

ISSN 2073-7432

# МИР ТРАНСПОРТА И ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ МАШИН

НАУЧНО - ТЕХНИЧЕСКИЙ ЖУРНАЛ

№ 2-2(89) 2025

Научно-технический  
журнал  
Издается с 2003 года  
Выходит четыре раза в год

**№ 2-2(89) 2025**

# Мир транспорта и технологических машин

Учредитель - федеральное государственное бюджетное образовательное  
учреждение высшего образования  
**«Орловский государственный университет имени И.С. Тургенева»**  
(ОГУ имени И.С. Тургенева)

**Главный редактор:**  
**Новиков А.Н.** д-р техн. наук, проф.

**Заместители главного редактора:**  
**Васильева В.В.** канд. техн. наук, доц.  
**Родимцев С.А.** д-р техн. наук, доц.

**Редколлегия:**  
**Агеев Е.В.** д-р техн. наук, проф. (Россия)  
**Агреев И.Е.** д-р техн. наук, проф. (Россия)  
**Басков В.Н.** д-р техн. наук, проф. (Россия)  
**Власов В.М.** д-р техн. наук, проф. (Россия)  
**Глаголев С.Н.** д-р техн. наук, проф. (Россия)  
**Демич М.** д-р техн. наук, проф. (Сербия)  
**Денисов А.С.** д-р техн. наук, проф. (Россия)  
**Евтиюков С.А.** д-р техн. наук, проф. (Россия)  
**Жаковская Л.** д-р. наук, проф. (Польша)  
**Жанказиев С.В.** д-р техн. наук, проф. (Россия)  
**Захаров Н.С.** д-р техн. наук, проф. (Россия)  
**Зырянов В.В.** д-р техн. наук, проф. (Россия)  
**Маткеримов Т.Ы.** д-р техн. наук, проф. (Кыргызстан)  
**Прентковский О.** д-р техн. наук, проф. (Литва)  
**Прижильт П.** д-р техн. наук, проф. (Чехия)  
**Пугачев И.Н.** д-р техн. наук, доц. (Россия)  
**Пушкирев А.Е.** д-р техн. наук, проф. (Россия)  
**Рассоха В.И.** д-р техн. наук, проф. (Россия)  
**Ременцов А.Н.** д-р пед. наук, проф. (Россия)  
**Ризаева Ю.Н.** д-р техн. наук, доц. (Россия)  
**Сарбаев В.И.** д-р техн. наук, профессор (Россия)  
**Трофименко Ю.В.** д-р техн. наук, проф. (Россия)  
**Трофимова Л.С.** д-р техн. наук, доц. (Россия)  
**Шарата А.** д-р. наук, проф. (Польша)

**Ответственный за выпуск: Акимочкина И.В.**

**Адрес редколлегии:**  
302030, Россия, Орловская обл., г. Орёл,  
ул. Московская, 77  
Тел. +79058566556  
<https://oreluniver.ru/science/journal/mtitm>  
E-mail: [srmostu@mail.ru](mailto:srmostu@mail.ru)

Зарегистрировано в Федеральной службе по  
надзору в сфере связи, информационных  
технологий и массовых коммуникаций  
(Роскомнадзор).  
Свидетельство: ПИ № ФС77-67027 от 30.08.2016г.

Подписной индекс: **16376**  
по объединенному каталогу «Пресса России»  
на сайтах [www.pressa-rf.ru](http://www.pressa-rf.ru) и [www.akc.ru](http://www.akc.ru)

© Составление. ОГУ имени И.С. Тургенева,  
2025

## Содержание

*Транспортные и транспортно-технологические системы страны,  
ее регионов и городов, организация производства на транспорте*

+

O.A. Пыталева, M.B. Грязнов <i>Методика снижения концентрации загрязняющих веществ в атмосфере от транспортных потоков в городах</i> .....	3
H.C. Захаров, E.C. Козин <i>Моделирование закономерностей формирования производственной структуры предприятий автомобильного транспорта</i> .....	11
M.C. Караткевич <i>Сравнение архитектур глубоких нейронных сетей для определения айсбергов на радиолокационных снимках</i> .....	20

### Управление процессами перевозок

M.B. Буйлова, C.I. Корягин <i>Проектирование маршрутной сети городского наземного пассажирского транспорта в условиях использования автобусов разных классов</i> .....	32
O.D. Покровская <i>Цифровые ассистенты в управлении железнодорожным перевозочным процессом</i> .....	40

### Эксплуатация автомобильного транспорта

I.A. Дембовский, C.A. Родимцев, H.E. Турбин <i>Гидрофобные свойства поверхности, как характеристика автомобильных дефлекторов</i> .....	47
A.C. Семыкина, H.A. Загородний, D.O. Ломакин <i>Критерии оценки рационального периода эксплуатации транспортных средств</i> .....	55
C.E. Бебинов, L.C. Трофимова <i>Методы определения соответствия водителей пассажирского автомобильного транспорта профессиональным и квалификационным требованиям</i> .....	62
C.A. Гребенников, B.N. Басков, G.O. Киселев, A.B. Рогожин <i>Неравномерность компрессии цилиндров и ресурс ДВС</i> .....	71
Lю Юйвэй, D.B. Капский, C.A. Лягин, D.C. Саражинский <i>Оценка качества алгоритмов адаптивного управления светофорными объектами методом имитационного моделирования</i> .....	80
C.N. Злобин, A.E. Карпов <i>Техническая инновация и повышение энергоэффективности тягового привода</i> .....	89
E.C. Сытник <i>Электротяговые установки как ключевой фактор декарбонизации в трансформации городского транспорта</i> .....	96
O.P. Кокарев <i>Энергонагруженность тормозной системы автомобилей категории M1 на дорогах с разным продольным уклоном</i> .....	104

### Интеллектуальные транспортные системы

M.D. Тебекин, L.O. Савин, I.B. Гусяков <i>Анализ развития интеллектуальных транспортных систем в России в период с 2012 по 2024 годы</i> .....	113
K.C. Кухарев, A.B. Кулев <i>Дополнительная оптимизация транспортного движения в городе Орле</i> .....	120
C.C. Евтиюков, J.B. Васильев, D.C. Голубев <i>Модель прогнозирования аварийности на основе адаптивного пейр-нечеткого вывода</i> .....	126

### Логистические транспортные системы

A.H. Дорофеев <i>Формирование цифрового двойника автотранспортного предприятия на основе его динамической бизнес-модели</i> .....	134
---	-----

Журнал входит в «Перечень рецензируемых научных изданий, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание ученой степени кандидата наук, на соискание ученой степени доктора наук» ВАК по научным специальностям: 2.9.1. Транспортные и транспортно-технологические системы страны, ее регионов и городов, организация производства на транспорте, 2.9.4. Управление процессами перевозок, 2.9.5. Эксплуатация автомобильного транспорта, 2.9.8. Интеллектуальные транспортные системы, 2.9.9. Логистические транспортные системы

Scientific and technical journal  
Published since 2003  
A quarterly review  
**№ 2-2(89) 2025**

# World of transport and technological machines

Founder - Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education «Orel State University named after I.S. Turgenev»  
(Orel State University)

*Editor-in-Chief*  
**A.N. Novikov Doc.Eng., Prof**

*Associates Editor*  
**V.V. Vasileva Can. Eng.**  
**S.A. Rodimzev Doc. Eng.**

*Editorial Board:*  
**E.V. Ageev Doc. Eng., Prof. (Russia)**  
**I.E. Agureev Doc. Eng., Prof. (Russia)**  
**V.N. Baskov Doc. Eng., Prof. (Russia)**  
**V.M. Vlasov Doc. Eng., Prof. (Russia)**  
**S.N. Glagolev Doc. Eng., Prof. (Russia)**  
**M. Demic Doc. Eng., Prof. (Serbia)**  
**A.S. Denisov Doc. Eng., Prof. (Russia)**  
**S.A. Evtyukov Doc. Eng., Prof. (Russia)**  
**L. Źakowska Ph.D., Doc. Sc., Prof. (Poland)**  
**S.V. Zhanakaziev Doc. Eng., Prof. (Russia)**  
**N.S. Zaharov Doc. Eng., Prof. (Russia)**  
**V.V. Zyryanov Doc. Eng., Prof. (Russia)**  
**T.Y. Matkerimov Doc. Eng., Prof. (Kyrgyzstan)**  
**O. Prentkovskis Doc. Eng., Prof. (Lithuania)**  
**P. Pribyl Doc. Eng., Prof. (Czech Republic)**  
**I.N. Pugachev Doc. Eng. (Russia)**  
**A.E. Pushkarev Doc. Eng., Prof. (Russia)**  
**V.I. Rassoha Doc. Eng., Prof. (Russia)**  
**A.N. Rementsov Doc. Edc., Prof. (Russia)**  
**Yu.N. Rizaeva Doc. Eng. (Russia)**  
**V.I. Sarbaev Doc. Eng., Prof. (Russia)**  
**Yu.V. Trofimenko Doc. Eng., Prof. (Russia)**  
**L.S. Trofimova Doc. Eng. (Russia)**  
**A. Szarata Ph.D., Doc. Sc., Prof. (Poland)**

*Person in charge for publication:*  
**I.V. Akimochkina**

*Editorial Board Address:*  
302030, Russia, Orel, Orel Region,  
Moskovskaya str., 77  
Tel. +7 (905)8566556  
<https://oreluniver.ru/science/journal/mtitm>  
E-mail:[srmostu@mail.ru](mailto:srmostu@mail.ru)

The journal is registered in Federal Agency of supervision in sphere of communication, information technology and mass communications. Registration Certificate ПИ № ФС77-67027 of August 30 2016

Subscription index: 16376  
in a union catalog «The Press of Russia»  
on sites [www.pressa-rf.ru](http://www.pressa-rf.ru) [www.akc.ru](http://www.akc.ru)

© Registration. Orel State University, 2025

## Contents

*Transport and transport-technological systems of the country, its regions and cities, organization of production in transport*

<b>O.A. Pytaleva, M.V. Gryaznov</b> Methodology of reducing the concentration of pollutants in the atmosphere from traffic flows in cities .....	3
<b>N.S. Zakharov, E.S. Kozin</b> Modelling the regularities of forming the production structure of motor transport enterprises .....	11
<b>M.S. Karatkevich</b> Comparison of deep neural network architecture for iceberg detection in radar images .....	20

### *Management of transportation processes*

<b>M.V. Builova, S.I. Koryagin</b> Designing a route network of urban ground passenger transportation in conditions of using buses of different classes .....	32
<b>O.D. Pokrovskaya</b> Digital assistants in railway transportation process management .....	40

### *Operation of motor transport*

<b>I.A. Dembovsky, S.A. Rodimtsev, N.E. Turbine</b> Hydrophobic properties of surfaces as a characteristic of car deflectors .....	47
<b>A.S. Semykina, N.A. Zagorodny, D.O. Lomakin</b> Criteria for evaluating the rational period of operation of vehicles .....	55
<b>S.E. Bebinov, L.S. Trofimova</b> Methods for determining the conformity of passenger transport drivers to professional and qualification requirements .....	62
<b>S.A. Grebennikov, V.N. Baskov, G.O. Kiselyov, A.V. Rogozhin</b> Cylinder compression unevenness and internal combustion engine life .....	71
<b>Liu Yu Wei, D.V. Kapski, S.A. Lyapin, D.S. Sarazhinsky</b> Assessment of the quality of algorithms for adaptive control of traffic light objects by simulation modeling .....	80
<b>S.N. Zlobin, A.E. Karpov</b> Technical innovation and increase in energy efficiency of traction drive .....	89
<b>E.S. Sytnik</b> Electric buses as a key factor in decarbonization within the transformation of urban transport .....	96
<b>O.P. Kokarev</b> Energy load of the braking system of m1 vehicles on roads with different longitudinal slopes .....	104

### *Intelligent transport systems*

<b>M.D. Tebekin, L.O. Savin, I.V. Gusyakov</b> Analysis of the development of intelligent transport systems in Russia in the period from 2012 to 2024 .....	113
<b>K.S. Kukharev, A.V. Kulev</b> Report on the topic: additional optimization of traffic in the city of Orel .....	120
<b>S.S. Evtyukov, Y.V. Vasiliev, D.S. Golubev</b> Accident prediction model on the basis of adaptive neuro-fuzzy inference .....	126

### *Logistic transport systems*

<b>A.N. Dorofeev</b> Formation of a digital twin of a motor transport enterprise based on its dynamic business model .....	134
--	-----

*The journal is included in the «List of peer-reviewed scientific publications in which the main scientific results of dissertations for the degree of candidate of science, for the degree of doctor of sciences» of the Higher Attestation Commission (VAK) in the scientific specialties: 2.9.1. Transport and transport-technological systems of the country, its regions and cities, organization of production in transport, 2.9.4. Management of transportation processes, 2.9.5. Operation of motor transport, 2.9.8. Intelligent transport systems, 2.9.9. Logistic transport systems*

**ТРАНСПОРТНЫЕ И ТРАНСПОРТНО-ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ СИСТЕМЫ  
СТРАНЫ, ЕЕ РЕГИОНОВ И ГОРОДОВ, ОРГАНИЗАЦИЯ  
ПРОИЗВОДСТВА НА ТРАНСПОРТЕ**

УДК 625.1/.5(075.32)  
doi:10.33979/2073-7432-2025-2-2(89)-3-10

О.А. ПЫТАЛЕВА, М.В. ГРЯЗНОВ

**МЕТОДИКА СНИЖЕНИЯ КОНЦЕНТРАЦИИ ЗАГРЯЗНЯЮЩИХ  
ВЕЩЕСТВ В АТМОСФЕРЕ ОТ ТРАНСПОРТНЫХ  
ПОТОКОВ В ГОРОДАХ**

**Аннотация.** Систематизированы методы и предложена методика снижения концентрации загрязняющих веществ в атмосферу от транспортных потоков в городах. Предлагаемая методика основана на выборе мероприятий по снижению интенсивности транспортных потоков на дорожной сети, изменению параметров внешней среды и транспортных средств. При выборе мероприятий и предложений необходимо руководствоваться оптимизационной математической моделью сокращения концентрации выбросов в атмосферу от транспортных средств с учётом удовлетворения спроса населения в передвижениях, пропускной способности городской дорожной сети и маршрутной сети городского пассажирского транспорта, наличия ресурсного обеспечения для реализации предлагаемых реконструктивных мероприятий. Статья написана по материалам ранее проведённых исследований Пыталевой О.А. и коллег, а также отчётов о НИР [12,13].

**Ключевые слова:** экологическая безопасность городов, выбросы загрязняющих веществ в атмосферу, предельно допустимая концентрация, автомобильный транспорт, городская дорожная сеть, уровень автомобилизации

**Введение**

В современной научной литературе, примерами которой являются работы [1-7], предлагаются большое количество методов снижения негативного воздействия выбросов загрязняющих веществ от автотранспорта. Функционально их можно систематизировать по следующим направлениям:

- управление параметрами транспортных потоков;
- ограничение распространения загрязняющих веществ от дороги путём развития дорожной инфраструктуры, включая создание архитектурно-строительных ландшафтных форм и озеленение территорий;
- защита окружающей среды предприятиями транспортного комплекса, а также совершенствование конструкции транспортных средств;
- повышение правовой культуры соблюдения государственной экологической политики и природоохранного законодательства на транспорте.

Каждое направление имеет свой набор реконструктивных мероприятий по снижению концентрации загрязняющих веществ в атмосферу, различающихся инструментарием и объектами своего приложения, объёмом финансирования.

**Материал и методы**

Условно все возможные реконструктивные мероприятия можно объединить в три группы. Мероприятия первой группы, направлены на управление параметрами транспортных потоков, в первую очередь интенсивностью потоков, обеспечивают уменьшение их концентрации (заторов) перед пересечениями. Уменьшение заторов обуславливает сокращение выбросов выхлопных газов от автомобилей, ожидающих очереди проезда профиля пересечения. Примером таких мероприятий является перенаправление грузового автотранспорта на высокоскоростные магистрали с запретом его проезда по второстепенным дорогам городской сети.

Мероприятия второй группы связаны с управлением параметрами внешней среды (развитие дорожной инфраструктуры, совершенствование технологического процесса предприятий автотранспортного комплекса и конструкции автотранспортных средств). Примером развития дорожной инфраструктуры является создание ветро- и снегозащитных полос вдоль проезжей части и границ селитебных районов. Совершенствование технологического процесса на автотранспортном предприятии выражается, например, в планировании и проведении технического обслуживания подвижного состава в ходе которого производится диагностика и проверка исправности топливных систем автомобилей.

Перевод автопарка на газомоторное топливо требует внесения изменений в конструкцию автомобилей, однако даёт эффект в сокращении выбросов. Использование компримированного или сжиженного природного газа сокращает практически до нуля выбросы окиси углерода от работы автотранспорта и минимизирует их при использовании пропан-бутановой смеси. Следует отметить, что отказ от жидкотопливного топлива требует дополнительных затрат не только на внесение конструктивных изменений в топливную систему автомобиля, но и существенно больших в техническое перевооружение производственно-технической базы автотранспортного предприятия [9, 10].

Третью группу формируют реконструктивные мероприятия, результативные лишь при комплексном применении с обязательным внесением изменений в экологическое законодательство. Существует масса инструментов по правовому регулированию экологической безопасности на автотранспорте. Широкое применение получили нормативы международных экологических стандартов на вредные выбросы и использование определенных видов бензинов и дизельного топлива, например, стандартов Евро-4, Евро-5, Евро-6. Примером также является законодательный запрет использования прямоточных глушителей, наличие которых считается по закону неисправностью транспортного средства при которой запрещается управление им. Реализация таких мероприятий в комплексе с озеленением городских территорий даёт больший эффект от сокращения и распространения вредных выбросов [14, 15].

### **Теория / Расчет**

Обоснованный выбор реконструктивных мероприятий производится посредством математического моделирования. Принципиальная математическая модель была предложена в работе [8], идея которой состоит в использовании бинарной логики для определения оптимального набора мероприятий, обеспечивающих минимум концентрации выбросов в атмосферу города от транспортных потоков. Ниже приведён уточнённый вариант математической модели с учётом корректировки измерителей, уточнения принципа определения интенсивности транспортного потока на перегонах и пересечениях, их пропускной способности. Целевая функция запишется в виде:

$$F = \left(1 - \sum_{k=1}^3 \mathcal{E}_k \cdot x_k\right) \cdot \sum_{i=1}^{13} \sum_{j=1}^l C_{ij} \cdot T_{ij} \rightarrow \min, \quad (1)$$

где  $\mathcal{E}_k$  – эмпирический коэффициент, показывающий долю снижения суммарного объёма выбросов в результате реализации реконструктивного мероприятия  $k$ -той группы;

$x_k$  – бинарная переменная, характеризующая условие реализации реконструктивного мероприятия  $k$ -той группы;

$C_{ij}$  – объём выбросов вредных веществ от транспортного средства  $i$ -го типа на  $j$ -м участке городской дорожной сети, г/(м<sup>3</sup>.час);

$T_{ij}$  – часовая интенсивность потока транспортных средств  $i$ -го типа на  $j$ -м участке городской дорожной сети, автомобилей/час;

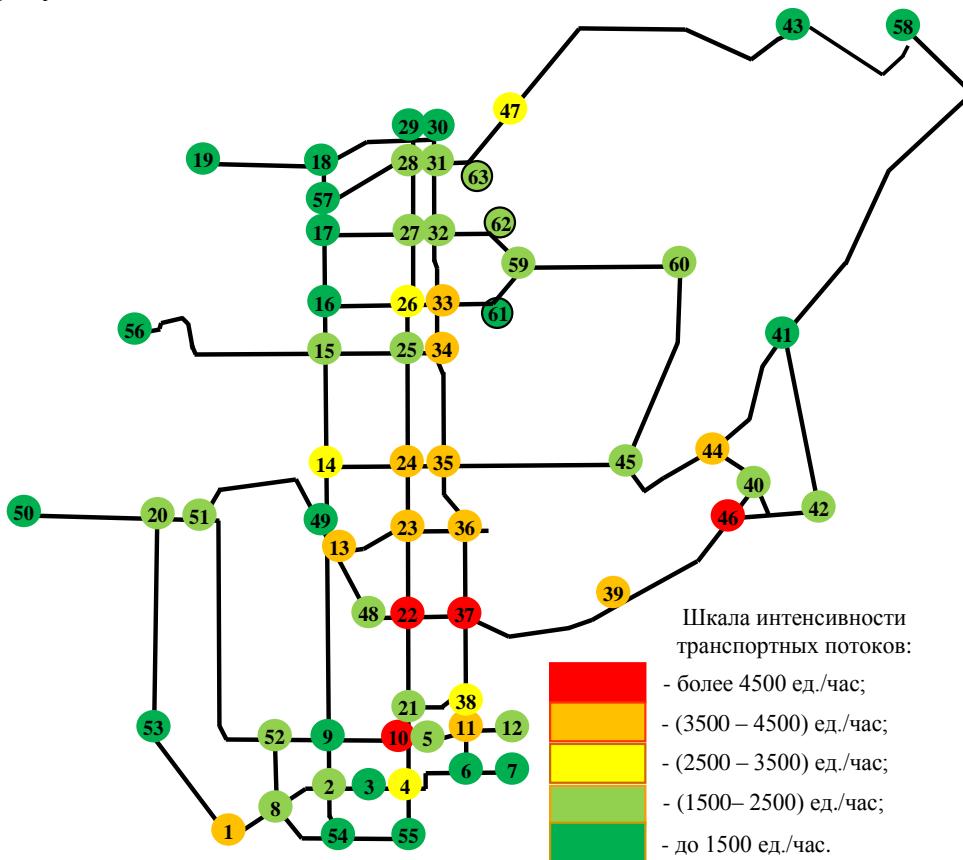
3 – число групп реконструктивных мероприятий (рассматривается три группы);

13 – число классов транспортных средств в соответствие с ГОСТ 32965-2014;

$l$  – число участков на городской дорожной сети, включая перегоны и пересечения, шт.

Предполагается, что в результате реализации реконструктивного мероприятия  $k$ -той группы возникает эффект в снижении вредных выбросов. Доля снижения суммарного объема выбросов показывает эмпирический коэффициент  $\mathcal{E}_k$ . Величина этого коэффициента изменяется от нуля до единицы и определяется экспертно специализированными проектными организациями или консалтинговыми компаниями. Таким же образом устанавливается значение бинарной переменной  $x_k$ , характеризующей условие реализации реконструктивного мероприятия в формате «возможно / невозможна». Для обеспечения математической обработки формату «возможно» присваивается значение  $x_k = 1$ , формату «невозможно» - 0. В первом случае рассматриваемое мероприятие включается в план реконструкции городской дорожной сети.

Часовая интенсивность потока транспортных средств  $i$ -го типа на  $j$ -м участке городской дорожной сети  $T_{ij}$  устанавливается по итогам выборочных натурных или автоматизированных замеров. Такая работа была проведена в 2023 году на дорожной сети г. Магнитогорска в рамках НИР [12], результаты которой для утреннего часа-пик показаны в виде тепловой карты на рисунке 1.



*Рисунок 1 – Тепловая карта часовей интенсивности транспортных потоков  
в г. Магнитогорске (утренний час-пик) в привязке к пересечениям*

Эксперт при определении значения бинарной переменной руководствуется ограничениями математической модели в части удовлетворенности спроса населения в передвижениях, соответствия пропускной способности городской дорожной сети интенсивности транспортного потока, наличия ресурсного обеспечения для реализации предлагаемых реконструктивных мероприятий.

Ограничение математической модели по удовлетворенности спроса населения на передвижения после реализации предложенных реконструктивных мероприятий имеет вид:

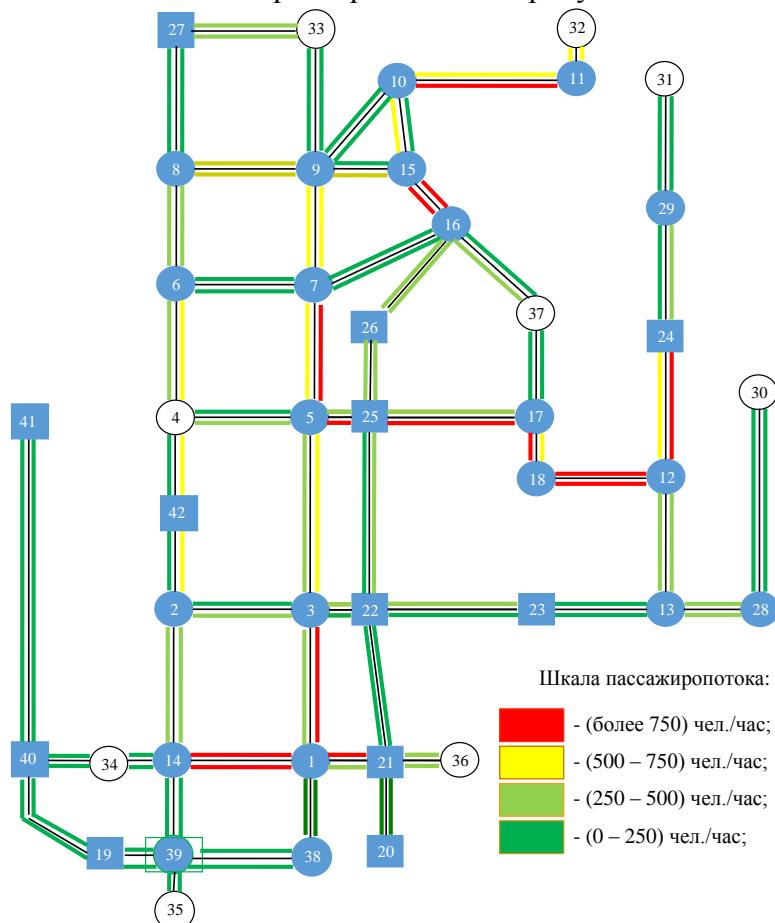
$$(1 - \sum_{k=1}^3 \mathcal{E}_{ki} \cdot x_k) \cdot \sum_{i=1}^2 \sum_{j=1}^l N_{ij} \cdot T_{ij} \geq M_{ij}, \quad (2)$$

где  $N_{ij}$  – средняя наполняемость пассажирами транспортного средства  $i$ -го класса на  $j$ -том участке городской дорожной сети, чел.;

$2$  – число классов пассажирских транспортных средств (легковые автомобили и автобусы);

$M_{ij}$  – спрос городского населения в передвижениях, чел./час.

Спрос городского населения в передвижениях по сути является величиной максимального пассажиропотока в час-пик, включая городской транспорт общего пользования, частные автомобили и такси. В НИР [13] были проведены натурные замеры часовых пассажиропотоков на маршрутной сети регулярных перевозок пассажиров г. Магнитогорска. Результаты замеров в виде тепловой карты приведены на рисунке 2.



При определении величины  $M_{ij}$  следует учитывать структуру предпочтений граждан вида транспорта для своих поездок. Практически во всех городах, за исключением мегаполисов, порядка трёх четвертей всех поездок осуществляется на личном автотранспорте. Как показывают исследования [11], более 40 % работающих горожан отказываются от поездок на трамвае и автобусе по причине большого времени ожидания, либо отсутствия прямого маршрута, что определяет более одной пересадки в пути следования.

Реализация реконструктивных мероприятий первой и третьей групп может привести к изменению структуры транспортного потока и к увеличению доли пассажирских транспортных средств на участках дорожной сети. Поэтому моделью задано ограничение на соответ-

ствие пропускной способности городской дорожной сети интенсивности транспортного потока:

$$(1 - \sum_{k=1}^3 \mathcal{E}_{ki} \cdot x_k) \cdot \sum_{j=1}^l T_{ij} \leq P_j, \quad (3)$$

где  $P_j$  – пропускная способность  $j$ -го участка городской дорожной сети, ед./час.

При определении пропускной способности участков дорожной сети следует иметь ввиду, что пропускная способность перегона в обоих направлениях ограничивается пропускной способностью профиля пересечения, которым перегон завершается. Формулы для расчёта  $P_j$  регулируемых и нерегулируемых пересечений имеются в научной литературе.

В итоге практическая реализуемость выбранного реконструктивного мероприятия определяется наличием ресурсного обеспечения, что в математической модели задаётся ограничением:

$$\sum_{k=1}^3 Z_k \cdot x_k \leq B, \quad (4)$$

где  $Z_k$  – затраты на реализацию реконструктивного мероприятия  $k$ -той группы, руб.;

$B$  – планируемый бюджет, руб.

### *Результаты и обсуждение*

На рисунке 2 в виде алгоритма приведена предлагаемая методика снижения концентрации загрязняющих веществ в атмосфере на основе выбора оптимального набора реконструктивных мероприятий по управлению параметрами транспортных потоков и внешней среды их генерации и погашения.



*Рисунок 3 – Предлагаемая методика снижения концентрации загрязняющих веществ в атмосфере от транспортных потоков*

На начальном этапе производится сбор данных о часовой интенсивности движения и часовому пассажиропотоку на рассматриваемых участках городской дорожной сети. На этапе анализа участков по параметру интенсивности движения из рассмотрения исключаются участки с заведомо малыми транспортными потоками с целью экономии трудозатрат и затрат времени на проведение расчётов. Далее производится расчёт выбросов загрязняющих веществ по классам транспортных средств на участках дорожной сети. На основании расчёта рассеивания выбросов загрязняющих веществ от автотранспорта проводится анализ превышения выбросов загрязняющих веществ ПДК.

Если неравенство не соблюдается, этот участок исключается из рассмотрения, а процедуру проверки проходят другие участки с высокой интенсивностью движения. В случае превышения фактической концентрации предельно допустимого значения, необходимо перейти к этапам разработки реконструктивных мероприятий. Предварительно рекомендуется установить, является ли данное превышение постоянным или вызвано, например, случайнм ростом интенсивности движения на данном участке или неблагоприятными метеоусловиями в день замеров. Устойчивость превышения служит основанием для дальнейших итераций предлагаемой методики.

Выбор оптимального набора реконструктивных мероприятий производится посредством бинарной логики их реализуемости, с учётом соблюдения ограничений математической модели для достижения её целевой функции. На одном из промежуточных этапов предлагаемой методики предусмотрено проведение экспертной оценки для установления величины компонентов математической модели (эмпирических коэффициентов и бинарных переменных), которые измерить инструментально или рассчитать невозможно. Обязательным условием после реализации предложенных мероприятий является мониторинг концентрации загрязняющих веществ на рассматриваемых участках дорожной сети. Если цель достигнута, то необходимо внести изменения в документы, определяющие транспортное планирование муниципального образования – Программу комплексного развития транспортной инфраструктуры и Документ планирования регулярных перевозок пассажиров. В противном случае, касательно достижения цели проводимых работ, требуется повторная реконструкция городской дорожной сети.

### **Выводы**

1. В современной научной литературе имеется множество методов снижения негативного воздействия выбросов загрязняющих веществ от автотранспорта, отличающихся набором реконструктивных мероприятий по управлению параметрами транспортных потоков и внешней среды их генерации и погашения.

2. Условно все реконструктивные мероприятия объединяются в три группы:

- направленные на управление интенсивностью потоков и обеспечивающие уменьшение их концентрации (заторов) перед пересечениями;

- направленные на развитие дорожной инфраструктуры, совершенствование технологического процесса предприятий автотранспортного комплекса и конструкции автотранспортных средств;

- результативные лишь при комплексном применении с обязательным внесением изменений в экологическое законодательство.

3. Оптимальный набор реконструктивных мероприятий производится математическим моделированием с использованием аппарата бинарной логики и экспертных оценок для установления эмпирических коэффициентов и бинарных переменных. Целевой функцией математической модели является минимум концентрации выбросов в атмосферу города от транспортных потоков. Система ограничений предусматривает соблюдение условий удовлетворения спроса населения в передвижениях, наличия пропускной способности городской дорожной сети и маршрутной сети городского пассажирского транспорта, а также ресурсного обеспечения для реализации предлагаемых реконструктивных мероприятий.

4. Предлагаемая методика снижения концентрации загрязняющих веществ представляет последовательность итераций по сбору исходных данных, анализу интенсивности движения на участках дорожной, расчёту выбросов загрязняющих веществ, математическому моделированию и проверке достижения его целей, внесения изменений в документы по транспортному планированию муниципального образования, а также возможности доработки полученных результатов.

## **СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ**

1. Плахотич С.А., Чемоданова К.Е. Новые технологии транспортного обслуживания населения в промышленно-городской агломерации // Вестник Уральского государственного университета путей сообщения. 2010. №2. С. 14-21.
2. Трофименко Ю.В., Ворожнин В.С. Метод оценки экологической безопасности участников дорожного движения // Транспорт Урала. 2015. №1(44). С. 73-78.
3. Рахмангулов А.Н., Корнилов С.Н., Пыталева О.А. Повышение безопасности и качества пассажирских перевозок в г. Магнитогорске // Автотранспортное предприятие. 2009. №6. С. 41-44.
4. Аналитический портал «ТрансСпот» [Электронный ресурс]. URL: [http://transspot.ru/2013/03/05/skorost-avtomobiliya-i-okruzhayushhaya-sreda-chast-2/?ocom=727http://mvf.klerk.ru/f1otchet/forma5\\_r7.htm](http://transspot.ru/2013/03/05/skorost-avtomobiliya-i-okruzhayushhaya-sreda-chast-2/?ocom=727http://mvf.klerk.ru/f1otchet/forma5_r7.htm).
5. Боброва З.М., Сомова Ю.В., Сомов В.А. Влияние факторов производственной среды на человека // Уральский промышленник. 2015. №1(1). С. 42-44.
6. Rinku Roy Chowdhury, Kelli Larson, Morgan Grove, Colin Polsky, Elizabeth Cook, Jeffrey Onsted, Laura Ogden (2011). A Multi-Scalar Approach to Theorizing Socio-Ecological Dynamics of Urban Residential Landscapes // Cities and the Environment (CATE): Vol. 4: Iss. 1.
7. Amudapuram Mohan Rao, Kalaga Ramachandra Rao. Measuring urban traffic congestion – a review // International Journal for Track and Transport Engineering. 2012. №2(4). P. 286–305. DOI: [http://dx.doi.org/10.7708/ijt2012.2\(4\).01](http://dx.doi.org/10.7708/ijt2012.2(4).01).
8. Рахмангулов А.Н., Пыталева О.А., Фридрихсон О.В. Модель оптимизации выбросов загрязняющих веществ от транспортных средств (на примере Магнитогорска) // Транспорт Урала. 2018. №3(58). С. 64-76.
9. Грязнов М.В., Гинятов М.З. Обоснование затрат на производственно-техническую базу при эксплуатации газодизельного парка // Актуальные проблемы современной науки, техники и образования: Тез. докл. 78-й междунар. науч.-техн. конференции. Магнитогорск: МГТУ им. Г.И. Носова, 2020. С. 25-26.
10. Якунин Н.Н. Грязнов М.В., Андриянов Н.С. Преимущества и недостатки использования газомоторных автомобилей на промышленном предприятии // Прогрессивные технологии в транспортных системах: Материалы XVII междунар. науч.-практ. конф. Оренбург: ОГУ. 2022. С. 625-629.
11. Грязнов М.В., Курганов В.М. Сысоева С.В. Привлекательность пассажирского транспорта общего пользования в городах с градообразующими предприятиями // Прогрессивные технологии в транспортных системах: Материалы XIX Всероссийской научно-практической конференции с международным участием. Оренбург: Оренбургский гос. ун-т 2025. С. 271-277.
12. Актуализация комплексной схемы организации дорожного движения (КСОДД) г. Магнитогорска на период 2018-2032 гг.: Отчёт о НИР. Магнитогорск, 2023. 308 с.
13. Определение суточных пассажиропотоков в пределах графа маршрутной сети регулярных перевозок пассажиров г. Магнитогорска на основании натурных обследований: Отчёт об оказании услуги. Магнитогорск, 2020. 88 с.
14. Пыталева О.А., Фридрихсон О.В., Бердашевич С.М. Обоснование необходимости разработки комплекса мероприятий по снижению загрязнения атмосферы городов автотранспортом (на примере г. Магнитогорска) // Уральский промышленник. 2015. №3(3). С. 14-17.
15. Булаев В.Г., Рябухин Э.А. Идентификация экологических аспектов с помощью диаграмм Парето и Исиавы // Транспорт Урала. 2015. №1(44). С. 67-72.

### **Пыталева Ольга Анатольевна**

Уральский государственный лесотехнический университет  
Адрес: 620100, Россия, г. Екатеринбург, Сибирский тракт, д. 37  
К.т.н., доцент высшей школы транспортно-технологических систем  
E-mail: pytalevaoa@m.usfeu.ru

### **Грязнов Михаил Владимирович**

Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова  
Адрес: 455000, Россия, г. Магнитогорск, пр. Ленина, 38.  
Д.т.н., профессор, профессор кафедры логистики и управления транспортными системами  
E-mail: gm-autolab@mail.ru

---

**O.A. PYTALEVA, M.V. GRYAZNOV**

## **METHODOLOGY OF REDUCING THE CONCENTRATION OF POLLUTANTS IN THE ATMOSPHERE FROM TRAFFIC FLOWS IN CITIES**

**Abstract.** The methods are systematized and a methodology for reducing the concentration of pollutants in the atmosphere from transport flows in cities is proposed. The proposed methodology is based on the selection of measures to reduce the intensity of traffic flows on the road network, changing the parameters of the external environment and vehicles. When choosing measures and proposals, it is necessary to be guided by an optimization mathematical model for reducing the concentration of emissions into the atmosphere from vehicles, taking into account the satisfaction of the population's demand for travel, the capacity of the urban road network and the route network of urban passenger transport, the availability of resource provision for the implementation of the proposed reconstructive measures. The article is based on the materials of previously conducted studies by Pytaleva O.A. and colleagues, as well as reports on R&D.

**Keywords:** environmental safety of cities, emissions of pollutants into the atmosphere, maximum permissible concentration, motor transport, urban road network, motorization level

### **BIBLIOGRAPHY**

1. Plakhotich S.A., Chemodanova K.E. Novye tekhnologii transportnogo obsluzhivaniya naseleniya v promyshlenno-gorodskoy aglomeratsii // Vestnik Ural'skogo gosudarstvennogo universiteta putey soobshcheniya. 2010. №2. S. 14-21.
2. Trofimenco YU.V., Vorozhnin V.S. Metod otsenki ekologicheskoy bezopasnosti uchastnikov dorozhnogo dvizheniya // Transport Urala. 2015. №1(44). S. 73-78.
3. Rakhmangulov A.N., Kornilov S.N., Pytaleva O.A. Povyshenie bezopasnosti i kachestva passazhir-skikh perevozok v g. Magnitogorske // Avtotransportnoe predpriyatiye. 2009. №6. S. 41-44.
4. Analiticheskiy portal "TransSpot" [Elektronnyy resurs]. URL: [http://transspot.ru/2013/03/05/skorost-avtomobilya-i-okrughayushchaya-sreda-chast-2/?ocom=727http://mvf.klerk.ru/f1otchet/forma5\\_r7.htm](http://transspot.ru/2013/03/05/skorost-avtomobilya-i-okrughayushchaya-sreda-chast-2/?ocom=727http://mvf.klerk.ru/f1otchet/forma5_r7.htm).
5. Bobrova Z.M., Somova YU.V., Somov V.A. Vliyanie faktorov proizvodstvennoy sredy na cheloveka // Ural'skiy promyshlennik. 2015. №1(1). S. 42-44.
6. Rinku Roy Chowdhury, Kelli Larson, Morgan Grove, Colin Polksky, Elizabeth Cook, Jeffrey Onsted, Laura Ogden (2011). A Multi-Scalar Approach to Theorizing Socio-Ecological Dynamics of Urban Residential Landscapes // Cities and the Environment (CATE): Vol. 4: Iss. 1.
7. Amudapuram Mohan Rao, Kalaga Ramachandra Rao. Measuring urban traffic congestion - a review // International Journal for Track and Transport Engineering. 2012. №2(4). R. 286-305. DOI: [http://dx.doi.org/10.7708/ije2012.2\(4\).01](http://dx.doi.org/10.7708/ije2012.2(4).01).
8. Rakhmangulov A.N., Pytaleva O.A., Fridrikhson O.V. Model` optimizatsii vybrosov zagryaznyayushchikh veshchestv ot transportnykh sredstv (na primere Magnitogorska) // Transport Urala. 2018. №3(58). S. 64-76.
9. Gryaznov M.V., Giniyatov M.Z. Obosnovanie zatrat na proizvodstvenno-tehnicheskuyu bazu pri ekspluatatsii gazodizel'nogo parka // Aktual'nye problemy sovremennoy nauki, tekhniki i obrazovaniya: Tez. dokl. 78-y mezhdunar. nauch.-tekhn. konferentsii. Magnitogorsk: MGTU im. G.I. Nosova, 2020. S. 25-26.
10. YAkunin N.N. Gryaznov M.V., Andriyanov N.S. Preimushchestva i nedostatki ispol'zovaniya gazomotornykh avtomobiley na promyshlennom predpriyatiy // Progressivnye tekhnologii v transportnykh sistemakh: Materialy XVII mezhdunar. nauch.-prakt. konf. Orenburg: OGU. 2022. S. 625-629.
11. Gryaznov M.V., Kurganov V.M. Sysoeva S.V. Privileiat'nost` passazhirskogo transporta obshchego pol'zovaniya v gorodakh s gradoobrazuyushchimi predpriyatiyami // Progressivnye tekhnologii v transportnykh sistemakh: Materialy XIX Vserossiyskoy nauchno-prakticheskoy konferentsii s mezhdunarodnym uchastiem. Orenburg: Orenburgskiy gos. un-t 2025. S. 271-277.
12. Aktualizatsiya kompleksnoy skhemy organizatsii dorozhnogo dvizheniya (KSODD) g. Magnitogorska na period 2018-2032 gg.: Otchet o NIR. Magnitogorsk, 2023. 308 s.
13. Opredelenie sutochnykh passazhiropotokov v predelakh grafa marshrutnoy seti reguljarnykh pere-vozok passazhirov g. Magnitogorska na osnovaniii naturnykh obsledovaniy: Otchet ob okazaniii uslugi. Magnitogorsk, 2020. 88 s.
14. Pytaleva O.A., Fridrikhson O.V., Berdashkevich S.M. Obosnovanie neobkhodimosti razrabotki kompleksa meropriyatiy po snizheniyu zagryazneniya atmosfery gorodov avtotransportom (na primere g. Magnitogorska) // Ural'skiy promyshlennik. 2015. №3(3). S. 14-17.
15. Bulaev V.G., Ryabukhin E.A. Identifikatsiya ekologicheskikh aspektov s pomoshch'yu diagramm Pareto i Isikavy // Transport Urala. 2015. №1(44). S. 67-72.

**Pytaleva Olga Anatolyevna**

Ural State Forest Engineering University  
Address: 620100, Russia, Yekaterinburg, Sibirskaia tract  
Candidate of Technical Sciences  
E-mail: pytaleva@usfeu.ru

**Gryaznov Mikhail Vladimirovich**

Nosov Magnitogorsk State Technical University  
Address: 455000, Russia, Magnitogorsk, Lenin Ave.  
Doctor of Technical Sciences  
E-mail: gm-autolab@mail.ru

УДК 656.07

doi:10.33979/2073-7432-2025-2-2(89)-11-19

Н.С. ЗАХАРОВ, Е.С. КОЗИН

## МОДЕЛИРОВАНИЕ ЗАКОНОМЕРНОСТЕЙ ФОРМИРОВАНИЯ ПРОИЗВОДСТВЕННОЙ СТРУКТУРЫ ПРЕДПРИЯТИЙ АВТОМОБИЛЬНОГО ТРАНСПОРТА

**Аннотация.** В статье рассмотрен подход по определению производственной структуры предприятий автомобильного транспорта с учетом размера парка автомобилей и интенсивности их эксплуатации. Производственная структура представлена в виде ориентированного графа, вершины которого являются технологическими звенями, выполняющими работы по техническому обслуживанию и ремонту автомобилей. С использованием имитационного моделирования проведен эксперимент по определению параметров эффективности системы для различных вариантов производственной структуры предприятия. Получена многофакторная регрессионная модель определения пропускной способности системы от влияющих на нее факторов. Проведена оценка адекватности модели. Сделан вывод о влиянии типа производственной структуры на относительную пропускную способность производственной зоны.

**Ключевые слова:** производственная структура, имитационное моделирование, автотранспортное предприятие, техническая эксплуатация, оптимизация

### **Введение**

Автотранспортные предприятия осуществляют работы по эксплуатации подвижного состава для перевозки грузов и пассажиров, а также по поддержанию и восстановлению работоспособности автомобилей. На это направлена деятельность технической службы. Нормативы по определению производственной структуры технической службы были разработаны в 80-х годах 20 века и существенно устарели. В документах тех лет определялись типовые структуры в зависимости от мощности транспортных предприятий. Однако, заложенные в эти расчеты нормативы по трудоемкости проведения технических воздействий, периодичности технического обслуживания и общему уровню надежности автомобилей за это время существенно изменились. Помимо количества автомобилей на предприятии, существенным фактором является интенсивность эксплуатации подвижного состава, влияние которой на выбор производственной структуры изучено недостаточно. В связи с этим, нормативы требуют пересмотра и научного обоснования закономерностей их формирования.

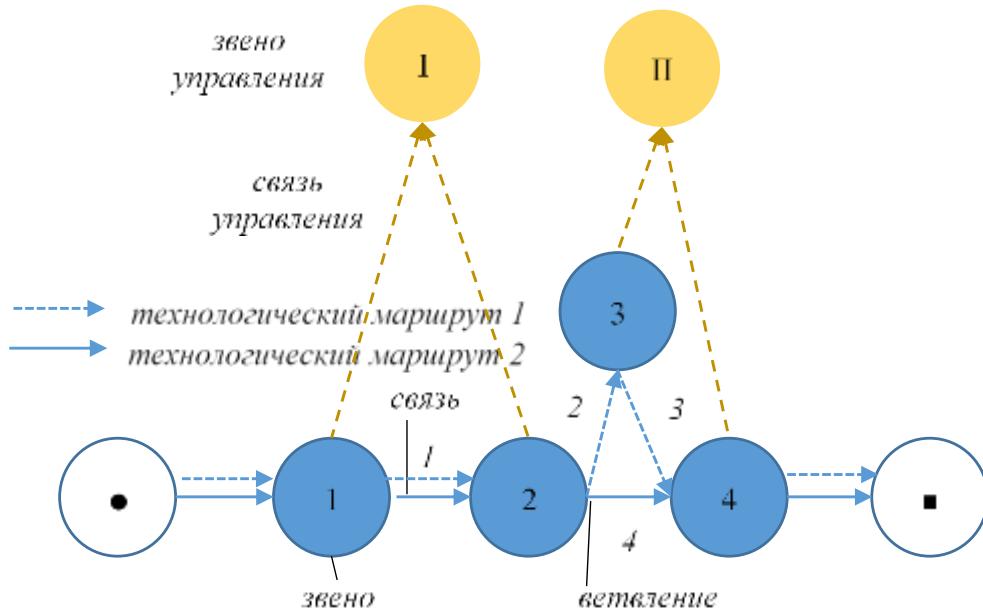
Целью исследования является повышение эффективности системы управления технической эксплуатацией автомобилей путем определения закономерностей формирования производственной структуры предприятий автомобильного транспорта.

### **Материал и методы**

В работе были использованы методы имитационного моделирования, теория математической статистики для построения и обработки результатов эксперимента, нотация исследования бизнес-процессов предприятий, корреляционно-регрессионный анализ, методы визуализации статистических данных.

Под производственной структурой в работе понимается совокупность производственных звеньев, взаимосвязей между ними и выполняемые ими технологические операции по ТО и Р автомобилей [10]. Технологическое звено - организационно обособленный, самостоятельный орган управления, выполняющий определенные функции управления, а именно реализующий работы по изменению статуса заявки на «обслуженный». Пост - основное технологическое звено на предприятии автомобильного транспорта является пост, оснащенный технологическим оборудованием и персоналом. Технологический маршрут заявки – вид и последовательность технологических операций, входящих в реализуемую услугу или технологический процесс. В рамках реализуемой в работе математической модели производствен-

ная структура представлена в виде ориентированного графа, вершины которого являются технологическими звеньями, а ребра – процессом обслуживания автомобиля на текущем звене [3, 17]. Схематично производственная и организационная структура предприятия представлена на рисунке 1.



*Рисунок 1 - Пример ориентированного графа, содержащего 4 звена, 4 связи между ними, 2 технологических маршрута, 1 ветвление, два звена управления с четырьмя связями*

### **Теория**

Согласно ряду авторов [11, 13] наиболее эффективным методом изучения сложных организационных систем является имитационное моделирование.

Для проведения исследований по изменению эффективности использования вариантов производственной структуры предприятия от различных значений входных факторов была разработана имитационная модель. Алгоритм имитационной модели представлен на рисунке 2.

Работа модели основана на принципах теории массового обслуживания [20]. Сначала в модель задается совокупность вариантов производственной структуры  $S$  предприятия. Каждый вариант включает в себя перечень технологических звеньев, выполняющих работы по техническому обслуживанию и ремонту автомобилей на предприятии [1]. Далее производятся вычисления по каждому варианту. С учетом определенного на этапе экспериментальных исследований закона распределения вероятности поступления заявок на ТО и Р в систему, моделируется поток заявок  $N$ , характеризуемый типом и интенсивностью [4]. Каждая заявка, попадая в систему, проходит через заданное количество технологических звеньев, что составляет ее технологический маршрут. В случае занятости звена заявка ожидает в очереди. В результате обслуженный автомобиль покидает систему. При этом регистрируются затраты на ожидание автомобиля в очереди и потери, вызванные простоем поста. Однако, особенность модели заключается в механизме сравнения заданного технологического маршрута заявки и маршрута, который может реализовать текущий вариант производственной структуры [2, 6]. В случае, если технологический маршрут предполагает проведение работ на специализированном посту, который отсутствует на предприятии, то обслуживание заявки производится на универсальном посту. Это иллюстрируется на рисунке 3 и в утверждении о том, что одна и та же технология может быть реализована различными вариантами производственной структурой, но с разными показателями эффективности [15].

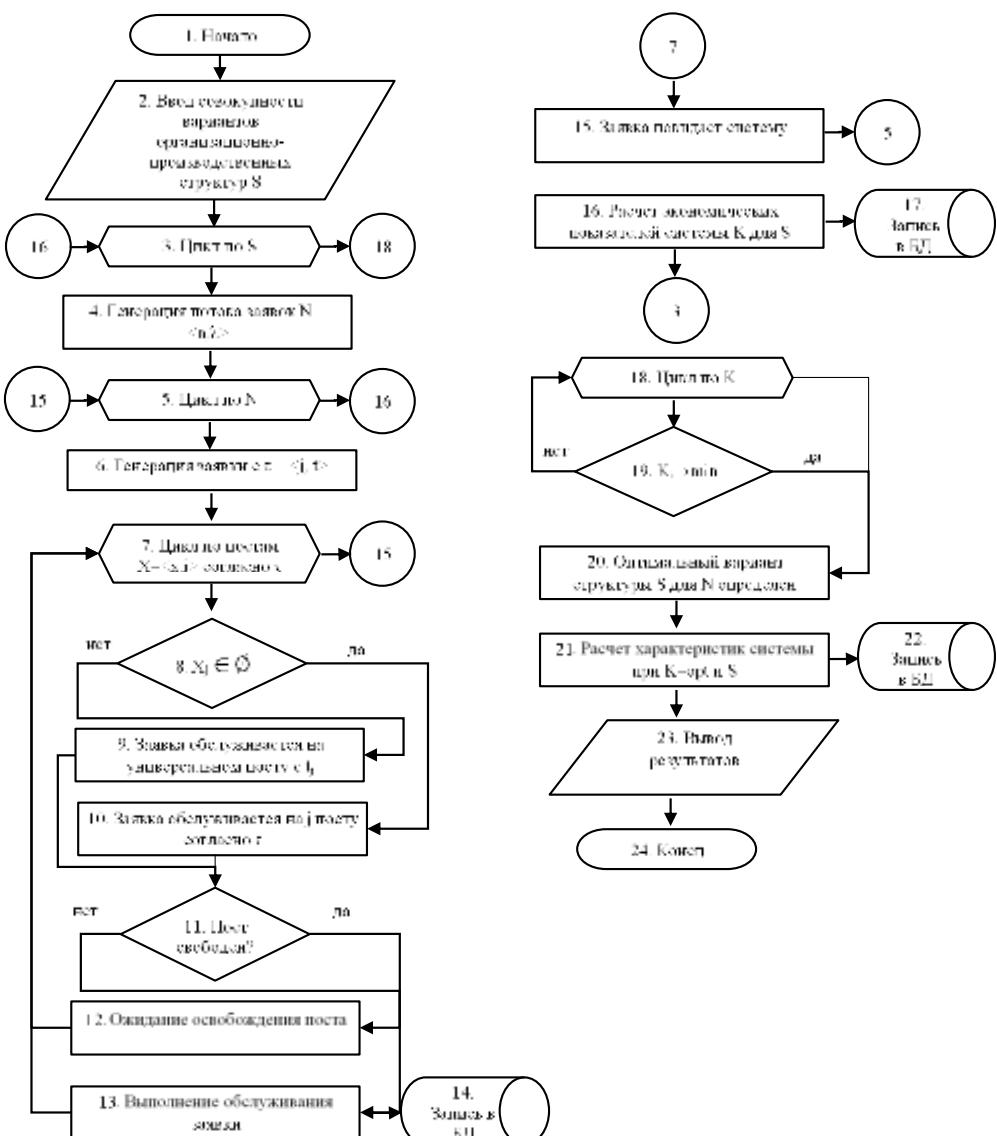


Рисунок 2 - Алгоритм имитационной модели формирования организационно-производственной структуры предприятий автомобильного транспорта

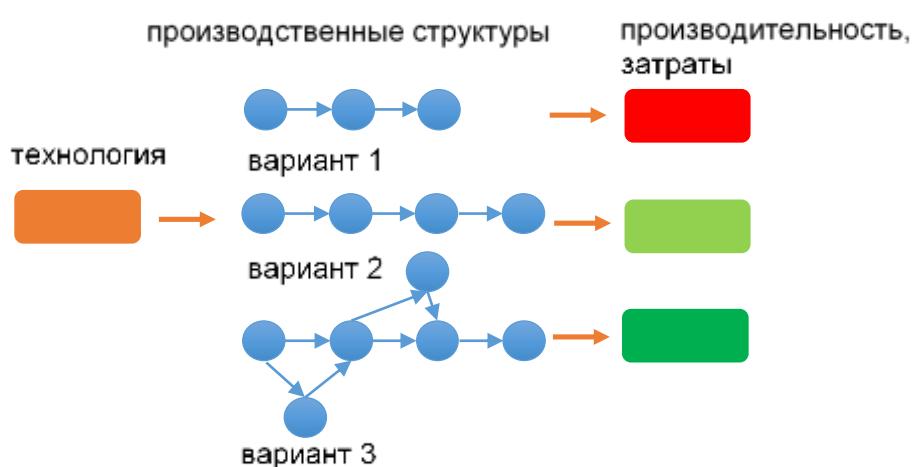


Рисунок 3 - Схема концептуального положения о возможности реализации одной и той же технологии разными вариантами производственной структуры на предприятии

Таким образом, для каждого входящего потока заявок N модель позволяет подобрать оптимальную производственную структуру, минимизирующую значение целевой функции

К. В качестве целевой функции используется величина издержек на функционирование системы (1).

$$K_{np\Sigma} = K_1 r + K_2 n_{ce} + (K_1 + K_2) \rho \rightarrow \min \quad (1)$$

где  $K_1$  – стоимость простоя автомобиля в очереди, руб.;

$r$  – средняя длина очереди, ч.;

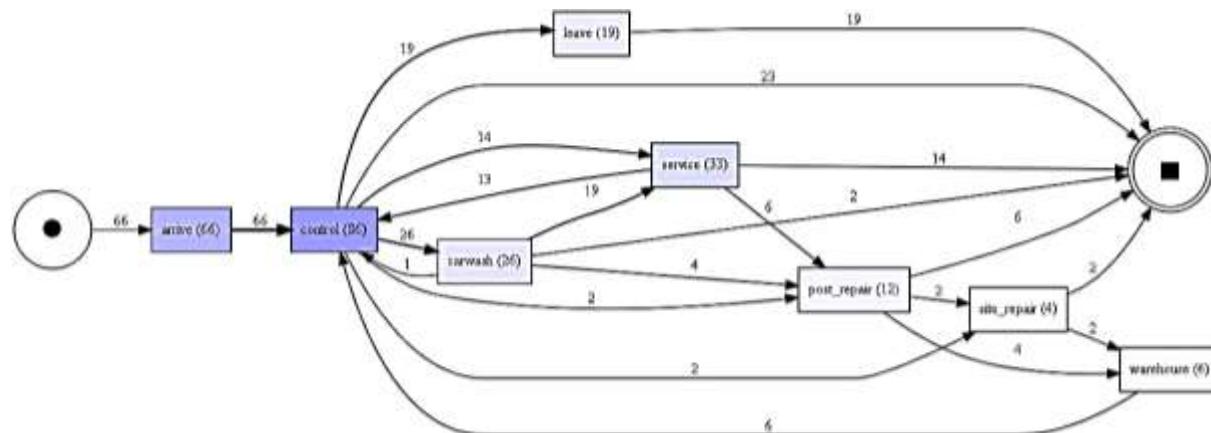
$K_2$  – стоимость простоя обслуживающего канала, руб.;

$n_{ce}$  – количество простояющих каналов, ед.;

$\rho$  – относительная пропускная способность системы.

При нахождении оптимального значения К определяются показатели производительности системы, в частности, относительная пропускная способность, количество обслуженных автомобилей и т.п.

При моделировании оценивалась эффективность различных вариантов производственных структур [19]. Для формализации модели структуры был использован язык BPMN-нотации, применяемый для исследования бизнес-процессов [5, 8]. Нотация схожа с графовой структурой, представленной на рисунке 1, и соответствует процессу прохождения автомобиля через зоны и участки обслуживания при одном заезде. В прямоугольниках указаны типы звеньев: arrive – поступление автомобиля в зону ТО и Р; control – пост технического контроля и определения типа работ; carwash – зона ежедневного обслуживания; service – универсальные посты по ТО; post\_repair – универсальные посты по текущему ремонту; site\_repair – ремонтные участки; warehouse – склад запасных частей и расходных материалов; leave – покидание производственной зоны. Стрелками указано направление перемещения автомобилей между технологическими звеньями [9]. Цифры соответствуют количеству прошедших через данное технологическое звено автомобилей. Пример варианта производственной структуры представлен на рисунке 4.



*Рисунок 4 - Пример моделируемого варианта производственной структуры со следующими звеньями: контрольный механик – пост по ТО – пост по ЕО - пост по ТР - участок ТР - склад*

В качестве параметра, характеризующего вариант производственной структуры, было принято решение использовать количество типов технологических звеньев  $x$ . В представленной на рисунке 4 структуре параметр  $x$  равен 6 и включает следующие звенья: control, carwash, service, post\_repair, site\_repair, warehouse.

Рядом ученых [7] установлено, что основными факторами, определяющими загрузку производственных зон и участков автотранспортных предприятий, являются списочный состав парка автомобилей Асс и интенсивность их эксплуатации  $\omega$ . Это подтверждается проведенным автором среди высшего управленческого звена опросом и его обработкой с использованием метода анализа иерархий [12]. В связи с этим, принято решение изучить влияние указанных выше факторов на производительность системы и на выбор оптимальной произ-

водственной структуры.

Каждый фактор изменяется на трех уровнях. Общее количество рассматриваемых факторов равно трем. Факторы, уровни и их значения перечислены в таблице 1.

Таблица 1 - Факторы, исследуемые при проведении эксперимента

№	Наименование фактора	Обозначение фактора	Уровни фактора
1	X <sub>1</sub> – размер парка автомобилей, ед.;	A <sub>CC</sub>	X <sub>1min</sub> = 50; X <sub>10</sub> = 275; X <sub>1max</sub> = 500
2	X <sub>2</sub> – интенсивность эксплуатации подвижного состава, км./мес.	ω	X <sub>2min</sub> = 1000; X <sub>20</sub> = 3000; X <sub>2max</sub> = 5000.
3	X <sub>3</sub> – количество технологических звеньев производственной структуры предприятия, ед.	x	X <sub>3min</sub> = 2; X <sub>30</sub> = 5; X <sub>3max</sub> = 8.

В качестве функции отклика определялись значения следующих параметров:

Y<sub>1</sub> – относительная пропускная способность системы, %

Y<sub>2</sub> – среднее время простоя автомобилей в очереди, ч.

Y<sub>3</sub> – среднее время простоя постов, ч.

Y<sub>4</sub> – суммарное время обслуживания автомобилей, ч.

Y<sub>5</sub> – количество обслуженных автомобилей, ед.

Y<sub>6</sub> – количество поступивших автомобилей, ед.

Y<sub>7</sub> – затраты (издержки) для моделей оптимизации, руб.

Был разработан факторный план проведения эксперимента, учитывающий количество факторов и уровней изменения каждого фактора [18]. Для минимизации количества измерений с использованием программы STATISTICA был сформирован 3<sup>(3-1)</sup> дробный план проведения эксперимента. Таблица плана эксперимента с зашифрованными уровнями фактора, такими как min = -1,0; max = 1,0; mean = 0,0 представлена ниже (табл. 2).

Таблица 2 - 3<sup>(3-1)</sup> дробный рандомизированный факторный план

№	Факторы		
	X <sub>1</sub>	X <sub>2</sub>	X <sub>3</sub>
1	1,0	-1,0	0,0
2	1,0	0,0	-1,0
3	-1,0	-1,0	-1,0
4	-1,0	0,0	1,0
5	0,0	1,0	-1,0
6	1,0	1,0	1,0
7	0,0	0,0	0,0
8	-1,0	1,0	0,0
9	0,0	-1,0	1,0

Для каждой точки плана эксперимента определялось количество измерений по формуле, представленной в [14].

$$n = \frac{v^2 \cdot t_{\alpha}^2}{\Delta^2} \quad (2)$$

где v – коэффициент вариации измеряемой величины;

t<sub>α</sub> – статистика Стьюдента для доверительной вероятности α;

Δ – относительная ошибка.

Расчетное значение n для выбранных значений параметров v = 0,3; t<sub>α=0,1</sub>; N>120 = 1,65; Δ=0,1. Тогда определим количество измерений, которое принято равным 6.

Методика обработки результатов исследования включает шесть основных этапов [14]:

1) определение коэффициентов парной корреляции или корреляционных отношений факторов;

2) определение значимости коэффициентов корреляции (корреляционных отношений) факторов по t-статистике Стьюдента;

- 3) проверка модели на адекватность по критерию Фишера для заданного уровня значимости, а также по величине средней ошибки аппроксимации;
- 4) оценка значимости коэффициентов модели регрессии по t-статистике Стьюдента;
- 5) дискриминационный анализ, реализуемый при необходимости выбора одного уравнения регрессии из нескольких;
- 6) определение коэффициентов эластичности и влияния для оценки степени влияния каждого фактора на функцию отклика.

### ***Результаты и обсуждение***

После проведения заданного количества измерений по результатам работы имитационной модели были получены и обработаны результаты эксперимента. Матрица коэффициентов парной корреляции факторов представлена в таблице 3.

Таблица 3 - Матрица коэффициентов корреляции

Параметр	X <sub>1</sub>	X <sub>2</sub>	X <sub>3</sub>	Y <sub>1</sub>	Y <sub>2</sub>	Y <sub>3</sub>	Y <sub>4</sub>	Y <sub>5</sub>	Y <sub>6</sub>
X <sub>1</sub>	1,00	0,04	-0,04	-0,56	0,59	-0,76	0,71	0,62	0,71
X <sub>2</sub>	0,04	1,00	-0,04	-0,52	0,58	-0,50	0,59	0,46	0,61
X <sub>3</sub>	-0,04	-0,04	1,00	0,28	-0,24	0,17	-0,24	0,17	-0,07
Y <sub>1</sub>	-0,56	-0,52	0,34	1,00	-0,91	0,68	-0,89	-0,44	-0,86
Y <sub>2</sub>	0,59	0,58	-0,24	-0,91	1,00	-0,66	0,96	0,45	0,92
Y <sub>3</sub>	-0,76	-0,50	0,17	0,68	-0,66	1,00	-0,83	-0,83	-0,83
Y <sub>4</sub>	0,71	0,59	-0,24	-0,89	0,96	-0,83	1,00	0,62	0,96
Y <sub>5</sub>	0,62	0,46	0,17	-0,44	0,45	-0,83	0,62	1,00	0,73
Y <sub>6</sub>	0,71	0,61	-0,07	-0,86	0,92	-0,83	0,96	0,73	1,00

Значимость коэффициентов парной корреляции оценивалась по критерию Стьюдента для уровня значимости  $p = 0,9$ , числа измерений  $n = 108$  и табличного значения t-критерия Стьюдента  $t_{\text{табл}} = 1,7$  [16]. Для удобства интерпретации значения значимых коэффициентов корреляции из условия  $t \geq t_{\text{табл}}$  были отмечены красным цветом в таблице 1. По результатам можно заключить, что все указанные факторы X<sub>1</sub> – X<sub>3</sub> имеют существенную взаимосвязь с показателями эффективности системы. Это послужило основой для включения этих факторов в модель регрессии. Поскольку параметры функции отклика коррелированы между собой, то в качестве независимой переменной использован показатель Y<sub>1</sub> – относительная пропускная способность системы.

Полученное уравнение регрессии имеет вид:

$$q = 0,99 - 0,000748 \cdot A_{cc} - 0,000077 \cdot \omega + 0,1173 \cdot \ln(x) \quad (3)$$

где q – относительная пропускная способность СТО, %

A<sub>cc</sub> – размер парка автомобилей, ед..

$\omega$  – интенсивность эксплуатации подвижного состава, км./мес;

x – количество типов технологических звеньев на АТП, ед.

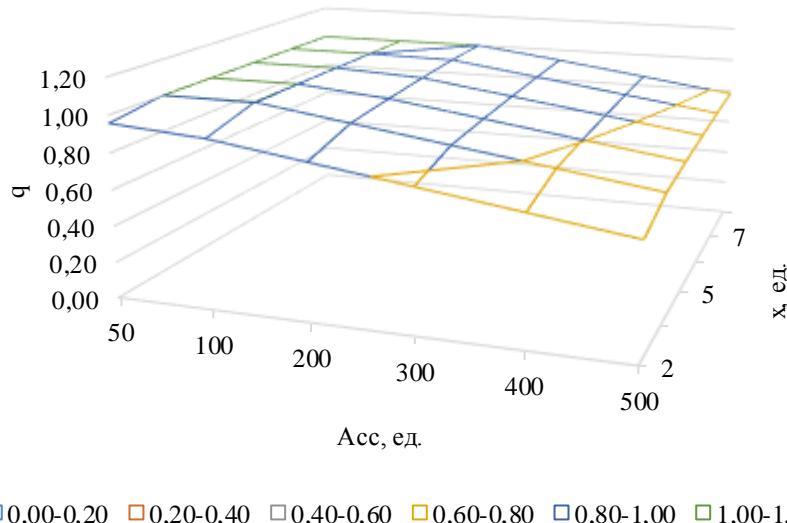
Оценка значимости коэффициентов уравнения регрессии показала, что все три параметра статистически значимы при фактических значениях t-статистики, равных 5,04; 4,62; 2,48 для A<sub>cc</sub>,  $\omega$ , x соответственно при табличном значении t<sub>p</sub> = 1,98. Статистические параметры модели (3) представлены в таблице 4.

Таблица 4 - Статистические характеристики многофакторной регрессионной модели

№	Наименование показателей	Значение
1	Объем выборки	108
2	Коэффициент множественной детерминации	0,63
3	Коэффициент множественной корреляции	0,79
4	t-статистика Стьюдента	9,8
5	t <sub>a=0,05</sub>	1,98
6	Дисперсионное отношение Фишера	19,23
7	F <sub>a=0,05</sub>	3,98
8	Средняя ошибка аппроксимации, %	16

Значения коэффициентов эластичности  $\lambda$  и влияния  $\beta$  факторов модели на результирующий признак равны -0,29 и -0,53 для  $A_{cc}$ ; -0,33 и -0,49 для  $\omega$ ; 0,81 и 1,11 для  $x$ . Коэффициент  $\lambda$  показывает, на сколько процентов изменится значение результирующего признака с изменением одного фактора на 1 % при фиксированных значениях других. Коэффициент  $\beta$  показывает относительное влияние фактора на результирующий признак при изменении этого фактора от минимума до максимума.

График модели регрессии с фиксированным значением одного из трех факторов будет представлять собой поверхность. На рисунке 5 представлен график поверхности в трех координатах, соответствующих влиянию факторов  $A_{cc}$  и  $x$  на относительную пропускную способность системы при фиксированном значении интенсивности эксплуатации, равном 1000 км/мес.



**Рисунок 5 - График зависимости относительной пропускной способности  $q$  от размера парка  $A_{cc}$  и количества технологических звеньев  $x$  при интенсивности эксплуатации  $\omega = 1000$  км/мес**

### **Выводы**

Таким образом, было установлено, что производственная структура предприятия оказывает влияние на пропускную способность системы. Так, согласно определенному значению коэффициента эластичности при изменении количества технологических звеньев производственной структуры предприятия с 2 до 8 пропускная способность увеличивается на 18-22 %. Кроме того, на пропускную способность производственной зоны влияет списочное количество автомобилей в парке и интенсивность их эксплуатации. Эти факторы оказывает обратнопропорциональное влияние, связанное с увеличением загрузки производственной зоны при фиксированном значении количества постов по ТО и Р автомобилей. Полученная закономерность может быть использована для определения оптимального количества технологических звеньев, т.е. для формирования наиболее эффективной производственной структуры предприятия для каждой совокупности значений влияющих на нее факторов. Для этого может быть использована представленная в работе модель целевой функции. Представленный в работе подход отличается от принятого ранее нормативно-функционального подхода, в рамках которого определялись типовые организационно-производственные структуры для автотранспортных предприятий. Он предполагает не дискретные варианты структур, а формирование структуры под конкретные основные производственные показатели предприятия. Это позволяет повысить эффективность управления технической эксплуатацией предприятий автомобильного транспорта.

### **СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ**

1. Aizerman M.A. Theory of Automatic Control: Adiwes International Series. Elsevier, 2016.
2. Bartuseviciene I., Sakalyte E. Organizational assessment: effectiveness vs. efficiency // Social Transformations in Contemporary Society. 2013. Vol. 1. №1. P. 45-53.

3. Binz T. et al. Improving the manageability of enterprise topologies through segmentation, graph transformation, and analysis strategies // 2012 IEEE 16th International Enterprise Distributed Object Computing Conference. 2012. C. 61-70.
4. Carter M., Price C.C., Rabadi G. Operations research: a practical introduction. Chapman and Hall/CRC, 2018.
5. Corradini F. et al. A guidelines framework for understandable BPMN models // Data & Knowledge Engineering. 2018. T. 113. C. 129-154.
6. Nikulina O., Zilberova I., Novoselova I. Formation of organizational behavior within the management system of business structures of the transportation industry // Transportation Research Procedia. Vol. 63. 2022. P. 541-547.
7. Bauer V.I., Kozin E.S., Bazanov A.V. [et al.] The methodic of forming a rational structure of a distributed production base of transport divisions in the pipeline industry // Biosciences Biotechnology Research Asia. 2014. Vol. 11. P. 287-295.
8. Van Der Aalst W. Process mining: Overview and opportunities // ACM Transactions on Management Information Systems (TMIS). 2012. Vol. 3. №2. P. 1-17.
9. White S.A., Miers D. BPMN modeling and reference guide: understanding and using BPMN // Future Strategies Inc. 2008.
10. Xuejun L., Shiyuan Z. Management mode and path of digital transformation of power grid enterprises based on artificial intelligence algorithm // International Journal of Thermofluids. Vol. 21. 2024. P. 100552.
11. Анфилатов В.С. Системный анализ в управлении: Учеб. пособие. М.: Финансы и статистика, 2009. 368 с.
12. Волокобинский М.Ю., Пекарская О.А., Рази Д.А. Принятие решений на основе метода анализа иерархий // Финансы: теория и практика/Finance: Theory and Practice. 2016. №20(2). С. 33-42.
13. Захаров Н.С. Влияние сезонных условий на процессы изменения качества автомобилей: дис. ... д-ра техн. наук: 05.22.10. Тюмень, 2000. 525 с.
14. Захаров Н.С. Моделирование процессов изменения качества автомобилей: Монография. ТГНГУ. Тюмень, 2002. 128 с.
15. Козин Е.С. Система поддержки принятия решений по управлению станцией технического обслуживания автомобилей // Транспорт Урала. 2022. №3(74). С. 73-77.
16. Кремер Н.Ш. Теория вероятностей и математическая статистика: учебник для вузов. 2-е изд., перераб. и доп. М.: ЮНИТИДАНА. 2006. 573 с.
17. Новиков Д.А. Теория управления организационными системами. М.: МПСИ, 2005. 584 с.
18. Сидняев Н.И. Теория планирования эксперимента и анализ статистических данных: Учебное пособие для вузов. 1-е изд.. Москва: Юрайт, 2011. 399 с.
19. Системы поддержки принятия решений на транспорте / Е.С. Козин, Н.С. Захаров, А.А. Панфилов, Д.М. Вохмин. Тюмень: Тюменский индустриальный университет, 2023. 170 с.
20. Тахтамышев Х.М. Моделирование показателей автосервисных предприятий при различных уровнях конкуренции и возможных вариантах взаимопомощи исполнителей на постах то и ремонта автомобилей // Актуальные направления научных исследований XXI века: теория и практика. 2015. Т. 3. №4-1(15-1). С. 221-225.

**Захаров Николай Степанович**

Тюменский индустриальный университет

Адрес: 625000, Россия, г. Тюмень, ул. Володарского  
Д.т.н., профессор, заведующий кафедрой сервиса автомобилей и технологических машин

E-mail: zakharovns@tyuiu.ru

**Козин Евгений Сергеевич**

Тюменский индустриальный университет

Адрес: 625000, Россия, г. Тюмень, ул. Володарского  
К.т.н., доцент, доцент кафедры сервиса автомобилей и технологических машин

E-mail: kozines@tyuiu.ru

N.S. ZAKHAROV, E.S. KOZIN

## **MODELLING THE REGULARITIES OF FORMING THE PRODUCTION STRUCTURE OF MOTOR TRANSPORT ENTERPRISES**

**Abstract.** The article considers an approach to determining the production structure of motor transport enterprises taking into account the size of the vehicle fleet and the intensity of their operation. The production structure is presented as a directed graph, the vertices of which are technological links that perform work on the maintenance and repair of cars. Using simulation modeling, an experiment was conducted to determine the parameters of the system's efficiency for various options for the production structure of the enterprise. A multifactor regression model for determining the throughput of the system from the factors influencing it was obtained. An assessment of the adequacy of the model was

*carried out. A conclusion was made about the influence of the type of production structure on the relative throughput of the production zone.*

**Keywords:** production structure, simulation modeling, motor transport enterprise, technical operation, optimization

1. Aizerman M.A. Theory of Automatic Control: Adiwes International Series. Elsevier, 2016.
2. Bartuevisiene I., Sakalyte E. Organizational assessment: effectiveness vs. efficiency // Social Transformations in Contemporary Society. 2013. Vol. 1. №1. P. 45-53.
3. Binz T. et al. Improving the manageability of enterprise topologies through segmentation, graph transformation, and analysis strategies // 2012 IEEE 16th International Enterprise Distributed Object Computing Conference. 2012. S. 61-70.
4. Carter M., Price C.C., Rabadi G. Operations research: a practical introduction. Chapman and Hall/CRC, 2018.
5. Corradini F. et al. A guidelines framework for understandable BPMN models // Data & Knowledge Engineering. 2018. T. 113. S. 129-154.
6. Nikulina O., Zilberova I., Novoselova I. Formation of organizational behavior within the management system of business structures of the transportation industry // Transportation Research Procedia. Vol. 63. 2022. P. 541-547.
7. Bauer V.I., Kozin E.S., Bazanov A.V. [et al.] The methodic of forming a rational structure of a distributed production base of transport divisions in the pipeline industry // Biosciences Biotechnology Research Asia. 2014. Vol. 11. P. 287-295.
8. Van Der Aalst W. Process mining: Overview and opportunities // ACM Transactions on Management Information Systems (TMIS). 2012. Vol. 3. №2. P. 1-17.
9. White S.A., Miers D. BPMN modeling and reference guide: understanding and using BPMN // Future Strategies Inc. 2008.
10. Xuejun L., Shiyuan Z. Management mode and path of digital transformation of power grid enterprises based on artificial intelligence algorithm // International Journal of Thermofluids. Vol. 21. 2024. P. 100552.
11. Anfilatov V.S. Sistemnyy analiz v upravlenii: Ucheb. posobie. M.: Finansy i statistika, 2009. 368 s.
12. Volokobinskiy M.YU., Pekarskaya O.A., Razi D.A. Prinyatiye resheniy na osnove metoda analiza ierarkhiy // Finansy: teoriya i praktika/Finance: Theory and Practice. 2016. №20(2). S. 33-42.
13. Zakharov N.S. Vliyanie sezonnnykh usloviy na protsessy izmeneniya kachestva avtomobiley: dis. ... d-ra tekhn. nauk: 05.22.10. Tyumen`, 2000. 525 s.
14. Zakharov N.S. Modelirovanie protsessov izmeneniya kachestva avtomobiley: Monografiya. TGNGU. Tyumen`, 2002. 128 s.
15. Kozin E.S. Sistema podderzhki prinyatiya resheniy po upravleniyu stantsiy tekhnicheskogo obsluzhivaniya avtomobiley // Transport Urala. 2022. №3(74). S. 73-77.
16. Kremer N.SH. Teoriya veroyatnostey i matematicheskaya statistika: uchebnik dlya vuzov. 2-e izd., pererab. i dop. M.: YUNITIDANA. 2006. 573 s.
17. Novikov D.A. Teoriya upravleniya organizatsionnymi sistemami. M.: MPSI, 2005. 584 s.
18. Sidnyaev N.I. Teoriya planirovaniya eksperimenta i analiz statisticheskikh dannykh: Uchebnoe posobie dlya vuzov. 1-e izd.. Moskva: YUrayt, 2011. 399 s.
19. Sistemy podderzhki prinyatiya resheniy na transporte / E.S. Kozin, N.S. Zakharov, A.A. Panfilov, D.M. Vokhmin. Tyumen`: Tyumenskiy industrial`nyy universitet, 2023. 170 s.
20. Takhtamyshev H.M. Modelirovanie pokazateley avtoservisnykh predpriyatiy pri razlichnykh urovnyakh konkurentsiy i vozmozhnykh variantakh vzaimopomoshchchi ispolniteley na postakh to i remonta avtomobiley // Aktual`nye napravleniya nauchnykh issledovaniy XXI veka: teoriya i praktika. 2015. T. 3. №4-1(15-1). S. 221-225.

**Zakharov Nikolai Stepanovich**

Tyumen Industrial University

Adress: 625000, Russia, Tyumen, st. Volodarsky, 38

Doctor of Technical Sciences

E-mail: zakharovns@tyuiu.ru

**Kozin Evgeniy Sergeevich**

Industrial University of Tyumen

Adress: 625000, Russia, Tyumen, st. Volodarsky, 38

Candidate of Technical Sciences

E-mail: kozines@tyuiu.ru

УДК 004.032.26

doi:10.33979/2073-7432-2025-2-2(89)-20-31

М.С. КАРАТКЕВИЧ

## **СРАВНЕНИЕ АРХИТЕКТУР ГЛУБОКИХ НЕЙРОННЫХ СЕТЕЙ ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ АЙСБЕРГОВ НА РАДИОЛОКАЦИОННЫХ СНИМКАХ**

**Аннотация.** Рассмотрены методики по определению айсбергов на радиолокационных снимках (РЛС), изучены существующие реализации детекции айсбергов, в том числе с применением глубокого обучения. Выполнен поиск данных спутниковых снимков Sentinel-1, произведена предварительная обработка снимков. Изучены существующие архитектуры моделей нейронных сетей для определения объектов на изображении, отобраны релевантные архитектуры, обучены модели нейронных сетей. Проведено сравнение обученных моделей, выбрана наиболее качественная. Разработана программа для взаимодействия с обученной нейронной сетью.

**Ключевые слова:** айсберг, глубокое обучение, нейронные сети, арктические моря, YOLO, Faster RCNN, детекция объектов на изображении

### **Введение**

Айсберги представляют серьёзную угрозу для судоходства в арктических морях, а своевременное их обнаружение позволит предотвращать столкновения.

Основным инструментом, для выявления айсбергов, являются радиолокационные спутниковые снимки (РЛС). Использование радиолокационных снимков для детектирования айсбергов имеет преимущество в условиях постоянной облачности или темного времени суток по сравнению со снимками в видимом диапазоне [1]. Известно, что режим поляризации РЛС влияет на обнаружение айсбергов: при углах падения радарного сигнала менее 35 градусов кросс-поляризационные наблюдения дают лучшие результаты, по сравнению с режимом горизонтальной поляризации [2].

Традиционный подход к автоматизации выявления айсбергов на РЛС предполагает попиксельный анализ растровых изображений снимков. Наиболее чувствительными параметрами снимка для определения айсбергов являются угол наклона спутника, положение айсберга относительного направления радиосигнала, а также время года, когда были получены снимки [3].

Одним из наиболее актуальных на сегодняшний день методов по выявлению айсбергов на снимках РЛС Арктической зоны является разработка Арктического и Антарктического научно-исследовательского института: программное обеспечение, позволяющее определять айсберги на спутниковых РЛС и оптических снимках [4]. Программа выполняет расчет квадратического отклонения сигнала  $\sigma$ , среднего значения сигнала  $\mu$  и  $\sigma/\mu$  и по полученным значениям выделяется пороговое значение сигнала, позволяющее определять границы айсбергов.

Анализ снимков можно производить технологиями глубокого обучения, что позволит выявлять неявные зависимости между уровнями отслеженного радиосигнала и границами айсбергов, сохраняя высокую точность предсказаний. Это снизит погрешности при использовании формул для вычисления толщины. Также, использование нейронных сетей позволяет автоматизировать процесс интерпретации данных, что ускоряет работу с большими объемами данных. В дополнение, РЛС содержат шум, который могут игнорировать глубокие нейронные сети.

Такие модели машинного обучения, как SVM, сверточная нейронная сеть и Single Shot Detector (SSD) использовались для классификации фрагментов РЛС, содержащих айсберги и корабли [5]. Модели обучались на 1500 радиолокационных снимков спутника Sentinel-1. По сравнению с SVM и SSD, лучше всего работает модель с архитектурой сверточной

нейронной сети, со значением F1 – 86.5 % и точностью 87.6 %. SSD-модель имеет точность хуже, и тратит больше времени на обучение, однако она способна учитывать все признаки из входного изображения, что свидетельствует о лучшей обобщенности модели. SVM-модель показала слабую точность в классификации и самое долгое время на обучение. Архитектура YOLOV3 так же применялась для детектирования айсбергов и кораблей на РЛС [6]. В качестве исходных данных использовались РЛС Арктических морей со спутника Sentinel-1, с объектами двух классов: корабль и айсберг. Количество данных для обучения составило около 1000 снимков. Общая точность сегментации и классификации обученной модели составила 51 %.

Однако, несмотря на приведенные существующие решения, программных реализаций для автоматической детекции айсбергов на РЛС с использованием методов машинного обучения на текущий момент не существует.

Цель – выявление наиболее качественной архитектуры нейронной сети, которая позволит повысить точность прогнозирования положения айсбергов с помощью спутниковых снимков.

### ***Материал и методы***

Согласно исследованиям данных судовых наблюдений о расположении айсбергов с 2004 по 2019 гг. в морях Северного Ледовитого Океана, в современной климатической обстановке айсберги дрейфом могут доходить до 75 градусов с.ш. [7]. Наиболее крупные скопления айсбергов расположены у острова Новая Земля, архипелагов Земля Франца Иосифа и Северная Земля (СЗ), у которого наблюдалось самое крупное скопление айсбергов. Наиболее активный период формирования айсбергов в Арктике приходится на август-октябрь в силу летнего периода разрушения ледников [8]. В сентябре повторяемость наблюдений айсбергов на архипелаге СЗ достигает максимальных значений. В середине сентября 2024 г. наблюдалось отсутствие ледового покрова на водной поверхности вокруг архипелага СЗ [9]. Это значит, что в этот период на РЛС и фотоснимках возможно визуально распознать айсберги. Похожая ситуация ледовой обстановки была и в 2023 г. [10]: в сентябре 2023 г. вокруг архипелага еще был тонкий слой ледового покрова, но в начале октября воды архипелага были покрыты ниласом.

Высокая частота появления айсбергов и таяние льда в «летний» период в архипелаге СЗ делает эту локацию наиболее подходящей для проведения исследования.

Основным источником данных служат РЛС со спутников. Наиболее распространеными спутниковыми системами с синтезированной апертурой являются Sentinel-1 и RADARSAT-2.

Sentinel-1. Ключевой спутник для мониторинга Арктики. Состоит из пары спутников (A и B) в составе программы Copernicus, разработанной Европейским Космическим Агентством. Sentinel-1A запущен в 2014 году; Sentinel-1B запущен в 2016 году, но выведен из эксплуатации в 2022. Sentinel-1 работает на солнечно-синхронной орбите, на высоте около 693 км, с углом наклона 98,18 градусов. Спутник работает в С-диапазоне на частоте 5,405 ГГц, и делает снимки в HH, HV, VV и VH поляризации. Ключевым свойством этой спутниковой системы является полностью открытые данные снимков, которые можно получить таких сервисов как Copernicus Open Access Hub, Google Earth Engine и Alaska Satellite Facility [11].

RADARSAT-2. Коммерческий спутник дистанционного зондирования Земли, разработанный Канадским космическим агентством. Разработан в качестве замены предыдущего спутника Radarsat-1. Спутник предназначен для наблюдения за Арктическим регионом, запущен в 2007 году. Аналогично Sentinel-1, спутник работает в С-диапазоне, находится на солнечно-синхронной орбите на высоте около 798 км с углом наклона 98,6 градусов. Делает снимки как в одиночной поляризации (HH, VV, HV, VH), так и в двойной (HH + HV, VV + VH). Поскольку спутник Radarsat-2 коммерческий, то данные доступны в платном доступе или по отдельным партнерским программам для научных организаций. В дополнение, часто-

та съемки снимка Radarsat-2 составляет 24 дня, в то время как у спутника Sentinel-1 частота составляет до 12 дней [12].

В области задач обнаружения объектов на изображениях существует множество архитектур нейронных сетей. Эти архитектуры можно разделить на двухэтапные детекторы и одноэтапные детекторы.

Двухэтапные детекторы известны своей высокой точностью в сложных сценариях. Как следует из названия, двухэтапные детекторы разбивают задачу определения объектов на два этапа: сначала идентифицируют регионы интереса на изображении, затем классифицируют эти регионы и уточняют границы объектов с помощью ограничивающих рамок (bounding box) [13]. Такой подход позволяет проводить более точную оценку изображения, но достигается это высокими затратами вычислительных мощностей и времени на обучение моделей. Двухэтапные модели были истоком развития архитектур по определению объектов на изображениях.

Двухэтапная модель состоит из двух последовательных архитектур нейронных сетей, представляющих собой сверточные нейронные сети (CNN).

Первая нейронная сеть выполняет задачу выявления областей интереса (RoI) на изображении, где могут находиться искомые объекты. Вторая нейронная сеть собирает все полученные карты признаков и выполняет классификацию: для каждого региона интереса извлекаются признаки из общей карты признаков и отправляются в классифицирующую голову (detection head). Классифицирующая голова выполняет две задачи: классификацию объекта в пределах региона интереса и уточнение координат ограничивающей рамки для более точного соответствия объекту.

Разделение генерации карты признаков регионов интереса и классификации этих регионов на две модели позволяет второму этапу сосредоточить свои ресурсы на меньшем наборе извлеченных признаков, что часто приводит к более высокой точности локализации и классификации. Двухэтапные модели, как правило, хорошо работают на небольших объектах и в переполненных сценах.

Однако обработка изображения в два отдельных этапа, с учетом расходов на генерацию и отдельную обработку каждого региона интереса на изображении, делает двухэтапные детекторы требующими больших вычислительных затрат. Это может ограничить их использование в приложениях, требующих строгого вывода в реальном времени.

Основные архитектуры двухэтапных детекторов:

- R-CNN – Region-based Convolutional Neural Network, первый двухэтапный детектор [14]. Для генерации регионов интереса используется Selective Search: каждый регион вручную обрезается и масштабируется до фиксированного размера и пропускается через предобученную сверточную нейронную сеть. Полученные признаки подаются в SVM для классификации объекта, а линейная регрессия определяет координаты bounding box.

- Fast R-CNN – ускоренная версия R-CNN: изображение пропускается через сверточную нейронную сеть один раз, что дает одну общую карту признаков, из которой выделяются все регионы интереса [15]. Классификацию выполняет функция softmax.

- Faster R-CNN – Вместо Selective Search используется Region Proposal Network, которая на основе карты признаков предсказывает набор bounding box с разными масштабами и соотношениями сторон, выполняет бинарную классификацию является ли объектом полученный регион и выполняет сдвиг bounding box [16]. Классифицирующая голова соответствует Fast R-CNN

- Mask R-CNN – аналогична архитектуре Faster R-CNN, но помимо классификации объектов, выполняет еще задачу сегментации маски объекта на изображении [17].

Основное отличие архитектуры одноэтапных детекторов от двухэтапных отражено в названии. Одноэтапные детекторы напрямую предсказывают bounding box и вероятность принадлежности к классу из полного изображения за один прямой проход по нейронной се-

ти. В один проход определяются границы объекта и производится его классификация. Такая конструкция дает значительные преимущества в скорости, что делает их оптимальными для приложений в реальном времени.

Архитектура одноэтапных детекторов позволяет избегать шага выявления областей интереса, на который требуется большое количество вычислительных мощностей. Вместо этого одноэтапные детекторы рассматривают задачу обнаружения объектов как задачу регрессии. Модель обрабатывает изображение один раз сверточной нейронной сетью и сразу же поставляет карту признаков в обнаруживающую голову (detection head), которая одновременно предсказывает координаты bounding box, вероятность принадлежности к классам и вероятность детекции.

Основные модели одноэтапных детекторов:

- YOLO (You Only Look Once). Делит изображение на сетку. Каждая ячейка сетки выполняет предсказание bounding box и класс объекта. После выполняется объединение предсказания через Non-Maximum Suppression – алгоритма, отсекающего пересекающиеся bounding box, оставляя только наиболее точные предсказания. Первая реализация архитектуры YOLO была выпущена в 2015 году [18]. Последняя версия – YOLOv12;

- SSD (Single Shot MultiBox Detector). Модель использует несколько карт признаков разного масштаба для детекции объектов разного размера, выполняет предсказание bounding box и класса объекта для каждого пикселя [19]. Благодаря картам признаков разного масштаба модель может хорошо детектировать мелкие объекты;

- RetinaNet. Модель вводит функцию потерь Focal Loss, которая добавляет веса для уменьшения вклада в предсказание легко классифицируемых объектов, таким образом решая проблему дисбаланса классов [20]. Медленнее YOLO/SSD;

Аннотацию изображений границами айсбергов возможно производить с помощью специализированных интернет-ресурсов для работы с нейронными сетями. проводилась с помощью сервиса RoboFlow.

К изображениям из обучающей выборки необходимо применять аугментацию. Аугментация представляет собой технику искусственного расширения обучающего набора данных путем применения различных преобразований к исходным изображениям. Аугментация позволяет увеличивать размер набора данных, что представляется необходимой мерой в данном исследовании, так как данные снимков доступны в небольшом количестве и за ограниченный промежуток времени (с конца августа по начало октября). Аугментация изображений также увеличит разнообразие предоставляемых в модель данных для обучения, что позволит сделать модель более устойчивой к вариативности данных, давая одинаково приемлемый результат для любого предоставляемого РЛС.

Метрики оценки качества моделей нейронных сетей по детекции объектов на изображениях помогают понять, насколько точно модель определяет и классифицирует объекты. Основные метрики для таких моделей:

- Precision, точность;
- Recall, полнота;
- Mean Average Precision, средняя точность по всем классам.

Оценка границ объектов производится метрикой Intersection over Union (IoU):

$$\text{IoU} = \frac{\text{Площадь перекрытия}}{\text{Площадь пересечения}}.$$

При  $\text{IoU} = 1$  модель идеально нашла необходимый объект, при  $\text{IoU} = 0$  объект, который нашла модель, не пересекается с истинным объектом. IoU используется как порог для определения, считается ли предсказание корректным, как правило порог равен 0.5.

Если объект обнаружен правильно и класс угадан корректно, то такое предсказание считается True Positive (TP). Если модель обнаружила объект, которого нет на истинных данных, то такое предсказание считается False Positive (FP). Если модель пропустила существующий объект, то такое предсказание считается False Negative (FN).

Precision – точность, представляет собой отношение верно обнаруженных объектов среди всех объектов, найденных моделью:

$$\text{Precision} = \frac{TP}{TP+FP}.$$

Если значение точности высокое, то это значит, что модель редко ошибается при нахождении объекта.

Recall – полнота, представляет собой отношение верно обнаруженных объектов относительно всех истинных объектов на изображении:

$$\text{Recall} = \frac{TP}{TP+FN}.$$

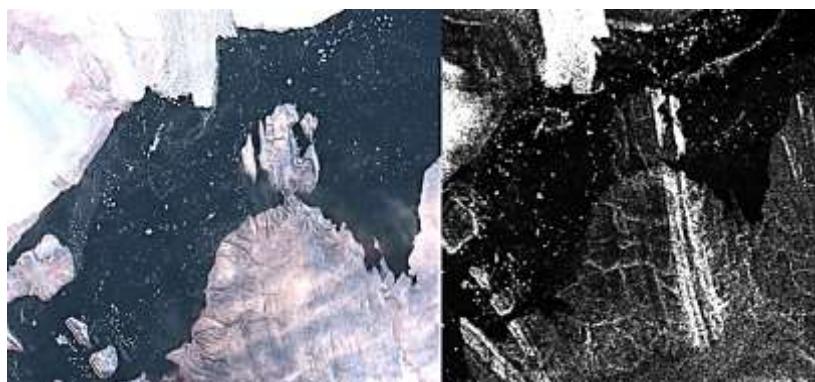
При высоком значении Recall модель почти не пропускает объекты, малое значение Recall говорит о том, что модель не научилась определять объекты на изображении.

Метрика Mean Average Precision (mAP) является средним значением Average Precision, которое, в свою очередь, является средним значением точности для разных уровней полноты и вычисляется как площадь под кривой графика отношения значения точности к полноте. Метрика mAP является основной в задачах детекции, она показывает обобщенное значение полноты и точности по всем классам и значениям IoU. Чем выше это значение, тем лучше модель классифицирует и ищет объекты.

### ***Расчет***

РЛС, сделанные спутником Sentinel-1, послужили основным источником данных. Снимки спутниковой системы Sentinel-1 бесплатные и находятся в открытом доступе. Доступ к данным осуществляется через сервис Alaska Satellite Facility (ASF) Data Search [21]. Рассматривалась территория архипелага Северная Земля, соответствующая проливам Юный и Красной Армии.

На рисунке 1 представлено сравнение снимка в RGB-каналах (слева) и радиолокационного снимка (справа). В верхней части РЛС заметны небольшие белые точки, являющиеся айсбергами, которые соответствуют белым фрагментам в проливе.



*Рисунок 1 - Сравнение снимков*

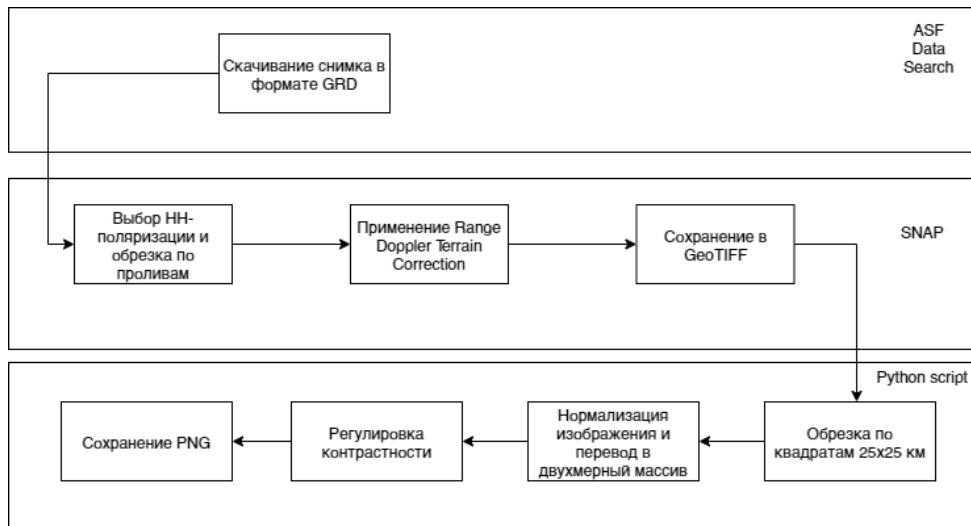
Языком программирования для работы с нейронными сетями использовался Python. Для работы со спутниковыми снимками используется библиотека GDAL. Подготовка данных и разработка нейронных сетей производится через библиотеки pandas и pytorch. В качестве среды разработки была выбрана Visual Studio Code.

Общая схема подготовки данных представлена на рисунке 2.

Предварительный анализ РЛС производился в программе SNAP Desktop. В программе SNAP снимок в формате GRD (Ground Range Detected) переводился из виртуальной амплитудной НН поляризации в физическую. Затем снимок центрировался и обрезался на участке, затрагивающим проливы Юный и Красной Армии.

Из-за топографических изменений местности и наклона спутникового датчика Sentinel-1 расстояния на его снимках могут быть искажены. Вследствие этого географиче-

ская привязка GRD снимка спутника может быть некорректной. Дополнительно, существуют различия в кодировке географических данных продуктов спутника Sentinel-1 и кодировке координат формата GeoTIFF. Для получения корректных координат снимка была проведена коррекция рельефа. Коррекция также позволила компенсировать искажения снимка, чтобы географическое представление изображения было как можно ближе к реальному миру, что существенно увеличило геометрическую точность получаемого изображения. Коррекция рельефа производилась методом Range Doppler Terrain Correction (RDTС), он устранил искажения, вызванные наклоном радиолокационного сигнала и влиянием рельефа, проецирует изображение на выбранную цифровую модель рельефа, пересчитывает координаты в новую систему координат и устраняет топографические смещения. В качестве цифровой модели рельефа послужила проекция Copernicus 30m Global DEM. Система координат была выбрана WGS 84.

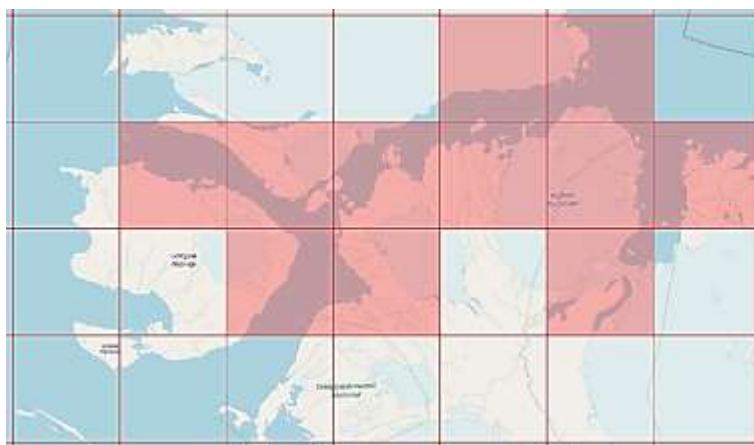


*Рисунок 2 – Схема подготовки данных*

Предварительный анализ РЛС производился в программе SNAP Desktop. В программе SNAP снимок в формате GRD (Ground Range Detected) переводился из виртуальной амплитудной НН поляризации в физическую. Затем снимок центрировался и обрезался на участке, затрагивающем проливы Юный и Красной Армии.

Из-за топографических изменений местности и наклона спутникового датчика Sentinel-1 расстояния на его снимках могут быть искажены. Вследствие этого географическая привязка GRD снимка спутника может быть некорректной. Дополнительно, существуют различия в кодировке географических данных продуктов спутника Sentinel-1 и кодировке координат формата GeoTIFF. Для получения корректных координат снимка была проведена коррекция рельефа. Коррекция также позволила компенсировать искажения снимка, чтобы географическое представление изображения было как можно ближе к реальному миру, что существенно увеличило геометрическую точность получаемого изображения. Коррекция рельефа производилась методом Range Doppler Terrain Correction (RDTС), он устранил искажения, вызванные наклоном радиолокационного сигнала и влиянием рельефа, проецирует изображение на выбранную цифровую модель рельефа, пересчитывает координаты в новую систему координат и устраняет топографические смещения. В качестве цифровой модели рельефа послужила проекция Copernicus 30m Global DEM. Система координат была выбрана WGS 84.

Полученные изображения разделялись на отдельные сектора, размером 25000 на 25000 м. Это было сделано, чтобы снизить размер снимков для более быстрого обучения нейронной сетью. На рисунке 3 представлены выделенные 11 секторов проливов Юный и Красной Армии.

*Рисунок 3 - Выделенные сектора*

Для обрезания изображений в формате GeoTIFF по координатам, чтения полученных сегментов снимков и извлечения растрового канала использовалась python библиотека GDAL модуля OSGeo. Значения каждого пикселя в изображении полученного канала нормализовались и преобразовывались в двумерный массив чисел с плавающей запятой.

Для исправления контрастности изображений была сделана обработка гистограммы методом отсечения перцентилей в 5 % и 95 %. Если полученное изображение представляло собой черный квадрат (в случае если указанный сектор не находился в границах исходного снимка), то такое изображение фильтровалось и не сохранялось в последующий набор данных.

Для каждого снимка применялись следующие аугментации:

- зеркальное отражение изображения;
- поворот на 90 градусов;
- обрезка изображения до 20 %;
- наклон изображения на 15 градусов;
- наложение шума на изображение в небольшом количестве.

Все изображения сжимались до размера 640 на 640 пикселей.

Общее число данных для обучения составило 798 снимков, для валидационного 15 снимков, для тестового набор данных 15 снимков.

### *Результаты и обсуждение*

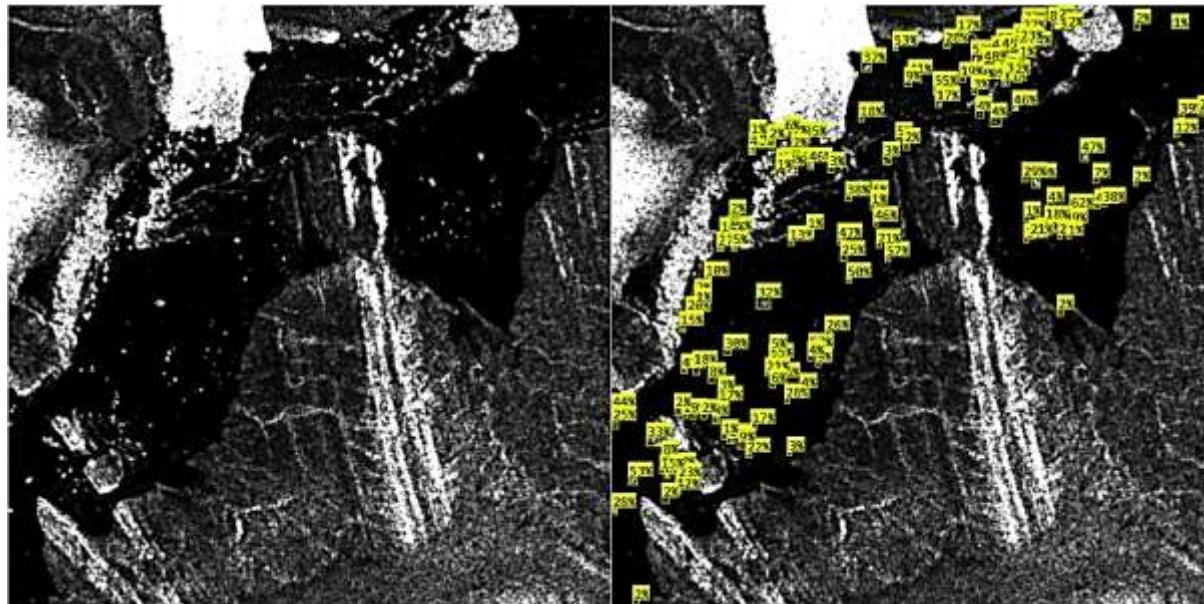
Первыми архитектурами нейронной сети для обучения послужили YOLOv12 и YOLOv11. Сервис RoboFlow позволяет производить обучение моделей на своих мощностях. Помимо обучения моделей через RoboFlow, модели версии YOLOv11 обучались локально, для этого были выбраны две версии: YOLOv11S и YOLOv11M. Модели Faster RCNN с backbone MobileNet и ResNet также обучались локально. Локальное обучение производилось на ПК с ОС Windows 10, процессоре i5 и 16 Гб ОЗУ и графическом процессоре GTX 1070. Сравнение метрик обученных моделей показано в таблице 1.

Таблица 1 – сравнение характеристик моделей

Модель	Количество эпох	Precision, %	Recall, %	mAP, %
YOLOv12	180	43,9	42,6	46
YOLOv11	200	43,4	44,2	49
YOLOv11S	40	46	38	33
YOLOv11M	40	50	43	37
Faster RCNN, backbone MobileNet	30	10	8	2
Faster RCNN, backbone ResNet	30	32	24	16

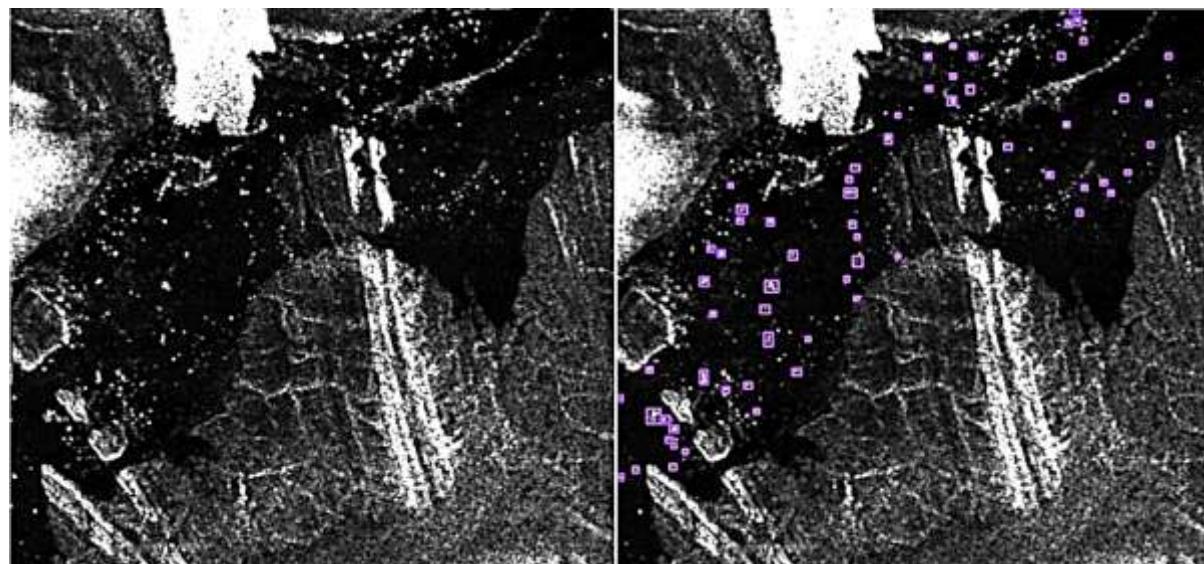
Таким образом, лучшей обученной моделью оказалась YOLOv11, обученная на мощ-

ностях RoboFlow. Пример визуализации детекции этой модели представлен на рисунке 4. Слева показано исходное изображение, справа – с нанесенными на него bounding box и отображением вероятности. Можно сделать вывод, что практически все айсберги модель смогла обнаружить, однако вероятность определения некоторых объектов ниже 5 %; это можно объяснить тем, что на самом изображении айсберги небольших размеров с низкой яркостью.



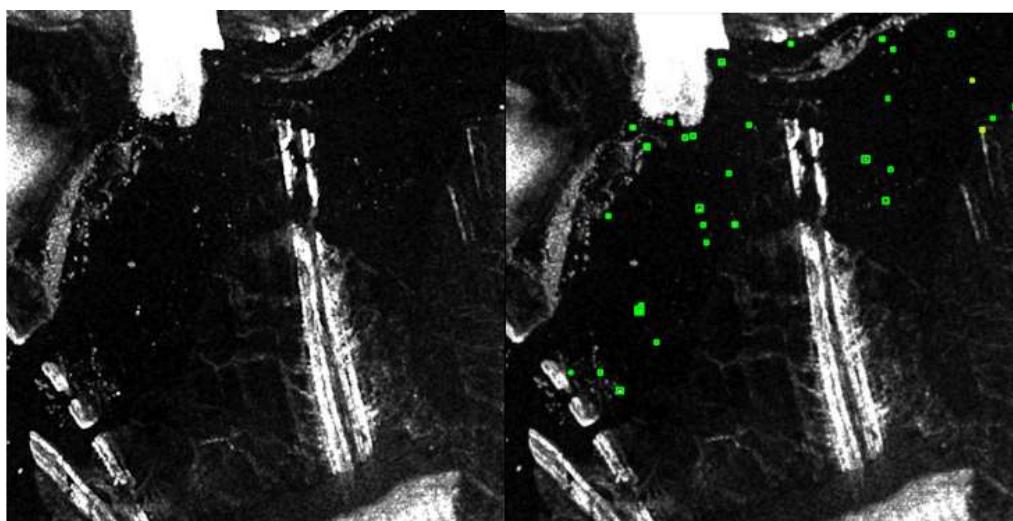
*Рисунок 4 - Визуальная оценка модели YOLOv11*

Из двух обученных локально моделей одноэтапных детекторов лучшей является YOLOv11M. Пример визуализации детекции обученной YOLOv11M по сравнению с оригинальным изображением представлен на рисунке 5. Модель определила меньшее количество айсбергов, чем обученная на мощностях RoboFlow. Это следствие разницы в количестве эпох обучения: 200 против 40.

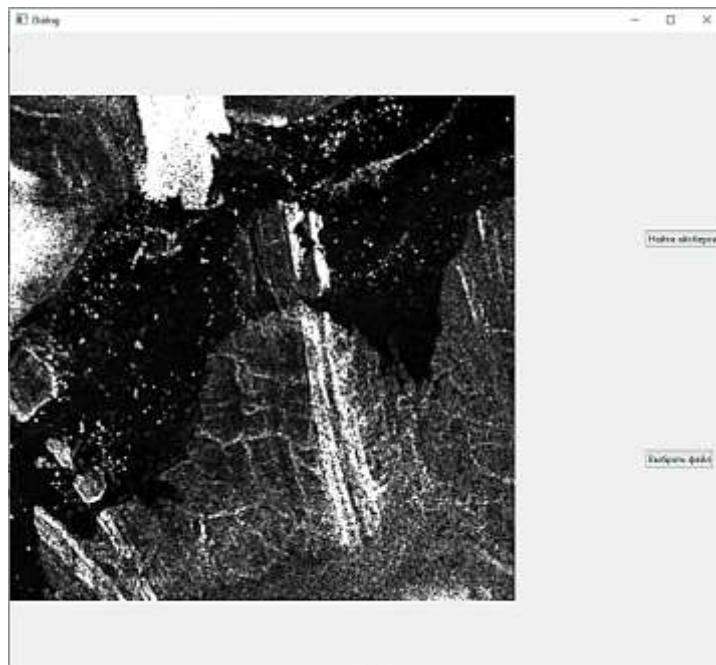


*Рисунок 5 - Визуальная оценка YOLOv11M*

Среди двухэтапных детекторов лучшей оказалась модель Faster RCNN с backbone ResNet, которая достигла метрики mAP в 16 %, однако она значительно уступает по качеству моделям YOLO. Модель с backbone MobleNet показала крайне неудовлетворительные результаты с метрикой mAP, равной 2 %. Пример визуальной оценки детекции модели Faster RCNN показан на рисунке 6.

*Рисунок 6 – Визуальная оценка Faster RCNN ResNet*

В качестве лучшей модели была выбрана YOLOv11, обученная на мощностях RoboFlow. Разработан прототип программы взаимодействия с обученной нейронной сетью. Интерфейс программы представлен на рисунке 7. Согласно рисунку, программа содержит кнопку для загрузки изображения из файловой системы и кнопку проведения детекции айсбергов.

*Рисунок 7 – Интерфейс программы*

При выполнении детекции, программа показывает диалоговое окно, отображающее количество найденных айсбергов на снимке, согласно рисунку 8. После закрытия диалогового окна, на исходном снимке выделяются рамки всех найденных айсбергов, согласно рисунку 9.

Уверенность в детекции объектов нейронной сетью отражена через цвет рамки:

- зеленый цвет показывает высокую вероятность детекции (от 50 %)
- желтый цвет показывает слабую вероятность детекции (от 15 до 49 %)
- красный цвет показывает очень слабую вероятность детекции (от 1 до 14 %).

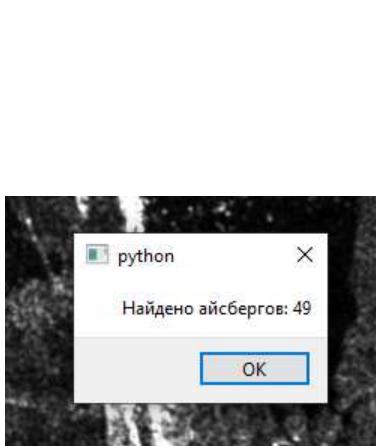


Рисунок 8 – Диалоговое окно

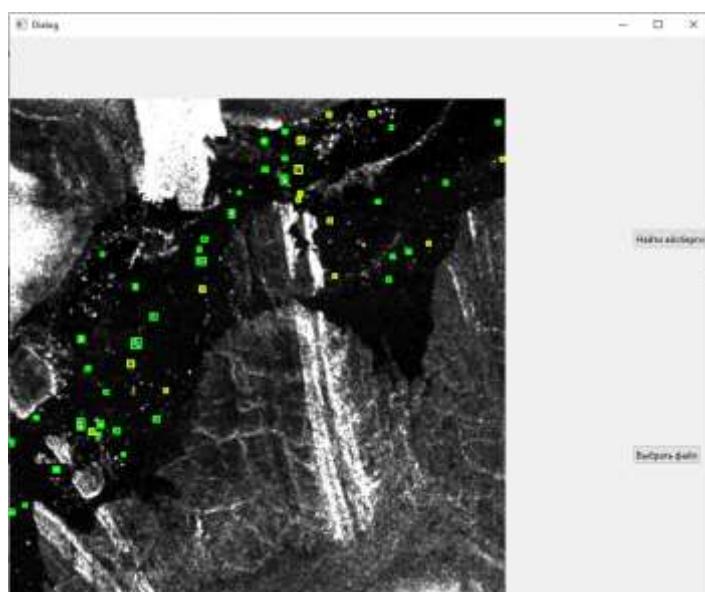


Рисунок 9 – Отрисованные рамки айсбергов

Архитектура YOLOv11 представилась наиболее эффективной для решения задачи детекции айсбергов в арктических морях, показывая значение mAP = 49%, что является неплохим результатом для небольшого набора исходных данных. На качество модели влияет как размер модели - модель YOLOv11 размера M оказалась более эффективной (среди обученных локально) – так и общее количество эпох обучения.

На качество всех обученных моделей могло оказаться сравнительно малое количество данных для обучения и вероятные ошибки при аннотации данных. Вероятно, что при увеличении набора данных, а также более точной аннотации изображений, качество моделей может увеличиться.

Таким образом, при дальнейшем расширении набора данных, увеличении размера моделей можно достигнуть более точных детекций объектов.

Дополнительно, существуют гораздо более «тяжелые» модели YOLO, содержащие более 50 млн параметров, такие как YOLO L или YOLO X. Обучение таких моделей также сможет повысить точность детекции.

Среди преимуществ архитектуры YOLO можно выделить скорость проведения предсказаний на изображении. Так, на снимке размером 4800 на 4500 пикселей модель YOLOv11 смогла выполнить предсказание за 1200 мс, в то время как модели Faster RCNN для этого потребовалось более минуты.

Чем ближе изображение для выделения объектов к размеру 640 на 640 пикселей, тем успешнее модели выполняют детекцию. Для того, чтобы делать предсказание на больших снимках, предварительно необходимо их разбивать на более мелкие фрагменты, выполнять детекцию на каждом фрагменте и склеивать обратно в исходное изображение. От скорости реализации подобного алгоритма будет зависеть общая скорость выделения объектов.

### **Выводы**

В статье исследованы методики по определению айсбергов на РЛС, изучены существующие программные реализации по детекции айсбергов, в том числе с применением глубокого обучения. Выбрана локация для проведения исследования: Архипелаг Северная Земля, в частности проливы Юный и Красной Армии. Выполнен поиск данных спутниковых снимков Sentinel-1, произведена предварительная обработка снимков в программе SNAP, конвертация снимков в PNG и коррекция контрастности. Изучены существующие архитектуры моделей нейронных сетей для определения объектов на изображении, выбрана архитектура YOLO как одноэтапного детектора; Faster RCNN как двухэтапных детекторов. РЛС подготовлены для обучения нейронной сети, обучено четыре модели YOLO и две модели Faster RCNN, представлена сравнительная таблица по каждой из них, выбрана наиболее качественная модель –

YOLOv11, которая достигает параметра mAP = 49 %. Для этой модели разработана программа, которая позволяет загружать РЛС и отображать границы найденных айсбергов с цветовой градацией по вероятности предсказания. Предложены дальнейшие варианты развития исследования для достижения лучших результатов детекции айсбергов на РЛС.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Спутниковые методы определения характеристик ледяного покрова морей / Ред. В.Г. Смирнов. СПб.: ААНИИ, 2011. 239 с.
2. Power D., Youden J., Lane K., Randell C., Flett D. Iceberg Detection Capabilities of RADARSAT Synthetic Aperture Radar // Canadian Journ. of Remote Sensing. 2001. V. 27 (5). P. 476–486.
3. Christine Wesche, Wolfgang Dierking. Iceberg signatures and detection in SAR images in two test regions of the Weddel Sea, Antarctica. // Journal of Glaciology. Vol. 58. №208. 2012.
4. Миронов Е.У., Смирнов В.Г., Бычкова И.А., Кулаков М.Ю., Демчев Д.М. Новые технологии обнаружения айсбергов и прогнозирования их дрейфа в западном секторе Арктики // Проблемы Арктики и Антарктики. 2015. №2 (104). С. 21–32.
5. Dong S. Deep Learning for Iceberg Detection in Satellite Images // Uppsala University - 2021.
6. Hass F.S., Jokar Arsanjani, J. Deep. Learning for Detecting and Classifying Ocean Objects: Application of YoloV3 for Iceberg–Ship Discrimination // ISPRS Int. J. Geo-Inf. 2020. P. 758.
7. Павлова Е.А., Алексеева Т.А., Миронов Е.У., Смоляницкий В.М. Особенности распределения айсбергов по данным судовых наблюдений в Карском море в 2004-2019 гг. // Научная арктика. Океанология–2020.
8. Виноградная Е.С., Егорова Е.С., Шевелева Т.В., Юлин А.В. Изменчивость положения границ старых льдов в весенний период и остаточных льдов в осенний период в Северном Ледовитом океане в текущем климатическом периоде // Российская Арктика. 2020. Т. 2 (9). С. 41-55.
9. Обзорные электронные карты СЛО за 2024 г. [Электронный ресурс] / Санкт-Петербург: ААНИИ. 2025. URL: <https://www.aari.ru/data/realtime/ledovye-karty-2/slo2024>.
10. Обзорные электронные карты СЛО за 2023 г. [Электронный ресурс] / Санкт-Петербург: ААНИИ. 2025. URL: <https://www.aari.ru/data/realtime/ledovye-karty-2/slo2024>.
11. Sentinel-1 [Электронный ресурс] / Brussels: Copernicus. 2025. URL: <https://sentinels.copernicus.eu/copernicus/sentinel-1>.
12. RADARSAT-2 [Электронный ресурс] / Ottawa: Government of Canada. 2025. URL: <https://www.asc-csa.gc.ca/eng/satellites/radarsat2/>.
13. Li Z., Peng C., Yu G., Zhang X., Deng Y., Sun J. Light-Head R-CNN: In Defense of Two-Stage Object Detector // arXiv. 2017. P. 1-9. doi: 10.48550/arXiv.1711.07264
14. Girshick R., Donahue J., Darrell T., Malik J. Region-Based Convolutional Networks for Accurate Object Detection and Segmentation // IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence. 2016. Vol. 38. №1. P. 142-158. doi: 10.1109/TPAMI.2015.2437384.
15. Girshick R. Fast r-cnn // Proceedings of the IEEE international conference on computer vision. 2015. C. 1440-1448.
16. Ren S. et al. Faster R-CNN: Towards real-time object detection with region proposal networks // IEEE transactions on pattern analysis and machine intelligence. 2016. T. 39. №6. C. 1137-1149.
17. He K. et al. Mask r-cnn // Proceedings of the IEEE international conference on computer vision. 2017. C. 2961-2969.
18. Redmon J. et al. You only look once: Unified, real-time object detection // Proceedings of the IEEE conference on computer vision and pattern recognition. 2016. C. 779-788.
19. Liu W. et al. Ssd: Single shot multibox detector // Computer Vision–ECCV 2016: 14th European Conference. 2016. C. 21-37.
20. Li Y., Ren F. Light-weight retinanet for object detection // arXiv preprint arXiv. 1905. 10011. 2019.
21. ASF Data Search [Электронный ресурс] / Alaska Satellite Facility. 2025. URL: <https://search.asf.alaska.edu/>.

### **Караткевич Матвей Сергеевич**

Северный (Арктический) Федеральный Университет им. М.В. Ломоносова

Адрес: 163046, Россия, г. Архангельск, пр. Ломоносова, 98

Магистрант

Email: matvey.karat@mail.ru

## COMPARISON OF DEEP NEURAL NETWORK ARCHITECTURE FOR ICEBERG DETECTION IN RADAR IMAGES

**Abstract.** The article considers methods for detecting icebergs on radar images (RLS), studies existing implementations of iceberg detection, including those using deep learning. A search for Sentinel-1 satellite imagery data was performed, and preliminary image processing was performed. Existing architectures of neural network models for detecting objects on an image were studied, relevant architectures were selected, and neural network models were trained. A comparison of the trained models was performed, and the highest quality was selected. A program for interaction with the trained neural network was developed.

**Keywords:** iceberg, deep learning, neural networks, arctic seas, YOLO, Faster RCNN, object detection in images

### BIBLIOGRAPHY

1. Sputnikovye metody opredeleniya kharakteristik ledyanogo pokrova morey / Red. V.G. Smirnov. SPb.: AANII, 2011. 239 s.
2. Power D., Youden J., Lane K., Randell C., Flett D. Iceberg Detection Capabilities of RADARSAT Synthetic Aperture Radar // Canadian Journ. of Remote Sensing. 2001. V. 27 (5). P. 476-486.
3. Christine Wesche, Wolfgang Dierking. Iceberg signatures and detection in SAR images in two test regions of the Weddel Sea, Antarctica. // Journal of Glaciology. Vol. 58. №208. 2012.
4. Mironov E.U., Smirnov V.G., Bychkova I.A., Kulakov M.YU., Demchev D.M. Novye tekhnologii obnaruzheniya aysbergov i prognozirovaniya ikh dreyfa v zapadnom sektore Arktiki // Problemy Arktiki i Antarktiki. 2015. №2 (104). S. 21-32.
5. Dong S. Deep Learning for Iceberg Detection in Satellite Images // Uppsala University - 2021.
6. Hass F.S., Jokar Arsanjani, J. Deep. Learning for Detecting and Classifying Ocean Objects: Application of YoloV3 for Iceberg-Ship Discrimination // ISPRS Int. J. Geo-Inf. 2020. P. 758.
7. Pavlova E.A., Alekseeva T.A., Mironov E.U., Smolyanitskiy V.M. Osobennosti raspredeleniya aysbergov po dannym sudovykh nablyudeniy v Karskom more v 2004-2019 gg. // Nauchnaya arktika. Okeanologiya-2020.
8. Vinogradnyaya E.S., Egorova E.S., Sheveleva T.V., Yulin A.V. Izmenchivost` polozheniya granits starykh l'dov v vesenniy period i ostatochnykh l'dov v osenniy period v Severnom Ledovitom okeane v tekushchem klimaticheskem periode // Rossiyskaya Arktika. 2020. T. 2 (9). C. 41-55.
9. Obzornye elektronnye karty SLO za 2024 g. [Elektronnyy resurs] / Sankt-Peterburg: AANII. 2025. URL: <https://www.aari.ru/data/realtime/ledovye-karty-2/slo2024>.
10. Obzornye elektronnye karty SLO za 2023 g. [Elektronnyy resurs] / Sankt-Peterburg: AANII. 2025. URL: <https://www.aari.ru/data/realtime/ledovye-karty-2/slo2024>.
11. Sentinel-1 [Elektronnyy resurs] / Brussels: Copernicus. 2025. URL: <https://sentinels.copernicus.eu/copernicus/sentinel-1>.
12. RADARSAT-2 [Elektronnyy resurs] / Ottawa: Government of Canada. 2025. URL: <https://www.asc-csa.gc.ca/eng/satellites/radarsat2/>.
13. Li Z., Peng C., Yu G., Zhang X., Deng Y., Sun J. Light-Head R-CNN: In Defense of Two-Stage Object Detector // arXiv. 2017. P. 1-9. doi: 10.48550/arXiv.1711.07264
14. Girshick R., Donahue J., Darrell T., Malik J. Region-Based Convolutional Networks for Accurate Object Detection and Segmentation // IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence. 2016. Vol. 38. №1. R. 142-158. doi: 10.1109/TPAMI.2015.2437384.
15. Girshick R. Fast r-cnn // Proceedings of the IEEE international conference on computer vision. 2015. S. 1440-1448.
16. Ren S. et al. Faster R-CNN: Towards real-time object detection with region proposal networks // IEEE transactions on pattern analysis and machine intelligence. 2016. T. 39. №6. S. 1137-1149.
17. He K. et al. Mask r-cnn // Proceedings of the IEEE international conference on computer vision. 2017. S. 2961-2969.
18. Redmon J. et al. You only look once: Unified, real-time object detection // Proceedings of the IEEE conference on computer vision and pattern recognition. 2016. S. 779-788.
19. Liu W. et al. Ssd: Single shot multibox detector // Computer Vision-ECCV 2016: 14th European Conference. 2016. S. 21-37.
20. Li Y., Ren F. Light-weight retinanet for object detection // arXiv preprint arXiv. 1905. 10011. 2019.
21. ASF Data Search [Elektronnyy resurs] / Alaska Satellite Facility. 2025. URL: <https://search.asf.alaska.edu/>.

**Karatkevich Matvey Sergeevich**

Northern (Arctic) Federal University

Address: 163046, Rossia, Arkhangelsk, Lomonosova str. 98

Master's student

Email: matvey.karat@mail.ru

**УПРАВЛЕНИЕ ПРОЦЕССАМИ ПЕРЕВОЗОК**

УДК 656.072 (076.2)

doi:10.33979/2073-7432-2025-2-2(89)-32-39

М.В. БУЙЛОВА, С.И. КОРЯГИН

**ПРОЕКТИРОВАНИЕ МАРШРУТНОЙ СЕТИ ГОРОДСКОГО  
НАЗЕМНОГО ПАССАЖИРСКОГО ТРАНСПОРТА В УСЛОВИЯХ  
ИСПОЛЬЗОВАНИЯ АВТОБУСОВ РАЗНЫХ КЛАССОВ**

**Аннотация.** Статья посвящена одной из задач проектирования маршрутных сетей городского общественного транспорта: построению набора базовых маршрутов. Рассматривается методика построения указанного набора, учитывающая характеристики маневренности автобусов различного размерного класса и особенности улично-дорожной сети. Показана целесообразность использовать критерии оптимизации величину линейной плотности пассажиропотока. Предлагаемый подход позволяет учитывать экономические интересы участников перевозочного процесса.

**Ключевые слова:** городской общественный транспорт, улично-дорожная сеть, маршрутная сеть, набор базовых маршрутов

***Введение***

Одним из приоритетов транспортной политики в мировой практике является стимулирование отказа от личных автомобилей жителей городов в пользу общественного транспорта. Развитие городского наземного пассажирского транспорта (ГНПТ) играет значимую роль при построении устойчивых городских транспортных систем. Эффективное функционирование ГНПТ зависит от организации маршрутной сети, которая является «кровеносной системой» города, комплексом маршрутов ГНПТ. Проектирование маршрутной сети представляет возможность определять ее качество с учетом разнообразных факторов. Трансформации городской среды и развитие агломерации обязывает перепроектировать маршрутную сеть. В этом случае возможны: организация новых или изменение существующих маршрутов, увеличение количества остановочных пунктов, их перемещение, привлечение перевозчиков и т. д. При проектировании и перепроектировании маршрутной сети, предусматривая все специфики определенного города, можно увеличить результативность работы маршрутной сети.

***Материал и методы***

Маршрутная сеть ГНПТ является сложной системой, а для ее формирования требуется применение методов оптимизации [1]. Весь процесс формирования маршрутной сети ГНПТ согласно Методическим рекомендациям по разработке Документа планирования регулярных перевозок пассажиров и багажа по муниципальным и межмуниципальным маршрутам автомобильным транспортом и городским наземным электрическим транспортом (утв. Минтрансом РФ 30.06.2020) проводится в четыре этапа. Первым является разработка транспортной модели города, в процессе которой проводится транспортное районирование. Этой части оптимизации маршрутных сетей посвящены, в частности, исследования Д.В. Капского [2], С.В. Скирковского [3], А.И. Когтевой [4]. При описании транспортного спроса формируется матрица пассажирских межрайонных корреспонденций. Для этого используют различные методы обследования пассажиропотоков. Выбор метода обследования транспортной сети зависит от задач, которые должны быть выполнены, и достаточности ресурсов, которые могут быть выделены для проведения исследования. Выборочное и сплошное обследования могут быть использованы в комбинации для более полного анализа ситуации в транспортной

сети. Однако, если необходима точная картина состояния транспортной сети, то сплошные обследования являются лучшим вариантом [5]. Определение пассажиропотока будет более точным в модели с большим количеством районов, но следует учитывать, что это увеличивает объемы расчетов. При транспортном районировании размеры расчетных зон могут различаться в зависимости от конкретного города и его инфраструктуры. Однако обычно размеры расчетных зон выбираются в соответствии с географическими особенностями города.

При построении базовой маршрутной сети на третьем этапе и ее оптимизации на четвертом основываются на различных критериях эффективности – целевых функциях. Наиболее распространенным критерием в работах многих исследователей является время, которое тратит пассажир на передвижение. Данный критерий использовали М.Е. Антошвили [1], А.В. Кулев [6, 7], Т.С. Воронкова [8], В.А. Федоров [9]. В других подходах основными критериями являются минимум уровня пересадочности [10], максимум пассажиропотока [11], суточной загрузки улично-дорожной сети (УДС) транспортными потоками [12], суммарные затраты на передвижение транспортных средств (ТС) по маршрутам в единицу времени [13] и др.

Министерство транспорта РФ разработало и утвердило требования к региональным стандартам транспортного обслуживания населения, в которых устанавливается перечень показателей, характеризующих доступность, безопасность и комфортность для населения субъекта РФ регулярных перевозок пассажиров и багажа автомобильным транспортом (рис. 1).



*Рисунок 1 – Требования к региональным стандартам транспортного обслуживания*

Показатель дорожной безопасности определяет долю дорожно-транспортных происшествий, произошедших по причине неудовлетворительного состояния дорог, используемых ГНПТ, что имеет особое значение для городов с исторически сложившейся УДС, которая не позволяет провести реконструкцию по причине плотной застройки.

С другой стороны, российские города постепенно возвращаются к использованию подвижного состава особо большого класса для перевозок на основных городских маршрутах. При сохранении приемлемой частоты движения такой подход позволяет сократить потребность в водителях, дефицит которых во всех регионах продолжает расти, сократить нагрузку на УДС, уменьшить объемы выбросов ГНПТ, увеличить комфортность перевозки пассажиров, а также сократить издержки перевозок.

С января 2024г после более чем пятилетнего перерыва сочленённые автобусы возобновили работу на улицах Перми. Ещё несколько регионов получили новые автобусы по региональным или муниципальным программам: Адыгея - марки СимАЗ, Якутия - Volgabus, Хабаровский край и Сахалинская область - ПАЗ, а в Псковскую область при содействии Минпромторга начата поставка крупной партии сочленённых автобусов белорусского производства МАЗ-216. В Пскове на свой баланс местный перевозчик ГППО «Псковпассажиртранс» получил 10 пассажирских автобусов особо большого класса марки Volgabus, кото-

рые ранее курсировали по петербургским маршрутам. нормативам по ширине и количеству полос [14]. В Калининграде сочленённые автобусы (особо большого класса) активно использовались до середины 2000-х годов. В Советский период (1970–1990-е) основным сочленённым автобусом был Ikarus 280 (венгерский), который работал на самых загруженных маршрутах. В период 1990-е – начало 2000-х парк пополнился подержанными Mercedes-Benz O405G из Германии. Эти автобусы были более комфортными и надёжными, чем старые «Икарусы». К 2007–2008 годам большинство таких автобусов было списано из-за износа и нерентабельности. Некоторые Mercedes O405G после списания в Калининграде перепродаются в другие города России и даже в страны СНГ, где работали ещё несколько лет.

Таким образом, в процессе формирования маршрутных сетей городского общественного транспорта особую значимость приобретает вопрос обеспечения безопасности эксплуатации транспортных средств определенной вместимости, что обусловлено существующими ограничениями, накладываемыми характеристиками улично-дорожной инфраструктуры. В связи с этим при разработке или оптимизации маршрутных сетей ГНПТ в городских условиях принципиально важным становится учет технических параметров автобусов разных классов, в частности их габаритной длины и минимально допустимых радиусов выполнения поворотных маневров и формирование маршрутов с учетом указанных технических параметров.

Для реализации поставленной цели необходимо провести анализ соответствия значений габаритных параметров автобусов особо большого класса геометрическим параметрам элементов УДС. Для определения этого соответствия необходимы размеры баз обеих секций, переднего и заднего свесов ТС. В ГОСТ Р 58653-2019 «Дороги автомобильные общего пользования. Пересечения и примыкания. Технические требования» в качестве расчетного ТС рассматриваемого класса обозначен сочлененный автобус с величиной переднего свеса 2,68 м и заднего 3,71 м, расстояниями между осями (базы) 5,96/6,05 м. В зависимости от радиуса внутреннего края полосы движения ширина полосы для вариантов функционирования однополосного поворотного съезда составляет от 5 до 8,5 м.

В разделе 5.10 «Маневренность» Правил ЕЭК ООН № 36-03 эта величина равна 7,2 м, если наиболее выступающие точки транспортного средства находятся в пределах круга поворота с радиусом 12,5 м,

Согласно требованиям СП 42.13330.2016 «Градостроительство. Планировка и застройка городских и сельских поселений» в структуре УДС выделяются магистральные и местные улицы и дороги, а также главные улицы, шириной полосы движения максимум 3,75 м.

Учитывая технические характеристики наиболее распространенных марок автобусов отечественного производства, которые имеют минимальный радиус поворота по колесу наружного переднего колеса 12 м [15], можно сказать, что при проектировании новых автомобильных дорог, съездов и разворотов габаритные параметры автобусов особо большого класса соответствуют нормативным геометрическим параметрам элементов УДС.

Однако, как упоминалось выше, существуют города с плотной исторической застройкой, где сложно или невозможно радикально изменить УДС. Примером такого города является Калининград, который насчитывает 1035 единиц дорог и улиц, 76 % которых не соответствуют указанным нормам. Следовательно, при проектировании маршрутной сети необходимо учитывать класс используемого ГНПТ и параметры УДС на территории различных транспортных районов.

### Теория

Для достижения указанной цели предлагается использовать следующий алгоритм:

1. Исходной информацией является граф улично-дорожной сети, в виде простого взвешенного графа, а также информация необходимая для определения значения выбранного критерия эффективности маршрутной сети. Вершины графа соответствуют центроидам множества транспортных районов. Веса ребер – расстояния между центроидами, задаются матрицей смежности.

2. Граф улично-дорожной сети разбивается на подграфы, каждый из которых приго-

ден для использования автобусов конкретного класса или группы классов. Для удобства работы предлагается не исключать из исходного графа участки, признанные не пригодными для движения автобусов рассматриваемого класса, а придавать весам ребер графа на этих участках значения, делающие их заведомо непригодными для включения в маршрут, формируемый по выбранному критерию эффективности. Это дает возможность работы с несколькими графиками, различающимися только весами ребер. Как показывают предварительные расчеты для городов с населением несколько сотен тысяч человек целесообразно использование именно групп классов автобусов во избежание получения большого числа коротких маршрутов.

3. С использованием алгоритма Флойда определяются кратчайшие пути между всеми парами вершин на указанных подграфах.

4. На основе результатов п.3 эксперты путем определяются возможные конечные точки (транспортные районы) маршрутов автобусов каждого класса или группы классов. При этом учитываются и другие факторы, например, наличие или возможности создания разворотной площадки для автобусов рассматриваемого класса.

5. Отсеиваются маршруты не начинающиеся или не заканчивающиеся на выбранных конечных точках. Также исключаются маршруты считающиеся неприемлемыми по какому-либо признаку. Например, в работах Хрущева М.В. [11] предлагается отсеивать маршруты по признаку их избыточно большой или малой длины.

Таким образом формируется набор базовых маршрутов, представляющих собой пересекающиеся подмножества вершин исходного графа:

$$S = A_1 \cup A_2 \cup \dots \cup A_n, \quad (1)$$

где  $S$  – множество вершин графа (транспортных районов);

$n$  – число базовых маршрутов;

$A_i$  – подмножество вершин графа (транспортных районов), соответствующих  $i$ -му базовому маршруту.

На этом этапе возможно принудительное введение необходимого маршрута.

Очевидна необходимость прохождения выбранных базовых маршрутов через все транспортные районы. Для оценки этого формируется матрица показателей прохождения маршрута через транспортный район (табл. 1), в которой прохождение маршрута через рассматриваемый район соответствует 1, а в противном случае – 0. Затем для каждого столбца вычисляется логическое выражение, показывающее прохождение или не прохождение минимум одного маршрута через этот транспортный район при конкретном наборе показателей выбора маршрутов.

Таблица 1 - Оценка прохождения выбранных базовых маршрутов через все транспортные районы

Маршруты	Показатель отбора маршрута	Транспортные районы								
		1	2	3	4	5	6	7	8	...
...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...
1-15	0	1	1	0	0	0	1	0	1	...
5-24	1	0	0	0	0	1	1	0	1	...
8-36	1	0	0	0	0	0	0	0	1	...
...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...
Логическое выражение		0=0&1 v1&0 v1&0	0=0&1 v1&0 v1&0	0=0&0 v1&0 v1&0	0=0&0 v1&0 v1&0	1=0&0 v1&1 v1&0	0=0&1 v1&1 v1&0	0=0&0 v1&1 v1&1	1=0&1 v1&0 v1&1	...

Примечание: логические выражения сформированы для приведенных фрагментов; символ  $\&$  обозначает логическое сложение – логическое ИЛИ

Сумма логических выражений должна равняться числу транспортных районов:

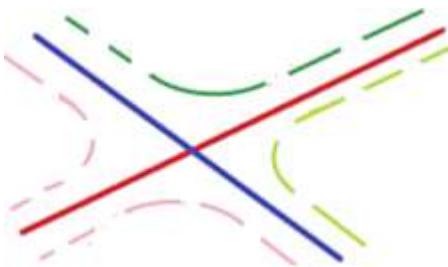
$$\sum_{i=1}^T \sum_{j=1}^n K_j \& a_{ij} = M, \quad (2)$$

где  $n$  – число базовых маршрутов;

$T$  – число транспортных районов;

$K_j$  – показатель отбора маршрута;

$a_{ij}$  – показатель прохождения  $j$ -го маршрута через  $i$ -й транспортный район.



*Рисунок 2 - Образование пересадочных маршрутов: сплошные линии – прямые маршруты, пунктирные линии – пересадочные маршруты*

Каждая пара пересекающихся базовых маршрутов порождает четыре пересадочных маршрута. Действие по формированию пересадочных маршрутов повторяется с учетом ранее сформированных пересадочных маршрутов, если региональные нормативные документы допускают число пересадок равное или превышающее 2 (рис. 2).

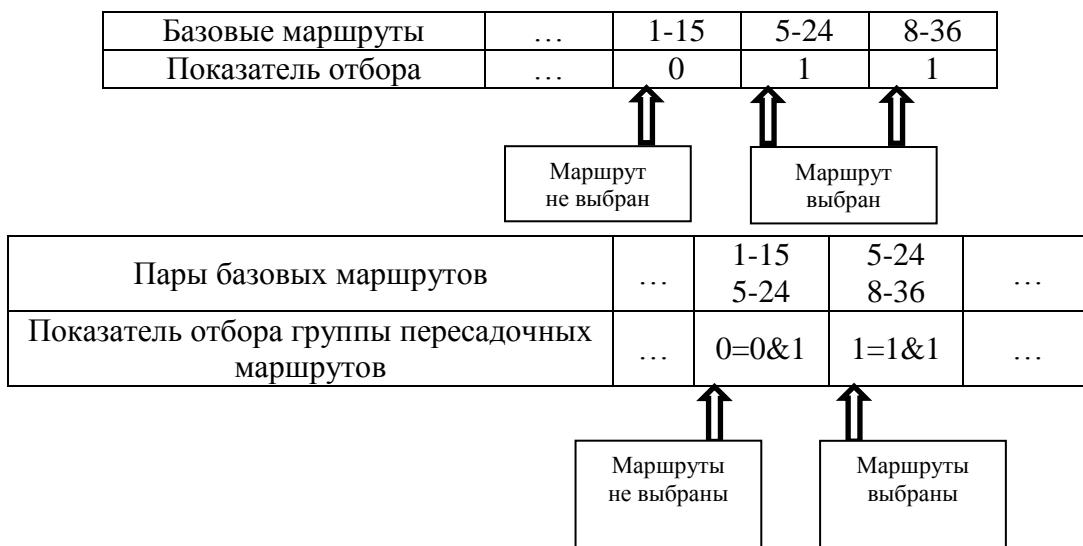
6. В результате имеем:

$$S = A_{n+1} \cup A_{n+2} \cup \dots \cup A_m, \quad (3)$$

где  $A_j$  – подмножество вершин графа (транспортных районов), соответствующих  $j$ -му пересадочному маршруту,  $m$  – общее число маршрутов.

7. Решается оптимизационная задача целочисленного программирования, то есть поиска набора базовых маршрутов, обеспечивающих минимум или максимум критерия, полученного умножением соответствующего показателя маршрута на индикатор отбора: 1 – маршрут выбран, 0 – маршрут не выбран. Таким образом в процессе решения варьируются логические значения показателей выбора маршрутов.

Группа пересадочных маршрутов считается выбранной, если образующая их пара базовых маршрутов выбрана, то есть, если логическое произведение показателей отбора пары базовых маршрутов равно 1, таким образом показатель отбора группы пересадочных маршрутов не является варьируемой величиной. Также не являются варьируемыми величинами показатели отбора принудительно введенных маршрутов, которые устанавливаются равными 1.



**Рисунок 3 - Отбор базовых и пересадочных маршрутов:**  
символ & обозначает логическое умножение – логическое И

Ограничением в оптимизационной задаче является необходимость прохождения через каждую пару транспортных районов минимум одного маршрута, включая пересадочные. То есть должно существовать подмножество (маршрут)  $A_i$ , элементами которого являются транспортные районы с номерами  $x$  и  $y$  – начальным и конечным пунктами поездки:

$$\exists A_i \subseteq S: x \in A_i \text{ & } y \in A_i, \quad (4)$$

где Э— квантор существования.

В результате использования приведенного алгоритма формируется оптимальный по выбранному критерию набор базовых беспересадочных маршрутов и, если необходимо, формируются соответствующие этому набору пересадочные маршруты.

### **Результаты и обсуждение**

Показана необходимость учета параметров улично-дорожной сети при проектировании маршрутов общественного транспорта. Сформированы основные пункты алгоритма, позволяющего учитывать особенности отдельных участков улично-дорожной сети при формировании маршрутов городского общественного транспорта. Выбор критерия оптимизации приведет к добавлению некоторых пунктов, состав которых будет определяться характером используемого критерия.

Обеспечение возможности использования транспортных средств с большей пассажировместимостью не только увеличивает провозную способность, но и позволяет сократить количество дублирующих маршрутов, что улучшает общее качество транспортного обслуживания. Минимизация применения автобусов малой и особо малой вместимости на высоконагруженных магистралях способствует рациональному использованию транспортных ресурсов общественного транспорта и повышению общей эффективности городской транспортной системы.

### **Выводы**

Предложенный алгоритм позволяет формировать оптимальный набор маршрутов общественного транспорта в соответствии с заданным критерием, включая отображение пересадочных маршрутов при необходимости. Он обеспечивает эффективное планирование с учётом параметров улично-дорожной сети и характеристик транспортных средств. Дополнительно может решаться задача минимизации использования автобусов малой и особо малой вместимости, а в некоторых случаях – их исключения с высоконагруженных магистралей для повышения пропускной способности и эффективности транспортной системы.

## **СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ**

1. Антошивили М.Е., Либерман С.Ю., Спирин И.В. Оптимизация городских автобусных перевозок. М.: Транспорт, 1985. 102 с
2. Капский Д.В. Обобщенные подходы к решению задач формирования сети городского пассажирского транспорта // Вестник Белорусско-Российского университета. 2021. №4(73). С. 15-25. DOI 10.53078/20778481\_2021\_4\_15. EDN DKSVQU.
3. Скирковский С.В., Капский Д.В., Лосин Л.А. Моделирование функционально-планировочной структуры города // Вестник Белорусского государственного университета транспорта: наука и транспорт. 2021. №2(43). С. 11-15. EDN UOUIHС.
4. Когтева А.И., Буйлова М.В., Фирсов Д.Н. К вопросу транспортного районирования города Калининграда // Мир транспорта и технологических машин. 2024. №2-2(85). С. 3-11. DOI 10.33979/2073-7432-2024-2-2(85)-3-11. EDN PAWCIT.
5. Новиков А.Н., Севостьянов А.Л., Кулев М.В., Кулев А.В. Интеграция мнения специалистов при выборе методов обследования пассажиропотоков // Актуальные вопросы инновационного развития транспортного комплекса: Материалы 2-ой Международной научно-практической конференции. Орел: ГУ УНПК. 2012. С. 101-107. EDN UURZBB.
6. Новиков А.Н., Кулев А.В., Катунин А.А. [и др.] Оптимизация маршрутов пассажирского транспорта в г. Орле // Мир транспорта и технологических машин. 2015. №3(50). С. 115-122. EDN ULELSZ.
7. Новиков А.Н., Кулев А.В., Кулев М.В., Кулева Н.С. Методика организации маршрутной сети городского пассажирского транспорта общего пользования // Мир транспорта и технологических машин. 2015. №1(48). С. 85-92. EDN TNIJIR.
8. Воронкова Т.С., Якунина Н.В., Котов В.В. Оптимизация маршрутной транспортной сети города Оренбурга // Теория и практика модернизации научной деятельности: Сборник статей Международной научно-практической конференции. Тюмень: ООО «Аэтерна». 2019. С. 19-23. EDN IQHQAL.
9. Федоров В.А. К вопросу о возможности оптимизации маршрутной сети городского пассажирского транспорта в мегаполисах [Электронный ресурс] / Молодой ученый. 2015. №2(82). С. 331-333. URL: <https://moluch.ru/archive/82/14765/>.
10. Лебедева О.А. Оптимизация маршрутов общественного транспорта для крупномасштабных мультимодальных сетей // Вестник Ангарского государственного технического университета. 2024. №18. С. 266-270. EDN DOVOLU.
11. Грязнов М.В., Литвинов А.М. Подход к оптимизации трамвайной маршрутной сети в Магнитогорском городском округе / Под научной редакцией Е.Е. Витвицкого // Техника и технологии наземного транспорта

та: Сборник трудов аспирантов (с международным участием). Омск: Сибирский государственный автомобильно-дорожный университет (СибАДИ). 2022. С. 10-18. EDN KPXJNU.

12. Сафонов Э.А., Сафонов К.Э. Оптимизация городской маршрутной сети // Вестник Сибирской государственной автомобильно-дорожной академии. 2014. №4(38). С. 39-43. EDN SQSRMD.

13. Корягин М.Е., Семенова О.С. Оптимизация потоков общественного транспорта в городской среде // Вопросы современной науки и практики. Университет им. В.И. Вернадского. 2008. №1-1(11). С. 70-79. EDN ULQAMF.

14. Малкина Е.Г., Буйлова М.В., Корягин С.И. Анализ траекторий движения сочлененных автобусов по улично-дорожной сети города // Мир транспорта и технологических машин. 2024. №2-2(85). С. 52-60. DOI 10.33979/2073-7432-2024-2-2(85)-52-60.

15. Буйлова М. В. Классификация автобусов для целей организации маршрутных сетей пассажирского транспорта общего пользования // Технико-технологические проблемы сервиса. 2023. №4(66). С. 64-70. EDN UOXWPJ.

### **Буйлова Мария Валерьевна**

Балтийский Федеральный Университет им. И. Канта

Адрес: 236041, Россия, г. Калининград, ул. А.Невского, д. 14

Старший преподаватель ОНК Институт высоких технологий

E-mail: MBuilova@kantiana.ru

### **Корягин Сергей Иванович**

Балтийский Федеральный Университет им. И. Канта

Адрес: 236041, Россия, г. Калининград, ул. А.Невского, д. 14

Д.т.н., профессор ОНК Институт высоких технологий

E-mail: SKoryagin@kantiana.ru

M.V. BUILOVA, S.I. KORYAGIN

## **DESIGNING A ROUTE NETWORK OF URBAN GROUND PASSENGER TRANSPORTATION IN CONDITIONS OF USING BUSES OF DIFFERENT CLASSES**

*Abstract. The article is devoted to one of the tasks of designing route networks of urban public transport: the construction of a set of basic routes. We consider the methodology of construction of this set, taking into account the characteristics of the maneuverability of buses of different size classes and the peculiarities of the street and road network. The expediency of using the linear density of passenger traffic as an optimization criterion is shown. The proposed approach makes it possible to take into account economic interests of participants in the transportation process.*

*Keywords:* urban public transport; street and road network; route network; set of basic routes.

## **BIBLIOGRAPHY**

1. Antoshvili M.E., Liberman S.YU., Spirin I.V. Optimizatsiya gorodskikh avtobusnykh perevozok. M.: Transport, 1985. 102 s
2. Kapskiy D.V. Obobshchennye podkhody k resheniyu zadach formirovaniya seti gorodskogo passazhirskogo transporta // Vestnik Belorussko-Rossiyskogo universiteta. 2021. №4(73). S. 15-25. DOI 10.53078/20778481\_2021\_4\_15. EDN DKSVQU.
3. Skirkovskiy S.V., Kapskiy D.V., Losin L.A. Modelirovanie funktsional`no-planirovochnoy strukturny go-roda // Vestnik Belorusskogo gosudarstvennogo universiteta transporta: nauka i transport. 2021. №2(43). S. 11-15. EDN UOUIHC.
4. Kogteva A.I., Buylova M.V., Firsov D.N. K voprosu transportnogo rayonirovaniya goroda Kaliningrada // Mir transporta i tekhnologicheskikh mashin. 2024. №2-2(85). S. 3-11. DOI 10.33979/2073-7432-2024-2-2(85)-3-11. EDN PAWCIT.
5. Novikov A.N., Sevost`yanov A.L., Kulev M.V., Kulev A.V. Integratsiya mneniya spetsialistov pri vybere metodov obsledovaniya passazhiropotokov // Aktual`nye voprosy innovatsionnogo razvitiya transportnogo kompleksa: Materialy 2-oy Mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii. Orel: GU UNPK. 2012. S. 101-107. EDN UURZBB.

6. Novikov A.N., Kulev A.V., Katunin A.A. [i dr.] Optimizatsiya marshrutov passazhirskogo transporta v g. Orle // Mir transporta i tekhnologicheskikh mashin. 2015. №3(50). S. 115-122. EDN ULELSZ.
7. Novikov A.N., Kulev A.V., Kulev M.V., Kuleva N.S. Metodika organizatsii marshrutnoy seti gorodskogo passazhirskogo transporta obshchego pol'zovaniya // Mir transporta i tekhnologicheskikh mashin. 2015. №1(48). S. 85-92. EDN TNIJIR.
8. Voronkova T.S., YAkunina N.V., Kotov V.V. Optimizatsiya marshrutnoy transportnoy seti goroda Orenburga // Teoriya i praktika modernizatsii nauchnoy deyatel'nosti: Sbornik statey Mezhdunarodnoy nauch-no-prakticheskoy konferentsii. Tyumen': OOO «Aeterna». 2019. S. 19-23. EDN IQHQAL.
9. Fedorov V.A. K voprosu o vozmozhnosti optimizatsii marshrutnoy seti gorodskogo passazhirskogo transporta v megapolisakh [Электронный ресурс] / Molodoy uchenyy. 2015. №2(82). S. 331-333. URL: <https://moluch.ru/archive/82/14765/>.
10. Lebedeva O.A. Optimizatsiya marshrutov obshchestvennogo transporta dlya krupnomasshtabnykh mul'timodal'nykh setey // Vestnik Angarskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. 2024. №18. S. 266-270. EDN DOVOLU.
11. Gryaznov M.V., Litvinov A.M. Podkhod k optimizatsii tramvaynoy marshrutnoy seti v Magnitogorskom gorodskom okruse / Pod nauchnoy redaktsiey E.E. Vitvitskogo // Tekhnika i tekhnologii nazemnogo transporta: Sbornik trudov aspirantov (s mezhdunarodnym uchastiem). Omsk: Sibirskiy gosudarstvennyy avtomobil'no-dorozhnyy universitet (SibADI). 2022. S. 10-18. EDN KPXJHU.
12. Safronov E.A., Safronov K.E. Optimizatsiya gorodskoy marshrutnoy seti // Vestnik Sibirskoy gosudarstvennoy avtomobil'no-dorozhnoy akademii. 2014. №4(38). S. 39-43. EDN SQSRMD.
13. Koryagin M.E., Semenova O.S. Optimizatsiya potokov obshchestvennogo transporta v gorodskoy srede // Voprosy sovremennoy nauki i praktiki. Universitet im. V.I. Vernadskogo. 2008. №1-1(11). S. 70-79. EDN ULQAMF.
14. Malkina E.G., Buylova M.V., Koryagin S.I. Analiz traektoriy dvizheniya sochlenennykh avtobusov po ulichno-dorozhnoy seti goroda // Mir transporta i tekhnologicheskikh mashin. 2024. №2-2(85). S. 52-60. DOI 10.33979/2073-7432-2024-2-2(85)-52-60.
15. Buylova M. V. Klassifikatsiya avtobusov dlya tseley organizatsii marshrutnykh setey passazhirskogo transporta obshchego pol'zovaniya // Tekhniko-tehnologicheskie problemy servisa. 2023. №4(66). S. 64-70. EDN UOXWPJ.

**Builova Maria Valerievna**

Immanuel Kant Baltic Federal University

Address: 236041, Russia, Kaliningrad, A.Nevskogo Str. 14

Senior Lecturer

E-mail: MBuilova@kantiana.ru

**Koryagin Sergey Ivanovich**

Immanuel Kant Baltic Federal University

Address: 236041, Russia, Kaliningrad, A.Nevskogo Str. 14

Doctor of Technical Sciences

E-mail: SKoryagin@kantiana.ru

О.Д. ПОКРОВСКАЯ

## ЦИФРОВЫЕ АССИСТЕНТЫ В УПРАВЛЕНИИ ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНЫМ ПЕРЕВОЗОЧНЫМ ПРОЦЕССОМ

**Аннотация.** Предложены инновационные концепт-модели «цифровых ассистентов» поездного диспетчера и приемосдатчика для обеспечения безопасного движения поездов за счет решений по автоматизации принятия решений, электронного документооборота, нивелирования человеческого фактора, а также для принятия бизнес-решений «со скоростью клика» и экономии эксплуатационных расходов ОАО «РЖД».

**Ключевые слова:** цифровой ассистент, приемосдатчик, поездной диспетчер, заполняемость контейнерного поезда, динамический интервал, график движения

### **Введение**

Актуальность исследования связана с вызовом: обеспечить быстроту и правильность выбора диспетчерского приема и оформления документов при усилении влияния человеческого фактора на риски, угрожающие безопасности движения поездов.

Цель: разработать концепт-модель «цифровых ассистентов» для нивелирования рисков, связанных с человеческим фактором, чтобы принимать экспресс-решения в оперативной обстановке при неукоснительном обеспечении безопасности движения поездов.

Задачи: для совершенствования технологии безопасности движения поездов разработать:

1) концепцию, модель и методику «цифрового ассистента» для «подсказки» эффективных диспетчерских приемов при построении и исполнении графика движения, включая прогноз времени следования поезда и исключение конфликтных ситуаций (часть 1);

2) концепцию, модель и методику «цифрового ассистента» для оценки заполняемости поезда, интегрирующего результаты расчета двадцатифутового эквивалента с электронным документооборотом, включая автоматизацию бизнес-процессов и оптимизацию загрузки и распределения грузов между вагонами (часть 2).

### **Материал и методы**

Оригинальные прикладные цифровые инструменты, соответствующие нормативным и технико-эксплуатационным требованиям к обеспечению безопасного движения поездов, методы теории систем, логистики, экономико-математического моделирования, динамического программирования.

### **Теория**

Объектом исследования является цифровизация работы железнодорожного транспорта, а предметом исследования – разработка цифровых ассистентов для нивелирования рисков, связанных с человеческим фактором, при неукоснительном обеспечении безопасности движения поездов.

Согласно статистике, 99% всех технологических нарушений происходят в связи с человеческим фактором, а не отказом технических средств и оборудования. Это свидетельствует, что человек является «слабым звеном» в системе организации перевозочного процесса на железных дорогах, что периодически приводит к отклонению поездов от графика движения, внеплановым задержкам и дополнительному износу оборудования.

Повышения надёжности перевозочного процесса можно достичь внедрением современных технических средств и совершенствованием процесса управления движением поездов. В настоящее время ведутся активные работы (один из примеров – внедрение «виртуаль-

ной сцепки» на Восточном полигоне). Подобные методы позволяют добиться повышения пропускной способности железных дорог, однако приводят к повышению процента опоздания поездов и снижению энергоэффективности их движения.

В связи с этим актуальным является вопрос разработки научно обоснованных решений, на основе которых возможно создание автоматизированных программных комплексов, «помогающих» поездному диспетчеру оперативно принимать решения в нестандартных ситуациях.

Немаловажным является и тот факт, что трансформация логистической транспортной системы Российской Федерации под санкционным влиянием обострила проблемы планирования и организации контейнерных перевозок. Ожидаемый рост объемов контейнеризации до 16-20 % в 2035 году [1] создаст дополнительный спрос на контейнерные перевозки и объективно потребует ответа на вызов: обеспечить правильность оценки загрузки вагонов, размещения груза и распределения груза между вагонами с учетом рациональной заполняемости контейнерных поездов, а также автоматизацию бизнес-процессов для снижения ошибки человека при расчете и оформлении сопроводительной и коммерческой документации.

Одной из проблем является слабое развитие инструментария оценки правильности формирования и полноценной заполняемости контейнерных поездов в двадцатифутовом эквиваленте (ДФЭ). Так, доля схода вагонов при неправильной погрузке составила порядка 30 % [2]. Во многом это было связано с ошибками человека при проведении расчетов и оформлении документов. Как следствие, при нерациональном формировании поездов возрастают и эксплуатационные расходы: меньшим количеством ниток в графике можно перевозить больше грузов. Для этого нужно обеспечить полноценное заполнение контейнерных поездов в 92 %. В настоящее время этот процент, например, в дальневосточном направлении перевозок, составляет всего 75 % [3].

Несмотря на то, что перевозка контейнеров по сети ОАО «РЖД» в 2023 году выросла на 14% и достигла 7,4 млн ТЕУ [4], существует проблема неполной загрузки контейнерных поездов. При этом, рациональная заполняемость подвижного состава является не только основой для выполнения плана погрузки отдельного поезда, но и выполнения ОАО «РЖД» заявленных объемов перевозок в целом, что приобретает особую важность для подсанкционной экономики. Число контейнерных поездов, одновременно находящихся в движении, постоянно растет, превышая в отдельные сутки 700 единиц и составляет порядка 15% от всех поездов сети [5].

Ситуация усложняется проблемой недостаточного развития автоматизированного алгоритмического и методического инструментария для оценки правильности формирования и заполняемости поезда [6-8]. Функционал автоматизированных систем железнодорожного транспорта, таких, как АРМ ПКП, АС ЭТРАН и ЕАСАПР АРЛ не позволяет одновременно оформить документацию на контейнерный поезд в целом и оценить заполняемости контейнерного поезда в ДФЭ. Появление в АС ЭТРАН технологии «Автоагент» на контейнерный поезд упрощает, но не снимает проблему.

Таким образом, решения по планированию и организации контейнерных перевозок не являются комплексными, отсутствуют инструменты анализа рациональности формирования контейнерных поездов, не исключаются ошибки человека при расчетах и оформлении документации, что в условиях роста объемов контейнерных перевозок, удлинения и усложнения логистических цепей доставки, выстраиваемых ОАО «РЖД» в волатильной экономике, обуславливает актуальность вопроса.

На рисунке 1 представлена актуальность рассматриваемой проблематики в текущей ситуации.



Рисунок 1 – Актуальность рассматриваемой проблематики в текущей ситуации

Как видно по рисунку 1, наблюдается существенное влияние «человеческого фактора» на безопасность движения поездов.

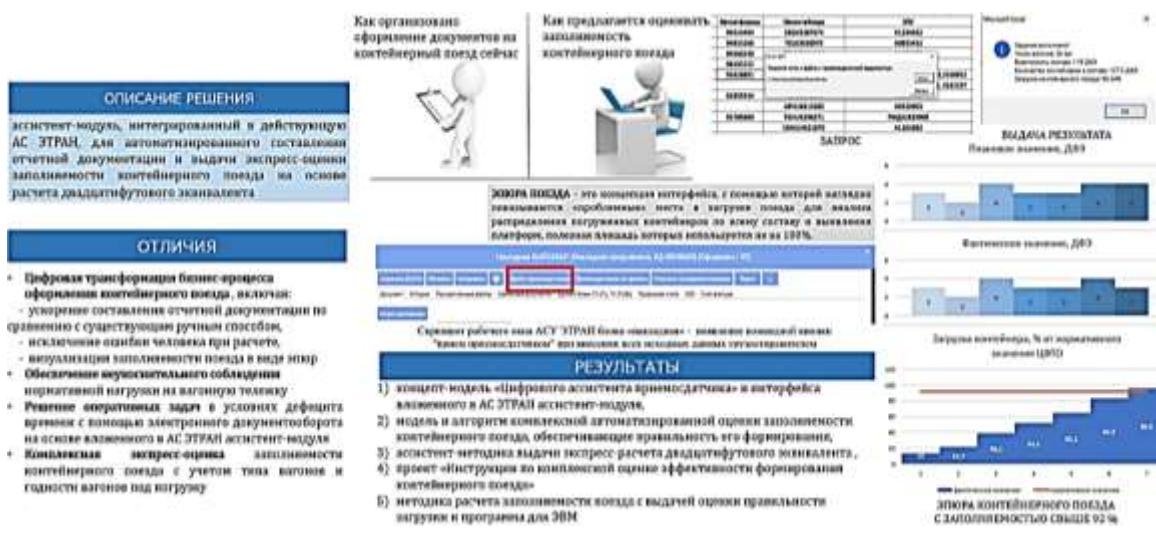
### Результаты

Предлагаемое решение по цифровым ассистентам состоит из двух частей.

Разрабатываемое в исследовании решение представлено двумя цифровыми ассистентами. В общем виде на рисунках 2 и 3 показано сущностное описание каждого цифрового ассистента.



Рисунок 2 – Общая характеристика цифрового ассистента для поездного диспетчера



*Рисунок 3 – Общая характеристика цифрового ассистента для приемосдатчика*

Функциональные особенности «цифрового ассистента» поездного диспетчера следующие:

- совершенствование управления движением поездов с учётом динамического интервала между поездами для предотвращения отклонения поездов от графика движения, «нагоны» (сближения) поездов и их сгущение на участке с помощью динамического интервала;
- установление динамического интервала между поездами для исключения/сокращения опозданий поездов при обеспечении потребной пропускной способности и устойчивости графика движения поездов;
- автоматизированная выдача рекомендации принятия решений поездным диспетчерам, обеспечивающая анализ поездной обстановки: на основе полученных результатов подбор рационального диспетчерского приёма и выдача его поездным диспетчерам в качестве рекомендации.

Функциональные особенности «цифрового ассистента» приемосдатчика:

- совершенствование планирования и организации железнодорожных контейнерных перевозок в части обеспечения рациональной заполняемости контейнерных поездов;
- оценка заполняемости и параметров формирования контейнерных поездов за счет рационального размещения грузов, исключения нарушений местных технических условий и ошибки человека при расчетах и оформлении документации;
- автоматизированный расчет заполняемости контейнерного поезда;
- оперативное и безошибочное размещение контейнеров на платформе.

### *Обсуждение*

Рассмотрим отличительные характеристики предлагаемых «цифровых ассистентов».

По части 1 решения («цифровой ассистент поездного диспетчера») отличия от существующих АСУ следующие: 1) построение прогнозного графика движения с учетом отклонений для всех категорий поездов: грузовых, пассажирских и высокоскоростных, а также характера движения на основе анализа оперативной обстановки; 2) решение оперативных задач с помощью подсказок-рекомендаций в условиях дефицита времени; 3) предиктивная экспресс-оценка поездной обстановки.

Предлагаемое техническое решение отличается от существующими возможностью построения прогнозного графика движения поездов с учётом характера их движения, а также автоматизацией анализа оперативной поездной обстановки на диспетчерском участке и выдачи на ее основании подсказок поездному диспетчеру в виде ассистент-методики о наиболее рациональном диспетчерском приёме.

Новизна технического решения состоит в учёте отклонений при движении поездов в целях оптимизации организации движения поездов.

Уникальностью является учёт отклонений не только для грузовых, но и для пассажирских и высокоскоростных поездов.

Техническое решение позволяет увеличить энергоэффективность движения поездов, а также добиться повышения показателей графика движения поездов [9].

По части 2 решения («цифровой ассистент приемосдатчика») отличия от существующих АСУ следующие: 1) цифровая трансформация бизнес-процесса оформления контейнерного поезда, включая: ускорение составления отчетной документации по сравнению с существующим ручным способом, исключение ошибки человека при расчете, визуализация заполняемости поезда в виде эпюра; 2) обеспечение неукоснительного соблюдения нормативной нагрузки на вагонную тележку; 3) решение оперативных задач в условиях дефицита времени с помощью электронного документооборота на основе вложенного в АС ЭТРАН ассистент-модуля; 4) комплексная экспресс-оценка заполняемости контейнерного поезда с учетом типа вагонов и годности вагонов под погрузку.

Предлагаемое техническое решение отличается от существующих исключением человеческой ошибки в процессе расчетов ручным способом и позволяет оптимизировать процесс синхронизации переноса данных расчета двадцатифутового эквивалента (далее – ДФЭ) в акты, а также автоматизацией анализа рациональности формирования и заполняемости контейнерного поезда и выдачи на ее основании подсказок приемосдатчику в виде ассистент-методики о соответствии требованиям местных технических условий (далее – МТУ).

Новизна технического решения состоит в том, что, в отличие от АС ЭТРАН, функционал «цифрового ассистента» предполагает расчет дефицита ДФЭ в контейнерном поезде с расстоянием перевозки более 2300 км; автоматическое создание АОФ ГУ-23ВЦ на основании произведенных в подсистеме расчетов и автоматическое создание на основании АОФ ГУ-23ВЦ накопительной ведомости ФДУ-92.

Уникальностью является комплексность подхода к экспресс-оценке заполняемости и рациональности размещения грузов в поезде.

Техническое решение позволяет оптимизировать маршруты и расписания поездов, оптимизировать загрузку контейнеров и распределение грузов между вагонами [10-12].

### **Выходы**

Экономические эффекты разработки следующие.

Потенциальный эффект для ОАО «РЖД» при условии интеграции решения ««Цифровой ассистент» поездного диспетчера» в действующие АСУ: 3,9 млрд.руб./год.

Потенциальный эффект для ОАО «РЖД» при условии интеграции решения ««Цифровой ассистент» приемосдатчика» в действующие АСУ: 6,9 млрд.руб./год. Общий эффект от предложений «цифровые ассистенты» по выполненным в исследовании расчетам может достигать 10, 8 млрд.руб. в год по сети ОАО «РЖД».

Результаты работы могут быть полезны при автоматизации технологических процессов работы железнодорожного транспорта. Разработанный цифровой многофункциональный экспресс-инструментарий позволит принимать оперативные решения «со скоростью клика» в формате «цифровой ассистент», включая алгоритмическое, программное, экономико-математическое и концептуальное обеспечение - ассистент-модули, интегрированные в действующие АСУ.

Предложены концепт-модели «цифровых ассистентов» поездного диспетчера и приемосдатчика для обеспечения безопасного движения поездов за счет решений по автоматизации принятия решений, электронного документооборота, нивелирования человеческого фактора, а также для принятия бизнес-решений «со скоростью клика» и экономии эксплуатационных расходов ОАО «РЖД».

Дальнейшие изыскания могут быть направлены на детальную техническую проработку и интеграцию «цифровых ассистентов» в программно-аппаратный комплекс ОАО «РЖД»

для общесетевого применения.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Объемы перевозок в России [Электронный ресурс]. URL: <https://www.interfax.ru/world/951666>
2. Статистика происшествий на железных дорогах: Отчет МСЖД 2022 [Электронный ресурс]. URL: <https://zdmira.com/articles/otchet-mszhd-2022-statistika-proisshestvij-na-zheleznykh-dorogakh>.
3. Уровень контейнеризации грузов в РФ остается низким [Электронный ресурс]. URL: <https://www.rzd-partner.ru/zhd-transport/comments/uroven-konteinernizatsii-gruzov-v-rf-ostaetsya-nizkim/>.
4. Перевозка контейнеров по сети РЖД в 2023 году выросла на 14 % [Электронный ресурс]. URL: <https://www.infranews.ru/logistika/zheleznaya-doroga/64096-perevozka-kontejnerov-po-seti-rzhd-v-2023-godu-vyrosla-na-14-i-dostigla-7-4-mln-teu/>.
5. Грузы собираются в контейнеры [Электронный ресурс]. URL: <https://index1520.com/news/gruzysobirayutsya-v-konteinery-kak-menyaayutsya-perevozki-i-poyavlyayutsya-novye-servisy/>.
6. Сотников Е.А., Шенфельд К.П. Неравномерность грузовых перевозок в современных условиях и её влияние на потребную пропускную способность участков // Вестник ВНИИЖТ. №5. 2011. С. 3-9.
7. Майоров А.В., Егорова Н.Ю. Цифровые двойники и их экономически целесообразное использование в сфере логистики // Техник транспорта: образование и практика. 2024. Т. 5. №2. С. 173-178. DOI 10.46684/2687-1033.2024.2.173-178. EDN ACIQJN.
8. Климов А.А., Куприяновский В.П., Куренков П.В., Мадяр О.Н. Цифровые транспортные коридоры для перевозок грузов и пассажиров // Вестник транспорта. 2017. №10. С. 26-30. EDN ZIVZEL.
9. Марченко М.А., Никифорова Г.И. Экономическая эффективность организации пропуска контейнерных поездов // Транспортное дело России. 2023. №3. С. 76-84. DOI 10.52375/20728689\_2023\_3\_76. EDN YCPQVS.
10. Шевердова М.В., Полиактов Д.А., Покровская О.Д. Алгоритмизация решения задачи выбора формулы закрепления подвижного состава тормозными башмаками согласно ПТЭ 2022 г. // Экономика железных дорог. 2023. №10. С. 80-86. EDN XRICOO.
11. Шевердова М.В., Покровская О.Д., Болдырев А.С. [и др.] Расширение функционала «мобильного рабочего места машиниста» // Экономика железных дорог. 2023. №11. С. 76-82. EDN KLRRXK.
12. Шевердова М.В. Методика принятия решений по погрузке и оформлению документов на контейнерный поезд // Экономика железных дорог. 2023. №12. С. 45-54. EDN HIMJUS.
13. Когтева А.И., Буйлова М.В., Фирсов Д.Н. К вопросу транспортного районирования города Калининграда // Мир транспорта и технологических машин. 2024. №2-2(85). С. 3-11. DOI 10.33979/2073-7432-2024-2-2(85)-3-11. EDN PAWCIT.
14. Новиков А.Н., Севостьянов А.Л., Кулев М.В., Кулев А.В. Интеграция мнения специалистов при выборе методов обследования пассажиропотоков // Актуальные вопросы инновационного развития транспортного комплекса: Материалы 2-ой Международной научно-практической конференции. Орел: ГУ УНПК. 2012. С. 101-107. EDN UURZBB.
15. Новиков А.Н., Кулев А.В., Катунин А.А. [и др.] Оптимизация маршрутов пассажирского транспорта в г. Орле // Мир транспорта и технологических машин. 2015. №3(50). С. 115-122. EDN ULELSZ.

### Покровская Оксана Дмитриевна

Петербургский государственный университет путей сообщения Императора Александра I

Адрес: 190031, Россия, Санкт-Петербург, Московский пр., 9

Д.т.н., доцент, зав. кафедрой «Управление эксплуатационной работой»

E-mail: pokrovskaya@pgups.ru

O.D. POKROVSKAYA

## DIGITAL ASSISTANTS IN RAILWAY TRANSPORTATION PROCESS MANAGEMENT

**Abstract.** Innovative concept models of «digital assistants» of a train dispatcher and a transponder are proposed to ensure safe train movement through solutions for automating decision-making, electronic document management, leveling the human factor, as well as for making business decisions «at the speed of a click» and saving operating costs of Russian Railways.

**Keywords:** digital assistant, receiver, train dispatcher, container train occupancy, dynamic interval, timetable.

**BIBLIOGRAPHY**

1. Ob"emy perevozok v Rossii [Elektronnyy resurs]. URL: <https://www.interfax.ru/world/951666>.
2. Statistika proisshestviy na zheleznykh dorogakh: Otchet MSZHD 2022 [Elektronnyy resurs]. URL: <https://zdmira.com/articles/otchet-mszhd-2022-statistika-proisshestviy-na-zheleznykh-dorogakh>.
3. Uroven` konteynerizatsii gruzov v RF ostaetsya nizkim [Elektronnyy resurs]. URL: <https://www.rzd-partner.ru/zhd-transport/comments/uroven-konteynerizatsii-gruzov-v-rf-ostaetsya-nizkim/>.
4. Perevozka konteynerov po seti RZHD v 2023 godu vyrosla na 14 % [Elektronnyy resurs]. URL: <https://www.infranews.ru/logistika/zheleznaya-doroga/64096-perevozka-kontejnerov-po-seti-rzhd-v-2023-godu-vyrosla-na-14-i-dostigla-7-4-mln-teu/>.
5. Gruzy sobirayutsya v konteynery [Elektronnyy resurs]. URL: <https://index1520.com/news/gruzy-sobirayutsya-v-konteynery-kak-menyaются-perevozki-i-poyavlyayutsya-novye-servisy/>.
6. Sotnikov E.A., Shenfel'd K.P. Neravnomernost` gruzovykh perevozok v sovremennykh usloviyakh i eio vliyanie na potrebnuyu propusknuyu sposobnost` uchastkov // Vestnik VNIZHT. №5. 2011. S. 3-9.
7. Mayorov A.V., Egorova N.YU. Tsifrovye dvoyники i ikh ekonomicheski tselesoobraznoe ispol`zovanie v sfere logistiki // Tekhnik transporta: obrazovanie i praktika. 2024. T. 5. №2. S. 173-178. DOI 10.46684/2687-1033.2024.2.173-178. EDN ACIQJN.
8. Klimov A.A., Kupriyanovskiy V.P., Kurenkov P.V., Madyar O.N. Tsifrovye transportnye koridory dlya perevozok gruzov i passazhirov // Vestnik transporta. 2017. №10. S. 26-30. EDN ZIVZEL.
9. Marchenko M.A., Nikiforova G.I. Ekonomicheskaya effektivnost` organizatsii propuska konteynernykh poezdov // Transportnoe delo Rossii. 2023. №3. S. 76-84. DOI 10.52375/20728689\_2023\_3\_76. EDN YCPQVS.
10. Sheverdova M.V., Poliktov D.A., Pokrovskaya O.D. Algoritmizatsiya resheniya zadachi vybora formuly zakrepleniya podvizhnogo sostava tormoznymi bashmakami soglasno PTE 2022 g. // Ekonomika zheleznykh dorog. 2023. №10. S. 80-86. EDN XRICOO.
11. Sheverdova M.V., Pokrovskaya O.D., Boldyrev A.S. [i dr.] Rasshirenie funktsionala «mobil'nogo rabochego mesta mashinista» // Ekonomika zheleznykh dorog. 2023. №11. S. 76-82. EDN KLRRXK.
12. Sheverdova M.V. Metodika prinyatiya resheniy po pogruzke i oformleniyu dokumentov na konteynernyy poезд // Ekonomika zheleznykh dorog. 2023. №12. S. 45-54. EDN HIMJUS.
13. Kogteva A.I., Buyllova M.V., Firsov D.N. K voprosu transportnogo rayonirovaniya goroda Kaliningrada // Mir transporta i tekhnologicheskikh mashin. 2024. №2-2(85). S. 3-11. DOI 10.33979/2073-7432-2024-2-2(85)-3-11. EDN PAWCIT.
14. Novikov A.N., Sevost'yanov A.L., Kulev M.V., Kulev A.V. Integratsiya mneniya spetsialistov pri vybere metodov obsledovaniya passazhiropotokov // Aktual`nye voprosy innovatsionnogo razvitiya transportnogo kompleksa: Materialy 2-oy Mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii. Orel: GU UNPK. 2012. S. 101-107. EDN UURZBB.
15. Novikov A.N., Kulev A.V., Katunin A.A. [i dr.] Optimizatsiya marshrutov passazhirskogo transporta v g. Orle // Mir transporta i tekhnologicheskikh mashin. 2015. №3(50). S. 115-122. EDN ULELSZ.

**Pokrovskaya Oksana Dmitrievna**

Emperor Alexander I St. Petersburg State Transport University  
 Address: 190031, Russia, Saint Petersburg, Moskovsky ave., 9  
 Doctor of Technical Sciences  
 E-mail: pokrovskaya@pgups.ru

## **ЭКСПЛУАТАЦИЯ АВТОМОБИЛЬНОГО ТРАНСПОРТА**

УДК 656.13: 62-4

doi: 10.33979/2073-7432-2025-2-2(89)-47-54

И.А. ДЕМБОВСКИЙ, С.А. РОДИМЦЕВ, Н.Е. ТУРБИН

### **ГИДРОФОБНЫЕ СВОЙСТВА ПОВЕРХНОСТЕЙ, КАК ХАРАКТЕРИСТИКА АВТОМОБИЛЬНЫХ ДЕФЛЕКТОРОВ**

**Аннотация.** Современные аддитивные технологии предполагают использование новых материалов, характеристики которых не всегда изучены, применительно к задачам сферы применения. Представлены результаты сравнительного исследования гидрофобных свойств пластика, применяемого для 3D-печати некоторых автомобильных деталей, предназначенных для формирования контролируемых жидкостных потоков. Разработан гидравлический стенд и получены экспериментальные значения краевого угла смачивания и максимальной ширины распространения потока в зоне контакта с 3D-поверхностью. Установлено, что вероятность проникновения влаги во внутреннее пространство автомобиля, вследствие «рассеивания» капель жидкости на дефлекторах, можно снизить путем увеличения гидрофобности отражающей поверхности в зоне контакта с набегающим потоком

**Ключевые слова:** автомобильный дефлектор, гидрофобность, аддитивные технологии, 3D-печать, краевой угол смачивания

#### **Введение**

В настоящее время активно развивается производственный сектор, в том числе в области машиностроения и автомобилестроения. Получают все большее распространение, так называемые аддитивные технологии [1]. В отличие от традиционных методов формирования детали за счет материала из массива заготовки, основу новых технологий составляет процесс изготовления физического объекта методом послойного нанесения материала.

Под аддитивным производством понимают процесс выращивания изделий на 3D-принтере по CAD-модели. Преимущества аддитивных технологий заключаются в улучшенных свойствах готовой продукции, возможность изготовления изделий со сложной геометрией, мобильность производства и ускорение обмена данными. Совместное исследование нескольких европейских университетов показало, что экономия сырья при аддитивном производстве может достигать 75-80 % [2]. Благодаря всем этим качествам аддитивное производство, в сравнении с традиционными производственными технологиями, обладает значительным потенциалом в том, что касается сокращения затрат, энергосбережения и снижения вредных выбросов в атмосферу.

Выделяют следующие технологии аддитивного производства [3]: FDM, SLA, SLS, LOM, MJM, PolyJet, 3DP, CLIP и другие. FDM-печать является наиболее распространенным способом 3D-печати в мире, на основе которого работают миллионы 3D-принтеров - от самых дешевых до промышленных систем трехмерной печати. При этом реализуется послойное построение изделия из расплавленной пластиковой нити.

Материал пластика для 3D-печати достаточно обширен. Типы материала отличаются цветом, плотностью, диаметром нити и т.д. Наиболее часто используется пластик ABS, обладающий плотностью  $1,06 \text{ г см}^{-3}$ .

Важно отметить, что изготовление деталей послойным наплавлением материала отягощено волнистостью поверхности вследствие линейного наложения пластика. Для сглаживания поверхности используют механический, термический и химический (ацетоновая баня) методы [4].

В автомобильной промышленности детали, изготовленные из ABS пластика получают как традиционными, так и аддитивными технологиями [5]. Предприятия, многие частные компании и отдельные умельцы используют 3D-печать для производства таких деталей, как корпуса электронного оборудования, защитные и декоративные накладки, жалюзийные реб-

ра, детали кузова и многое другое. При этом, на наш взгляд, недостаточно внимания уделяется такому свойству материала, как характер его взаимодействия с водой.

Высокая смачиваемость поверхности водой, обеспечивающая ее растекание определяет гидрофильность поверхности материала. Напротив, гидрофобность – стремление вещества избежать взаимодействия с водой [6]. Степень влияния данной характеристики материала детали на способность ее удовлетворять заданным функциям, легко оценить на примере дефлекторов боковых окон автомобиля. Основная их функция – это создание более комфортных условий для водителя и пассажиров при езде с приоткрытыми окнами в любую погоду и с любой скоростью. Одна из главных задач - защита салона авто от воды, снега и грязи. В этом случае, очевидно, что эффективность дефлектора будет зависеть от гидрофобности его поверхности [14]. Таким образом, несмотря на бурное развитие аддитивных технологий, данный аспект применения их отдельных элементов недостаточно изучен. Следовательно, изучение гидрофобных свойств поверхности материала деталей, изготовленных методом 3D печати является актуальным.

Цель настоящего исследования состоит в определении характера взаимодействия с водой поверхности деталей, изготовленных методом 3D печати, в сравнении с другими материалами.

Задачи исследования заключаются в принятии адекватных теоретических предпосылок описания процесса натекания жидкости на отражающую поверхность и методик опытной проверки; разработке специализированного лабораторного оборудования; экспериментальном определении характеристик интенсивности молекулярного взаимодействия поверхностей некоторых материалов с водой и формулировании соответствующих выводов.

#### **Материал и методы**

В качестве субъекта исследования применялись детали из пластика ABS, полученные методом 3D-печати, в черновом (исходном) состоянии, а также с поверхностью, обработанной парами ацетона. В качестве альтернативных поверхностей применялось чистое стекло, а также стеклянная поверхность, обработанная мыльным раствором C17H33COOK и моторным маслом марки 5W-30.

Степень смачивания поверхностей определялась углом контакта (краевым углом смачивания). Для его оценки применялся описанный в литературе метод лежащей капли [7]. Метод основан на измерении угла контакта неподвижной капли в точках пересечения между контуром капли и проекцией поверхности с использованием фотоизображения [15]. На тестируемую поверхность капля жидкости помещается с помощью шприца. Средний диаметр капли должен составлять 2-5 мм, что гарантирует независимость краевого угла от диаметра капли. Угол смачивания определяли по фотоизображению, с помощью утилиты «Формат фигуры» для касательной к поверхности капли, в месте ее основания (рис. 1).

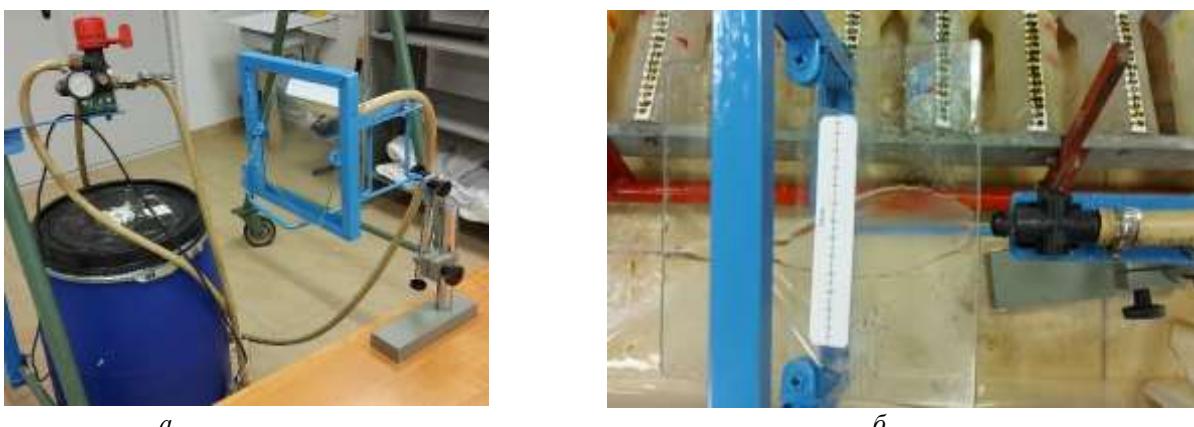


Рисунок 1 – Экспериментальный гидравлический стенд и устройство для исследования растекания жидкости на гидрофобной поверхности (а) и общий вид характера растекания (б)

С целью изучения условий растекания слоя жидкости на отражающей поверхности, разработан гидравлический стенд (рис. 2). Он состоит из напорной и специализированной частей. Последняя включает штатив с жестко закрепленной рамкой и кронштейн крепления распылителя. В рамке смонтированы врачающиеся держатели листа прозрачного материала (стекла). Держатели позволяют стеклу поворачиваться на требуемый угол  $\gamma$ , относительно оси струи, поступающей из отверстия распылителя. Кронштейн крепления распылителя имеет возможность осевого перемещения. Перпендикулярно прозрачной плоскости смонтировано устройство для крепления фото- и видео аппаратуры, фиксирующей ширину растекания потока на отражающей поверхности. Экспериментом предусматривалось изменение угла  $\gamma$  натекания, в пределах  $10\ldots90^\circ$ , с шагом  $20^\circ$ , расстоянием между соплом и отражающей поверхностью – 10 мм и давлением в гидромагистрали 0,01; 0,05; 0,1 и 0,15 МПа.

### **Теория и расчет**

Изучению гидрофобных свойств поверхностей посвящено немало работ, как у нас в стране, так и за рубежом [8-10, 13]. В частности, анализ процесса растекания жидкости на отражающей пластине подробно выполнен в работе [9, 12]. Здесь, используя законы сохранения энергии, массы и импульса, а также условия равновесия капли, с учетом поверхностных натяжений на границах разделов жидкость-газ, жидкость-твердое тело, твердое тело-газ и доли смоченной поверхности и ее шероховатости, получена зависимость максимальной ширины растекания жидкости на отражающей поверхности, от свойств контактирующего твердого тела, самой жидкости, режимов ее истечения и угла натекания:

$$b_{max} = \pi \frac{d_{отв}}{\cos \gamma} \left( \frac{1}{8} W_{e\Theta z} + \frac{1}{1 - \cos \Theta} \right), \quad (1)$$

где  $b_{max}$  – максимальная ширина слоя жидкости на отражающей поверхности, м;

$W_{e\Theta z}$  – измененное по краевому углу  $\Theta$  число Вебера перпендикулярной составляющей  $\omega_z$  скорости потока;

$\gamma$  – угол натекания рабочей жидкости на отражающую поверхность дефлектора;

$\Theta$  – краевой угол смачивания отражающей поверхности.

Функция  $b_{max}$  из уравнения (1) использована в качестве контролируемого критерия для оценки реальной смачиваемости тестируемых поверхностей, при заданных условиях.

Как следует из (1), краевой угол смачивания  $\Theta$  относится к важным параметрам, характеризующим степень смачивания поверхностей материалов, применяемых для изготовления автомобильных дефлекторов. Во многом благодаря степени гидрофобности (гидрофильности) отражающей поверхности будут зависеть процессы растекания жидкости, формирования пленки и ее дробления на капли.

Согласно уравнению Юнга [7, 11], существует взаимосвязь между углом контакта  $\theta$ , поверхностным натяжением жидкости  $\sigma_{LG}$ , межфазным натяжением  $\sigma_{SL}$ , между жидкостью, твердым телом и поверхностной свободной энергией  $\sigma_{SG}$ :

$$\cos \Theta = \frac{\sigma_{SG} - \sigma_{SL}}{\sigma_{LG}}. \quad (2)$$

В этом случае, являющийся мерой смачиваемости твердого вещества жидкостью угол  $\Theta$  будет образован на границе между поверхностью жидкости и твердым телом.

### **Результаты и обсуждение**

Результаты эксперимента показали, что значение краевого угла  $\Theta$  смачивания зависит от вида и состояния материала твердой среды. На рисунке 2 демонстрируется характер свободного растекания контрольной капли на исходной поверхности, полученной из пластика ABS методом 3D-печати. Как видно, растекание происходит неравномерно из-за наличия на поверхности пластика линий его наложения 3D-принтером. «Растяжение» капли происходит вдоль этих линий. Очевидно, и краевой угол смачивания будет большим, для поперечного сечения капли, перпендикулярного, относительно линий наложения, что подтверждается экспериментальными данными.

Так, для поперечного сечения контрольной капли, перпендикулярно направлению линий наложения, угол  $\Theta$ , в среднем, равен  $75^\circ$ . Напротив, для поперечного сечения симметричного линиям наложения пластика, угол  $\Theta$  принимает значение  $60^\circ$ . Среднее значение угла

$\Theta$  для необработанной поверхности детали из пластика ABS, полученной 3D печатью, составило  $68^\circ$ . Постобработка поверхности детали методом «ацетоновой бани» обеспечивает хорошее сглаживание, до глянца, поверхности за счет сплавления слоев пластика. Этим достигается равномерность растекания и увеличение гидрофильности контактной поверхности до  $\Theta=51^\circ$ , что меньше  $\Theta$  для необработанной детали в 1,2-1,5 раза или на 15-32 %.

Оценка гидрофильности чистого стекла показала значение угла  $\Theta=34^\circ$ . В то же время, краевой угол смачивания для стекла, обработанного жидким мылом равен  $7^\circ$ . Гидрофильность стекла, обработанного моторным маслом оценивается углом  $\Theta=47^\circ$ .

Таблица 1 содержит полученные в экспериментах характеристики интенсивности молекулярного взаимодействия некоторых поверхностей с водой. Результаты эксперимента по исследованию изменения ширины поперечного сечения натекающего потока приведены в таблице 2.

Очевидно, что максимальная ширина потока в зоне встречи с отражающей поверхностью дефлектора определяется как углом натекания и давлением (скоростью потока), так и гидрофильными свойствами поверхности. Ширина поперечного сечения увеличивается с повышением давления и увеличением угла  $\gamma$  встречи. Наибольшие значения  $b_{\max}$  характерны для растекания по стеклу, обработанному C17H33COOK (при  $\Theta=7^\circ$ ). Так, если при давлении в гидросистеме  $\Delta P=0,1$  МПа ширина  $b_{\max}$  на стекле, обработанном жидким мылом изменилась от 105 до 200 мм, при углах контакта от  $10^\circ$  до  $90^\circ$ , то для чистого стекла  $b_{\max}$  принимала значение от 90 до 180 мм, при средних показателях по всему эксперименту 128 мм против 113 мм.

Таблица 1 - Значения краевого угла смачивания различных контактных поверхностей

Твердая среда	$\Theta$ , град $\pm \sigma$
Пластик ABS, 3D-печать:	
- сечение вдоль линий наложения	$60 \pm 3,8$
- сечение поперек линий наложения	$75 \pm 4,0$
- поверхность, подвергнутая постобработке (ацетоновая баня)	$51 \pm 5,2$
Стекло:	
- чистое	$34 \pm 4,2$
- обработанное C17H33COOK	$7 \pm 1,0$
- обработанное моторным маслом 5W-30	$47 \pm 4,1$



Рисунок 2 – Общий вид растекания контрольной капли на исходной (а) и постобработанной (б) поверхности пластика ABS, выполненной методом 3D-печати

Таблица 2 - Изменение ширины поперечного сечения натекающего потока для поверхностей с различной гидрофильтностью

Угол встречи, $\gamma^\circ$	Давление, $\Delta P$ , МПа	Ширина поперечного сечения, $b_{max}$ , мм	
		1	2
<i>Стекло чистое (<math>\Theta=34^\circ</math>)</i>			
10	0,01		40
	0,05		70
	0,1		90
	0,15		100
30	0,01		70
	0,05		95
	0,1		105
	0,15		125
50	0,01		73
	0,05		110
	0,1		130
	0,15		145
70	0,01		85
	0,05		125
	0,1		130
	0,15		165
90	0,01		95
	0,05		120
	0,1		180
	0,15		205
<i>Стекло обработанное С17Н33СООК (<math>\Theta=7^\circ</math>)</i>			
10	0,01		45
	0,05		80
	0,1		105
	0,15		110
30	0,01		70
	0,05		110
	0,1		110
	0,15		130
50	0,01		78
	0,05		120
	0,1		135
	0,15		150
70	0,01		100
	0,05		115
	0,1		135
	0,15		170
90	0,01		95
	0,05		120
	0,1		180
	0,15		200
<i>Стекло обработанное моторным маслом 5W-30 (<math>\Theta=47^\circ</math>)</i>			
10	0,01		5
	0,05		10
	0,1		15
	0,15		20
30	0,01		8
	0,05		10
	0,1		15
	0,15		30
50	0,01		10
	0,05		25
	0,1		40
	0,15		45
70	0,01		30
	0,05		60
	0,1		70
	0,15		75
90	0,01		90
	0,05		110
	0,1		180
	0,15		200

Наиболее компактной оказалась максимальная ширина растекания для стеклянной поверхности, обработанной моторным маслом ( $\Theta=47^\circ$ ). Здесь, пределы значений  $b_{\max}$  при  $\Delta P=0,1$  МПа ограничивались диапазоном 15-180 мм, при углах контакта 10-90°. Отсюда следует, что вероятность проникновения влаги во внутреннее пространство автомобиля, вследствие «рассеивания» капель жидкости на дефлекторах, можно снизить путем увеличения гидрофобности отражающей поверхности в зоне контакта с набегающим потоком.

Установлено, что при увеличенных углах контакта с потоком ( $\gamma=90^\circ$ ) изменение гидрофильных свойств поверхностей не имеет существенного влияния на ширину зоны растекания. К примеру, при  $\Delta P=0,1$  МПа,  $b_{\max}=180$  мм, независимо от вида обработки поверхности.

На рисунке 3 изображен график зависимости  $b_{\max}$  от угла  $\gamma$  натекания потока на отражающую поверхность в зоне устья, при расчетном давлении  $\Delta P=0,1$  МПа для поверхности с краевым углом смачивания  $\Theta=47^\circ$ . Как видно, экспериментальные значения  $b_{\max}$  находятся в области теоретической кривой, описываемой уравнением (1). Сопоставимостью данных установлено, что среднее отклонение экспериментальных значений от теоретических не превышает 8%.

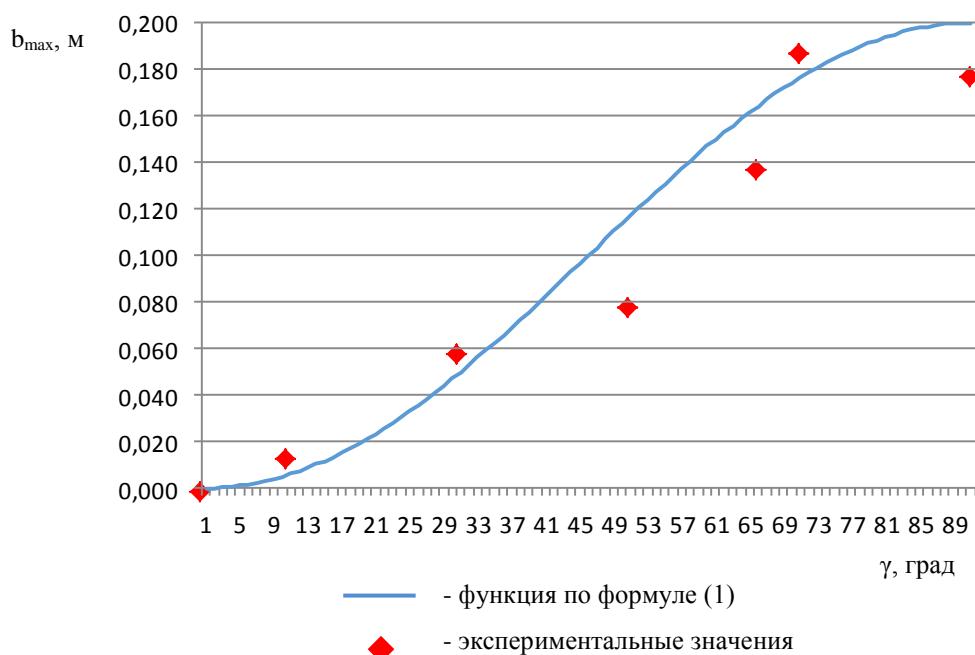


Рисунок 3 – Зависимость ширины поперечного сечения потока на отражающей поверхности дефлектора от угла  $\gamma$  натекания, для  $\Theta=47^\circ$

### Выводы

Результаты выполненного исследования позволяют утверждать следующее.

- Черновая поверхность деталей, изготовленных методом 3D-печати имеет волнистость, вызванную линейным наложением пластика.
- Краевой угол смачивания поверхности детали из пластика ABS в сечении, продольном, относительно линий наложения, на  $15^\circ$  меньше значения краевого угла, полученного в поперечном сечении, относительно линий наложения.
- Среднее значение угла смачивания необработанной поверхности из пластика ABS составляет  $68^\circ$ ; поверхности, обработанной методом ацетоновой бани -  $51^\circ$ , или на 15-32% меньше.
- Поверхность листового стекла имеет краевой угол смачивания -  $34^\circ$ ,  $7^\circ$  и  $47^\circ$ , при отсутствии обработки, обработанной раствором C17H33COOK и моторным маслом, соответственно.
- Все изученные поверхности являются гидрофильными, так как краевой угол  $\Theta$  для

них не превышает 90°. Постобработка поверхностей деталей, изготовленных методом 3D-печати, должна соответствовать их назначению.

6. Вероятность проникновения влаги во внутреннее пространство автомобиля, вследствие «рассеивания» капель жидкости на дефлекторах, можно снизить путем увеличения гидрофобности отражающей поверхности в зоне контакта с набегающим потоком.

## **СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ**

1. Новиков С.В., Рамазанов К.Н. Аддитивные технологии: состояние и перспективы : учебное пособие [Электронный ресурс] / Уфимск. гос. авиац. техн. ун-т. Уфа: УГАТУ, 2022. URL: [https://www.ugatu.su/media/uploads/MainSite/Ob%20universite/Izdateli/El\\_izd/2022-41.pdf](https://www.ugatu.su/media/uploads/MainSite/Ob%20universite/Izdateli/El_izd/2022-41.pdf)
2. Аддитивное производство: на пике завышенных ожиданий [Электронный ресурс] / Умное производство. URL: [http://www.umpro.ru/index.php?page\\_id=17&art\\_id\\_1=610&group\\_id\\_4=110](http://www.umpro.ru/index.php?page_id=17&art_id_1=610&group_id_4=110).
3. Freichel C. Matching Supply and Demand in Collaborative Additive Manufacturing // Enterprise Modelling and Information Systems Architectures. Vol. 16. №1. 2021. DOI:10.18417/emisa.16.1.
4. Gordeev E.G. Widely accessible 3D printing technologies in chemistry, biochemistry and pharmaceutics: applications, materials and prospects [Электронный ресурс] / Russ. Chem. Rev. 2020. №89(12). P. 1507-1561. URL: <https://doi.org/10.1070/RCR4980>.
5. Ласточкин Д.М., Медяков А.А., Костромин Д.В., Бахтин А.А., Семенов К.Д. Анализ перспективы применения 3D-печати при ремонте автомобильного транспорта [Электронный ресурс] / Вестник Поволжского государственного технологического университета. Серия «Материалы. Конструкции. Технологии». 2023. №1(25). С. 51–65. URL: <https://doi.org/10.2568/2542-114X.2023.1.51>.
6. Николаенко М.Н., Минлебаева М.Н. Обзор существующих гидрофобизирующих материалов, используемых в легкой промышленности // Вестник технологического университета. 2015. Т.18. №17.
7. Фролов В.И., Семенов А.П., Гришина И.Н., Кучеров В.Г. Краевой угол смачивания и методы его определения. М.: Издательский центр РГУ нефти и газа (НИУ) им. И.М. Губкина, 2021. 53 с.
8. Бойнович Л.Б., Емельяненко А.М. Гидрофобные материалы и покрытия // Успехи химии. №77(7). 2008. С. 619-638.
9. de la Cruz RM, Mäkiharju SA. Jet impingement on the underside of a superhydrophobic surface // Journal of Fluid Mechanics. 2022. №938. doi:10.1017/jfm.2022.124.
10. Determining superhydrophobic surfaces from an expanded Cassie–Baxter equation describing simple wettability experiments / Kaps S., Adelung R., Schärnberg M., Faupel F., Milenkovic S., Hassel A.W. arXiv:1408.5273. 2014.
11. Майоров А.В., Егорова Н.Ю. Цифровые двойники и их экономически целесообразное использование в сфере логистики // Техник транспорта: образование и практика. 2024. Т. 5. №2. С. 173-178. DOI 10.46684/2687-1033.2024.2.173-178. EDN ACIQJN.
12. Климов А.А., Куприяновский В.П., Куренков П.В., Мадяр О.Н. Цифровые транспортные коридоры для перевозок грузов и пассажиров // Вестник транспорта. 2017. №10. С. 26-30. EDN ZIVZEL.
13. Марченко М.А., Никифорова Г.И. Экономическая эффективность организации пропуска контейнерных поездов // Транспортное дело России. 2023. №3. С. 76-84. DOI 10.52375/20728689\_2023\_3\_76. EDN YCPQVS.
14. Шевердова М.В., Полиэктов Д.А., Покровская О.Д. Алгоритмизация решения задачи выбора формулы закрепления подвижного состава тормозными башмаками согласно ПТЭ 2022 г. // Экономика железных дорог. 2023. №10. С. 80-86. EDN XRICOO.
15. Шевердова М.В., Покровская О.Д., Болдырев А.С. [и др.] Расширение функционала «мобильного рабочего места машиниста» // Экономика железных дорог. 2023. №11. С. 76-82. EDN KLRRXK.

**Дембовский Илья Андреевич**

Орловский государственный аграрный университет имени Н.В. Парадина

Адрес: 302019, Россия, г. Орел, ул. Генерала Родина, д. 69

Соискатель ученой степени кафедры техносферной безопасности, преподаватель многопрофильного колледжа

E-mail: emilyenn@rambler.ru

**Родимцев Сергей Александрович**

Орловский государственный университет имени И.С. Тургенева

Адрес: 302030, Россия, г. Орел, ул. Московская, д. 77

Д.т.н., доцент, профессор кафедры сервиса и ремонта машин

E-mail: rodimcew@yandex.ru

**Турбин Никита Евгеньевич**

Орловский государственный университет имени И.С. Тургенева

Адрес: 302030, Россия, г. Орел, ул. Московская, д. 77

Студент

E-mail: nikitka.turbin@inbox.ru

## HYDROPHOBIC PROPERTIES OF SURFACES AS A CHARACTERISTIC OF CAR DEFLECTORS

**Abstract.** Modern additive technologies involve the use of new materials, the characteristics of which are not always studied, in relation to the tasks of the application area. The results of a comparative study of the hydrophobic properties of plastic used for 3D printing of some automotive parts designed to form controlled liquid flows are presented. A hydraulic stand was developed and experimental values of the contact angle of wetting and the maximum width of flow spreading in the contact zone with the 3D surface were obtained. It was found that the probability of moisture penetration into the interior of the car, due to the «dispersion» of liquid droplets on the deflectors, can be reduced by increasing the hydrophobicity of the reflective surface in the contact zone with the oncoming flow.

**Keywords:** car deflector, hydrophobicity, additive technologies, 3D printing, contact angle

### BIBLIOGRAPHY

1. Novikov S.V., Ramazanov K.N. Additivnye tekhnologii: sostoyanie i perspektivy : uchebnoe posobie [Elektronnyy resurs] / Ufimsk. gos. aviats. tekhn. un?t. Ufa: UGATU, 2022. URL: [https://www.ugatu.su/media/uploads/MainSite/Ob%20universite/Izdateli/El\\_izd/2022?41.pdf](https://www.ugatu.su/media/uploads/MainSite/Ob%20universite/Izdateli/El_izd/2022?41.pdf)
2. Additivnoe proizvodstvo: na pike zavyshennykh ozhidaniy [Elektronnyy resurs] / Umnoe proizvodstvo. URL: [http://www.umpro.ru/index.php?page\\_id=17&art\\_id\\_1=610&group\\_id\\_4=110](http://www.umpro.ru/index.php?page_id=17&art_id_1=610&group_id_4=110).
3. Freichel S. Matching Supply and Demand in Collaborative Additive Manufacturing // Enterprise Modelling and Information Systems Architectures. Vol. 16. №1. 2021. DOI:10.18417/emisa.16.1.
4. Gordeev E.G. Widely accessible 3D printing technologies in chemistry, biochemistry and pharmaceuticals: applications, materials and prospects [Elektronnyy resurs] / Russ. Chem. Rev. 2020. №89(12). R. 1507-1561. URL: <https://doi.org/10.1070/RCR4980>.
5. Lastochkin D.M., Medyakov A.A., Kostromin D.V., Bakhtin A.A., Semenov K.D. Analiz perspektivy primeniya 3D-pechati pri remonte avtomobil'nogo transporta [Elektronnyy resurs] / Vestnik Povolzhskogo gosudarstvennogo tekhnologicheskogo universiteta. Seriya «Materialy. Konstruktsii. Tekhnologii». 2023. №1(25). S. 51-65. URL: <https://doi.org/10.25686/2542-114X.2023.1.51>.
6. Nikolaenko M.N., Minlebaeva M.N. Obzor sushchestvuyushchikh gidrofobiziruyushchikh materialov, ispol'zuemykh v legkoy promyshlennosti // Vestnik tekhnologicheskogo universiteta. 2015. T.18. №17.
7. Frolov V.I., Semenov A.P., Grishina I.N., Kucherov V.G. Kraevoy ugol smachivaniya i metody ego opredeleniya. M.: Izdatel'skiy tsentr RGU nefti i gaza (NIU) im. I.M. Gubkina, 2021. 53 s.
8. Boynovich L.B., Emel'yanenko A.M. Gidrofobnye materialy i pokrytiya // Uspekhi khimii. №77(7). 2008. S. 619-638.
9. de la Cruz RM, M?kharju SA. Jet impingement on the underside of a superhydrophobic surface // Journal of Fluid Mechanics. 2022. №938. doi:10.1017/jfm.2022.124.
10. Determining superhydrophobic surfaces from an expanded Cassie-Baxter equation describing simple wettability experiments / Kaps S., Adelung R., Scharnberg M., Faupel F., Milenkovic S., Hassel A.W. arXiv:1408.5273. 2014.
11. Mayorov A.V., Egorova N.YU. Tsifrovye dvoyники i ikh ekonomicheski tselesoobraznoe ispol'zovanie v sfere logistiki // Tekhnika transporta: obrazovanie i praktika. 2024. T. 5. №2. S. 173-178. DOI 10.46684/2687-1033.2024.2.173-178. EDN ACIQJN.
12. Klimov A.A., Kupriyanovskiy V.P., Kurenkov P.V., Madyar O.N. Tsifrovye transportnye koridory dlya perevozok gruzov i passazhirov // Vestnik transporta. 2017. №10. S. 26-30. EDN ZIVZEL.
13. Marchenko M.A., Nikiforova G.I. Ekonomicheskaya effektivnost' organizatsii propuska konteynernykh poezdov // Transportnoe delo Rossii. 2023. №3. S. 76-84. DOI 10.52375/20728689\_2023\_3\_76. EDN YCPQVS.
14. Sheverdova M.V., Poliktov D.A., Pokrovskaya O.D. Algoritmizatsiya resheniya zadachi vybora formuly zakrepleniya podvizhnogo sostava tormoznymi bashmakami soglasno PTE 2022 g. // Ekonomika zheleznykh dorog. 2023. №10. S. 80-86. EDN XRICOO.
15. Sheverdova M.V., Pokrovskaya O.D., Boldyrev A.S. [i dr.] Rasshirenie funktsionala «mobil'nogo rabochego mesta mashinista» // Ekonomika zheleznykh dorog. 2023. №11. S. 76-82. EDN KLRRXK.

**Dembovsky Ilya Andreevich**

Oryol State Agrarian University  
Adress: 302019, Russia, Orel, st. Generala Rodina, 69  
Postgraduate student  
E-mail: emilyenn@rambler.ru

**Turbin Nikita Evgenievich**

Oryol State University named after I.S. Turgenev  
Adress: 302030, Russia, Orel, st. Moscow, d. 77  
Student  
E-mail: nikitka.turbin@inbox.ru

**Rodimtsev Sergey Alexandrovich**

Oryol State University named after I.S. Turgenev  
Adress: 302030, Russia, Orel, st. Moscow, d. 77  
Doctor of Technical Sciences  
E-mail: rodimcew@yandex.ru

А.С. СЕМЫКИНА, Н.А. ЗАГОРОДНИЙ, Д.О. ЛОМАКИН

## КРИТЕРИИ ОЦЕНКИ РАЦИОНАЛЬНОГО ПЕРИОДА ЭКСПЛУАТАЦИИ ТРАНСПОРТНЫХ СРЕДСТВ

**Аннотация.** В работе рассматривается определение эффективности эксплуатации транспортных средств. С учетом вычисления стоимости владения автомобилем и стоимости владения на 1 км пробега возможно определить рациональный период эксплуатации автомобилей с минимальными затратами на их использование.

**Ключевые слова:** эксплуатация автомобилей, эффективность использования автомобилей, стоимость владения автомобилем, период эксплуатации автомобилем

### **Введение**

В настоящее время при покупке, выборе автомобиля используется параметр – стоимость владения автомобилем, который отображает, во сколько обходится владение автомобилем конкретной марки и модели в течение определенного промежутка времени (периода эксплуатации или срока службы автомобиля). Параметр «стоимость владения автомобилем» используется как физическими лицами, приобретающими транспортное средство для удовлетворения личных нужд, так и юридическими лицами для работы в составе уже существующего или формирующегося автопарка. Для коммерческих организаций и предприятий данный параметр имеет особое значение, т.к. при большом количестве транспортных средств, в существующем автопарке, с учетом стоимости владения автомобилем возможно планирование бюджета организации и экономия материальных и финансовых ресурсов.

Стоимость владения автомобилем определяется на основе суммарных затрат при эксплуатации автомобиля: затраты на топливо, страхование автомобиля, техническое обслуживание и ремонт автомобиля, уборочно-моечные работы, установка дополнительного оборудования и др. [1]. Значение данного параметра определяется при проведении сравнительного анализа нескольких транспортных средств, с целью определения наименьших затрат на эксплуатацию выбранной одной марки и модели. Подсчет фактического значения стоимости владения автомобилем осуществляется покупателем автомобиля с целью экономии собственных средств или продавцом, демонстрирующим покупателю преимущества и недостатки рассматриваемых автотранспортных средств [2]. Кроме того, стоимость владения может быть использована лизинговыми компаниями (или другими финансовыми институтами) для расчёта лизинговых платежей.

Для полноценной и всесторонней оценки эффективности использования автотранспортного средства [3], одного параметра стоимости владения автомобилем недостаточно, т.к. данный параметр позволяет определить только значение издержек при эксплуатации автомобиля, но не позволяет определить рациональное применение автомобиля, обосновать окончательный выбор автомобиля, проанализировать лучшие показатели и технические характеристики автомобиля, оценить преимущества и недостатки по отношению к другим автотранспортным средствам, определить суммы получаемой прибыли и убытков при выполнении работ с участием выбранного автомобиля для предприятий и др. Поэтому вопрос полной оценки эффективности использования транспортных средств является актуальным.

### **Материал и методы**

Для определения эффективности использования выбранного автомобиля необходимо определение параметра - рациональный период эксплуатации (РПЭ) автотранспорта.

РПЭ – это период времени, в течение которого, экономически целесообразно эксплуатировать автомобиль. Окончание рационального периода эксплуатации автотранспорта свидетельствует о необходимости замены автомобиля на новый, с целью снижения расходов на

его эксплуатацию.

РПЭ определяет промежуток времени, в течение которого автомобиль способен удовлетворять нужды владельца с минимальными затратами на его эксплуатацию и приносить определённую сумму прибыли для предприятий. В основе расчета РПЭ лежит межсервисный интервал проведения ТО автомобиля. При определении значения РПЭ необходимо учитывать, что различные марки автомобилей имеют различные интервалы проведения ТО - 10 тыс. км или 15 тыс. км, что может оказаться на достоверности полученного значения и объективности полученных сведений. Для получения более точной информации необходимо вести подсчет отталкиваясь не от условных интервалов (базирующихся на межсервисных интервалах), а от реальных пробегов, при этом точно зная стоимость эксплуатации одного километра пробега для конкретного автомобиля. Поэтому для адекватного подсчета РПЭ необходим еще и такой параметр, как стоимость одного километра пробега – стоимость владения на 1 км пробега. Основой математической модели подсчета РПЭ является стоимость одного километра пробега (стоимость владения на 1 км пробега). Это позволяет произвести расчет РПЭ исходя из срока владения автомобилем, эксплуатационных затрат и потери товарной стоимости автомобиля.

### **Теория / Расчет**

При расчете стоимости владения автомобиля и РПЭ необходимо учитывать значение потери товарной стоимости. В первые годы эксплуатации удешевление автомобиля для различных марок и моделей составляет в среднем 20-40% [8]. Для уменьшения потери товарной стоимости требуется поддержание технически исправного состояния автомобиля, обеспечение работоспособности и долговечности автомобиля за счет своевременного проведения периодического ТО и ремонта автомобиля, усовершенствование функциональности и технических характеристик автомобиля, что влечет за собой увеличение материальных и финансовых затрат на эксплуатацию автомобиля.

В начальный момент эксплуатации автомобиля стоимость владения на 1 км пробега минимальна. В дальнейшем происходит увеличение срока эксплуатации автомобиля, ухудшение его технического состояния, увеличение затрат на сервисное обслуживание, что подразумевает затраты на проведение ТО и на замену вышедших из строя деталей, узлов, агрегатов новыми, снижение технических характеристик и др. - это приводит к росту стоимости владения автомобилем на 1 км пробега.

Возникновение отказов и неисправностей систем и агрегатов автомобиля, утрата ресурса, снижение работоспособности требует проведения текущего или капитального ремонта автомобиля [4, 5]. С начала эксплуатации автомобиля, с увеличением возраста автомобиля изменяется его техническое состояние. Поэтому при вычислении РПЭ следует учитывать затраты на восстановление работоспособного состояния автомобиля. Для верного расчета РПЭ чрезвычайно важно обеспечить точный учет запасных частей, расходных материалов, технических жидкостей и всех прочих продуктов, обеспечивающих исправное функционирование автомобильной техники.

На рациональный период эксплуатации автомобиля оказывает влияние:

- 1) гарантийный срок автомобиля;
- 2) установленный на основе опыта и рекомендаций срок эксплуатации самим владельцем;
- 3) межсервисный интервал;
- 4) эксплуатационные затраты;
- 5) техническое состояние автомобиля;
- 6) возраст автомобиля;
- 7) потеря товарной стоимости;
- 8) личные потребности и предпочтения владельца.

Окончание рационального периода эксплуатации автомобиля происходит в момент превышения стоимости владения автомобилем стоимости владения новым автомобилем.

Рациональный период эксплуатации транспортных средств должен учитывать, как и параметры технического состояния, так и экономические составляющие, а также определять дальнейшую эксплуатацию автомобиля или его списание (рис. 1).



*Рисунок 1 – Определение рационального периода эксплуатации транспортных средств*

Момент списания транспортных средств определяется на основе информации о техническом состоянии узлов и агрегатов автомобиля, экономических потерь при эксплуатации, получаемой прибыли от эксплуатации, а также особенностях режимов работы и условий эксплуатации автомобилей.

### **Результаты**

На предприятиях срок предельного использования автомобилей устанавливается на основе бухгалтерских нормативов амортизации с учетом ожидаемого срока использования автомобиля, физического износа и иных факторов. Недостатком применения такого метода является необоснованность полученных значений, т.к. не учитывается классификация и разновидность марок, моделей и модификаций транспортных средств, старение автомобиля и момент утраты ресурса. Срок эксплуатации автомобилей различен. Поэтому РПЭ необходим для принятия осознанных, экономически целесообразных и оправданных, объективных решений об эксплуатации автотранспортных средств.

Расчет РПЭ дает возможность для каждого парка, для каждого конкретного автомобиля с его индивидуальной историей и техническим состоянием определить момент замены автомобиля новым.

На сегодняшний день существуют различные калькуляторы, определяющие величину стоимости владения автомобилем [9, 10]. Недостатком таких калькуляторов является определение значения для определенного пробега автомобиля с установленными от завода-изготовителя характеристиками, но не учитывающие изменение технического состояния автомобиля в период эксплуатации [11].

Вычисление РПЭ позволяет изменять пробег, что дает возможность рассчитывать стоимость владения на один километр пробега и учитывать динамику изменения расходов: непредвиденные расходы в процессе эксплуатации или снижение расходов, например, с помощью скидочных программ на запасные части или услуги [12, 13].

Основным преимуществом расчета параметра РПЭ является не только определение стоимости владения автомобилей и выбор наиболее предпочтительного варианта, но и определение периода времени, в течение которого целесообразно эксплуатировать каждый конкретный автомобиль [14]. Корректируя изменяющиеся ключевые показатели, занося дополнительные сведения и данные, предоставляется возможность проведения тщательного кон-

троля за техническим состоянием автомобилей и экономически обоснованно определять период эксплуатации каждого конкретного автомобиля [6]. Вариативность используемых параметров, возможность их добавления и исключения позволяет определять наиболее точные значения РПЭ.

Помимо утраты товарной стоимости и эксплуатационных затрат для правильной оценки стоимости владения на 1 км пробега и РПЭ коммерческого транспорта необходимо учитывать затраты на простой.

В процессе эксплуатации автомобилей на предприятиях одним из основных расходов является возникновение простоев транспорта [7]. Простои транспорта могут возникать по причинам: ожидание ремонта или проведения ТО, ожидание поступления запасных частей, отсутствие документации, задержка других производственных процессов, неисправность технологического оборудования, отсутствие сотрудников и др. Поэтому в целях снижения производственных расходов требуется контроль и предотвращение возникновения простоев транспорта.

Рациональный период эксплуатации транспортных средств определяется следующими критериями:

- фактическая и прогнозная производительность;
- экономическая целесообразность эксплуатации ( себестоимость, доходы и расходы);
- техническое состояние автомобиля.

Рациональный период эксплуатации рассчитывается с учетом указанных выше критериев независимо от затрат на приобретение автомобиля.

### ***Обсуждение***

На каждом предприятии требуется проведение анализа материальных и финансовых затрат и применение современных технологий и методик для оценки экономического ущерба простоев транспорта [15, 16].

Для унификации подсчета стоимости простоев в методике расчета РПЭ необходимо учитывать стоимость аренды аналогичного автомобиля на тот же самый период – период простоя. В целях предотвращения остановки производственного процесса и потери прибыли необходимо произвести расчет стоимости аренды аналогичного автомобиля и убытков, понесенных за счет простоя автомобиля [17]. В случае превышения расходов, связанных с простоем транспорта, например, по причине проведения ТО или ремонта автомобиля, стоимости аренды идентичного автомобиля, в целях обеспечения бесперебойной работы производственного процесса предприятия следует взять автомобиля в аренду [18].

Возникновение простоев транспортных средств предприятий увеличивает стоимость владения на 1 км пробега.

### ***Выводы***

В совокупности РПЭ и стоимость владения автомобилем формируют комплексный показатель эффективности эксплуатации [19]. Это механизм, которым можно очень четко и предельно точно контролировать весь находящийся в управлении автопарк [20, 21].

Таким образом, прогностическая модель трансформируется в прикладной механизм контроля и учета, посредством которого можно с высокой точностью планировать бюджеты, сроки эксплуатации автомобилей при определенных индивидуальных условиях и т. д.

Установлено, с помощью расчета РПЭ возможно в реальном масштабе времени оценивать эффективность эксплуатации автомобилей путем сравнения данных, полученных при вычислении прогностической модели и реальных показателей деятельности автопарка, которые могут в силу определенных факторов изменяться. Полученные значения РПЭ позволят снизить материальные и финансовые затраты предприятия, обеспечить безостановочную работу производственного процесса, произвести рациональный выбор марки и модели автомобиля при покупке, определить период эксплуатации автомобилей с минимальными затратами, спрогнозировать сроки замены устаревших автомобилей новыми, повысить эффективность работы предприятия.

**Благодарности:** Работа выполнена в рамках реализации федеральной программы поддержки университетов «Приоритет 2030» с использованием оборудования на базе Центра высоких технологий БГТУ им. В.Г. Шухова.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Верхорубов В.В. Оценка стоимости владения как метод оптимизации структуры парка автомобилей предприятия // Развитие современной науки : теоретические и прикладные аспекты сборник статей студентов, магистрантов, аспирантов, молодых ученых и преподавателей. Пермь. 2016. С. 18-20.
2. Горнаков И.А. Основные подходы к определению стоимости владения транспортным средством // Авиамашиностроение и транспорт Сибири: Сборник статей всероссийской молодежной научно-практической конференции. 2016. С. 64-68.
3. Долгушин А.А., Воронин Д.М. Методика интегральной оценки эффективности эксплуатации автомобилей // Вестник Омского государственного аграрного университета. 2016. №4(24). С. 183-188.
4. Заятров А.В., Козловский В.Н. Исследование эксплуатационной надежности современных легковых автомобилей // Грузовик. 2011. №10. С. 39-42.
5. Козловский В.Н., Панюков Д.И., Пьянов М.А. Прогнозирование бюджета на гарантийное обеспечение автомобилей // Автомобильная промышленность. 2014. №8. С. 27-29.
6. Семыкина А.С., Загородний Н.А. Исследование количества обращений владельцев транспортных средств в гарантийный период к официальным дилерским центрам г. Белгорода // Альтернативный источники энергии в транспортно-технологическом комплексе: проблемы и перспективы рационального использования: Сборник научных трудов по материалам ежегодных конференций. Т. 3. Вып. 1 (4). Воронеж: ВГЛТУ. 2016. С. 127-131.
7. Семыкина А.С., Загородний Н.А., Конев А.А. Повышение эффективности эксплуатации транспортного комплекса горно-обогатительных комбинатов // Мир транспорта и технологических машин. 2018. №1(60). С.134-140.
8. Смирнов П.И К вопросу оценки стоимости владения автомобилем / Под общей редакцией Т.М. Сигитова // Развитие современной науки: теоретические и прикладные аспекты: Сборник научных статей студентов, магистрантов, аспирантов, молодых ученых и преподавателей. Пермь, 2018. С. 45-46.
9. Смирнов П.И. Оценка стоимости владения автомобилем на основании анализа его технико-экономических показателей // Автоматизация и энергосбережение машиностроительного и металлургического производств, технология и надежность машин, приборов и оборудования материалы XI Международной научно-технической конференции. 2016. С. 151-154.
10. Семыкина А.С., Загородний Н.А., Новиков А.Н. Повышение эффективности деятельности автосервисных предприятий посредством использования цифровых и информационных технологий: монография. Белгород: Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова, 2023. 140 с.
11. Горгоц О.В., Горшков Г.В. Перспективы предоставления услуг предприятиями автосервиса // Условия успешного кластерного развития промышленного комплекса Ханты-Мансийского автономного округа - Югры. Компоненты и технологии в автопроме и дорожном строительстве: Сборник научных трудов региональной научно-технической конференции. Автор-составитель: Лесковец Дмитрий Олегович. 2016. С. 23-30.
12. Семыкина А.С., Конев А.А. Особенности создания клиентированной компании для сферы сервиса транспортных и технологических машин // Современные наукоемкие технологии. 2013. №8-2. С. 225-227.
13. Сергеев А.Г., Латышев М.В. Сертификация: Учебное пособие для студентов вузов. 2-е изд., перераб. и доп. М.: Логос, 2001. 264с.
14. Цахаева К.Н. Основные тенденции развития российского автомобилестроения, формирующей доминантные факторы спроса на автосервисные услуги // Вопросы структуризации экономики. 2010. №4. С. 148-151.
15. Авхадеева Э.А., Тишина В.С., Фатихова Л.Э. Роль и значение цифровых технологий в деятельности автосервисных предприятий // Перспективные направления развития автотранспортного комплекса: Сборник статей XIII Международной научно- практической конференции. 2019. С. 6-9.
16. Тетцоева О.А., Степанов А.А., Маренков А.О. Российский автобизнес в условиях постгарантийной реальности // Транспортное дело России. 2020. №4. С. 63-65.
17. Рыжая А.А., Белякова Е.В., Добрачев С.С. Состояние рынка технического обслуживания и ремонта автомобильного транспорта в России // Молодые ученые в решении актуальных проблем науки: Сборник материалов Всероссийской научно-практической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых (с Международным участием). Красноярск, 2022. С. 1095-1097.
18. Ростова О.В. Использование информационной поддержки в сфере услуг // Развитие сферы услуг: стратегии, инновации, компетенции: Материалы всероссийской научно-практической конференции. 2019. С. 471-476.
19. Алемасов Е.П., Зарипова Р.С. Информационные технологии как фактор эффективности работы автосервиса // International Journal of Advanced Studies. 2020. Т. 10. №3. С. 132-136.

20. Коняхина Т.Б., Панасенко И.В., Недзельская О.Н., Анохина Ю.С. Исследование рынка обслуживания автотранспортных средств в России // Молодой ученый. 2021. №18 (204). С. 336-338.  
21. Карнаухова В.К., Краковская Т.А. Сервисная деятельность. М.: Ростов-на-Дону: МАРТ, 2019. 256 с.

**Семыкина Алла Сергеевна**

Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова

Адрес: 308012, Россия, г. Белгород, ул. Костюкова, д. 46

К.т.н., старший преподаватель кафедры «Эксплуатация и организация движения автотранспорта»

E-mail: fantarock@mail.ru

**Загородний Николай Александрович**

Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова

Адрес: 308012, Россия, г. Белгород, ул. Костюкова, д. 46

К.т.н., доцент, заведующий кафедрой «Эксплуатация и организация движения автотранспорта»

E-mail: n.zagorodnj@yandex.ru

**Ломакин Денис Олегович**

Орловский государственный университет им. И.С. Тургенева

Адрес: 302030, Россия, г. Орел, ул. Московская, д. 77

К.т.н., доцент, доцент кафедры сервиса и ремонта машин

E-mail: srmostu@mail.ru

---

A.S. SEMYKINA, N.A. ZAGORODNY, D.O. LOMAKIN

**CRITERIA FOR EVALUATING THE RATIONAL PERIOD  
OF OPERATION OF VEHICLES**

*Abstract. The paper considers the definition of the efficiency of vehicle operation. Taking into account the calculation of the cost of car ownership and the cost of ownership per 1 km of mileage, it is possible to determine the rational period of operation of cars with minimal costs for their use.*

*Keywords:* car operation, efficiency of car use, cost of car ownership, period of car operation

**BIBLIOGRAPHY**

1. Verkhorubov V.V. Otsenka stoimosti vladeniya kak metod optimizatsii struktury parka avtomobiley predpriyatiya // Razvitie sovremennoy nauki: teoreticheskie i prikladnye aspekty sbornik statey studentov, magistrantov, aspirantov, molodykh uchenykh i prepodavateley. Perm'. 2016. S. 18-20.
2. Gornakov I.A. Osnovnye podkhody k opredeleniyu stoimosti vladeniya transportnym sredstvom // Aviamashinostroenie i transport Sibiri: Sbornik statey vserossiyskoy molodezhno-prakticheskoy konferentsii. 2016. S. 64-68.
3. Dolgushin A.A., Voronin D.M. Metodika integral'noy otsenki effektivnosti ekspluatatsii avtomo-biley // Vestnik Omskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta. 2016. №4(24). S. 183-188.
4. Zayatrov A.V., Kozlovskiy V.N. Issledovanie ekspluatatsionnoy nadezhnosti sovremennykh legkovykh avtomobiley // Gruzovik. 2011. №10. S. 39-42.
5. Kozlovskiy V.N., Panyukov D.I., P'yanov M.A. Prognozirovaniye byudzheta na garantiynoe obespechenie avtomobiley // Avtomobil'naya promyshlennost'. 2014. №8. S. 27-29.
6. Semykina A.S., Zagorodniy N.A. Issledovanie kolichestva obrashcheniy vladel'tsev transportnykh sredstv v garantiynyy period k ofitsial'nym dilerskim tsentram g. Belgoroda // Al'ternativnyy istochniki energii v transportno-tehnologicheskem kompleksse: problemy i perspektivy ratsional'nogo ispol'zovaniya: Sbornik nauchnykh trudov po materialam ezhegodnykh konferentsiy. T. 3. Vyp. 1 (4). Voronezh: VGLTU. 2016. S. 127-131.
7. Semykina A.S., Zagorodniy N.A., Konev A.A. Povyshenie effektivnosti ekspluatatsii transportno-go kompleksa gorno-obogatitel'nykh kombinatov // Mir transporta i tekhnologicheskikh mashin. 2018. №1(60). S.134-140.
8. Smirnov P.I K voprosu otsenki stoimosti vladeniya avtomobilem / Pod obshchey redaktsiei T.M. Sigitova // Razvitie sovremennoy nauki: teoreticheskie i prikladnye aspekty: Sbornik nauchnykh statey studentov, magistrantov, aspirantov, molodykh uchenykh i prepodavateley. Perm', 2018. S. 45-46.
9. Smirnov P.I. Otsenka stoimosti vladeniya avtomobilem na osnovanii analiza ego tekhniko-ekonomicheskikh pokazateley // Avtomatizatsiya i energosberezhenie mashinostroitel'nogo i metallurgicheskogo pro-

izvodstv, tekhnologiya i nadezhnost` mashin, priborov i oborudovaniya materialy XI Mezhdunarodnoy nauchno-tehnicheskoy konferentsii. 2016. S. 151-154.

10. Semykina A.S., Zagorodny N.A., Novikov A.N. Povyshenie effektivnosti deyatel`nosti avtoservisnykh predpriyatiy posredstvom ispol`zovaniya tsifrovyykh i informatsionnykh tekhnologiy: monografiya. Belgorod: Belgorodskiy gosudarstvennyy tekhnologicheskiy universitet im. V.G. Shukhova, 2023. 140 s.

11. Gorgots O.V., Gorshkov G.V. Perspektivy predostavleniya uslug predpriyatiyami avtoservisa // Usloviya uspeshnogo klasternogo razvitiya promyshlennogo kompleksa Hanty-Mansiyskogo avtonomnogo okruga - YUgry. Komponenty i tekhnologii v avtoprome i dorozhnom stroitel`stve: Sbornik nauchnykh trudov regio-nal`noy nauchno-tehnicheskoy konferentsii. Avtor-sostavitev: Leskovets Dmitriy Olegovich. 2016. S. 23-30.

12. Semykina A.S., Konev A.A. Osobennosti sozdaniya klientirovannoy kompanii dlya sfery servisa transportnykh i tekhnologicheskikh mashin // Sovremennye naukoemkie tekhnologii. 2013. №8-2. S. 225-227.

13. Sergeev A.G., Latyshev M.V. Sertifikatsiya: Uchebnoe posobie dlya studentov vuzov. 2-e izd., pererab. i dop. M.: Logos, 2001. 264s.

14. Tsakhaeva K.N. Osnovnye tendentsii razvitiya rossiyskogo avtomobilestroeniya, formiruyushchey dominantnye faktory sprosa na avtoservisnye uslugi // Voprosy strukturizatsii ekonomiki. 2010. №4. S. 148-151.

15. Avkhadeeva E.A., Tishina V.S., Fatikhova L.E. Rol` i znachenie tsifrovyykh tekhnologiy v deyatel`nosti avtoservisnykh predpriyatiy // Perspektivnye napravleniya razvitiya avtotransportnogo kompleksa: Sbornik statey XIII Mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii. 2019. S. 6-9.

16. Tettsoeva O.A., Stepanov A.A., Marenkov A.O. Rossiyskiy avtobiznes v usloviyah postgarantiynoy real`nosti // Transportnoe delo Rossii. 2020. №4. S. 63-65.

17. Ryzhaya A.A., Belyakova E.V., Dobrachev S.S. Sostoyanie rynka tekhnicheskogo obsluzhivaniya i remonta avtomobil`nogo transporta v Rossii // Molodye uchenye v reshenii aktual`nykh problem nauki: Sbornik materialov Vserossiyskoy nauchno-prakticheskoy konferentsii studentov, aspirantov i molodykh uchenykh (s Mezhdunarodnym uchastiem). Krasnoyarsk, 2022. S. 1095-1097.

18. Rostova O.V. Ispol`zovanie informatsionnoy podderzhki v sfere uslug // Razvitie sfery uslug: strategii, innovatsii, kompetentsii: Materialy vserossiyskoy nauchno-prakticheskoy konferentsii. 2019. S. 471-476.

19. Alemasov E.P., Zaripova R.S. Informatsionnye tekhnologii kak faktor effektivnosti raboty avtoservisa // International Journal of Advanced Studies. 2020. T. 10. №3. S. 132-136.

20. Konyakhina T.B., Panasenko I.V., Nedzel`skaia O.N., Anokhina YU.S. Issledovanie rynka obsluzhivaniya avtotransportnykh sredstv v Rossii // Molodoy uchenyy. 2021. №18 (204). S. 336-338.

21. Karnaukhova V.K., Krakovskaya T.A. Servisnaya deyatel`nost`. M.: Rostov-na-Donu: MART, 2019. 256 s.

**Semykina Alla Sergeevna**

Belgorod State Technological University  
Address: 308012, Russia, Belgorod, st. Kostyukova, 46  
Candidate of Technical Sciences  
E-mail: fantarock@mail.ru

**Zagorodny Nikolay Alexandrovich**

Belgorod State Technological University  
Address: 308012, Russia, Belgorod, st. Kostyukova, 46  
Candidate of Technical Sciences  
E-mail: n.zagorodnj@yandex.ru

**Lomakin Denis Olegovich**

Orel State University  
Address: 302030, Russia, Orel, Moskovskaya St., 77  
Candidate of Technical Sciences  
E-mail: srmostu@mail.ru

УДК 656.1

doi: 10.33979/2073-7432-2025-2-2(89)-62-70

С.Е. БЕБИНОВ, Л.С. ТРОФИМОВА

## МЕТОДЫ ОПРЕДЕЛЕНИЯ СООТВЕТСТВИЯ ВОДИТЕЛЕЙ ПАССАЖИРСКОГО АВТОМОБИЛЬНОГО ТРАНСПОРТА ПРОФЕССИОНАЛЬНЫМ И КВАЛИФИКАЦИОННЫМ ТРЕБОВАНИЯМ

*Аннотация.* Результаты проведенного исследования показывают, что методологической основой оценки соответствия водителей пассажирского автомобильного транспорта профессиональным и квалификационным требованиям служит метод нечетких множеств. В качестве исследуемых параметров используются измеряемые показатели эксплуатации автобусов. Оценочными показателями являются коэффициенты, соответствующие количеству баллов сформированности профессиональных навыков и учитывающие диапазон оценок от минимального до максимального уровня в существующих условиях эксплуатации подвижного состава.

**Ключевые слова:** водители пассажирского автомобильного транспорта, измеряемые показатели, профессиональные водительские навыки, система оценочных коэффициентов сформированности, соответствие профессиональным и квалификационным требованиям

### **Введение**

Вопросы оценки соответствия персонала автомобильного транспорта профессиональным и квалификационным требованиям являются актуальной темой исследований в области транспортной науки. Анализ научных публикаций в ведущих отраслевых журналах позволяет выделить основные направления и подходы к решению данной задачи. Результатами ранее проведенных исследований [1] показана необходимость при формировании персонала пассажирского автомобильного предприятия учитывать соответствие профессиональным и квалификационным требованиям различных групп работников (водителей, слесарей и контролеров технического состояния).

Н.В. Якуниной [2] исследуются нормативно-правовые аспекты системы допуска к выполнению перевозок пассажирским автомобильным транспортом. Основываясь на анализе условий, обеспечивающих безопасность регулярных перевозок пассажиров по муниципальным маршрутам автор предлагает использовать в качестве оценочных показателей систему коэффициентов, учитывающих количество нарушений водителями правил дорожного движения и уровень аварийности.

Исследованиями В.Н. Баскова с соавторами [3] изучены связи поведенческих аспектов работы водителя с решительностью и их влияние на поведение транспортных потоков. Но тем не менее, изучая закономерности управления автотранспортными средствами, авторами не учитывается уровень соответствия водителей профессиональным и квалификационным требованиям.

Е.В. Агеевым и Е.С. Виноградовым [4] предложена функциональная модель, характеризующая разноуровневые факторы, определяющие безопасное управление автомобилем на этапе профессиональной подготовки водителей. Выявленные факторы позволяют определить критерии формирования профессиональной подготовленности при взаимодействии с другими участниками транспортного потока.

Ряд работ затрагивает аспекты влияния кадровой политики пассажирских автомобильных предприятий на обеспечение безопасности движения и экономические показатели. Т.В. Коноваловой с соавторами [5] исследуются связи профессиональных знаний и умений водителей автомобильного транспорта с обеспечением безопасности дорожного движения и производительностью труда. Однако, не уточняется за счет каких профессиональных навыков обеспечивается возможность выработки подвижного состава не ниже планового уровня.

Исследования Т.Н. Андюхиной [6] посвящены разработке и совершенствованию методов оценки профессиональных компетенций работников автомобильного транспорта. Предлагаются различные подходы к проведению профессионального отбора и аттестации персонала. Предложена компетентностная модель подготовки специалистов автомобильного транспорта. Ценность предлагаемого подхода заключается в том, что учитывается не только уровень профессиональных знаний работников, но и имеющиеся практические навыки.

Ранее проведенными исследованиями [7] акцентируется внимание на применении современных технических средств для оценки профессиональной надежности водителей. В частности, предлагается использование цифровых тренажеров и программных комплексов, позволяющих моделировать различные дорожные ситуации и оценивать действия водителя. Такой подход позволяет проводить объективную оценку навыков управления транспортным средством в сложных условиях дорожного движения.

В.С. Волков, Е.Г. Лебедев [8] предлагают связать оценку соответствия водителей профессиональным и квалификационным требованиям с показателями безопасности дорожного движения. Отмечается, что допускаемый нарушения правил дорожного движения связаны с двумя основными причинами, характеризующими профессиональный уровень работников. Во-первых, это недостаточный объем информации об условиях дорожного движения и связанные этим ошибки в управлении автотранспортным средством. Во-втором случае допускаются осознанные нарушения, являющиеся индикаторами недостаточной дисциплинированности водителя и не соответствия требованиям безопасности.

Разработанные научные основы текущего планирования деятельности предприятий автомобильного транспорта, устанавливают методологический подход, базирующийся на интеграции методов, моделирующих результаты деятельности по нижнему и верхнему уровням, с учетом вероятностных событий [9].

Исследования ранее выполненных работ зарубежных ученых показали, что для определения показателей работы водителей используются:

- методы моделирования случайных параметров [10];
- концепция социальной справедливости в сфере транспорта, позволившая изучить влияние справедливости в сфере общественного транспорта на качество общественного транспорта, участие общественности и политику в сфере общественного транспорта на примере Шэньчжэна [11];
- методы анализа требований сертификации ISO:39001 [12];
- методы анкетирования [13, 14];
- структурная модель уравнения для оценки того, связаны ли управление предприятием и внешняя среда с рискованным поведением при вождении, о котором сообщают сами водители, как напрямую, так и косвенно, через влияние отношения к безопасности дорожного движения в большой выборке водителей автобусов [15];
- реляционная модель воздействия «Эксплуатация-Услуга» для изучения взаимосвязей между рабочим статусом автобуса и оценкой обслуживания с точки зрения различных групп пассажиров [16];
- модель прогнозирования пассажиропотока, основанную на долговременной краткосрочной памяти (LSTM) и частоте поездок пассажиров, называемую двухэтапной моделью прогнозирования пассажиропотока LSTM (TLPLP) [17];
- взаимосвязь методов гибридного дерева решений (HDT) и временных рядов позволили авторам [18] решить проблему планирования и эксплуатации пассажирского автомобильного транспорта и установить факторы, влияющие на плановые показатели работы автобусов.

Анализ научных публикаций показывает перспективное направление адаптивного подхода, учитывающего существующие условия эксплуатации подвижного состава, в оценке профессиональной подготовленности персонала пассажирского автомобильного транспорта. Таким образом, разработка единой методологии оценки соответствия персонала

пассажирского автомобильного транспорта профессиональным и квалификационным требованиям имеет высокую актуальность.

Ранее проведенными исследованиями авторами статьи предложена новая классификация профессиональных навыков персонала пассажирского автомобильного транспорта, имеющая иерархическую структуру, позволяющую обеспечивать производительность труда работников не ниже планового уровня в системе «персонал-автобус-дорога-среда» (ПАДС) [19].

Цель данной статьи заключается в обосновании взаимосвязи методов для определения соответствия водителей пассажирского автомобильного транспорта профессиональным и квалификационным требованиям через измеряемые показатели их деятельности.

### **Материал и методы**

Для определения соответствия водителей пассажирского автомобильного транспорта профессиональным и квалификационным требованиям исследовались водительские навыки работников, выполняющих регулярные перевозки по муниципальным маршрутам на автобусах большого класса (табл. 1).

Таблица 1 – Взаимосвязь методов для определения соответствия водителей пассажирского автомобильного транспорта профессиональным и квалификационным требованиям

Цель применения	Научный метод
С помощью научных основ определялись методы, используемые для оценки соответствия водительских навыков профессиональным и квалификационным требованиям по верхнему и нижнему уровням	Научные основы текущего планирования работы автотранспортных предприятий
Установлен закон распределения вероятностных показателей, значения верхних и нижних границ количества баллов соответствия водительских навыков профессиональным и квалификационным требованиям	Теории вероятностей и математической статистики
Определены значения функции нечеткого множества, устанавливающие коэффициенты соответствия водительских навыков профессиональным и квалификационным требованиям по минимальному и максимальному уровням	Метод нечетких множеств
Рассчитан коэффициент, определяющий диапазон оценок соответствия водителей профессиональным и квалификационным требованиям	Математическое моделирование
С помощью этих методов измеряются показатели водительских навыков, обеспечивающие соответствие работников профессиональным и квалификационным требованиям	Метод измерения адаптационного потенциала водителя. Линейный метод измерений. Методы измерения технико-эксплуатационных показателей подвижного состава. Отчетно-статистический метод измерения регулярности движения подвижного состава. Метод измерения специальных знаний водителя

Работоспособность водителей ( $N_1$ ) определялась через измеряемый показатель динамики адаптационного потенциала (Ап, %), учитывающий изменения гемодинамики водителей в начале и конце рабочего дня.

Вспомогательные технические водительские навыки ( $N_2$ ) обеспечивают безопасное управление автобусом и удобство пассажиров в ограниченных условиях движения промежуточных и конечных остановочных пунктов. Среди исследуемых измеряемых показателей изучался навык определения бокового габарита (Бг, м), обеспечивающий удобное расстояние между посадочной площадкой и дверями автобуса. В ходе натурного наблюдения за работой водителей в наряде измерялся навык определения траектории движения (Тр, м), регулирующий параллельность движения автобуса при въезде в заездное уширение проезжей части по отношению к посадочной площадке остановочного пункта.

Основные технические водительские навыки ( $N_3$ ) исследовались через измеряемые

показатели технической скорости ( $V_t$ , км/ч), скорости движения при выполнении маневрирования на проезжей части ( $V_m$ , км/ч), положительных ( $g$ ) и отрицательных (- $g$ ) ускорений автобуса, значения дистанции до впереди едущих транспортных средств ( $D_s$ , с).

Измеряемые показатели скорости сообщения ( $V_c$ , км/ч) и эксплуатационной скорости ( $V_e$ , км/ч) характеризовали тактические навыки ( $N_4$ ) взаимодействия с другими участниками дорожного движения при подъезде к промежуточным остановочным пунктам и управлении автобусом с учетом изменяющихся условий транспортного потока.

Стратегические навыки ( $N_5$ ) оценивались через измеряемый показатель регулярности движения по маршруту ( $R_d$ , %), отражающий возможность водителя изменять и перераспределять время движения автобуса на перегонах в зависимости от имеющихся характеристик транспортного потока и существующих условий эксплуатации подвижного состава для того, чтобы снизить отклонения от графика.

Индивидуальный стиль и оценка рисков ( $N_6$ ) определялись измеряемым показателем времени закрытия дверей автобуса ( $T_3$ , с) после посадки последнего пассажира на промежуточном остановочном пункте.

Для оценки уровня профессиональной культуры водителя ( $N_7$ ) использовался разработанный авторами опросник, позволяющий определить характер принимаемых работником решений в различных дорожных ситуациях повышенной сложности. Результат измерялся по относительному количеству набранных баллов ( $P_k$ , %).

### **Теория / Расчет**

Полученные значения водительских навыков ( $H_{ki}$ )  $k$ -й группы, достаточных для выполнения  $i$ -х условий муниципального контракта на перевозку пассажиров и багажа приводились к оценочному показателю  $N_{k,i}$ , количества баллов, принимающих значение от минимального до максимального уровня по характеристикам подготовленности водителей.

В качестве оценочных показателей соответствия работников профессиональным и квалификационным требованиям применяются коэффициенты, являющиеся функцией  $\mu_A(N_{k,i})$  нормального нечеткого множества (1), универсальным множеством которого служит количество баллов  $N_{k,i}$  для оценки  $k$ -й группы профессиональных водительских навыков необходимых для выполнения  $i$ -х требований муниципального контракта на перевозку пассажиров и багажа [20].

$$\mu_A(N_{k,i}) = \begin{cases} 1, & \text{если } N_{k,i} = N_{k,i,Mn}, \\ \frac{N_{k,i}-N_{k,i,min}}{N_{k,i,Mn}-N_{k,i,min}}, & N_{k,i,min} \leq N_{k,i} \leq N_{k,i,Mn}, \\ \frac{N_{k,i,max}-N_{k,i}}{N_{k,i,max}-N_{k,i,Mn}}, & N_{k,i,Mn} \leq N_{k,i} \leq N_{k,i,max}, \\ N_{k,i, треб} & \text{если } N_{k,i,Mn}-\sigma \leq N_{k,i} \leq N_{k,i,Mn} + \sigma. \end{cases} \quad (1)$$

где  $N_{k,i}$  – баллы, определяющие сформированность профессиональных водительских навыков  $k$ -й группы необходимых для выполнения  $i$ -х требований муниципального контракта на перевозку пассажиров и багажа;

$N_{k,i, треб}$  – количество баллов  $k$ -й группы профессиональных водительских навыков для выполнения  $i$ -х требований муниципального контракта на перевозку пассажиров и багажа достаточное для подтверждения соответствия профессиональным и квалификационным требованиям;

$N_{k,i,max}$  – максимальное количество баллов, полученных за сформированность  $k$ -й группы профессиональных водительских навыков для выполнения  $i$ -х требований муниципального контракта на перевозку пассажиров и багажа;

$N_{k,i,min}$  – минимальное количество баллов, полученных за сформированность  $k$ -й группы профессиональных водительских навыков для выполнения  $i$ -х требований муниципального контракта на перевозку пассажиров и багажа;

$N_{k,iMп} - \sigma$  – минимальное количество баллов  $k$ -й группы профессиональных водительских навыков для выполнения  $i$ -х требований муниципального контракта на перевозку пассажиров и багажа достаточное для подтверждения соответствия профессиональным и квалификационным требованиям;

$N_{k,iMп} + \sigma$  – максимальное количество баллов  $k$ -й группы профессиональных водительских навыков для выполнения  $i$ -х требований муниципального контракта на перевозку пассажиров и багажа достаточное для подтверждения соответствия профессиональным и квалификационным требованиям.

В результате анализа полученных эмпирических значений для каждого изучаемого показателя был построен поинтервальный вариационный ряд, определены середины интервалов, опытные числа попадания в интервалы, статистические поинтервальные частоты, теоретические поинтервальные частоты и теоретические числа попадания в интервалы. Было рассчитано математическое ожидание ( $Mп$ ), несмещенная дисперсия ( $\bar{D}$ ), несмещенное среднее квадратическое отклонение ( $\sigma$ ), среднее квадратическое отклонение среднего результата ( $\sigma_{ср}$ ) и границы доверительного интервала ( $Mпki \pm \sigma$ ) (табл. 2).

Таблица 2 – Статистическая таблица измеряемых показателей водительских навыков

Измеряемый показатель	Ед. изм.	$Mп$	$\bar{D}$	$\sigma$	$\sigma_{ср}$	$Mпki - \sigma$	$Mпki + \sigma$
Ап	%	3,66	1,01	1,0	0,17	3,31	4,01
Бг	м	0,4	0,04	0,19	0,03	0,37	0,51
Тр	м	0,22	0,07	0,09	0,01	0,19	0,25
$V_t$	км/ч	23,89	15,54	3,94	0,69	22,50	25,29
$V_m$	км/ч	15,73	7,31	2,70	0,46	14,80	16,65
$g$	$g$	0,23	0,003	0,06	0,01	0,21	0,25
$-g$	$g$	-0,30	0,004	0,07	0,01	-0,32	-0,28
Дс	с	4,44	1,61	1,27	0,22	3,99	4,88
$V_c$	км/ч	20,44	11,08	3,33	0,56	19,29	21,58
$V_e$	км/ч	17,55	14,64	3,83	0,64	16,26	18,84
Рд	%	84,27	68,24	8,26	1,44	81,35	87,19
Тз	с	3,66	1,01	1,00	0,17	3,31	4,01
Пк	%	72,60	176,89	13,30	2,32	67,90	77,30

Проверка гипотезы о принадлежности исследуемых показателей нормальному распределению осуществлялась с помощью критериев Романовского и Пирсона.

Полученным эмпирическим значениям изучаемых водительских навыков присваивалась бальная оценка. Математическое ожидание измеряемых показателей соответствовало 50 баллам ( $N_{k,iMп}$ ). Количество баллов, соответствующих минимальному ( $N_{kimin}$ ) и максимальному ( $N_{kimax}$ ) уровням каждого изучаемого показателя определялось в отношении математического ожидания (2), (3)

$$N_{kimin} = \frac{H_{kimin} \cdot 50}{N_{k,iMп}}; \quad (2)$$

$$N_{kimax} = \frac{H_{kimax} \cdot 50}{N_{k,iMп}}, \quad (3)$$

где  $H_{kimin}$  – минимальный уровень  $k$ -го измеряемого показателя для выполнения  $i$ -х требований муниципального контракта на перевозку пассажиров и багажа;

$H_{kimax}$  – максимальный уровень  $k$ -го измеряемого показателя для выполнения  $i$ -х требований муниципального контракта на перевозку пассажиров и багажа.

Минимальное ( $N_{k,iMп} - \sigma$ ) и максимальное ( $N_{k,iMп} + \sigma$ ) количество баллов  $k$ -й группы водительских навыков, для выполнения  $i$ -х требований муниципального контракта на перевоз-

ку пассажиров и багажа, достаточное для подтверждения соответствия профессиональным и квалификационным требованиям соответствовали нижним и верхним границам доверительных интервалов  $M_{\text{п}ki-\sigma}$  и  $M_{\text{п}ki+\sigma}$  значений измеряемых показателей.

### **Результаты и обсуждение**

С использованием метода нечетких множеств были определены коэффициенты  $K_{k,i\min}$  и  $K_{k,i\max}$ , учитывающие диапазон оценок баллов  $k$ -й группы водительских навыков, для выполнения  $i$ -х требований муниципального контракта на перевозку пассажиров и багажа, достаточных для подтверждения соответствия профессиональным и квалификационным требованиям. Полученные результаты представлены в таблице 3.

Таблица 3 – Количество баллов и коэффициенты, соответствующие значениям измеряемых показателей, достаточных для выполнения условий муниципального контракта

Измеряемый показатель	$N_{k\min}$	$N_{k\max}$	$N_{k,iM\pi - \sigma}$	$N_{k,iM\pi + \sigma}$	$K_{k,i\min}$	$K_{k,i\max} f(N_{k\min})$
Ап	23,56	75,65	45,33	54,67	0,82	1,00
Бг	5,70	91,27	42,24	57,76	0,81	1,00
Тр	11,32	90,57	43,11	56,89	0,82	1,00
Вт	34,45	65,59	47,08	52,92	0,81	1,00
Vm	42,06	59,11	47,05	52,95	0,63	1,00
$g$	24,03	76,46	45,67	54,33	0,83	1,00
$-g$	28,39	70,14	46,07	53,93	0,80	1,00
Дс	22,54	78,88	44,95	55,05	0,82	1,00
Vс	34,64	66,42	47,21	52,79	0,82	1,00
VЭ	27,35	72,65	46,31	53,69	0,84	1,00
Рд	40,76	59,33	48,27	51,73	0,81	1,00
Тз	23,23	76,51	45,16	54,84	0,82	1,00
Пк	34,43	68,87	46,76	53,24	0,79	1,00

Коэффициент общего значения оценок соответствия водителей профессиональным и квалификационным требованиям определялся выражением (4).

$$\prod_{y=1}^Y (K_{k,i} f(N_{k,i})) , \quad (4)$$

где  $y$  – группа профессиональных навыков;

$Y$  – количество групп профессиональных навыков.

Используемые в данном исследовании методы определяют количественные границы показателей соответствия водителей пассажирского автомобильного транспорта профессиональным и квалификационным требованиям по минимальному и максимальному уровням. Разработанная математическая модель коэффициента общего значения оценок соответствия водителей профессиональным и квалификационным требованиям учитывает взаимосвязанность и взаимокомпенсации между отдельными водительскими навыками при выполнении регулярных перевозок пассажиров и багажа по муниципальным маршрутам.

### **Выходы**

Применение взаимосвязи методов для определения соответствия водителей пассажирского автомобильного транспорта профессиональным и квалификационным требованиям позволили сделать ряд выводов.

1. Уровень соответствия персонала профессиональным и квалификационным требованиям определяется в отношении математического ожидания баллов измеряемых показателей, соответствующего максимальному оценочному уровню.

2. Применение метода нечетких множеств определяет коэффициенты, характеризующие границы соответствия водителей профессиональным и квалификационным требованиям в зависимости от существующих условий эксплуатации подвижного состава.

3. Применение системы коэффициентов позволяет осуществить количественную оценку измеряемых показателей, имеющих различные единицы измерения, для определения

общих критериев соответствия водителей пассажирского автомобильного транспорта профессиональным и квалификационным требованиям в существующих условиях эксплуатации подвижного состава.

4. Разработанный авторами метод и полученные в исследовании результаты применимы для определения соответствия водителей профессиональным и квалификационным требованиям на отдельных муниципальных маршрутах пассажирских автомобильных перевозок в зависимости от имеющихся характеристик дорожного движения и условий эксплуатации подвижного состава.

## **СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ**

1. Прошина Ю.А. Актуальные проблемы кадровой политики на предприятиях пассажирского автомобильного транспорта // Вестник университета. 2016. №6. С. 207-211. EDN WMGPKT.
2. Якунина Н.В. Показатели безопасности транспортного процесса в системе допуска претендентов к перевозкам пассажиров автомобильным транспортом // Вестник Оренбургского государственного университета. 2014. №9(170). С. 210-215. EDN TMWEYN.
3. Басков В.Н., Красникова Д.А., Исаева Е.И. Влияние поведенческого фактора водителя на образование транспортного затора // Мир транспорта. 2019. Т. 17. №4(83). С. 272-281. DOI 10.30932/1992-3252-2019-17-4-272-281. EDN LQUBOC.
4. Агеев Е.В., Виноградов Е С. Методология прогнозирования ошибок кандидатом в водители при анализе дорожных ситуаций // Мир транспорта и технологических машин. 2024. №1-1(84). С. 63-72. DOI 10.33979/2073-7432-2024-1-1(84)-63-72. EDN IZGQGF.
5. Коновалова Т.В., Надирян С.Л., Миронова Ю.П. К вопросу эффективности кадрового обеспечения на автомобильном транспорте // Научно-технические аспекты инновационного развития транспортного комплекса: Материалы III Международной научно-практической конференции, в рамках 3-го Международного Научного форума Донецкой Народной Республики. Донецк: Донецкая академия транспорта. 2017. С. 169-172. EDN YSACAZ.
6. Андрюхина Т.Н. Проектирование и реализация компетентностной модели профессиональной подготовки специалистов автомобильного транспорта // Вестник Самарского государственного технического университета. Серия: Психолого-педагогические науки. 2008. №1(9). С. 4-9. EDN MBFHNL.
7. Агеев Е.В., Виноградов Е.С. Методика исследования параметров подсистемы «курсант-автомобиль» // Мир транспорта и технологических машин. 2022. №3-2(78). С. 113-118. DOI 10.33979/2073-7432-2022-2(78)-3-113-118. EDN GPEFNC.
8. Волков В.С., Лебедев Е.Г. Влияние качества подготовки водительского состава на безопасность движения // Воронежский научно-технический Вестник. 2023. Т. 2. №2(44). С. 81-87. DOI 10.34220/2311-8873-2023-81-87. EDN DNGFYP.
9. Трофимова Л.С., Певнев Н.Г. Структура методологии текущего планирования работы грузового автотранспортного предприятия // Вестник Сибирского государственного автомобильно-дорожного университета. 2017. №6(58). С. 63-71. EDN YNHMWA.
10. Chen T., Sze N.N., Newnam S., Bai L. Effectiveness of the compensatory strategy adopted by older drivers: Difference between professional and non-professional drivers [Электронный ресурс] / Transportation Research. Part F: Traffic Psychology and Behaviour. 2021. Vol. 77. P. 168-180. URL: <https://doi.org/10.1016/j.trf.2021.01.006>.
11. Wang Y., Cao M., Liu Y., Ye R., Gao X., Ma L. Public transport equity in Shenyang: Using structural equation modelling [Электронный ресурс] / Research in Transportation Business & Management. 2022. Vol. 42. URL: <https://doi.org/10.1016/j.rtbm.2020.100555>.
12. Nævestad T.-O., Elvik R., Milch V., Karlsen K., Phillips R. Traffic safety in bus transport: An analysis of Norway's largest transit authority's contract requirements to bus companies [Электронный ресурс] / Transportation Research. Part F: Traffic Psychology and Behaviour. 2022. Vol. 89. P. 317-333. URL: <https://doi.org/10.1016/j.trf.2022.07.004>.
13. Jiao Y., Wang X., Hurwitz D., Lei Y., Zhou L. Revision of the driver behavior questionnaire for bus drivers in China based on in-vehicle monitoring data [Электронный ресурс] / Transportation Research. Part F: Traffic Psychology and Behaviour. 2024. Vol. 105. P. 24-41. URL: <https://doi.org/10.1016/j.trf.2024.06.021>.
14. Shen J., Liu Q., Ye Z., Jiang W., Ma C. Autonomous bus services: current research status and future recommendations // Digital Transportation and Safety. 2023. №2(3). P. 229-240. doi: 10.48130/DTS-2023-0019.
15. Wang L., Wang Y., Shi L., Xu X. Analysis of risky driving behaviors among bus drivers in China: The role of enterprise management, external environment and attitudes towards traffic safety [Электронный ресурс] / Accident Analysis & Prevention. 2022. Vol. 168. 106589. URL: <https://doi.org/10.1016/j.aap.2022.106589>.
16. Weng J.C., Yu J.B., Di X.J., Lin P.F., Wang J.-J., Mao L.-Z. How does the state of bus operations influence passengers' service satisfaction? A method considering the differences in passenger preferences [Электронный

ресурс] / Transportation Research. Part A: Policy and Practice. 2023. Vol. 174. 103734. URL: <https://doi.org/10.1016/j.tra.2023.103734>.

17. Lv Y., Lv W., Ren Y., Ouyang Q. Optimizing the bus operation plan Based on Deep Learning. [Электронный ресурс] / Microprocessors and Microsystems. 2021. URL: <https://doi.org/10.1016/j.micpro.2021.104042>.

18. Li P., Wu W., Pei X. A separate modelling approach for short-term bus passenger flow prediction based on behavioral patterns: A hybrid decision tree method [Электронный ресурс] / Physica A: Statistical Mechanics and its Applications. 2023. Vol. 616. URL: <https://doi.org/10.1016/j.physa.2023.128567>.

19. Бебинов С.Е., Трофимова Л.С. Теоретическое обоснование для разработки показателей совершенствования подготовки и переподготовки персонала пассажирского автомобильного транспорта // Вестник Сибирского государственного автомобильно-дорожного университета. 2024. Т. 21. №1(95). С. 48-61. DOI 10.26518/2071-7296-2024-21-1-48-61. EDN QFTVHE.

20. Бебинов С.Е., Трофимова Л.С. Применение методов нечетких множеств для оценивания сформированности профессиональных навыков с учетом особенностей эксплуатации пассажирского автомобильного транспорта // Мир транспорта и технологических машин. 2024. №4-2(87). С. 74-82. DOI 10.33979/2073-7432-2024-4-2(87)-74-82. EDN LIRIEZ.

**Бебинов Сергей Евгеньевич**

Сибирский государственный автомобильно-дорожный университет (СибАДИ)

Адрес: 644080, Россия, г. Омск, пр. Мира, 5

К.п.н., доцент, доцент кафедры «Организация перевозок и безопасность движения»

E-mail: bebinov.ru@gmail.com

**Трофимова Людмила Семёновна**

Сибирский государственный автомобильно-дорожный университет (СибАДИ)

Адрес: 644080, Россия, г. Омск, пр. Мира, 5

Д.т.н., доцент, заведующая кафедрой «Организация перевозок и безопасность движения»

E-mail: trofimova\_ls@mail.ru

S.E. BEBINOV, L.S. TROFIMOVA

**METHODS FOR DETERMINING THE CONFORMITY OF PASSENGER TRANSPORT DRIVERS TO PROFESSIONAL AND QUALIFICATION REQUIREMENTS**

*Abstract. The results of the conducted study show that the methodological basis for assessing the compliance of drivers of passenger automobile transport with professional and qualification requirements is the fuzzy set method. The measured indicators of bus operation are used as the parameters under study. The evaluation indicators are coefficients corresponding to the number of points of professional skills formation and taking into account the range of assessments from the minimum to the maximum level in the existing operating conditions of the rolling stock.*

*Keywords:* drivers of passenger motor transport, measured indicators, professional driving skills, system of assessment coefficients of formation, compliance with professional and qualification requirements

**BIBLIOGRAPHY**

1. Proshina YU.A. Aktual`nye problemy kadrovoy politiki na predpriyatiyakh passazhirskogo avtomobil`nogo transporta // Vestnik universiteta. 2016. №6. S. 207-211. EDN WMGPKT.
2. YAkunina N.V. Pokazateli bezopasnosti transportnogo protsessa v sisteme dopuska pretendentov k perevozкам passazhirov avtomobil`nym transportom // Vestnik Orenburgskogo gosudarstvennogo universiteta. 2014. №9(170). S. 210-215. EDN TMWEYN.
3. Baskov V.N., Krasnikova D.A., Isaeva E.I. Vliyanie povedencheskogo faktora voditelya na obrazovanie transportnogo zatora // Mir transporta. 2019. T. 17. №4(83). S. 272-281. DOI 10.30932/1992-3252-2019-17-4-272-281. EDN LQUBOC.
4. Ageev E.V., Vinogradov E.S. Metodologiya prognozirovaniya oshibok kandidatom v voditeli pri analize dorozhnykh situatsiy // Mir transporta i tekhnologicheskikh mashin. 2024. №1-1(84). S. 63-72. DOI 10.33979/2073-7432-2024-1-1(84)-63-72. EDN IZGQGF.
5. Konovalova T.V., Nadiryan S.L., Mironova YU.P. K voprosu effektivnosti kadrovogo obespecheniya na avtomobil`nom transporte // Nauchno-tehnicheskie aspekty innovatsionnogo razvitiya transportnogo kompleksa: Mate-

rialy III Mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii, v ramkakh 3-go Mezhdunarodnogo Nauchnogo foruma Donetskoy Narodnoy Respubliki. Donetsk: Donetskaya akademiya transporta. 2017. S. 169-172. EDN YSACAZ.

6. Andryukhina T.N. Proektirovanie i realizatsiya kompetentnostnoy modeli professional'noy podgotovki spetsialistov avtomobil'nogo transporta // Vestnik Samarskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. Seriya: Psichologo-pedagogicheskie nauki. 2008. №1(9). S. 4-9. EDN MBFHNL.

7. Ageev E.V., Vinogradov E.S. Metodika issledovaniya parametrov podsistemy «kursant-avtomobil'» // Mir transporta i tekhnologicheskikh mashin. 2022. №3-2(78). S. 113-118. DOI 10.33979/2073-7432-2022-2(78)-3-113-118. EDN GPEFNC.

8. Volkov V.S., Lebedev E.G. Vliyanie kachestva podgotovki voditeľ'skogo sostava na bezopasnost' dvizheniya // Voronezhskiy nauchno-tehnicheskiy Vestnik. 2023. T. 2. №2(44). S. 81-87. DOI 10.34220/2311-8873-2023-81-87. EDN DNGFYP.

9. Trofimova L.S., Pevnev N.G. Struktura metodologii tekushchego planirovaniya raboty gruzovogo avtotransportnogo predpriatiya // Vestnik Sibirskogo gosudarstvennogo avtomobil'no-dorozhnogo universiteta. 2017. №6(58). S. 63-71. EDN YNHMWA.

10. Chen T., Sze N.N., Newnam S., Bai L. Effectiveness of the compensatory strategy adopted by older drivers: Difference between professional and non-professional drivers [Elektronnyy resurs] / Transportation Research. Part F: Traffic Psychology and Behaviour. 2021. Vol. 77. R. 168-180. URL: <https://doi.org/10.1016/j.trf.2021.01.006>.

11. Wang Y., Cao M., Liu Y., Ye R., Gao X., Ma L. Public transport equity in Shenyang: Using structural equation modelling [Elektronnyy resurs] / Research in Transportation Business & Management. 2022. Vol. 42. URL: <https://doi.org/10.1016/j.rtbm.2020.100555>.

12. N?vestad T.-O., Elvik R., Milch V., Karlsen K., Phillips R. Traffic safety in bus transport: An analysis of Norway's largest transit authority's contract requirements to bus companies [Elektronnyy resurs] / Transportation Research. Part F: Traffic Psychology and Behaviour. 2022. Vol. 89. R. 317-333. URL: <https://doi.org/10.1016/j.trf.2022.07.004>.

13. Jiao Y., Wang X., Hurwitz D., Lei Y., Zhou L. Revision of the driver behavior questionnaire for bus drivers in China based on in-vehicle monitoring data [Elektronnyy resurs] / Transportation Research. Part F: Traffic Psychology and Behaviour. 2024. Vol. 105. R. 24-41. URL: <https://doi.org/10.1016/j.trf.2024.06.021>.

14. Shen J., Liu Q., Ye Z., Jiang W., Ma C. Autonomous bus services: current research status and future recommendations // Digital Transportation and Safety. 2023. №2(3). R. 229-240. doi: 10.48130/DTS-2023-0019.

15. Wang L., Wang Y., Shi L., Xu X. Analysis of risky driving behaviors among bus drivers in China: The role of enterprise management, external environment and attitudes towards traffic safety [Elektronnyy resurs] / Accident Analysis & Prevention. 2022. Vol. 168. 106589. URL: <https://doi.org/10.1016/j.aap.2022.106589>.

16. Weng J.C., Yu J.B., Di X.J., Lin P.F., Wang J.-J., Mao L.-Z. How does the state of bus operations influence passengers' service satisfaction? A method considering the differences in passenger preferences [Elektronnyy resurs] / Transportation Research. Part A: Policy and Practice. 2023. Vol. 174. 103734. URL: <https://doi.org/10.1016/j.tra.2023.103734>.

17. Lv Y., Lv W., Ren Y., Ouyang Q. Optimizing the bus operation plan Based on Deep Learning. [Elektronnyy resurs] / Microprocessors and Microsystems. 2021. URL: <https://doi.org/10.1016/j.micpro.2021.104042>.

18. Li P., Wu W., Pei X. A separate modelling approach for short-term bus passenger flow prediction based on behavioral patterns: A hybrid decision tree method [Elektronnyy resurs] / Physica A: Statistical Mechanics and its Applications. 2023. Vol. 616. URL: <https://doi.org/10.1016/j.physa.2023.128567>.

19. Bebinov S.E., Trofimova L.S. Teoreticheskoe obosnovanie dlya razrabotki pokazateley sovershenstvovaniya podgotovki i perepodgotovki personala passazhirskogo avtomobil'nogo transporta // Vestnik Sibirskogo gosudarstvennogo avtomobil'no-dorozhnogo universiteta. 2024. T. 21. №1(95). S. 48-61. DOI 10.26518/2071-7296-2024-21-1-48-61. EDN QFTVHE.

20. Bebinov S.E., Trofimova L.S. Primenenie metodov nechetkikh mnozhestv dlya otsenivaniya sformirovaniyu professional'nykh navykov s uchetom osobennostey ekspluatatsii passazhirskogo avtomobil'nogo transporta // Mir transporta i tekhnologicheskikh mashin. 2024. №4-2(87). S. 74-82. DOI 10.33979/2073-7432-2024-4-2(87)-74-82. EDN LIRIEZ.

**Bebinov Sergey Evgenyevich**

Siberian State Automobile and Road University  
Address: 644080, Russia, Omsk, Mira Ave., 5  
Candidate of Pedagogical Sciences  
E-mail: bebinov.ru@gmail.com

**Trofimova Liudmila Semenovna**

Siberian State Automobile and Highway University  
Address: 644080, Russia, Omsk, Mira Ave., 5  
Doctor of Technical Sciences  
E-mail: trofimova\_ls@mail.ru

С.А. ГРЕБЕННИКОВ, В.Н. БАСКОВ, Г.О. КИСЕЛЕВ, А.В. РОГОЖИН

## НЕРАВНОМЕРНОСТЬ КОМПРЕССИИ ЦИЛИНДРОВ И РЕСУРС ДВС

**Аннотация.** Рассматривается зависимость показателей надежности, экономичности и негативного воздействия на окружающую среду от степени неравномерности работы цилиндров в двигателе внутреннего сгорания автомобильных транспортных средств. Обосновывается важность контроля неравномерности работы цилиндров в процессе эксплуатации автомобиля. Предложен более точный показатель оценки неравномерности работы цилиндров по результатам измеренных в них значений компрессии. Приводятся результаты аналитических и экспериментальных исследований, необходимых для прогнозирования ресурса ДВС по исходному значению коэффициента неравномерности компрессионных свойств цилиндров после выполненного ремонта. Даются рекомендации к встроенным средствам непрерывного поэлементного контроля/диагностирования технического состояния цилиндропоршневой группы ДВС.

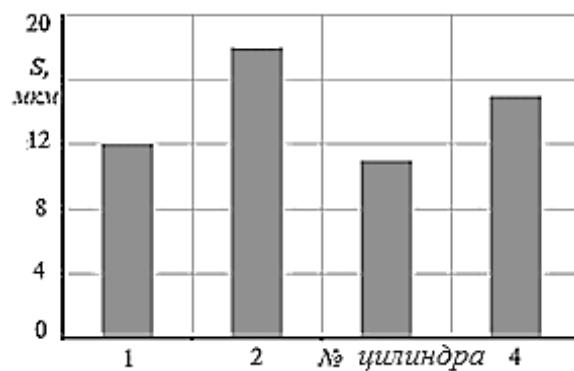
**Ключевые слова:** двигатель внутреннего сгорания, ресурс, прогнозирование, неравномерность, компрессионных свойств цилиндров и технического состояния

### **Введение**

Надежность, технико-экономические и экологические показатели двигателя внутреннего сгорания (ДВС) автотранспортного средства (АТС) во многом определяются уровнем работоспособности цилиндропоршневой группы (ЦПГ). Несмотря на известные достижения в технологии изготовления и упрочнения деталей ЦПГ отказы ДВС по причине их предельного износа составляют около 10 % [1, 2, 4, 12, 18], часто сопровождаются значительными убытками АТП из-за прекращения грузовых или пассажирских перевозок на загородных маршрутах.

По характеру возникновения и возможности прогнозирования отказы ЦПГ относятся к постепенным, а, соответственно, могут предотвращаться в результате своевременно выполненного предупредительного текущего ремонта (ТР).

Своевременное предотвращение отказа ЦПГ возможно только с использованием встроенных в бортовую сеть диагностических средств непрерывного контроля рабочих процессов в цилиндрах ДВС, над разработкой которых трудятся специалисты научно-исследовательских организаций и фирм-производителей АТС [4, 7-10, 19]. Основная причина необходимости постоянного и одновременного контроля эффективности работы каждого цилиндра ДВС заключается в значительной неравномерности изменения их технического состояния в процессе эксплуатации (рис. 1 [13]), требующей теоретического осмысливания и экспериментального подтверждения наличия функциональной взаимосвязи между степенью неравномерности работы цилиндров и их ресурсом.



**Рисунок 1 - Неравномерность значений износа деталей ЦПГ по цилиндрам двигателя ЗМЗ 4Ч 9,2/9,2 после 100 мото-ч работы в режиме холостого хода**

Перечисленные обстоятельства важности контроля технического состояния ЦПГ ДВС в процессе выполнения транспортного задания автомобилем определяют научную и практическую актуальность представленной работы.

Цель статьи – теоретически и экспериментально обосновать зависимости ресурса ДВС от неравномерности показателя технического состояния цилиндров в процессе эксплуатации и на их основе сформулировать требования к способу и средству их поэлементного диагностирования.

### **Материал и методы**

В качестве объектов для выполнения работ экспериментального исследования по сбору статистического материала о неравномерности технического состояния одноименных элементов ЦПГ были отечественные ДВС заводов ЗМЗ и ВАЗ.

Методика исследования неравномерности изнашивания деталей ЦПГ ДВС предусматривала стендовые и эксплуатационные испытания ДВС имеющих фактический эксплуатационный износ отдельных гильз цилиндров, зафиксированный заранее, и ДВС с искусственно созданным износом. Например, контролируемое снижение компрессионных свойств в конкретных цилиндрах при стендовых испытаниях ДВС осуществлялось с использованием специально изготовленных проставок с калиброванными сквозными отверстиями, установленных между ГБЦ и свечой зажигания. Численные значения утечек рабочего тела через калиброванные отверстия проставок фиксировались компрессометром КБ – 1126.

Оценку неравномерности компрессионных свойств цилиндров производили по показателю  $\delta P_C$ , который определялся как отношение максимальной разности значений измеренной компрессии между цилиндрами  $P_{Cmax} - P_{Cmin}$  к ее средней величине по всем цилиндрам ДВС

$$\delta P_C = \frac{P_{Cmax} - P_{Cmin}}{\overline{P}_C}. \quad (1)$$

Определение износа деталей ЦПГ выполнялись при помощи электронного микрометра «GRIFF» (Россия) МК-75 и нутромера BMW-17 с точностью измерения 0,001 мм. Замер износа гильз цилиндров производили в плоскости качания шатуна как наиболее изнашивающей (износ на 10...20% выше, чем в перпендикулярной ей) в месте остановки первого компрессионного кольца.

Наибольшему износу среди элементов ЦПГ подвержены поршневые кольца. В процессе износа компрессионных колец по радиальной толщине изменяется зазор в их замке (начальное значение  $S_{Kpo} = 0,20\text{--}0,35$  мм), который возможно оценить без разборки ДВС. Именно его приняли в качестве технического критерия при исследовании изменения межремонтного ресурса ЦПГ после ТР. Для ДВС ЗМЗ и ВАЗ максимальное значение зазора в замке  $S_{Kp} = 2$  мм определено по параметрам предельного расхода моторного масла на «угар» и снижения компрессии в цилиндрах, до значений, соответственно  $P_{cZMz} < 0,6$  МПа и  $P_{cVAZ} < 1,0$  МПа [6, 8, 17].

### **Теория / Расчет**

За показатель неравномерности износа одноименных деталей по цилиндрам ДВС принимали максимальную разность его величин при определённом пробеге  $l$

$$S_h(l) = S_{max} - S_{min}, \quad (2)$$

где  $S_{max}$ ,  $S_{min}$  – соответственно значения максимального и минимального износа.

В качестве индивидуальной оценки неравномерности износа деталей в однотипных сопряжениях ЦПГ конкретного ДВС использовали коэффициент неравномерности, по физической сути аналогичный (1)

$$\delta_S = \frac{S_{max} - S_{min}}{\overline{S}}. \quad (3)$$

Базовой теоретической основой для достижения поставленной цели статьи и проведения экспериментальных исследований служит зависимость [1] деградации технического состояния одноименных сопряжений «гильза цилиндра – компрессионное поршневое кольцо»

по цилиндрам с увеличением пробега  $l$

$$S = S_0 e^{bl}, \quad (4)$$

где  $S_0$  – исходное значение структурного (диагностического) параметра после этапа приработки;

$b$  – коэффициент интенсификации процесса изнашивания сопряженных деталей ЦПГ.

Поскольку после выполненного ТР ЦПГ замененные детали (поршневые компрессионные кольца, гильзы цилиндра и др.) функционируют с частично изношенными элементами КШМ при большем значении исходного зазора  $S_1 > S_0$ , чем у работавших до ремонта, то динамическая нагрузка на вновь поставленные элементы также будет выше прежней, что увеличит интенсивность изнашивания  $\alpha$  всех сопряжений ЦПГ ростом коэффициента интенсификации  $b_1 > b_0$  процесса изнашивания по зависимости [1]

$$\alpha = \alpha_0 e^{b_1 l}, \quad (5)$$

где  $\alpha_0$  – интенсивность изнашивания сопряжений «гильза цилиндра – компрессионное поршневое кольцо» до ТР.

Принимая во внимание зависимости (4) и (5), прогнозируемый ресурс  $l_i$  замененного  $i$ -го элемента ЦПГ относительно первоначального пробега  $l_0$  будет экспоненциально уменьшаться

$$l_i = \frac{S_n - S_0}{\alpha_0 \cdot e^{b_1 l}} = l_0 e^{-b_1 l}, \quad (6)$$

где  $l_0 = (S_n - S_0)/\alpha_0$  – наработка ЦПГ ДВС до первого ТР;

$S_n$  – значение предельного износа (зазора)  $i$ -го замененного элемента ЦПГ при ТР.

### Результаты и обсуждение

Аппроксимация экспериментально полученных значений износа сопряжений «гильза – компрессионное кольцо» в процессе эксплуатации (по пробегу  $L$ ) в исследуемых двигателях ЗМЗ и ВАЗ подтвердила теоретически обоснованный экспоненциальный вид зависимости (4), численные параметры которой приведены на рисунках 2 и 3. Установлено также, что ресурс элементов ЦПГ ДВС в последовательных межремонтных пробегах АТС после выполненного ТР уменьшается по зависимости (5):

- среднее значение снижения ресурса компрессионных колец после их замены (без расточки цилиндров) при первом ТР в двигателях ВАЗ составило более 17 % (рис. 2);

- после проведения первого ТР по замене элементов ЦПГ средняя наработка на отказ по двигателям ЗМЗ 4Ч9,2/9,2 снизилась на 10% (рис. 3).

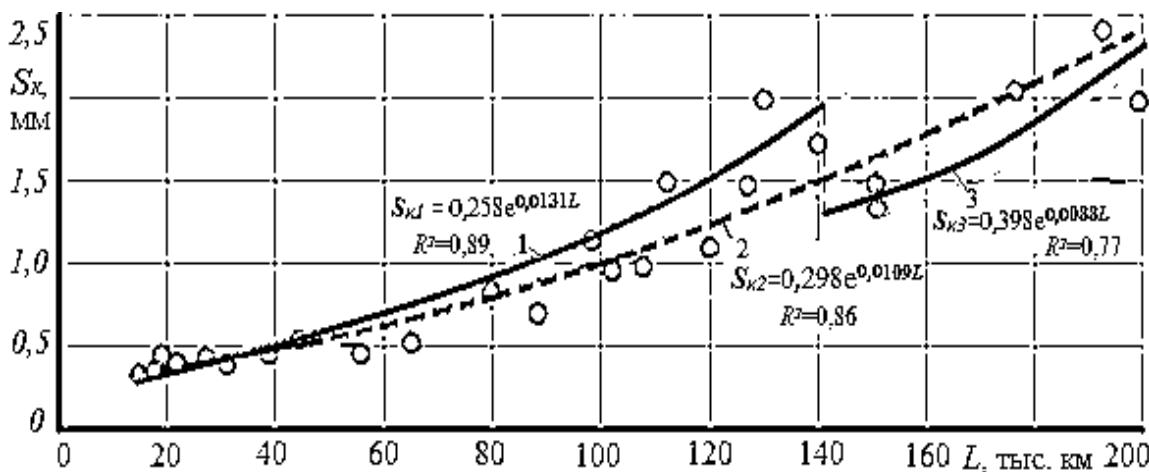


Рисунок 2 - Изменение значений зазора в замке первого компрессионного поршневого кольца в цилиндрах ДВС ВАЗ от пробега  $L$  до (1) и после ТР (3)

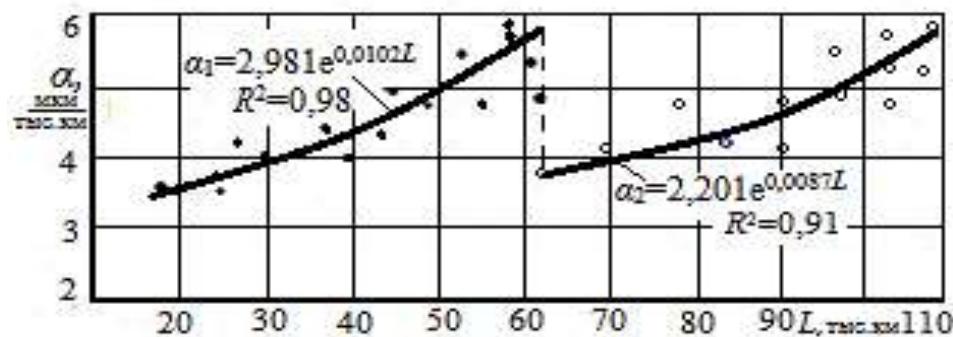


Рисунок 3 - Зависимость интенсивности изнашивания  $\alpha$  цилиндров двигателя ЗМЗ 4Ч9,2/9,2 по пробегу  $L$  до первого ТР ( $a_1$ ) и после ( $a_2$ )

Показательны в этом отношении результаты экспериментальных данных докторов технических наук В.И. Чумака и И.Б. Гурвича, исследовавших изменение ТЭП двигателей ЗМЗ 4Ч9,2/9,2 до ТР ЦПГ и после в процессе ускоренных испытаний при номинальной частоте вращения коленчатого вала  $n_{\text{ном}}=2500 \text{ мин}^{-1}$  и полной нагрузке. Как свидетельствуют, приведенные на рисунке 4 графики изменения ТЭП по наработке ДВС ЗМЗ 4Ч9,2/9,2, характеризующие техническое состояние двигателя вплоть до предельно допустимых значений, после выполнения ТР по замене поршневых колец, поршней и вкладышей коленчатого вала, их ресурс использования ЦПГ был на 20 % ниже (снизился с 50 до 40 мото-ч) и соответствовал зависимости (6).

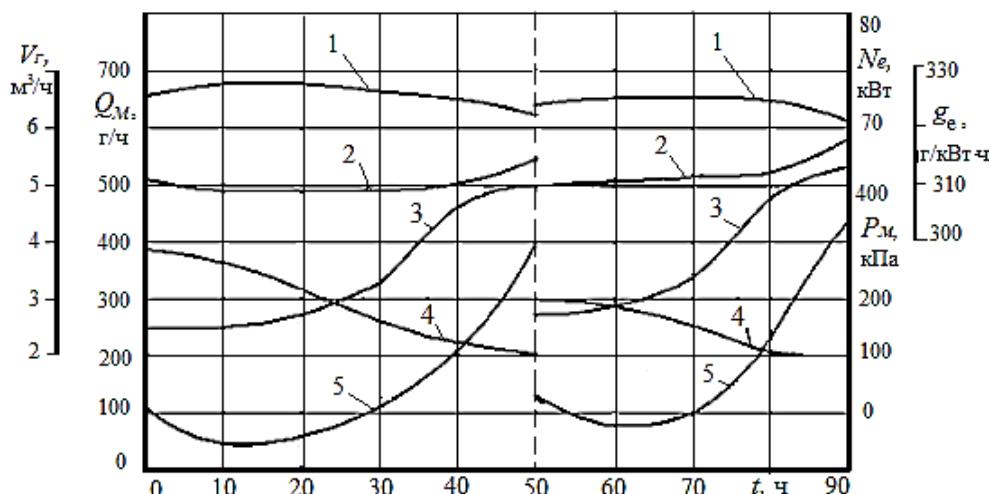


Рисунок 4 - Изменение наработки  $t$  показателей технического состояния до предельных значений при ускоренных испытаниях ДВС 4Ч 9,2/9,2 до ТР ( $t=50$  ч) и после:

1- эффективная мощность,  $N_e$ ; 2 – удельный расход топлива,  $g_e$ ; 3 - объём картерных газов,  $V_r$ ; 4 – давление масла в магистрали,  $p_m$ ; 5 - расход моторного масла  $Q_m$  «на угар»

Неравномерность изнашивания одноименных элементов ЦПГ соответственно отражается на компрессионных свойствах цилиндров, которые, как показал анализ результатов экспериментальных исследований, даже в ДВС одной модели, имеющих одинаковый пробег, по средним её значениям отличаются, пропорционально изменениям структурных параметров в ЦПГ.

Например, для ДВС автомобилей ВАЗ (рис. 5 по данным [2]) характерны следующие показатели отклонения от средней компрессии: при пробеге  $l$  до 20 тыс. км разность от средней компрессии  $P_c = 1,17 \text{ МПа}$  составляет  $\Delta P_c = \pm 0,05 \text{ МПа}$ ; при  $l = 20-80$  тыс. км – при средней компрессии  $P_c = 1,12 \text{ МПа}$ ,  $\Delta P_c = \pm 0,08 \text{ МПа}$ ; при  $l = 80-180$  тыс. км - при средней компрессии  $P_c = 1,04 \text{ МПа}$ ,  $\Delta P_c = \pm 0,1 \text{ МПа}$ . Эти изменения значений средней компрессии в цилиндрах ДВС автомобилей ВАЗ от пробега  $l$  подчиняются зависимости экспоненциального вида (4) с отображенными численными параметрами на рисунке 5.

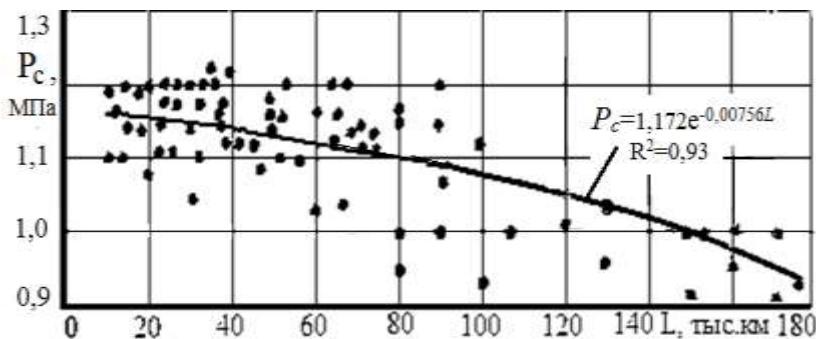


Рисунок 5 - Неравномерность показателя среднего значения компрессии  $P_c$  в цилиндрах ДВС автомобилей ВАЗ от пробега  $L$

Проведенными стендовыми испытаниями ДВС ЗМЗ 4Ч 9,2/9,2 доказано, что повышение коэффициента (1) неравномерности компрессионных свойств по цилиндрам ДВС с  $\delta P_c = 0,03$  до 0,06 МПа снижает ресурс на 25 % и более по экспоненциальному закону прогрессирующего характера (4). Уменьшение ресурса ЦПГ в ДВС, помимо рассмотренных ранее причин, дополнительно вызвано неравномерностью значения степени сжатия  $\varepsilon$  в цилиндрах, изменение которой на каждые 0,1 единицу относительно номинальной повышает интенсивность изнашивания сопряжения «гильза – компрессионное кольцо» на 2...3 % [8].

Следует заметить, что технические условия на конвейерную сборку ЦПГ и КШМ двигателя ЗМЗ 402.10 допускает размах по отклонениям степени сжатия цилиндров до  $\pm 0,2$  единицы от номинального её значения  $\varepsilon = 8,2$ , изменяя средние начальные значения компрессии  $P_c$  по цилиндрам ДВС на величину 0,06 МПа; в двигателях ВАЗ на 0,1 МПа.

Поэтому были выполнены экспериментальные исследования по обоснованию взаимосвязи ресурса ЦПГ со значением неравномерности исходных структурных показателей в одноименных элементах ЦПГ, выраженных через диагностический параметр компрессии  $P_c$ , а именно, коэффициент  $\delta P_c$  (1) неравномерности компрессионных свойств цилиндров. .

По результатам поэтапного измерения компрессионных свойств цилиндров ДВС ЗМЗ 4Ч 9,2/9,2 (средней величины компрессии  $P_c$  и коэффициента  $\delta P_c$  неравномерности по цилиндрам) до выполнения им ТР ЦПГ, у 32 подконтрольных автомобилей – такси в процессе эксплуатации с годовым пробегом свыше 100 тыс. км, все АТС (рис. 6) были разделены на несколько групп в зависимости от исходного показателя коэффициента  $\delta P_c$ , измеренного в начале эксплуатации, с интервалом  $\Delta \delta P_c = 0,01$ .

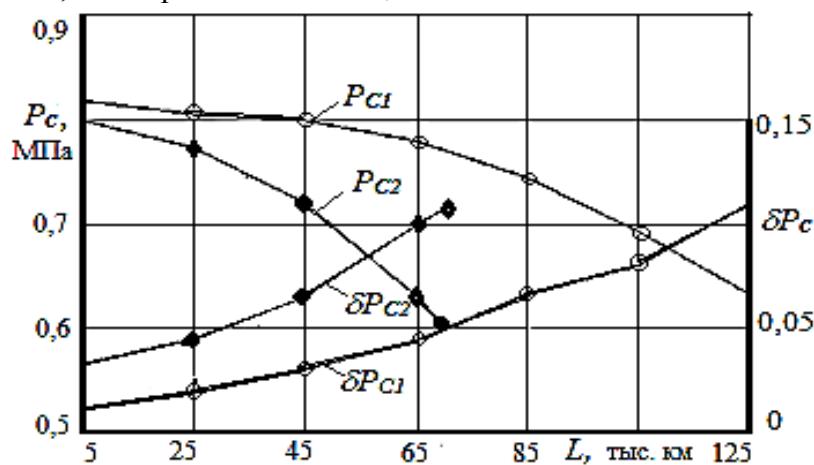


Рисунок 6 - Изменение средней величины компрессии  $P_{c1}$ ,  $\bar{P}_{c2}$  и коэффициента ее неравномерности  $\delta P_{c1}$  и  $\delta P_{c2}$  по цилиндрам ДВС ЗМЗ 4Ч 9,2/9,2 по пробегу  $L$

Первую группу (17 АТС), составили двигатели АТС с практически одинаковой, максимально достижимой по техническим условиям компрессией в цилиндрах  $P_{c1}=0,82$  МПа, у

которых после этапа приработки (5-10 тыс. км), коэффициент неравномерности компрессионных свойств цилиндров  $\delta P_{C1}$  не превышал 0,020 (рис. 6). У ДВС этой группы АТС при пробеге  $l$  в интервале  $105 \pm 5$  тыс. км значение коэффициента  $\delta P_{C1}$  неравномерности компрессии по цилиндрам составляло менее 0,09, что соответствовало максимальной разнице компрессии  $\Delta P_C$  по цилиндрам 0,08 МПа при предельно допустимой 0,1 МПа [5, 6], а средняя её величина  $P_{C1}$  была выше допустимой, равной 0,65 МПа. Интенсивность изменения коэффициента неравномерности  $\delta P_{C1}$  компрессии по пробегу  $l$  соответствовала теоретически обоснованной экспоненциальной зависимости (4) износа основного сопряжения «гильза – компрессионное поршневое кольцо» с высоким значением коэффициента детерминации  $R^2$

$$\delta P_{C1} = 0,0132 e^{0,0168l}, R^2=0,98.$$

Зарегистрированные окончательные наработки двигателей первой группы АТС с коэффициентом  $\delta P_{C1}$  (рис. 6) до текущего ремонта по замене элементов цилиндропоршневой группы находились в пределах 130-250 тыс. км. Прекращение эксплуатации АТС с ДВС первой группы происходило при увеличении коэффициента неравномерности компрессионных свойств цилиндров до величины  $\delta P_{C1} = 0,11-0,12$ , при которой расход моторного масла «на угар» превышал нормативное ограничение в 2,4 % от расхода топлива [11], то есть по экономическому и экологическому критериям [4, 9, 14, 17].

Выделенные во вторую группу АТС с позиции неравномерности компрессионных свойств цилиндров ДВС представлены неудачно восстановленными экземплярами, у которых после этапа приработки показатели коэффициента неравномерности  $\delta P_{C2} = 0,035-0,040$  (рис. 6) были близкие к предельно допустимому значению. Эти ДВС характеризовались водителями как «с повышенной шумностью», их эксплуатация сопровождалась большим на 3-7 % расходом топлива и моторного масла «на угар» по сравнению с двигателями первой группы. Коэффициент  $\delta P_{C2}$  неравномерности компрессии по цилиндрам этих ДВС достигал предельной величины 0,11 при относительно малом пробеге  $L = 65\dots80$  тыс. км (рис. 6), когда расход масла «на угар» превышал допустимое значение в 2,4 % от расхода топлива и составлял более 0,3 л на 100 км. Интенсивность изменения коэффициента неравномерности  $\delta P_{C2}$  компрессии в цилиндрах ДВС второй группы по пробегу  $l$  автомобиля составляла  $\delta P_{C2} = 0,0297 e^{0,0153l}, R^2=0,97$ ; их текущий ремонт требовал более крупных материальных затрат, часто со шлифовкой шеек коленчатого вала под ремонтный размер.

По экспериментально полученным результатам определили зависимость потенциально возможного ресурса ЦПГ двигателей ЗМЗ 4Ч 9,2/9,2 от исходного (после этапа приработки) коэффициента неравномерности компрессионных свойств цилиндров  $\delta P_C$ , (рис. 7), необходимую для формирования заключения об остаточном ресурсе ЦПГ при осуществлении процесса диагностирования.

Приведенные на рисунке 7 данные взаимозависимости ресурса  $L_{ЦПГ}$  элементов ЦПГ ДВС ЗМЗ 4Ч 9,2/9,2 и коэффициента  $\delta P_C$  неравномерности компрессии в цилиндрах сформулировали требования к разрабатываемому способу диагностирования ЦПГ, реализуемого в виде встроенного устройства в бортовую информационно-диагностическую сеть автомобиля.

### Выводы

Взаимосвязь ресурса ДВС от показателя неравномерности технического состояния взаимосвязанных одноименных элементов ЦПГ должна рассматриваться и обосновываться с учетом показателя неравномерности их исходных или текущих структурных параметров (за-

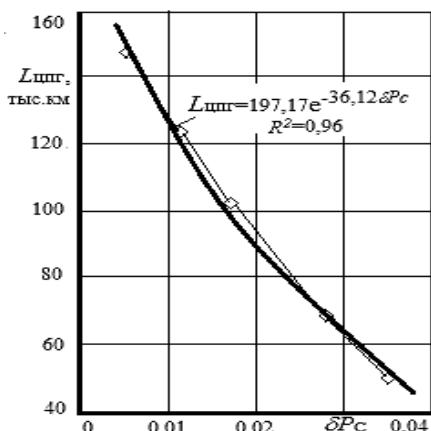


Рисунок 7 - Зависимость ресурса ЦПГ двигателей ЗМЗ 4Ч 9,2/9,2 от исходного коэффициента  $\delta P_C$  неравномерности компрессии в цилиндрах

зоров), сложившегося в процессе производства или эксплуатации АТС.

Указываемый автомобильными фирмами диагностический норматив предельной максимальной разности величин компрессии по цилиндрам (для ДВС, работающих на бензине, не должна превышать 0,07 МПа, в дизельных – 0,15 МПа) ДВС не в полной мере характеризует изменение технического состояния ЦПГ в процессе эксплуатации, так как не учитывает, что при закономерном уменьшении абсолютных значений компрессии в цилиндрах при одной и той же их разности неравномерность работы цилиндров в ДВС увеличивается, отрицательно влияя на выходные его характеристики. Предложенный для оценки неравномерности компрессионных свойств цилиндров ДВС коэффициент  $\delta p_c$  неравномерности более точно адаптирован к контролю их технического состояния.

Максимальное значение ресурса ЦПГ возможно достигнуть только в случае изготовления ДВС с идентичными величинами структурных параметров в её одноименных сопряжениях «гильза цилиндра – поршневые кольца» с минимальными допускаемыми зазорами по техническим условиям.

При назначении ТР ЦПГ необходимо решать его технико-экономическую целесообразность, поскольку с каждой последующей заменой детали продлеваемый ресурс не остается постоянным, а уменьшается по зависимости (6) по причине увеличенного износа других, с ней сопряженных деталей.

Установленные функциональные взаимосвязи (1), (4), (6) неравномерности изменения технического состояний одноименных элементов ЦПГ с ресурсом, позволяют сформулировать требования к созданию более точного диагностического устройства для непрерывного контроля технического состояния ЦПГ в ДВС.

## **СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ**

1. Авдонькин Ф.Н. Оптимизация изменения технического состояния автомобиля. М.: Транспорт, 1993. 350 с.
2. Автомобили ВАЗ: Изнашивание и ремонт / А. А. Звягин и др., под ред. А.А. Звягина. Л.: Политехника, 1991. 255 с.
3. Баженов Ю. В., Баженов М.Ю. Основы надежности и работоспособности технических систем. Владимир: ВлГУ, 2017. 267 с.
4. Болдин А.П., Сарбаев В.И. Надёжность и техническая диагностика подвижного состава автомобильного транспорта: теоретические основы. М.: МАИИ, 2010. 206 с.
5. Бородин А.Л., Васильев В.И., Шабуров В.Н. Методика синтеза алгоритма постановки диагноза агрегатов и систем автомобиля // Ученые записки Крымского инженерно-педагогического университета. Симферополь: КИПУ, 2022. №4(78). С. 231-237.
6. Вальехо Мальдонадо П.Р., Чайнов Н.Д. Расчет кинематики и динамики рядных поршневых двигателей. М.: ИНФРА-М, 2022. 259 с.
7. Системы телеметрии и мониторинга сельскохозяйственной техники: монография / И.Г. Голубев, Н.П. Мишурев, В.Я. Гольтяпин и др. М.: ФГБНУ «Росинформагротех». 2020. 176 с.
8. Гребенников С.А., Гребенников А.С., Киселёв Г.О., Рогожин А.В. Обоснование динамического способа диагностирования цилиндропоршневой группы ДВС // Актуальные вопросы технической эксплуатации и автосервиса подвижного состава автомобильного транспорта. М.: МАДИ. 2023. С.128-135.
9. Гребенников С.А., Басков В.Н., Гребенников А.С. и др. Диагностирование трансмиссии автомобилей по показателям неравномерности вращения её элементов // Грузовик. 2022. №3. С. 9-15.
10. Дидманидзе О.Н., Дорохов А.С., Катаев Ю.В. Тенденции развития цифровых технологий диагностирования технического состояния тракторов // Техника и оборудование для села. 2020. №11(281). С. 39-43.
11. Добролюбов И.П., Савченко О.Ф., Альт В.В. и др. Точность идентификации состояния двигателей внутреннего сгорания с настраиваемой моделью с помощью измерительной экспертной системы // Вычислительные технологии. 2021. Т. 26. №6. С. 54-67.
12. Новиков В.А., Седов И.В., Богачев Ю.В. Некоторые аспекты защиты результатов интеллектуальной деятельности на примере исследования влияния отклонения конструктивных параметров двигателя внутреннего сгорания на неравномерность частоты вращения // Автомобильная промышленность. 2022. №1. С. 27-31.
13. Родионов Ю.В., Глебов М.Ф. Повышение эффективности эксплуатации автомобилей на холостом ходу //Автотранспортное предприятие. 2007. №7. С. 46-51.
14. Сарбаев В.И., Гусев А.Г., Гришин А.С., Джованис С. Управление предупредительными заменами и запасами деталей и узлов в автобусном парке // Мир транспорта и технологических машин. 2023. №2(81). С. 18-25.
15. Агуреев И.Е., Груничев А.В., Платонов К.Ю. [и др.] Экспериментальные исследования влияния

монтажных деформаций цилиндра дизеля на его эксплуатационные показатели // Известия МГТУ МАМИ. 2020. №1(43). С. 2-7.

16. Agureev I.E., Elagin M.Y., Khmelev R.N. [et al.]. Using experience of the dynamic models of piston internal combustion engines // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering; International Scientific Conference Interstroymeh. 2019. Kazan: Institute of Physics Publishing. 2020. P. 012080. DOI 10.1088/1757-899X/786/1/012080.

17. Boldin A.P., Sarbaev, V.I., Aksenov, P.V. Diagnostics of passenger cars and minibuses with diesel engines for compliance with euro emissions standards // International Journal of Mechanical Engineering and Technology. Vol. 8. 2017. P. 933-943.

18. Denisov A.S., Grebennikov A.S., Grebennikov S.A., Snarsky S.V., Nosov A.O. Diagnostics of the lubrication system and cylinder piston group of automobile diesel // Oil and Gas Engineering (OGE-2020): AIP Conf. Proc. Vol. 2285, 050011-1–050011-5.

19. Terentyev A.V., Karelina M.Yu., Pavlovskaya A.A., Arifullin I.V., Karelina E.A. Methodological approach to digitalization of management processes in automobile and road complex // IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering. Moscow. №832. 2020. 012069. DOI: 10.1088/1757-899X/832/1/012069.

**Гребенников Сергей Александрович**

Саратовский государственный технический университет имени Гагарина Ю.А.

Адрес: 410054, Россия, Саратов, Политехническая, 77

К.т.н., доцент, доцент

E-mail: sa.greb@mail.ru

**Басков Владимир Николаевич**

Саратовский государственный технический университет имени Гагарина Ю.А.

Адрес: 410054, Россия, Саратов, Политехническая, 77

Д.т.н., доцент, профессор

E-mail: sedankin29@mail.ru

**Киселёв Глеб Олегович**

Саратовский государственный технический университет имени Гагарина Ю.А.

Адрес: 410054, Россия, Саратов, Политехническая, 77;

Аспирант

E-mail: kiselew.gl@yandex.ru

**Рогожин Алексей Васильевич**

Саратовский государственный технический университет имени Гагарина Ю.А.

Адрес: 410054, Россия, Саратов, Политехническая, 77

Аспирант

E-mail: rogozhin-97@mail.ru

---

S.A. GREBENNIKOV, V.N. BASKOV, G.O. KISELYOV, A.V. ROGOZHIN

**CYLINDER COMPRESSION UNEVENNESS AND INTERNAL  
COMBUSTION ENGINE LIFE**

**Abstract.** The dependence of indicators of reliability, efficiency and the degree of negative impact on the environment on the degree of uneven operation of cylinders in an internal combustion engine of motor vehicles is considered. The importance of controlling the uneven operation of the cylinders during the operation of the car is substantiated. A more accurate indicator for estimating the uneven operation of cylinders based on the results of the compression values measured in them is proposed. The results of analytical and experimental studies necessary to predict the life of an internal combustion engine based on the initial value of the coefficient of unevenness of the compression properties of the cylinders after the repair are presented. Recommendations are given for the built-in means of continuous piecemeal monitoring/diagnosis of the technical condition of cylinder piston groups of internal combustion engines.

**Keywords:** Internal combustion engine, resource, forecasting, unevenness, compression properties of cylinders, technical condition

**BIBLIOGRAPHY**

1. Avdon`kin F.N. Optimizatsiya izmeneniya tekhnicheskogo sostoyaniya avtomobilya. M.: Transport, 1993.

350 s.

2. Avtomobili VAZ: Iznashivanie i remont / A. A. Zvyagin i dr., pod red. A.A. Zvyagina. L.: Politekhnika, 1991. 255 s.
3. Bazhenov YU. V., Bazhenov M.YU. Osnovy nadezhnosti i rabotosposobnosti tekhnicheskikh sistem. Vladimir: VIGU, 2017. 267 s.
4. Boldin A.P., Sarbaev V.I. Radiozhnost` i tekhnicheskaya diagnostika podvizhnogo sostava avtomobil`nogo transporta: teoreticheskie osnovy. M.: MAII, 2010. 206 s.
5. Borodin A.L., Vasil`ev V.I., Shaburov V.N. Metodika sinteza algoritma postanovki diagozo agregatov i sistem avtomobilya // Uchenye zapiski Krymskogo inzhenerno-pedagogicheskogo universiteta. Simferopol': KIPU, 2022. №4(78). S. 231-237.
6. Val`ekho Mal`donado P.R., CHaynov N.D. Raschet kinematiki i dinamiki ryadnykh porshnevykh dvigateley. M.: INFRA-M, 2022. 259 s.
7. Sistemy telemetrii i monitoringa sel'skokhozyaystvennoy tekhniki: monografiya / I.G. Golubev, N.P. Mishurov, V.YA. Gol'tyapin i dr. M.: FGBNU "Rosinformagrotekh". 2020. 176 s.
8. Grebennikov S.A., Grebennikov A.S., Kiselyov G.O., Rogozhin A.V. Obosnovanie dinamicheskogo sposoba diagnostirovaniya tsilindroporshnevoy gruppy DVS // Aktual`nye voprosy tekhnicheskoy ekspluatatsii i avtoservisa podvizhnogo sostava avtomobil`nogo transporta. M.: MADI. 2023. S.128-135.
9. Grebennikov S.A., Baskov V.N., Grebennikov A.S. i dr. Diagnostirovanie transmissii avtomobiley po pokazatelyam neravnomernosti vrashcheniya eio elementov // Gruzovik. 2022. №3. S. 9-15.
10. Didmanidze O.N., Dorokhov A.S., Kataev YU.V. Tendentsii razvitiya tsifrovyykh tekhnologiy diagnostirovaniya tekhnicheskogo sostoyaniya traktorov // Tekhnika i oborudovanie dlya sela. 2020. №11(281). S. 39-43.
11. Dobrolyubov I.P., Savchenko O.F., Al`t V.V. i dr. Tochnost` identifikatsii sostoyaniya dvigateley vnutrennego sgoraniya s nastraivaemoy model`yu s pomoshch`yu izmeritel`noy ekspertnoy sistemy // Vychislitel`nye tekhnologii. 2021. T. 26. №6. S. 54-67.
12. Novikov V.A., Sedov I.V., Bogachev YU.V. Nekotorye aspekty zashchity rezul`tatov intellektual`noy deyatel`nosti na primere issledovaniya vliyaniya otkloneniya konstruktivnykh parametrov dvigatelya vnutrennego sgoraniya na neravnomernost` chastoty vrashcheniya // Avtomobil`naya promyshlennost`. 2022. №1. S. 27-31.
13. Rodionov YU.V., Glebov M.F. Povyshenie effektivnosti ekspluatatsii avtomobiley na kholostom khodu // Avtotransportnoe predpriyatiye. 2007. №7. S. 46-51.
14. Sarbaev V.I., Gusev A.G., Grishin A.S., Dzhovanis S. Upravlenie predupreditel`nymi zamenami i zapasami detaley i uzlov v avtobusnom parke // Mir transporta i tekhnologicheskikh mashin. 2023. №2(81). S. 18-25.
15. Agureev I.E., Grunichev A.V., Platonov K.YU. [i dr.] Eksperimental`nye issledovaniya vliyaniya montazhnykh deformatsiy tsilindra dizelya na ego ekspluatatsionnye pokazateli // Izvestiya MGTU MAMI. 2020. №1(43). S. 2-7.
16. Agureev I.E., Elagin M.Y., Khmelev R.N. [et al.]. Using experience of the dynamic models of piston internal combustion engines // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering; International Scientific Conference Interstroymeh. 2019. Kazan: Institute of Physics Publishing. 2020. P. 012080. DOI 10.1088/1757-899X/786/1/012080.
17. Boldin A.P., Sarbaev,V.I., Aksenov, P.V Diagnostics of passenger cars and minibuses with diesel engines for compliance with euro emissions standards // International Journal of Mechanical Engineering and Technology. Vol. 8. 2017. P. 933-943.
18. Denisov A.S., Grebennikov A.S., Grebennikov S.A., Snarsky S.V., Nosov A.O. Diagnostics of the lubrication system and cylinder piston group of automobile diesel // Oil and Gas Engineering (OGE-2020): AIP Conf. Proc. Vol. 2285, 050011-1-050011-5.
19. Terentyev A.V., Karelina M.Yu., Pavlovskaya A.A., Arifullin I.V., Karelina E.A. Methodological approach to digitalization of management processes in automobile and road complex // IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering. Moscow. №832. 2020. 012069. DOI: 10.1088/1757-899X/832/1/012069.

**Grebennikov Sergey Alexandrovich;**

Saratov State Technical University

Address: 410054, Rossia, Saratov, Polytechnic, 77

Candidate of Technical Sciences

E-mail: sa.greb@mail.ru

**Baskov Vladimir Nikolaevich,**

Saratov State Technical University

Address: 410054, Rossia, Saratov, Polytechnic, 77

Doctor of Technical Sciences

E-mail: sedankin29@mail.ru

**Kiselyov Gleb Olegovich;**

Saratov State Technical University

Address: 410054, Rossia, Saratov, Polytechnic, 77

Graduate student

E-mail: kiselew.gl@yandex.ru

**Rogozhin Alexey Vasilyevich;**

Saratov State Technical University

Address: 410054, Rossia, Saratov, Polytechnic, 77

Graduate student

E-mail: rogozhin-97@mail.ru

УДК 656.13

doi: 10.33979/2073-7432-2025-2-2(89)-80-88

ЛЮ ЮЙВЭЙ, Д.В. КАПСКИЙ, С.А. ЛЯПИН, Д.С. САРАЖИНСКИЙ

## ОЦЕНКА КАЧЕСТВА АЛГОРИТМОВ АДАПТИВНОГО УПРАВЛЕНИЯ СВЕТОФОРНЫМИ ОБЪЕКТАМИ МЕТОДОМ ИМИТАЦИОННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ

**Аннотация.** В статье рассматриваются вопросы оценки качества алгоритмов адаптивного управления светофорными объектами с использованием системы имитационного моделирования городской мобильности SUMO – Simulation of Urban MObility. Исследуется стратегия организации светофорного регулирования с адаптивным управлением на участке дорожной сети с трамвайным движением в варианте гибкого регулирования по принципу «actuated control».

Разработаны решения и сформулированы предложения по оптимизации режимов светофорного регулирования, что позволило организовать эффективное адаптивное управление на исследуемом участке. Проанализировано влияние предлагаемого адаптивного управления на задержки и остановки транспорта.

**Ключевые слова:** светофорный объект, адаптивное управление, светофорное регулирование, дорожная инфраструктура, скорость движения, аварийность, пробки, перекресток

### Введение

Проблема не соответствия скорости строительства транспортных магистралей растущему объему автомобильного трафика является одной из самых острых в современной городской инфраструктуре. Автомобильная нагрузка на дороги увеличивается приводя к образованию пробок, и как следствие к задержкам в доставке грузов и снижению качества жизни граждан. Поэтому, оптимизация управления существующей дорожно-транспортной сетью представляет собой гораздо более экономичный и быстрый способ решения транспортных проблем чем весьма капиталоемкое наращивание дорожной инфраструктуры [1]. При этом не нужно забывать про парадокс Браеса, согласно которому строительство более широких дорог может ухудшить ситуацию с дорожным движением. Ранее, однако, недостаток эффективных технологий управления трафиком сдерживал полную реализацию потенциала оптимизации улично-дорожной сети [2]. Это касалось как сбора и обработки данных о транспортных потоках, так и разработки алгоритмов управления трафиком, учитывающих множество факторов. Ситуация коренным образом изменилась с появлением новых технологий [3]. Современные системы интеллектуального управления транспортом используют целый комплекс средств оптимизации дорожного движения. К ним относятся адаптивные системы управления светофорами а также интеллектуальные транспортные системы(ИТС), включающие в себя датчики, камеры, системы распознавания номерных знаков и другие средства сбора и обработки данных о транспортных потоках в режиме реального времени. Эти данные обрабатываются с помощью мощных вычислительных центров, способных анализировать текущую обстановку и прогнозировать будущее изменения в трафике [4].

Адаптивные системы управления светофорами вместо статических циклов системы способны динамически регулировать работу светофоров в зависимости от реальной ситуации на дороге. Это позволяет оптимизировать пропускную способность перекрёстков и минимизировать время ожидания на светофорах. Современной системы используют алгоритмы машинного обучения, которые постоянно совершенствуются на основе анализа больших объемов данных [5].

### Материал и методы

Внедрение адаптивного регулирования долгое время сдерживалась рядом с серьёзных проблем главная из них были сложность и дороговизна сбора данных о транспортных потоках. Традиционные методы основанные на использовании дорожных датчиков требовали значительных

капитальных затрат на установку и что особенно важно на их регулярное техническое обслуживание. Для обеспечения надёжности приходилось устанавливать дублирующие датчики что ещё больше увеличивало расходы. Кроме того, необходимость проверки исправности датчиков требовала привлечения специализированных бригад, что значительно замедляло процесс реагирования на изменение дорожной ситуации [6]. В результате многие проекты по адаптивному регулированию сводились к упрощённым сценарным решениям изменяющим лишь программу работы светофоров по заранее заданному расписанию без учёта реальной обстановки, что естественно не приносило ожидаемого эффекта. Прорыв в этой области произошёл благодаря развитию технологий компьютерного зрения и машинного обучения. Современные системы способные анализировать видеопотоки с уже установленных уличных камер видеонаблюдения определяя плотность и скорость движения транспортных средств, выявляя аварии и другие инциденты без необходимости использования дополнительных дорогостоящих датчиков. Это значительно снизило стоимость внедрения адаптивного регулирования и ускорило процесс его развёртывания [7].

Оценить качество адаптивного управления можно используя платформы, программы и приложения, основанные на методах имитационного моделирования. Для моделирование дорожного движения при изучении поведения транспортных потоков большинство исследователей используют платные платформы Anylogic, VISSIM, Aimsun, CORSIM и др. и платформы с открытым доступом SUMO, MITSIM. Однако, помимо моделирования на реалистичных городских дорожных сетях существует проблема калибровки этих симуляторов трафика в соответствии с ежедневными схемами движения.

Нужно учитывать неравномерность пешеходного и автомобильного потоков по времени суток, дням недели, времени года а также их связь с культурно-массовыми мероприятиями. Сделать это довольно-таки сложно: невозможно знать маршрут каждого автомобиля. При этом важным требованием является обеспечение устойчивости результатов моделирования трафика в смысле начальных условий. Эти результаты должны чётко давать ответ, улучшает ли предлагаемое решение транспортный поток в широком спектре возможных ситуаций.

### ***Теория / Расчет***

Предлагается стратегия организации светофорного регулирования с адаптивным управлением на участке дорожной сети с трамвайным движением от пересечения улицы Плеханова и улицы Васнецова, до пересечения улицы Плеханова и улицы Народная в г. Минске. Исследуемый вариант выступает в качестве альтернативы варианту стратегии по снижению аварийности между трамваем и нерельсовым транспортным средством за счёт светофорного регулирования с фиксированным управлением [10]. В предлагаемой стратегии оценка задержек и остановок производилась с помощью свободной системы имитационного моделирования (микромоделирования) SUMO – Simulation of Urban MObility («Моделирования городской мобильности»), имеющейся на кафедре «Транспортные системы и технологии» автотракторного факультета Белорусского национального технического университета.

На первом этапе, в соответствии со стандартными подходами, для исследуемого участка была разработана схема светофорного регулирования правого поворота с фиксированной диаграммой, а именно, на перекрёстке улицы Плеханова и улицы Тухачевского (далее – СФО-2) предложено запретить левый поворот со входа А (вход со стороны улицы Васнецова) и добавить дополнительную фазу с выделением отдельного сигнала для поворачивающих со входа С (вход со стороны улицы Корицкого) транспортных средств путем установки дополнительной секции светофора.

На втором этапе, для повышения эффективности такого подхода, схема с фиксированным управлением была модифицирована за счет добавления адаптивного регулирования: был выбран вариант гибкого регулирования по принципу «actuated control» [12, 13]. При

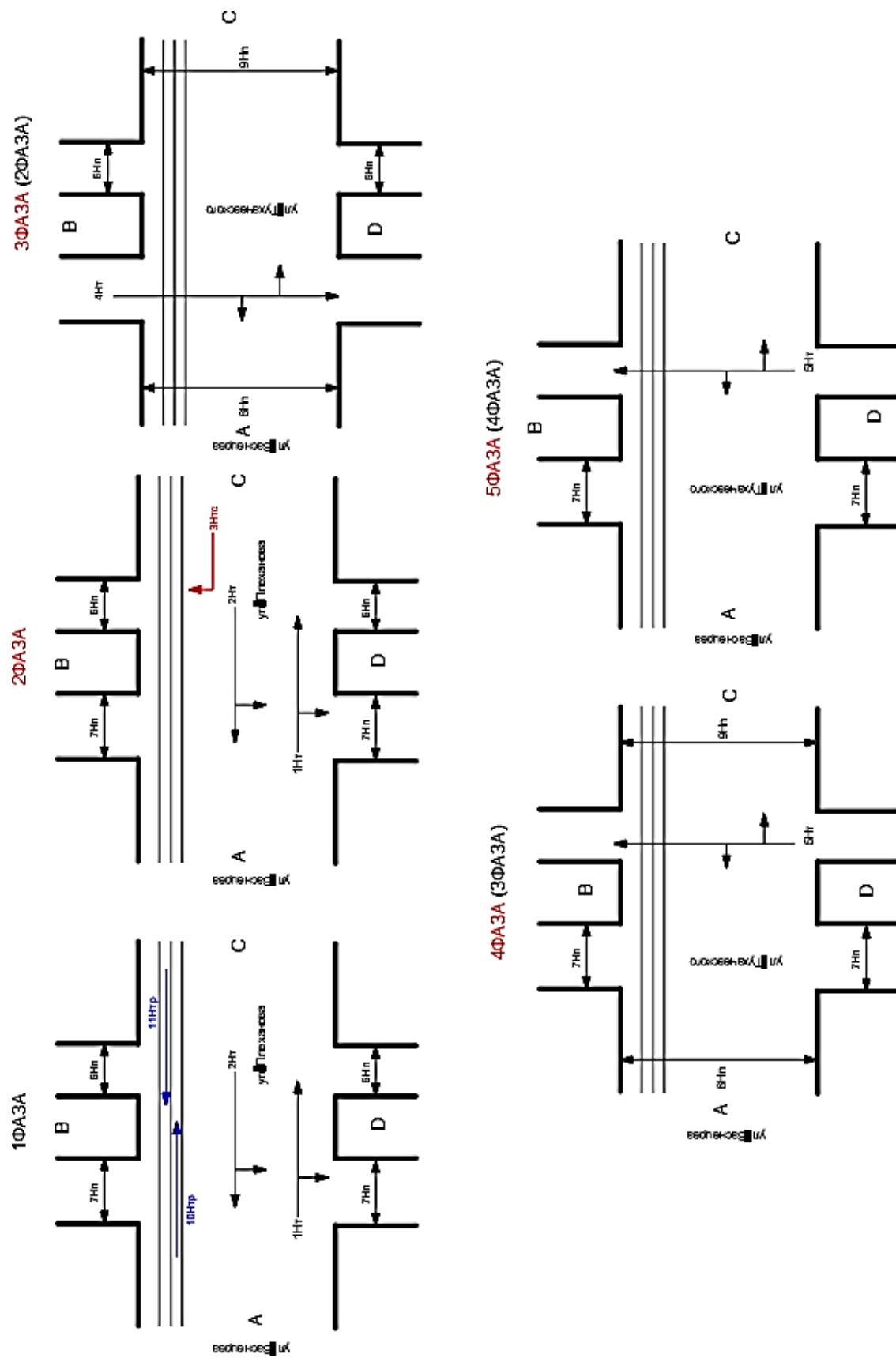
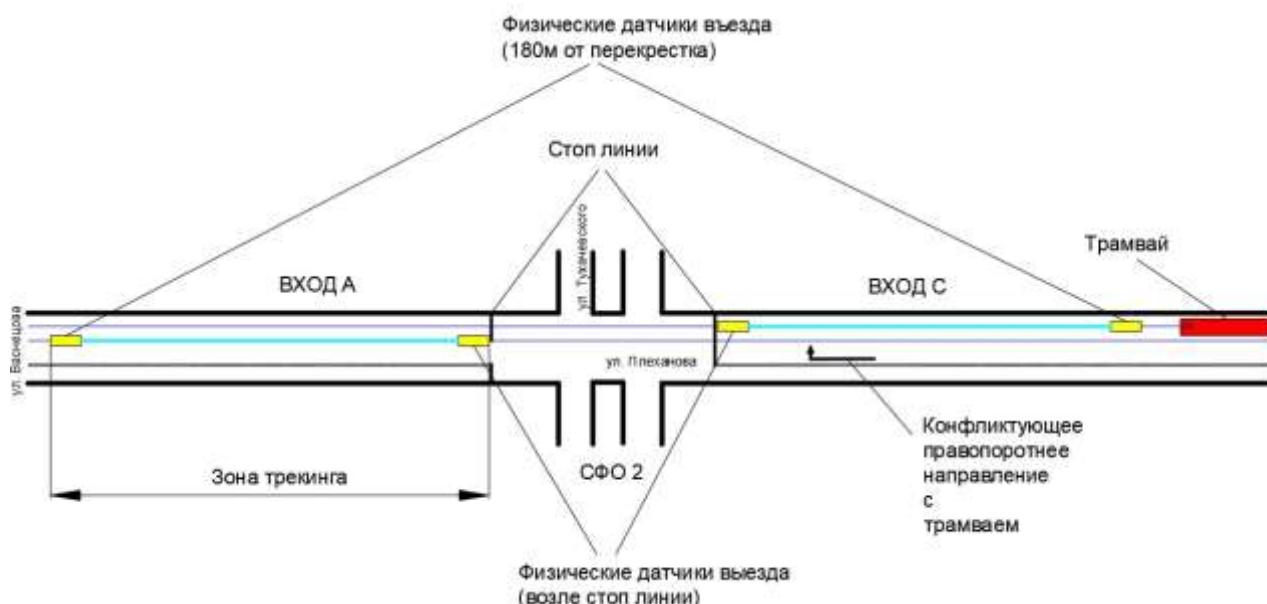


Рисунок 1 – Предлагаемая схема пофазного разъезда на СФО-2

таком подходе изначально предполагается рассмотрение базовой диаграммы – диаграммы, когда предположительно по всем направлениям есть запрос на обслуживание, если же запро-

са нет ни на одном из трамвайных направлений, то зарезервированное время сокращается и передается другому направлению (вариант actuated control с передачей неиспользуемого времени) [14, 15]. В указанной ситуации рассматриваются трамвайные направления (10т, 11т) и транспортное поворотное направление (3т) – с передачей неиспользуемого времени от трамвайных направлений транспортному. Кроме того выбранный вариант предполагает обязательное включение трамвайного направления даже в случае отсутствия запроса, это обосновывается тем, что этот вариант более надежен с точки зрения устойчивости к поломке датчиков (для нерельсовых транспортных средств такая ситуация, хоть и ухудшает проезд перекрестка и добавляет перепробег, но движение автомобилей к конечной точке назначения заблокируется не полностью).

Непосредственная реализация предложенного выше варианта предполагает установку четырех физических датчиков: по два на каждом трамвайном направлении или по одному на каждый вход, рассматриваемого перекрестка, с которого выезжают трамваи (А и С) (рис. 2).



*Рисунок 2 – Схема расположения датчиков*

Предполагаемое расположение датчиков на входах:

- датчик въезда (check-in) устанавливается за 180 м от стоп линии;
- датчик выезда (check-out) устанавливается непосредственно перед стоп линией.

Рекомендуется допускать изменение длительности разрешающих сигналов в интервале:

- от 8 до 32 секунд - для трамвайного направления (см. примечание 1 ниже);
- от 15 до 39 секунд - для правоповоротного конфликтного направления (см. примечание 2 ниже).

В результате предварительно проведенного эксперимента было установлено, что на указанном перекрестке за наблюдаемый период могло одновременно находиться не более двух трамваев; далее было определено время, затраченное трамваями на прохождение стоп-линий. Исходя из полученных данных был сделан вывод, что для предотвращения заторов для трамвайных направлений минимальное время разрешающего сигнала должно составлять не менее 8 секунд.

Применяя вышеизложенный подход, для предотвращения заторов на рассматриваемом перекрестке, по варианту правоповоротного конфликтного направления, на прохождение поворота при разрешающем сигнале семью автомобилями потребуется около 15 секунд.

Ниже предполагается рассмотрение возможных вариантов работы алгоритма:

- 1) на обоих входах трамваи не приехали;
- 2) на входе А трамвай приехал, на входе С не приехал;
- 3) на входе С трамвай приехал, на входе А не приехал;

4) на обоих входах трамваи приехали. Рассмотрим каждый случай по подробнее:

*Первый вариант:* трамваи не попали в зону трекинга (в зону между входным и выходным физическими датчиками), следовательно время горения зеленого на направлениях т10 и т11 сокращается до минимально допустимого; не использованное время передаётся правоповоротному направлению (т3) (рис. 3).

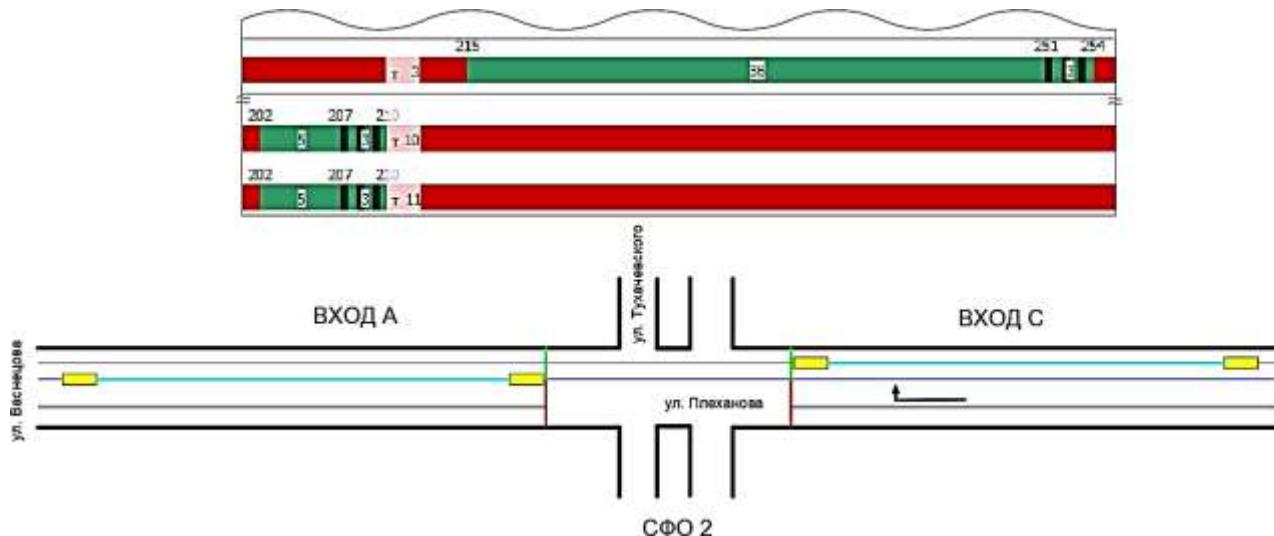


Рисунок 3 – Вариант 1 - трамваи не попали в зону трекинга

*Второй и третий варианты:* только один трамвай попадает в зону трекинга. Если время проезда трамвая от точки его фиксирования до второго датчика больше времени до включения запрещающего сигнала, то поскольку трамвай и так не успевает проехать, то время горения зеленого на направлениях т10 и т11 сокращается до минимально допустимого; не использованное время передается правоповоротному направлению (т3) (рисунок 4).

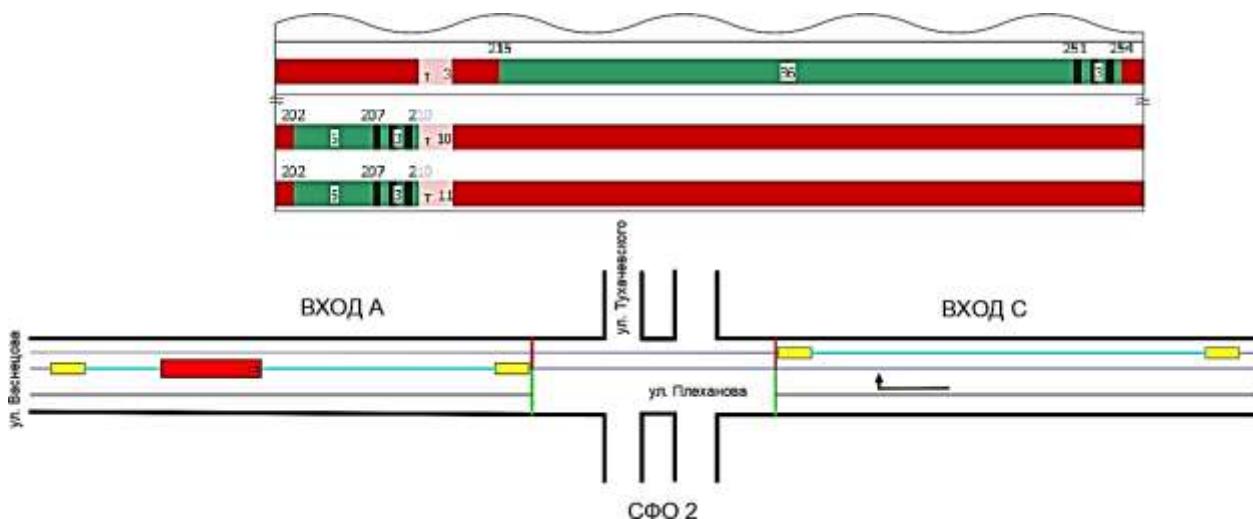
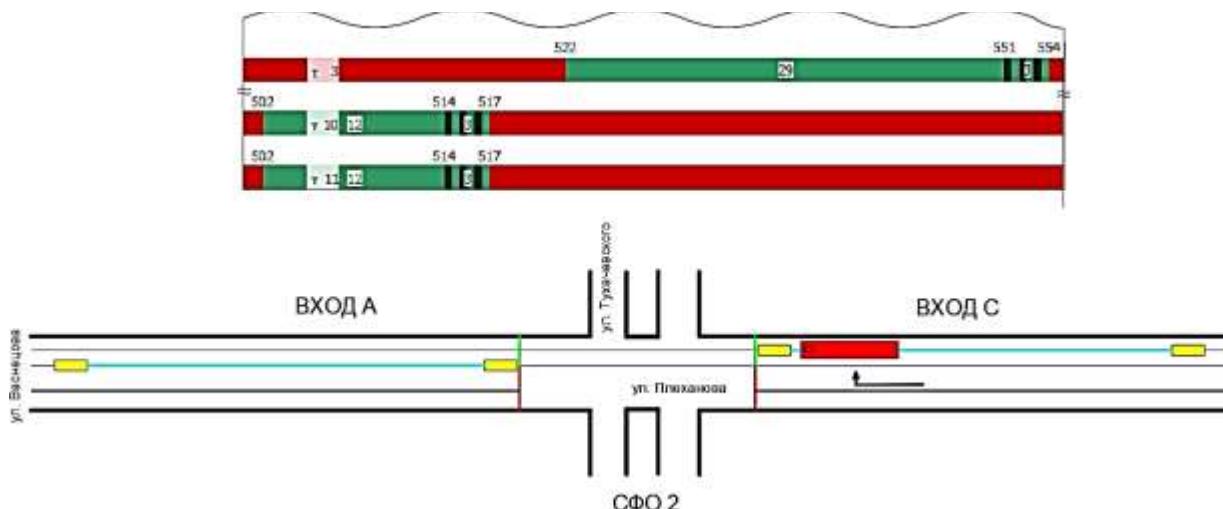


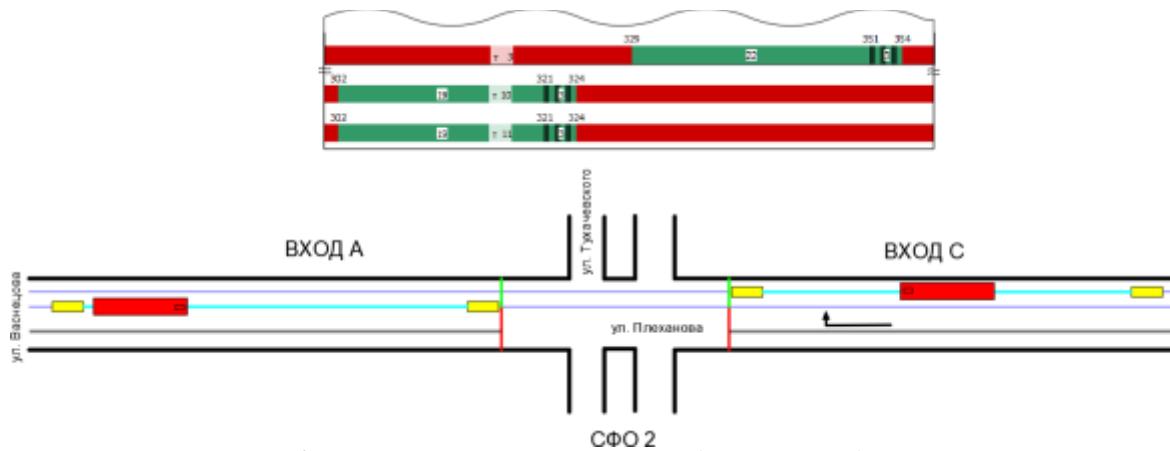
Рисунок 4 – Вариант 2 - один трамвай в зоне трекинга, но потенциально не успевает проехать стоп-линию

Если же время, затраченное трамваем для проезда до второго датчика меньше, то зеленый сигнал по направлениям т10 и т11 горит до момента проезда трамваем второго датчика, расположенного возле стоп-линии, или до времени, равного максимально допустимой длительности сигнала (это может быть применено при отклонениях в движении трамвая, например, по причине аварии или других обстоятельств) (рис. 5).



*Рисунок 5 – Вариант 3 - один трамвай в зоне трекинга и потенциально успевает проехать стоп-линию*

**Четвёртый вариант:** трамваи с двух входов одновременно попадают в зону трекинга, в такой ситуации алгоритм работает как и во втором и третьем случае, только учитывая, кому из трамваев потребуется больше времени для проезда и отключает разрешающий сигнал после проезда последнего трамвая (рис. 6).



*Рисунок 6 – Вариант 4 – в зоне трекинга одновременно два трамвая*

Предлагаемый алгоритм реализован в программе DUMKA E.

В качестве физического датчика может быть рассмотрен специализированный индуктивный датчик, предназначенный для контроля положения трамваев, используемый белорусскими проектными институтами.

Индукционные датчики, установленные в трамвайном полотне, позволяют собирать информацию о проезде трамвая, которая далее предается на логический датчик, обрабатывающий полученные данные для определения нахождения легкорельсового транспортного средства в области детектирования.

#### **Результаты и обсуждение**

Один из основных частных критериев качества дорожного движения – задержки транспорта [1,16]. Задержки для предлагаемого (фиксируемого, жесткого регулирования) и предполагаемого (адаптивного регулирования без изменения продолжительности светофорного цикла) дорожно-транспортной ситуации были определены с помощью свободного программного обеспечения SUMO – Simulation of Urban MObility, разработанного в Институте исследования транспорта (Institute of Transportation Systems, Германия). Пакет моделирования каждую единицу времени отслеживает текущее время индивидуальной задержки транспортного средства. На основе полученной информации и учитывая, что задержка одного автомобиля приводит к приросту общей задержки, путем суммирования по общим задержкам от всех задержанных к данному моменту транспортных средств окончательно высчитывалась общая суммарная задержка по всей сети.

Результаты моделирования задержек транспорта в стандартной (фиксированное, жёсткое регулирование) и предполагаемой (при адаптивном управлении) дорожно-транспортной ситуации представлены соответственно в таблице 1.

Таблица 1 – Задержки транспорта стандартной и предполагаемой дорожно-транспортной ситуации (за час)

Тип ТС	Номер прогона											
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Стандартная												
Л	217	155	146	161	172	171	191	165	166	165	160	178
Тр	15	15	15	15	15	15	15	15	15	15	15	15
Общие, Авт*ч	232	170	161	176	187	186	206	180	181	180	175	193
Предполагаемая												
Л	223	167	156	177	192	192	211	186	189	184	182	200
Тр	15	15	15	15	15	15	15	15	15	15	15	15
Общие, Авт*ч	238	182	171	192	207	207	226	201	204	199	197	215

Остановки транспорта также определялись в том же пакете SUMO путем вычитания количества стоящих в данный момент времени транспортных средств из количества стоящих в предыдущий момент времени, и перерасчитывались в часовые потери от остановок транспорта были по формуле:

$$\Pi_0 = e * C_0, \text{ у.е./час}, \quad (1)$$

где  $e$  – удельное число остановок, ост/а;

$C_0$  – стоимость одной остановки легкового автомобиля, у.е./ост. Принято:  $C_0 = 0,02$  у.е./ост.

Моделируемое число остановок и значения часовых потерь от остановок транспорта стандартной и предполагаемой дорожно-транспортной ситуации представлены в таблице 2.

Таблица 2 – Прогнозируемые остановки транспорта и часовые потери от них при стандартной и предполагаемой дорожно-транспортной ситуации

Параметр	Номер прогона									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Стандартная										
е,ост/а	2794	1921	1680	1544	1530	1558	1627	1562	1558	1548
$\Pi_0$ , у.е./ч	56	38	34	31	31	31	33	31	31	31
Предполагаемая										
е,ост/а	2737	1853	1520	1460	1459	1480	1539	1506	1481	1508
$\Pi_0$ , у.е./ч	55	37	30	29	29	30	31	30	30	30

### Выводы

1. В качестве технологии по снижению задержек и остановок транспорта и повышению качества дорожного движения был выбран метод разведение конфликтующих направлений по времени с помощью светофорного регулирования адаптивным управлением.

2. По результатам экспериментально-теоретических исследований усовершенствован алгоритм адаптивного управления по критерию минимизации экономических потерь без изменения продолжительности светофорного цикла.

3. Разработаны решение и соответствующие предложения по оптимизации режимов светофорного регулирования, что позволило организовать эффективное адаптивное управление на исследуемом участке.

4. Проведена оценка результирующей и эффективности предложений по адаптивному управлению с помощью системы имитационного моделирования (микромоделирования) SUMO («Моделирования городской мобильности»), которая показала снижение экономических потерь на 6 % по сравнению со стандартной практикой (использованием фиксированного (жёсткого) управления).

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Павленко П.Ф. Моделирование системы адаптивного управления транспортными потоками // Наука, техника и образование. Science, technology and education. 2015. №7(13).
- Голубков А.С., Царёв В.А. Адаптивное управление дорожным движением на базе системы микроскопического моделирования транспортных потоков // Информационно-управляющие системы. 2010. 5

3. Stevanovic A. Adaptive Traffic Control Systems: Domestic and Foreign State of Practice. A Synthesis of Highway Practice / National Cooperative Highway Research Program - Transportation Research Board of the National Academies, Editor: NCHRP Editorial Board.
4. Врубель, Ю.А., Капский Д.В., Кот Е.Н. Определение потерь в дорожном движении: монография. Мин.: БИТУ, 2006. 240 с.
5. Капский Д.В. Методология повышения качества дорожного движения. Белорусский национальный технический университет. Минск: БНТУ, 2018. 370 с.
6. Устойчивая городская мобильность: теория и практика развития / А.О. Лобашов, Е.Н. Кот, Д.В. Капский [и др.]. Вологда: Инфра-Инженерия, 2023. 236 с.
7. Синергия подходов к совершенствованию интеллектуальных транспортных систем городов в России и Белоруссии / И.Н. Пугачев, Д.В. Капский, Д.В. Навой [и др.]. Хабаровск: Тихоокеанский государственный университет, 2020. 230 с. EDN YDRMXN.
8. Автоматизированные системы управления дорожным движением: Учебное пособие для учреждений высшего образования по специальности «Организация дорожного движения» / Д.В. Капский, Ю.А. Врубель, Д.В. Навой [и др.]. Минск; Москва: Издательский Дом «Инфра-М», 2015. 367 с. EDN YWURBB.
9. Основы автоматизации интеллектуальных транспортных систем: Учебник / Д.В. Капский, Е.Н. Кот, С.В. Богданович [и др.]. Вологда: ООО «Издательство «Инфра-Инженерия», 2022. 412 с. EDN KVMHHS.
10. Координированное управление дорожным движением: Монография / Ю.А. Врубель, Д.В. Капский, Д.В. Рожанский [и др.]. Минск: Белорусский национальный технический университет, 2011. 230 с. EDN TLBBOV.
11. Скирковский С.В., Капский Д.В., Навой Д.В. Теоретические и практические подходы к созданию и развитию интеллектуальной транспортной системы города. Гомель: Учреждение образования «Белорусский государственный университет транспорта», 2022. 171 с. EDN PJKPAX.
12. Yuxiong Ji, Yu Tang, Wei Wang, Yuchuan Du. Guidelines for Traffic Signals RILSA // Research Article «Tram-Oriented Traffic Signal Timing Resynchronization». 2018. 14 с.
13. Оценка экологических потерь в дорожном движении на основе GPS-данных о параметрах транспортных потоков и моделирования / И. Н. Пугачев, Д. В. Капский, Л. П. Майорова [и др.]. Хабаровск: Тихоокеанский государственный университет, 2020. 250 с. – EDN YKKMXH.
14. Синергия подходов к совершенствованию интеллектуальных транспортных систем городов в России и Белоруссии / И. Н. Пугачев, Д. В. Капский, Д. В. Навой [и др.]. Хабаровск: Тихоокеанский государственный университет, 2020. 230 с. EDN YDRMXN.
15. Основы автоматизации интеллектуальных транспортных систем: Учебник / Д.В. Капский, Е.Н. Кот, С.В. Богданович [и др.]. Вологда: ООО «Издательство «Инфра-Инженерия», 2022. 412 с. EDN KVMHHS.
16. Капский Д.В., Скирковский С.В., Лосин Л.А. Применение математических методов для решения задач транспортного планирования // Мир транспорта и технологических машин. 2022. №4-2(79). С. 81-87. DOI 10.33979/2073-7432-2022-2(79)-4-81-87. EDN OHNTMJ.

**Лю Юйвэй**

Белорусский национальный технический университет  
Адрес: 220013, Беларусь, г. Минск, пр-т Независимости, 65  
Аспирант  
E-mail: 1277794415@qq.com

**Капский Денис Васильевич**

Белорусский национальный технический университет  
Адрес: 220013, Беларусь, г. Минск, пр-т Независимости, 65  
Д.т.н., профессор, профессор кафедры «Транспортные системы и технологии»  
E-mail: d.kapsky@gmail.com

**Ляпин Сергей Александрович**

Липецкий государственный технический университет  
Адрес: 398055, Россия, г. Липецк, ул. Московская, д. 30  
Д.т.н., профессор кафедры «Управление автотранспортом»  
E-mail: lyapinserg2012@yandex.ru

**Саражинский Денис Сергеевич**

Белорусский национальный технический университет  
Адрес: 220013, Беларусь, г. Минск, пр-т Независимости, 65  
К.ф.-м.н., доцент кафедры «Транспортные системы и технологии»  
E-mail: sarazhinsky@mail.ru

---

LIU YU WEI, D.V. KAPSKI, S.A. LYAPIN, D.S. SARAZHINSKY

**ASSESSMENT OF THE QUALITY OF ALGORITHMS  
FOR ADAPTIVE CONTROL OF TRAFFIC LIGHT OBJECTS  
BY SIMULATION MODELING**

**Abstract.** The article deals with the issues of assessing the quality of algorithms for adaptive control of traffic light objects using the urban mobility simulation system SUMO – Simulation of Urban MObility. The strategy of organizing traffic light regulation with adaptive control on a section of the road network with tram traffic in a variant of flexible regulation based on the principle of "actuated control" is being investigated. Solutions have been developed and proposals have been formulated to optimize traffic light control modes, which made it possible to organize effective adaptive control in the studied area. The influence of the proposed adaptive control on delays and stops of transport is analyzed.

**Keywords:** traffic light object, adaptive control, traffic light regulation, road infrastructure , speed, accident rate, traffic jams, intersection

## BIBLIOGRAPHY

1. Pavlenko P.F. Modelirovaniye sistemy adaptivnogo upravleniya transportnymi potokami // Nauka, tekhnika i obrazovanie. Science, technology and education. 2015. №7(13).
2. Golubkov A.S., Tsariov V.A. Adaptivnoe upravlenie dorozhnyim dvizheniem na baze sistemy mikroskopicheskogo modelirovaniya transportnykh potokov // Informatsionno-upravlyayushchie sistemy. 2010. 5
3. Stevanovic A. Adaptive Traffic Control Systems: Domestic and Foreign State of Practice. A Synthesis of Highway Practice / National Cooperative Highway Research Program - Transportation Research Board of the National Academies, Editor: NCHRP Editorial Board.
4. Vrubel', YU.A., Kapskiy D.V., Kot E.N. Opredelenie poter' v dorozhnom dvizhenii: monografiya. Mn.: BITU, 2006. 240 s.
5. Kapskiy D.V. Metodologiya povysheniya kachestva dorozhnogo dvizheniya. Belorusskiy natsional'nyy tekhnicheskiy universitet. Minsk: BNTU, 2018. 370 s.
6. Ustoychivaya gorodskaya mobil'nost': teoriya i praktika razvitiya / A.O. Lobashov, E.N. Kot, D.V. Kapskiy [i dr.]. Vologda: Infra-Inzheneriya, 2023. 236 s.
7. Sinergiya podkhodov k sovershenstvovaniyu intellektual'nykh transportnykh sistem gorodov v Rossii i Belorussii / I.N. Pugachev, D.V. Kapskiy, D.V. Navoy [i dr.]. Habarovsk: Tikhookeanskiy gosudarstvennyy universitet, 2020. 230 s. EDN YDRMXN.
8. Avtomatizirovannye sistemy upravleniya dorozhnyim dvizheniem: Uchebnoe posobie dlya uchrezhdeniy vysshego obrazovaniya po spetsial'nosti «Organizatsiya dorozhnogo dvizheniya» / D.V. Kapskiy, YU.A. Vrubel', D.V. Navoy [i dr.]. Minsk; Moskva: Izdatel'stvo Dom «Infra-M», 2015. 367 s. EDN YWURBB.
9. Osnovy avtomatizatsii intellektual'nykh transportnykh sistem: Uchebnik / D.V. Kapskiy, E.N. Kot, S.V. Bogdanovich [i dr.]. Vologda: OOO «Izdatel'stvo «Infra-Inzheneriya», 2022. 412 s. EDN KVMHHS.
10. Koordinirovannoe upravlenie dorozhnyim dvizheniem: Monografiya / YU.A. Vrubel', D.V. Kapskiy, D.V. Rozhanskiy [i dr.]. Minsk: Belorusskiy natsional'nyy tekhnicheskiy universitet, 2011. 230 s. EDN TLBBOV.
11. Skirkovskiy S.V., Kapskiy D.V., Navoy D.V. Teoreticheskie i prakticheskie podkhody k sozdaniyu i razvitiyu intellektual'noy transportnoy sistemy goroda. Gomel': Uchrezhdenie obrazovaniya «Belorusskiy gosudarstvennyy universitet transporta», 2022. 171 s. EDN PXKPAX.
12. Yuxiong Ji, Yu Tang, Wei Wang, Yuchuan Du. Guidelines for Traffic Signals RILSA // Research Article «Tram-Oriented Traffic Signal Timing Resynchronization». 2018. 14 s.
13. Otsenka ekologicheskikh poter' v dorozhnom dvizhenii na osnove GPS-dannyykh o parametrikakh transportnykh potokov i modelirovaniya / I. N. Pugachev, D. V. Kapskiy, L. P. Mayorova [i dr.]. Habarovsk: Tikhookeanskiy gosudarstvennyy universitet, 2020. 250 s. - EDN YKKMXH.
14. Sinergiya podkhodov k sovershenstvovaniyu intellektual'nykh transportnykh sistem gorodov v Rossii i Belorussii / I. N. Pugachev, D. V. Kapskiy, D. V. Navoy [i dr.]. Habarovsk: Tikhookeanskiy gosudarstvennyy universitet, 2020. 230 s. EDN YDRMXN.
15. Osnovy avtomatizatsii intellektual'nykh transportnykh sistem: Uchebnik / D.V. Kapskiy, E.N. Kot, S.V. Bogdanovich [i dr.]. Vologda: OOO «Izdatel'stvo «Infra-Inzheneriya», 2022. 412 s. EDN KVMHHS.
16. Kapskiy D.V., Skirkovskiy S.V., Losin L.A. Primenenie matematicheskikh metodov dlya resheniya zadach transportnogo planirovaniya // Mir transporta i tekhnologicheskikh mashin. 2022. №4-2(79). S. 81-87. DOI 10.33979/2073-7432-2022-2(79)-4-81-87. EDN OHHTMJ.

**Liu Yuwei**

Belarusian National Technical University  
Address: 220013, Belarus, Minsk, Nezavisimosti Ave., 65  
Graduate student  
E-mail: 1277794415@qq.com

**Kapski Denis Vasilievich**

Belarusian National Technical University  
Address: 220013, Belarus, Minsk, Nezavisimosti Ave., 65  
Doctor of Technical Sciences  
E-mail: d.kapsky@gmail.com

**Lyapin Sergey Alexandrovich**

Lipetsk State Technical University  
Address: 398055, Russia, Lipetsk, st. Moskovskaya, 30,  
Doctor of Technical Sciences  
E-mail: lyapinserg2012@yandex.ru

**Sarazhinsky Denis Sergeevich**

Belarusian National Technical University  
Address: 220013, Belarus, Minsk, Nezavisimosti Ave., 65  
Candidate of Physical and Mathematical Sciences  
E-mail: sarazhinsky@mail.ru

С.Н. ЗЛОБИН, А.Е. КАРПОВ

## ТЕХНИЧЕСКАЯ ИННОВАЦИОННИКА И ПОВЫШЕНИЕ ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНОСТИ ТЯГОВОГО ПРИВОДА

**Аннотация.** В результате анализа узлов тягового привода зарубежных локомотивов с использованием методов технической инновационники выявлены недостатки, приводящие к ухудшению энергоэффективности при проведении технологических работ при ремонте и эксплуатации. Предложены новые решения тягового привода локомотивов и его узлов, обеспечивающие более высокую технологичность при конструировании и последующих ремонтах по сравнению с известными зарубежными аналогами.

**Ключевые слова:** теория конструирования, изобретательское творчество, инженерный эксперимент, прогнозирование, математическое моделирование, локомотивы, моторвагонный подвижной состав

### **Введение**

Расширение использования агрегатного ремонта локомотивов и фирменного сервиса, с одной стороны, позволяет повысить качество ремонта в целом и сократить издержки на содержание и развитие основных фондов в виде производственных мощностей ремонтно-обслуживающих предприятий, находящихся в составе ОАО «РЖД». С другой стороны, это усиливает зависимость эксплуатационных служб железных дорог от производителей локомотивов и затрудняет импортозамещение, учитывая, что в эксплуатации находится значительное количество локомотивов, созданных в сотрудничестве с зарубежными фирмами, в конструкции которых были использованы импортные узлы. Обычно технические решения принято выбирать с учетом изучения современных тенденций конструирования в мировой практике. Такой подход применительно к локомотивостроению мог быть rationalен в 50 – 70-х годах прошлого века, когда число предприятий-разработчиков насчитывалось десятками из-за национальной разобщенности рынков. К настоящему времени в мировом локомотивостроении сложилась ситуация – технические решения стали определяться политикой нескольких крупных компаний, заинтересованных в невозможности проникновения на рынок новых производителей за счет продвижения таких конструкций, которые технологически сложно воспроизвести конкурентам.

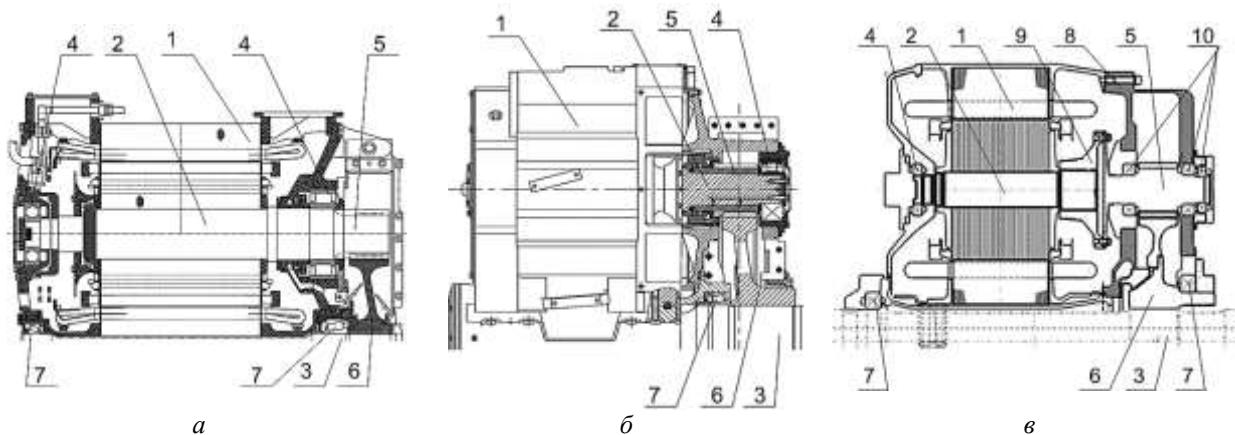
Таким образом, возникает проблема методов выбора вариантов конструкции узлов локомотива (в рассматриваемом случае – тягового привода) применительно к задаче повышения энергоэффективности при проектировании, технологичности производства и ремонта его в отечественных условиях.

Рассмотрим примеры современных зарубежные конструкций тягового привода грузовых локомотивов с бесколлекторными тяговыми электродвигателями (ТЭД).

Для большинства грузовых локомотивов зарубежных фирм с бесколлекторными ТЭД применяется опорно-осевой привод (рисунок 1). Исключение составляет грузовой тепловоз ER20 CF производства фирмы Siemens, в котором применен опорно-рамный привод с осевым редуктором [1].

### **Материал и методы**

Рассмотрим выбор технических решений в данных тяговых приводах с точки зрения методов технической инновационники [2-4], то есть, реконструируем логику проектировщика, исходя из решаемых задач и технологических возможностей.



**Рисунок 1 – Опорно-осевой привод зарубежных грузовых локомотивов с бесколлекторными тяговыми электродвигателями:**

*а – тепловоз ТЭ33а; б – электровоз БКГ-1; в – электровоз 2ЭВ-120;*

*1 – ТЭД; 2 – вал ТЭД; 3 – ось колесной пары; 4 – роторный подшипник; 5 – малое зубчатое колесо; 6 – большое зубчатое колесо; 7 – осевой подшипник; 8 – корпус редуктора; 9 – мембранный муфта; 10 – подшипники редуктора*

### Теория

При создании конструкций (рис. 1), использовали те потенциальные преимущества, которые имеет асинхронный ТЭД, то есть, снижение общей и неподрессоренной массы привода за счет повышения максимального числа оборотов ТЭД. В свою очередь, это требовало повышения передаточного числа тяговой передачи, при этом использование двухступенчатой передачи привело бы не только к усложнению последней, но и к существенному уменьшению осевого габарита ТЭД, а, следовательно, его крутящего момента, что усложняло решение задачи. Таким образом, во всех трех случаях пришлось решать задачу уменьшения диаметра малого зубчатого колеса. При традиционном размещении зубчатого колеса на валу с помощью посадки с гарантированным натягом прочность соединения с натягом получалась заведомо недостаточной, как и прочность хвостовика вала на изгиб.

На рисунке 1*a* изображен привод тепловоза ТЭ33а (ES44ACi, разработка компании General Electric, США). Антагонизм свойств (нельзя уменьшать диаметр посадки из-за снижения прочности) в этой конструкции снят тем, что посадка с натягом вообще отсутствует, а зубья нарезаны на самом валу ТЭД. Такой вариант, во-первых, требует изготовления вала из высоколегированной стали, а, во-вторых, существенно снижает ремонтопригодность, поскольку замена изношенного вала-шестерни требует разборки всего двигателя с распрессовкой пакета стали ротора, насаженного на вал без промежуточной гильзы. Восстановление зубьев путем наплавки с последующей механической обработкой, причем в сборе с двигателем, когда канавки для выхода фрезы находятся под обоймой роторного подшипника, также представляется технологически сложной задачей. В приводе на рисунке 1*b* электровоза БКГ-1 разработки Датунского завода, КНР, совместно с компанией Alstom, Франция, на основе электровоза Alstom Prima 47000, проблема прочности посадки малого зубчатого колеса на вал решена путем увеличения длины ступицы. Чтобы снять антагонизм свойств (нельзя увеличить длину хвостовика из-за ограничения габаритов), роторный подшипник размещен на конце вала, а малое зубчатое колесо – между подшипником и пакетом стали ротора, что позволило существенно увеличить длину посадки и уменьшить толщину зубчатого колеса за счет снижения натяга. Для замены малого зубчатого колеса требуется разборка ТЭД, но без спрессовки пакета ротора с вала.

Приводы на рисунке 1*a* и рисунке 1*b* имеют общий недостаток: силы от зубчатой передачи в основном приходятся на ближний роторный подшипник, что, в сочетании с увеличением частоты вращения вала ТЭД, создает препятствия для повышения его срока службы.

Антагонизм свойств в данном случае состоит в том, что возможность увеличения размеров подшипника для повышения его несущей способности также ограничена по условиям нагрева при повышенной частоте вращения вала. Данный антагонизм свойств был снят в приводе интегрированной компоновки электровоза 2ЭВ-120, разработанном фирмой Bombardier, Канада (рис. 1в), за счет того, что малое зубчатое колесо, выполненное в виде вал-шестерни, симметрично опирается на два подшипника, а вал ротора ТЭД опирается на подшипники малого зубчатого колеса через металлическую диафрагменную муфту, имеющую высокую жесткость в радиальном направлении, благодаря чему критическое число оборотов вала значительно выше предельного числа оборотов ТЭД. Аналогичная конструкция применена в тяговом приводе фирмы Siemens, Германия, установленном на электровозах 2ЭС7 и 2ЭС10.

Увеличение срока службы подшипников малого зубчатого колеса для интегрированного привода на рисунке 1в достигнуто за счет существенного ухудшения технологичности его изготовления и ремонта, поскольку положение зубчатых колес относительно друг друга в этом случае зависит не только от точности изготовления корпуса редуктора, но и корпуса ТЭД, а также ступицы ведомой шестерни, на которую опирается осевой подшипник со стороны тяговой передачи, при этом базирование производится по поверхностям, перпендикулярным друг другу, что требует более высокой точности обработки и монтажа.

При этом все три рассмотренные вида тягового привода не имеют упругого звена в валопроводах. Это ведет к росту динамических моментов в приводе и ухудшению сцепления колеса с рельсом, что было отмечено еще в [5, 6].

Полагая для упрощения, что при прохождении неровностей пути не происходит скольжения колесной пары по рельсу, зависимость динамического момента на валу тягового электродвигателя ТЭД колес колесной пары от вертикальных ускорений оси колесной пары можно в первом приближении определить на основании [7] следующим образом:

$$M_d = \frac{I_p (i + 1)}{c} \ddot{x}_{kn}, \quad (1)$$

где  $\ddot{x}_{kn}$  – вертикальные ускорения оси колесной пары в расчетном режиме тяги, м/сек;

$c$  – расстояние между точкой подвеса к раме (точкой поворота КМБ при прохождении вертикальных неровностей) и осью колесной пары, м;

$I_p$  – момент инерции ротора ТЭД, кг/м<sup>2</sup>;

$i$  – передаточное число тяговой передачи.

Авторами были получены следующие приближенные значения динамического момента:

- для электровоза 2ЭС10 среднеквадратическое значение  $M_d = 4$  кНм, что составляет примерно 60 % от тягового момента двигателя 1ТВ-2822 в расчетном режиме;

- для тепловоза ТЭ3За среднемаксимальное значение  $M_d = 6,4$  кНм, что соответствует режиму тяги при коэффициенте сцепления  $\psi = 0,28$ .

Таким образом динамическая составляющая момента при жесткой тяговой передаче приводит как к сокращению срока службы элементов тягового привода, так и к сокращению службы бандажей либо цельнокатанных колес локомотива из-за увеличения скольжения их по рельсам (в [5] указано, что применение упругого звена УЗК на отечественных грузовых тепловозах позволило на 15 % снизить темпы износа бандажей). В то же время применение упругого звена в виде УЗК в опорно-осевом тяговом приводе имело смысл в условиях, когда данный тип привода, во-первых, имел простую конструкцию, поскольку для замены эластичных элементов УЗК требовалось снимать кожух тяговой передачи, и, во-вторых, когда срок службы тяговой передачи был сопоставим со сроком службы УЗК. Переход на моторно-осевые подшипники (МОП) качения сделал размещение упругих элементов в зубчатом колесе нерациональным [8], по крайней мере, до значительного увеличения срока службы УЗК.

Из изложенного следует вывод, что рассмотренные конструктивные решения содержат противоречия требований к ним. С точки зрения долговечности подшипников малого зубчато-

го колеса наиболее предпочтительна конструкция, изображенная на рисунке 1 $\sigma$ . При этом, для того, чтобы повысить технологичность данной конструкции, необходимо выполнить ТЭД и осевой редуктор раздельными, как это сделано в опорно-рамном приводе с осевым редуктором, однако в то же время ТЭД и осевой редуктор должны быть соединены друг с другом, поскольку размещение упруго-компенсирующего механизма в полом валу ТЭД невозможно из-за необходимости увеличить диаметр вала ротора и внутренний диаметр роторных подшипников, что, в свою очередь, ведет к их перегреву из-за высокой частоты вращения.

#### *Предлагаемые решения*

Рассмотрим физический смысл выявленных противоречий требований. Требование «ТЭД и осевой редуктор должны быть соединены друг с другом» означает, что между ними должна быть связь, которая препятствует их перемещению друг относительно друга. Требование «ТЭД и осевой редуктор не должны быть соединены друг с другом» означает, что между ними не должно быть связи. Таким образом, антагонизм свойств данного устройства заключается в том, что физическая связь между ТЭД и осевым редуктором одновременно должна быть и ее не должно быть. На основании этого, мы можем сформулировать функцию связи, как устройства, которое препятствует и не препятствует перемещению относительно друг друга данных узлов. Физически это реализуемо, если связь является гибкой или шарнирной и допускает перемещения ТЭД и осевого редуктора друг относительно друга, компенсируя неточности монтажа, но ТЭД не имеет возможности перемещаться относительно осевого редуктора при колебаниях рамы тележки на рессорах.

Некоторые из вариантов данной конструкции, предложенные авторами, представлены на рисунке 2. В данных вариантах привода осевой редуктор представляет собой отдельный агрегат, что значительно упрощает его изготовление и ремонт по сравнению с приводом на рисунке 1 $\sigma$ . Поскольку при колебаниях надрессорного строения осевой редуктор не перемещается относительно ТЭД, то упругая муфта, соединяющая валы ТЭД и осевого редуктора, компенсирует только небольшие смещения, вызванные неточностью монтажа, и может быть выполнена одинарной. При этом муфта располагается снаружи редуктора, что упрощает ее осмотр и ремонт без разборки редуктора.

Недостатком данной схемы привода, названной авторами агрегатной, является увеличение общего числа подшипников.

Само по себе увеличение числа подшипников не оказывает однозначного влияния на трудоемкость ремонта, кроме увеличения числа объектов, подлежащих диагностике. Распределение нагрузок на большее число подшипниковых узлов позволяет обойтись без использования сложных в регулировке конических подшипников.

В варианте привода на рисунке 2 $\delta$  для возможности увеличения подшипникового узла и сокращения числа подшипников ТЭД расположен на неподвижной трубе, одним концом опирающуюся на подшипник на колесном центре, а другим, через сферическую опору, на корпус осевого редуктора.

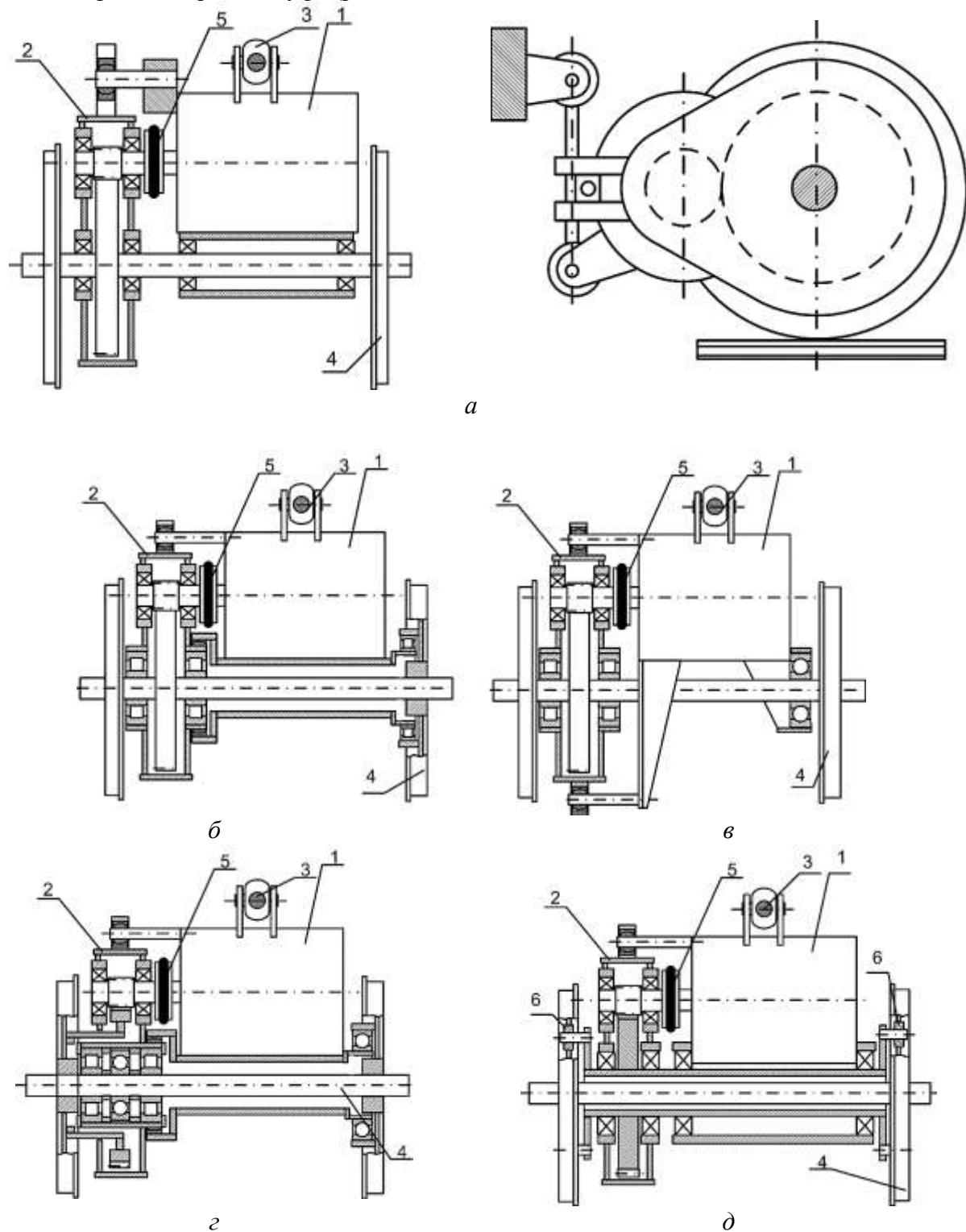
В варианте привода на рисунке 2 $\sigma$  для равномерного распределения нагрузки на осевые подшипники редуктора ТЭД опирается на корпус осевого редуктора через шарнирные соединения. В приводе на рисунке 2 $\tau$  подшипники размещены на месте ступицы большого зубчатого колеса, что позволяет увеличить их габариты, а на рисунке 2 $\delta$  показан пассажирский вариант привода с упругим опиравием на колесную пару.

#### *Результаты и обсуждение*

На предложенные конструкции тяговых приводов авторами получены патенты на полезные модели [9-12].

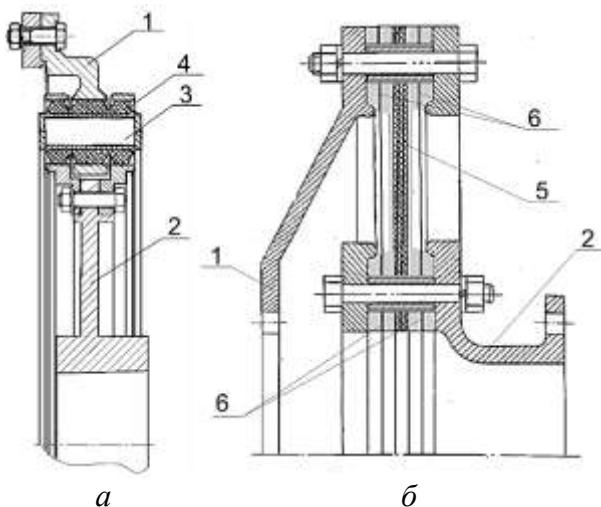
Создание агрегатного привода в основном сводится к созданию упругой муфты, рассчитанной на работу при частоте вращения порядка  $4000 \text{ мин}^{-1}$ , поскольку остальные узлы привода к настоящему времени достаточно исследованы. Возможность размещения упруго-компенсирующей муфты в габаритах тягового привода ранее была доказана в [13]. В качестве возможных примеров рассмотрим предложенные авторами конструкции резинометал-

лической и резинокордной муфт (рис. 3).



**Рисунок 2 – Схемы вариантов агрегатного тягового привода с опиранием ТЭД на осевой редуктор:**  
 а – с раздельными опорами ТЭД и редуктора; б - с опорой ТЭД через неподвижную трубу; в – с опорой ТЭД через два шарнира; г – с креплением большого зубчатого венца на колесе; д – с упругим опиранием;  
 1 – ТЭД; 2 – осевой редуктор; 3 – подвеска; 4 – колесная пара; 5 – упругая муфта; 6 – упругие элементы

Основной задачей создания упруго-компенсирующей муфты является снижение поперечной жесткости муфты при сохранении несущей способности. Для этого в резинометаллической муфте (рис. 3а) втулки выполнены двойными, работающими последовательно. В резинокордной муфте (рис. 3б) внутри кольцевых выступов размещена промежуточная металлическая арматура, что, при сохранении жесткости на сжатие и силы прижатия резины к



**Рисунок 3 – Схемы вариантов муфт для агрегатного привода:** а – резинометаллической; б – резинокордной;  
1, 2 – фланцы; 3 – втулка; 4 – резиновый элемент; 5 – резинокордная муфта; 6 – плоская арматура

### Выводы

- Установлено, что анализ тенденций в мировом локомотивостроении не позволяет определить технические решения узлов локомотива. Выявлена необходимость поиска методики анализа конструкции локомотивов, позволяющей находить рациональные решения.
- Использование для анализа узла тягового привода зарубежных локомотивов методами технической инновационники позволила выявить их недостатки, приводящие к ухудшению энергоэффективности и технологичности ремонта.
- Авторами предложен ряд новых конструкций тягового привода локомотивов и его узлов.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Грузовой тепловоз ER20 CF для Литвы // Железные дороги мира. 2009. №5. С. 17-24.
- Техническая инновационника. Проектирование конкурентоспособных машин: монография / О.В. Измеров и др.; под ред. А.С. Космодамианского. Орел: Госуниверситет - УНПК, 2013. 415 с.
- Техническая инновационника. Проблемы инженерного анализа технических систем: монография / О.В. Измеров и др. Орел: Госуниверситет – УНПК, 2013. 261 с.
- Техническая инновационника. Рациональный выбор технических решений при проектировании: монография / О.В. Измеров и др.; под ред. О.В. Измерова. Орел: Госуниверситет - УНПК, 2013. 340 с.
- Бирюков И.В., Беляев А.И., Рыбников Е.К. Тяговые передачи электроподвижного состава железных дорог. М.: Транспорт, 1986. 256 с.
- Развитие локомотивной тяги / Н.А. Фуфрянский, А.С. Нестрахов, А.Н. Долганов, Н.Н. Каменев, Э.А. Пахомов; Под ред. Н.А. Фуфрянского и А.И. Бевзенко. М.: Транспорт, 1982. 303 с.
- Конструкция и динамика тепловозов / В.Н. Иванов, В.В. Иванов, Н.И. Панов, А.П. Третьяков. М.: Транспорт, 1974. 336 с.
- Михайлов Г.И. Повышение надежности и несущей способности зубчатых тяговых передач. Казань: Алгоритм+, 2023. 560 с.
- Тяговый привод рельсового транспортного средства: пат. 2782731 Рос. Федерации. №2022100171 / Воробьев В.И., Злобин С.Н., Измеров О.В. и др.; заявл. 10.01.22; опубл. 01.11.22, Бюл. №31.
- Тяговый привод локомотива: пат. 217859 Рос. Федерации. № 2022128487 / Воробьев В.И., Злобин С.Н., Измеров О.В. и др.; заявл. 01.11.22; опубл. 21.04.23, Бюл. №12.
- Тяговый привод локомотива: пат. 223262 Рос. Федерации № 2023126944 / Воробьев В.И., Злобин С.Н., Измеров О.В. и др.; заявл. 18.10.23; опубл. 09.02.24, Бюл. №4.
- Тяговый привод локомотива: пат. 215944 Рос. Федерации / А.С. Космодамианский, О.В. Измеров, С.О. Копылов и др.; опубл. 11.01.2023, Бюл. №2.
- Космодамианский А.С., Пугачев А.А., Воробьев В.И., Измеров О.В., Николаев Е.В. Применение агрегатных тяговых приводов для локомотивов с повышенными тяговыми свойствами // Транспорт Урала. №2(77). Екатеринбург: УрГУПС. 2023. С. 41-48.

фланцам для обеспечения требуемой силы трения между резиной и фланцами, дает возможность увеличить суммарную толщину резинового слоя и возможность увеличить поперечное смещение валов.

На предложенную конструкцию муфты получен патент на полезную модель [14], на конструкцию резинокордной – оформлена заявка на получение патента.

Из изложенного следует, что методы технической инновационники целесообразно использовать для поиска конструктивных решений новых узлов тяговых приводов и способов снижения расходов на обслуживание и ремонт локомотивов.

14. Компенсационная муфта тягового привода локомотива: пат. 217857 Рос. Федерация № 2023103413 / Воробьев В.И., Воробьев Д.В., Злобин С.Н. и др.; заявл. 14.02.23; опубл. 21.04.23, Бюл. №12.  
15. Капский Д.В. Методология повышения качества дорожного движения. Белорусский национальный технический университет. Минск: БНТУ, 2018. 370 с.

**Злобин Сергей Николаевич**

Орловский государственный университет  
имени И.С. Тургенева  
Адрес: 302030, г. Орел, ул. Московская, д. 77  
К.т.н., доцент кафедры машиностроения  
E-mail: zsn2@rambler.ru

**Карпов Артем Евгеньевич**

Российский университет транспорта (МИИТ)  
Адрес: 127018, г. Москва, Октябрьский пер, д. 7  
Ассистент кафедры «Тяговый подвижной состав»  
E-mail: akarpov576@gmail.ru

S.N. ZLOBIN, A.E. KARPOV

## **TECHNICAL INNOVATION AND INCREASE IN ENERGY EFFICIENCY OF TRACTION DRIVE**

**Abstract.** As a result of the analysis of traction drive units of foreign locomotives using the methods of technical innovation, shortcomings were identified that lead to deterioration of energy efficiency during technological work during repair and operation. New solutions for the traction drive of locomotives and its units were proposed, providing higher technological efficiency during design and subsequent repairs compared to known foreign analogues.

**Keywords:** design theory, inventive creativity, engineering experiment, forecasting, mathematical modeling, locomotives, multiple unit rolling stock

### **BIBLIOGRAPHY**

1. Gruzovoy teplovoz ER20 CF dlya Litvy // ZHeleznye dorogi mira. 2009. №5. S. 17-24.
2. Tekhnicheskaya innovatsionika. Proektirovanie konkurentospособnykh mashin: monografiya / O.V. Izmerov i dr.; pod red. A.S. Kosmodamianskogo. Orel: Gosuniversitet - UNPK, 2013. 415 s.
3. Tekhnicheskaya innovatsionika. Problemy inzhenernogo analiza tekhnicheskikh sistem: monografiya / O.V. Izmerov i dr. Orel: Gosuniversitet - UNPK, 2013. 261 s.
4. Tekhnicheskaya innovatsionika. Ratsional'nyy vybor tekhnicheskikh resheniy pri proektirovani: monografiya / O.V. Izmerov i dr.; pod red. O.V. Izmerova. Orel: Gosuniversitet - UNPK, 2013. 340 s.
5. Biryukov I.V., Belyaev A.I., Rybnikov E.K. Tyagovye peredachi elektropodvizhnogo sostava zheleznykh dorog. M.: Transport, 1986. 256 s.
6. Razvitiye lokomotivnoy tyagi / N.A. Fufryanskiy, A.S. Nestrakhov, A.N. Dolganov, N.N. Kamenev, E.A. Pakhomov; Pod red. N.A. Fufryanskogo i A.I. Bevzenko. M.: Transport, 1982. 303 s.
7. Konstruktsiya i dinamika teplovozov / V.N. Ivanov, V.V. Ivanov, N.I. Panov, A.P. Tret'yakov. M.: Transport, 1974. 336 s.
8. Mikhaylov G.I. Povyshenie nadezhnosti i nesushchey sposobnosti zubchatykh tyagovykh peredach. Kazan': Algoritm+, 2023. 560 s.
9. Tyagovyy privod re'sovogo transportnogo sredstva: pat. 2782731 Ros. Federatsiya. №2022100171 / Vorob'ev V.I., Zlobin S.N., Izmerov O.V. i dr.; заявл. 10.01.22; опубл. 01.11.22, Byul. №31.
10. Tyagovyy privod lokomotiva: pat. 217859 Ros. Federatsiya. № 2022128487 / Vorob'ev V.I., Zlobin S.N., Izmerov O.V. i dr.; заявл. 01.11.22; опубл. 21.04.23, Byul. №12.
11. Tyagovyy privod lokomotiva: pat. 223262 Ros. Federatsiya № 2023126944 / Vorob'ev V.I., Zlobin S.N., Izmerov O.V. i dr.; заявл. 18.10.23; опубл. 09.02.24, Byul. №4.
12. Tyagovyy privod lokomotiva: pat. 215944 Ros. Federatsiya / A.S. Kosmodamianskiy, O.V. Izmerov, S.O. Kopylov i dr.; опубл. 11.01.2023, Byul. №2.
13. Kosmodamianskiy A.S., Pugachev A.A., Vorob'ev V.I., Izmerov O.V., Nikolaev E.V. Primenenie agregatnykh tyagovykh privodov dlya lokomotivov s povyshennymi tyagovymi svoystvami // Transport Urala. №2(77). Ekaterinburg: UrGUPS. 2023. S. 41-48.
14. Kompensacionnaya mufta tyagovogo privoda lokomotiva: pat. 217857 Ros. Federatsiya № 2023103413 / Vorob'ev V.I., Vorob'ev D.V., Zlobin S.N. i dr.; заявл. 14.02.23; опубл. 21.04.23, Byul. №12.
15. Kapskiy D.V. Metodologiya povysheniya kachestva dorozhnogo dvizheniya. Belorusskiy natsional'nyy tekhnicheskiy universitet. Minsk: BNTU, 2018. 370 s.

**Zlobin Sergey Nikolaevich**

Orel State university  
Address: 302030, Orel, Moskovskaya St., 77  
Candidate of technical sciences  
E-mail:

**Karpov Artem Evgenievich**

Russian University of Transport (MIIT)  
Address: 127018, Moscow, Oktyabrsky lane, 7  
Assistant of the Department «Traction rolling stock»  
E-mail: akarpov576@gmail.ru

УДК 656.13

doi:10.33979/2073-7432-2025-2-2(89)-96-103

Е.С. СЫТНИК

## ЭЛЕКТРОБУСЫ КАК КЛЮЧЕВОЙ ФАКТОР ДЕКАРБОНИЗАЦИИ В ТРАНСФОРМАЦИИ ГОРОДСКОГО ТРАНСПОРТА

**Аннотация.** В статье рассматривается роль электробусов как ключевого элемента в стратегии декарбонизации транспортной системы РФ. Проанализированы недостатки традиционных автобусов, приведены сравнительные характеристики с электробусами. Систематизирован опыт российских городов по внедрению электробусов, включая проект в Донецкой Народной Республике, реализуемый при поддержке федерального центра. Представлена трёхэтапная модель интеграции электробусов в транспортную систему городов, сочетающая комплексный подход и поэтапное решение технологических, инфраструктурных и экологических задач. Указаны ограничения внедрения электробусов, предложены решения для их минимизации. Работа формирует основу для устойчивой трансформации транспортных систем в условиях экологических и ресурсных ограничений.

**Ключевые слова:** электробусы, электрический транспорт, декарбонизация, городской транспорт, углеродный след, зарядная инфраструктура, экология транспорта

### Введение

Автомобильный транспорт (АТ), работающий на нефтяных топливах, является одним из основных источников вредных выбросов, включая оксиды углерода ( $\text{CO}$ ,  $\text{CO}_2$ ), азота ( $\text{NO}_x$ ), углеводороды ( $\text{C}_m\text{H}_n$ ) и твёрдые частицы, которые образуются при сгорании топлива в двигателях внутреннего сгорания (ДВС) и диспергируются с отработавшими газами автомобилей (табл. 1) [1]. Накапливаясь в окружающей среде эти выбросы приводят к деградации атмосферного воздуха, загрязнению гидросферы и почв, а также повышению рисков для здоровья населения [2]. Дизельные ДВС демонстрируют более высокий уровень выбросов сажи по сравнению с бензиновыми (таблица 1), что согласуется с их склонностью к образованию твердых частиц. При этом концентрация  $\text{CO}$  в бензиновых ДВС превышает дизельные аналоги в 2–10 раз, что требует разных подходов к нейтрализации токсичных компонентов.

Таблица 1 - Диапазоны процентного содержания компонентов отработавших газов, %

Тип ДВС	Компоненты отработавших газов, %							
	$\text{N}_2$	$\text{O}_2$	$\text{H}_2\text{O}$ (пар)	$\text{CO}_2$	$\text{CO}$	$\text{N}_x\text{O}_y$	$\text{C}_m\text{H}_n$	Сажа
Бензиновый	74-77	0,3-0,8	3-5,5	5-12	5-10	до 0,8	0,2-3	До 0,4
Дизельный	76-78	2-18	0,5-4	1-10	0,02-5	до 0,5	до 0,5	до 1,1

Транспортный сектор, ответственный за 24 % мировых антропогенных выбросов  $\text{CO}_2$  [3], находится в фокусе глобальной климатической повестки. Согласно Парижскому соглашению, Россия взяла обязательства по достижению углеродной нейтральности (баланса между выбросами и их поглощением) к 2060 году, а транспортная отрасль должна стать углеродно-нейтральной уже к 2050 году [4]. Это требует радикальных изменений, включая замену традиционных ДВС экологически безопасными технологиями.

Вклад разных видов транспорта в эмиссии  $\text{CO}_2$  в мировом транспортном комплексе [5] крайне неравномерен (табл. 2). На легковые автотранспортные средства (АТС) и микролитражные автомобили приходится почти половина выбросов (48 %), тогда как на железнодорожный транспорт – всего 1 %. Такая диспропорция отражает не только массовость использования легкового АТ (уровень автомобилизации в РФ \*- 322 автомобиля на 1000 жителей [6]), но и низкую энергоэффективность ДВС: КПД бензиновых ДВС составляет 20–30 %, дизельных – 30–45 %, что в 2–4 раза ниже, чем у электродвигателей. При этом низкий КПД АТС с тради-

ционным ДВС требует сжигания на 40–60 % больше топлива для преодоления той же дистанции, что и АТС с электродвигателем, что дополнительно увеличивает эмиссию токсичных веществ.

Таблица 2 - Распределение выбросов CO<sub>2</sub> по видам транспорта в мировом масштабе

№	Категория транспорта	Доля в общих выбросах транспортного сектора, %
1	Легковые автомобили и микроавтобусы	48
2	Грузовые автомобили	25
3	Международные авиаперевозки	10
4	Автобусы	6
5	Внутренняя авиация	5
6	Железнодорожный транспорт	1

Анализ динамики автотранспортного сектора позволил выявить несколько основных проблем:

- ежегодное увеличение парка АТС с ДВС;
- рост потребления углеводородного топлива;
- увеличение объемов выбросов АТС в атмосферу.

Следует отметить, что без мер декарбонизации выбросы от АТ будут увеличиваться. Для нивелирования данной тенденции важным инструментом экологизации транспортного сектора является электрификация автомобильного парка страны, в частности — внедрение электробусов. Они полностью исключают выбросы в процессе эксплуатации, а их энергоэффективность (КПД электродвигателя – 70–90 %) в 2–4 раза выше, чем у ДВС.

### **Материал и методы**

Целью данной статьи является систематизация опыта внедрения электробусов в России и разработка практических рекомендаций для декарбонизации городского транспорта в регионах.

В работе использованы данные из открытых источников, включая статистические отчеты аналитического агентства «Автостат», данные «Мосгортранса», «Мосэкомониторинга», техническая документация ГОСТ Р 59483-2021. Методологическая основа исследования включает: документальный анализ нормативно-правовых актов РФ, регулирующих переход на низкоуглеродный транспорт; сравнительное изучение эксплуатационных характеристик дизельных автобусов и электробусов; анализ инновационных решений в области зарядной инфраструктуры. Аналитический подход позволил систематизировать практики внедрения электробусов, а также разработать модель интеграции электробусов в транспортную систему городов ДНР. Работа направлена на формирование методологической базы для устойчивой трансформации транспортных систем РФ в рамках стратегии низкоуглеродного развития до 2050 года.

### **Теория**

В рамках климатической повестки ряд европейских стран (Германия, Франция, Великобритания) планируют ввести запрет на эксплуатацию АТС с ДВС к 2030–2035 гг. [7], что отражает глобальное направление в сторону декарбонизации транспорта. Согласно утвержденной в 2021 году стратегии, достижение Россией углеродной нейтральности в сфере транспорта [4] предполагает:

- поэтапное сокращение парка АТС с ДВС;
- развитие электротранспорта и водородных технологий;
- модернизацию инфраструктуры под новые виды энергии.

В контексте общественного транспорта ключевые экологические и эксплуатационные проблемы, присущие традиционным автобусам с ДВС (вредные выбросы, акустическое загрязнение, зависимость от нефтепродуктов) позволяют устраниить электробусы. Согласно ГОСТ Р 59483 - 2021 электробус представляет собой пассажирское транспортное средство,

приводимое в движение электродвигателем, питание которого осуществляется от бортовой перезаряжаемой системы хранения электрической энергии.

Принципиальное отличие электрических от традиционных автобусов проявляется в способах энергообеспечения, среди которых выделяются три основных подхода.

1. Непрерывная подача из внешнего источника (контактная сеть, индукционная зарядка). В этом случае электробус получает энергию в режиме реального времени.

2. Использование аккумуляторных батарей на борту (литий-ионные, твердотельные и др.). Энергия хранится на борту и периодически пополняется в процессе зарядки.

3. Генерация энергии на борту (водородные топливные элементы) – электричество производится в процессе химической реакции. В этом случае не нужны системы зарядки, а требуется заправка водородом.

Аккумуляторные электробусы, в отличие от водородных, требуют периодической подзарядки, которая может быть организована тремя способами [8].

1. Ночная зарядка в депо. Батареи пополняют запас энергии в периоды минимального энергопотребления (как правило, ночью), что помогает равномерно распределять нагрузку на электросети. Однако для одновременного подключения множества электробусов необходимо оснастить депо мощными электрическими линиями и преобразователями.

2. Динамическая зарядка (во время движения). Электробусы получают энергию от контактных проводов, установленных над дорогой на отдельных участках маршрута. Такой метод требует наличия инфраструктуры, аналогичной троллейбусной (опоры, подвесные линии), что ограничивает его применение городами с уже развитыми сетями электротранспорта.

3. Быстрая зарядка на остановках. Короткие сеансы подзарядки (5-10 минут) осуществляются через поднимающиеся устройства (пантографы) на конечных станциях или ключевых остановках. Это позволяет избежать простоев, но требует размещения специализированных станций вдоль маршрутов, что увеличивает затраты на инфраструктуру.

Каждая система имеет свои преимущества и недостатки и адаптируется под конкретные условия городской инфраструктуры. Например, ночную зарядку целесообразнее применять для небольших городов, а динамическую - для маршрутов с фиксированными остановками.

Сравнительный анализ ключевых характеристик автобусов с дизельными и электрическими двигателями (табл. 3) наглядно демонстрирует, что переход на электробусы является необходимым решением для декарбонизации транспорта при условии комплексного подхода.

Благодаря своим преимуществам электробусы находят применение на маршрутах крупных городов РФ [9]. Примером успешной реализации данной технологии является Москва, где к 2023 году сформирован крупнейший в мире парк электробусов, насчитывающий 1050 единиц [10], а на начало 2025 года их количество составило 2,3 тысячи единиц [11]. Согласно официальным данным «Мосгортранса» и «Мосэкомониторинга», замена традиционных автобусов на электробусы с 2018 по 2024 год позволила сократить выбросы загрязняющих веществ на 928 тонн, а CO<sub>2</sub> – на 189 тыс. тонн нарастающим итогом (рис. 1) [11]. Этот опыт показывает, что масштабный переход на электротранспорт технически осуществим и способен принести значимые экологические и социальные результаты, однако его реализация требует системной государственной поддержки на всех этапах.

Таким образом, внедрение электробусов в транспортные системы городов и регионов РФ может стать стратегическим решением для комплексного достижения целей:

- снижение экологической нагрузки за счёт нулевых эксплуатационных выбросов и устранения источников вредных выбросов, характерных для автобусов с ДВС;

- модернизация инфраструктуры путем создания зарядных станций и обновления автобусного парка с учетом требований энергоэффективности;

- совершенствование городской среды (снижение шумового загрязнения, повышение привлекательности общественного транспорта для населения).

Особую актуальность такой подход приобретает в регионах, где восстановление инфраструктуры совмещается с экологической трансформацией.

Таблица 3 - Сравнение дизельных и электрических автобусов по ключевым параметрам для устойчивого транспорта

Критерий	Дизельные автобусы	Электробусы
Экологичность	- высокий уровень вредных выбросов (CO, CxHy, NxOy, CO <sub>2</sub> , сажи), особенно в городских условиях эксплуатации;	- отсутствие вредных выбросов при эксплуатации; - сниженнное акустическое загрязнение;
Экономичность	- меньшая начальная стоимость по сравнению с электробусами; - высокие расходы на углеводородное топливо и техническое обслуживание (ТО);	- высокая первоначальная стоимость; - более низкие эксплуатационные расходы благодаря низкой стоимости электроэнергии и меньшим затратам на ТО;
Энергоэффективность	- КПД дизельных ДВС составляет около 30–45%; - значительные потери энергии;	- КПД электродвигателей достигает 70–90%; - эффективное использование энергии;
Комфорт для пассажиров	- значительный уровень шума и вибрации;	- тихая работа, отсутствие вибраций;
Гибкость маршрутов	- не требует специальной инфраструктуры; - может использоваться на любых маршрутах;	- требует наличия зарядной инфраструктуры; - отсутствие привязки к контактной сети обеспечивает гибкость маршрутов;
Обслуживание	- сложная система с большим количеством механических компонентов, требующих регулярного ТО;	- меньшее количество движущихся частей; - сниженные потребности в ТО;
Погодные условия	- работоспособность незначительно зависит от температуры окружающей среды;	- энергоэффективность может снижаться в холодную погоду из-за повышенного потребления энергии на обогрев салона;
Инфраструктура	- развитая сеть заправочных станций; - не требует дополнительных инвестиций в инфраструктуру;	- необходимо создание сети зарядных станций и модернизации депо для обслуживания электробусов;
Пассажировместимость	- стандартная пассажировместимость; - не ограничена весом аккумуляторов;	- возможно снижение пассажировместимости из-за веса аккумуляторов и ограничений по нагрузке на ось;
Долговечность батарей	не применимо.	- потеря емкости аккумуляторов может снижать запас хода и требовать замены батарей в течение срока службы электробуса.

Одним из регионов, где восстановление инфраструктуры сопряжено с экологическими проблемами, является Донецкая Народная Республика (ДНР). Здесь, на фоне восстановления транспортной инфраструктуры, разрушенной в ходе военного конфликта, усугубляется экологическая ситуация, вызванная как последствиями боевых действий (загрязнение почв, разрушение промышленных объектов, транспортной инфраструктуры), так и повышенной антропогенной нагрузкой [12].

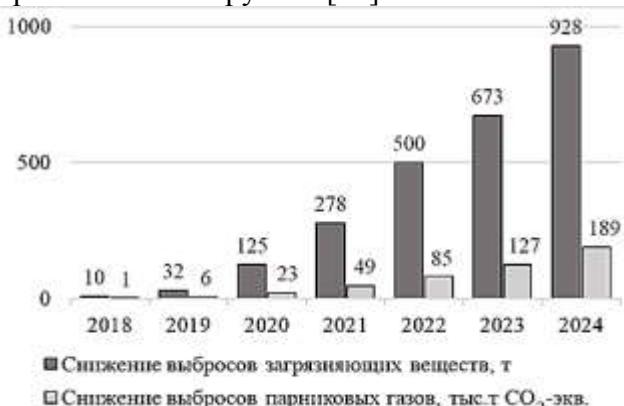


Рисунок 1 - Снижение выбросов загрязняющих веществ и парниковых газов (2018–2024 гг., нарастающим итогом) [11]

образом, переход на электробусы становится стратегическим инструментом, позволяющим

Для комплексного решения этих задач глава республики Денис Пушилин инициировал масштабную программу обновления городского электротранспорта. Она предусматривает не только организацию новых муниципальных маршрутов и модернизацию инфраструктуры, но и внедрение электробусов — экономичного и экологичного вида транспорта [13].

Важно отметить, что проект, реализуемый при поддержке федерального центра, преследует двойную цель: повышение качества жизни населения путём развития безопасного и доступного транспорта и снижение экологического ущерба. Таким

одновременно модернизировать систему общественного транспорта и сократить уровень загрязнения воздуха.

Данные инициативы, реализуемые при поддержке федерального центра, подтверждают, что транспорт на альтернативных источниках энергии способен стать инструментом системных преобразований даже в сложных условиях постконфликтного восстановления. При этом развитие соответствующей инфраструктуры требует сопутствующих мер государственной поддержки, направленных на минимизацию финансовых рисков для транспортных компаний.

Однако, наряду с преимуществами, внедрение электробусов сталкивается с рядом технологических и экономических ограничений:

1. Ограничения по пробегу и времени зарядки. Даже с учётом динамической подпитки от контактной сети (которая смягчает, но не устраняет проблему полностью) запас хода электробусов уступает дизельным аналогам, а полная зарядка аккумуляторов занимает несколько часов.

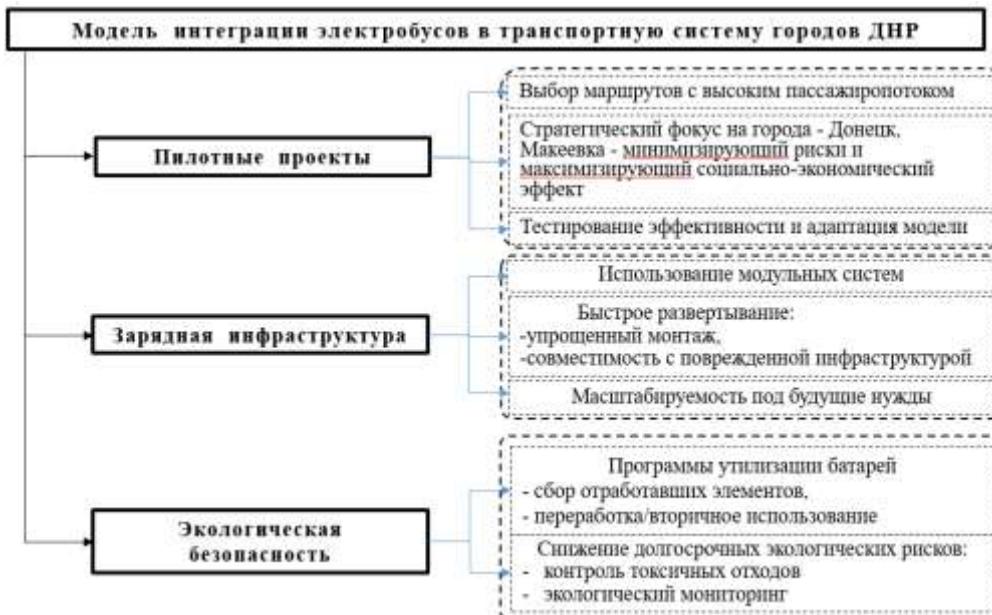
2. Дефицит зарядной инфраструктуры. Массовое использование электробусов требует масштабного строительства зарядных станций, что сопряжено не только с высокими капитальными затратами, но и необходимостью перепланировки городского пространства.

3. Высокие первоначальные затраты. Стоимость электробуса в 1.5–2 раза превышает цену автобуса с ДВС, что ограничивает доступность технологии для регионов с ограниченным бюджетом.

4. Экологические риски утилизации. Отслужившие батареи содержащие токсичные компоненты (литий, кобальт), требуют специализированной переработки, однако инфраструктура для этого отсутствует в большинстве стран.

### **Результаты и обсуждение**

Для минимизации указанных ограничений и системного внедрения технологии предлагаются трёхэтапная модель интеграции электробусов в транспортную систему ДНР (рис. 2). Её ключевая особенность – комплексный подход, который поэтапно решает технологические, инфраструктурные и экологические задачи.



**Рисунок 2 - Трёхэтапная модель интеграции электробусов в транспортную систему городов ДНР**

Предложенная перспективная модель регламентирует внедрение электробусов в транспортную систему ДНР путем последовательной реализации взаимосвязанных этапов, обеспечивающих технологическую, инфраструктурную и экологическую устойчивость про-

екта. Согласно модели, пилотные проекты станут отправной точкой для поэтапного внедрения электробусов [14]. В качестве тестовых полигонов предлагается выбрать маршруты с высоким пассажиропотоком в Донецке и Макеевке. В ходе испытаний будет осуществляться мониторинг ключевых параметров (фактический суточный пробег, временные интервалы зарядки, эксплуатационные расходы на обслуживание и энергопотребление). Это позволит адаптировать технологию к локальным условиям (например, использовать гибридную зарядку «депо + остановки» для длинных маршрутов) и минимизировать риски перед масштабированием проекта на другие города ДНР, такие как Горловка, Енакиево.

Формирование зарядной инфраструктуры целесообразно начать на этапе пилотных проектов, так как это позволит синхронизировать тестирование электробусов с параметрами энергоснабжения и выявить узкие места до масштабирования. Модульные станции (мобильные конструкции с оптимальной мощностью 150–300 кВт, обеспечивающей баланс между скоростью зарядки и нагрузкой на энергосети) планируется разместить в ключевых узлах – депо и на конечных остановках. Их мощность предполагается корректировать по мере роста парка; интеграция с поврежденными энергосетями будет обеспечиваться через буферные накопители [15]. Это решит проблему перебоев в энергоснабжении и позволит создать гибкую систему, готовую к расширению.

Этап экологической безопасности рекомендуется включить в процесс внедрения с ранней стадии. Первоочередными шагами станут: заключение долгосрочных соглашений с профильными перерабатывающими предприятиями-партнерами в РФ; проектирование сети пунктов сбора отработанных батарей с учётом логистики маршрутов. Это обеспечит преемственность между тестированием технологии и её жизненным циклом, минимизируя риски загрязнения окружающей среды.

На финальной стадии, когда пилотные проекты будут завершены, а инфраструктура масштабирована, предусматривается запуск полного цикла утилизации: от сбора отработанных батарей до их переработки. Это обеспечит замкнутость системы и снизит долгосрочные экологические риски.

Данная модель, разработанная для постконфликтных регионов, применима в любых условиях, где внедрение электробусов осложнено бюджетными ограничениями, а также инфраструктурными проблемами. Например, в моногородах (населённых пунктах с экономикой, зависимой от одного предприятия) устаревший транспорт можно заменить электробусами, снизив затраты за счёт поэтапного внедрения.

Для эффективной реализации модели необходимо:

- согласование правил утилизации батарей с российскими нормами;
- льготное кредитование для компаний, закупающих электробусы;
- развитие региональных центров по обслуживанию и ремонту электробусов.

Опыт Москвы доказывает: даже в условиях санкций и дефицита инвестиций электробусы могут стать основой транспорта при системной поддержке. Однако долгосрочная эффективность модели зависит от перехода на возобновляемые источники энергии (ВИЭ) и темпов замены парка. Эти задачи выходят за рамки транспортной реформы, но их решение определит достижение углеродной нейтральности к 2060 году.

### **Выходы**

Декарбонизация путем внедрения электробусов - ключевой шаг к достижению углеродной нейтральности транспорта путем полного исключения эксплуатационных выбросов. Предложена трёхэтапная модель внедрения электробусов, целью которой выступает обеспечение системного, устойчивого и адаптивного внедрения электробусов в условиях ограниченных ресурсов, инфраструктурных и экологических проблем. Модель решает три ключевые задачи: минимизацию рисков, связанных с пробегом и затратами, создание инфраструктурной базы и гарантию экологической безопасности. Данная модель представляет собой не просто программу обновления автопарка, а комплексную стратегию декарбонизации, адаптированную для регионов с ограниченными ресурсами. Электробусы в этой системе — основной элемент реформы, которая объединяет экологические преимущества и экономиче-

скую выгоду (сокращение затрат на топливо и обслуживание). Каждый внедренный электробус приближает города к цели нулевых выбросов к 2060 году. Однако для этого требуются изменения не только в транспорте, но и в энергетике, логистике, законодательстве.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Сытник Е.С., Черный А.И. Автомобильный транспорт как основной потребитель топлив нефтяного происхождения и источник вредных выбросов в окружающую среду // Актуальные проблемы науки и техники : материалы Всероссийской (национальной) научно-практической конференции. Ростов-на-Дону: Донской гос. техн. ун-т. 2023. С. 600–602. EDN ISEXCL.
2. Стуканов В.А. Автомобильные эксплуатационные материалы: учеб. пособие. Лабораторный практикум. М.: ФОРУМ: ИНФА-М, 2003. 208 с.
3. Кокорина Т. Зеленое преображение: самые экологичные технологии - 2024, которые меняют мир [Электронный ресурс] / Журнал НОЖ. 2024. URL: <https://knife.media/eco-technologies/>.
4. Декарбонизация транспортного сектора в России [Электронный ресурс] / Российская академия транспорта. 2022. URL: <https://rosacademtrans.ru/decarbonizacia/>.
5. Распределение выбросов углекислого газа в мировом транспортном секторе, по отраслям [Электронный ресурс]. 2024. URL: <https://topic.ru/statistics/energy/emissions/raspredelenie-vybrosov-uglekislogo-gaza-v-mirovom-transportnom-sektore-po-otraslyam/>.
6. Тимерханов А. На 1 тысячу россиян приходится 322 легковых автомобилей [Электронный ресурс] / АВТОСТАТ. 2024. URL: <https://www.autostat.ru/infographics/57413/>.
7. Елизаров Д. Европа откажется от ДВС к 2035 году. Но не совсем [Электронный ресурс] / Auto.ru. – 2023. URL: <https://auto.ru/mag/article/parlament-evrosoyuza-utverdil-otkaz-ot-dvs-k-2035-godu-no-s-ogovorkami/>.
8. ГУП «Мосгортранс»: Более 2 200 электробусов составляют более 30% парка наземного городского транспорта Мосгортранса [Электронный ресурс]. 2024. URL: <https://mosgortrans.ru/press/news/bolee-2-200-elektrobusov-sostavlyayut-bolee-30-parka-nazemnogo-gorodskogo-transporta-mosgortransa/>.
9. Надирян С. Л., Коцуба С. В., Камышникова Н. А. Опыт применения электробусов в крупных городах Российской Федерации // Наука. Техника. Технологии (Политехнический вестник). 2024. №2. С. 69-71. EDN BNVRMA.
10. Толстошев Д. Появление электробусов в Москве [Электронный ресурс] / MSK1.ru. 2023. URL: <https://msk1.ru/text/transport/2023/01/22/71995652/>.
11. Гень, М. Электробусы в Москве помогли сократить выбросы углекислого газа в атмосферу [Электронный ресурс] / Комсомольская правда. 2025. URL: <https://www.msk.kp.ru/online/news/6282436/>.
12. Дрозд Г. Я. Оценка деградации качества окружающей среды Донбасса вследствие годовых боевых действий // Агротехника и энергообеспечение. 2023. №2(39). С. 90-100. EDN JZITUO.
13. Пушилин анонсировал появление электробусов в ДНР [Электронный ресурс] / ДАН. 2025. URL: <https://dan-news.ru/obschestvo/pushilin-anonsiroval-pojavlenie-elektrobusov-v-dnr/>.
14. Бирюков И.В., Беляев А.И., Рыбников Е.К. Тяговые передачи электроподвижного состава железных дорог. М.: Транспорт, 1986. 256 с.
15. Развитие локомотивной тяги / Н.А. Фуфрянский, А.С. Нестрахов, А.Н. Долганов, Н.Н. Каменев, Э.А. Пахомов; Под ред. Н.А. Фуфрянского и А.И. Бевзенко. М.: Транспорт, 1982. 303 с.

### Сытник Елена Сергеевна

Автомобильно-дорожный институт (филиал) ФГБОУ ВО «Донецкий национальный технический университет»

Адрес: 284646, Россия, г. Горловка, ул. Кирова, д. 51

К.т.н., доцент кафедры «Автомобильный транспорт»

E-mail: ess007@bk.ru

E.S. SYTNIK

## ELECTRIC BUSES AS A KEY FACTOR IN DECARBONIZATION WITHIN THE TRANSFORMATION OF URBAN TRANSPORT

*Abstract. The article examines the role of electric buses as a core component of the Russian Federation's transport decarbonization strategy. It analyzes the shortcomings of conventional internal combustion engine (ICE) buses and presents comparative characteristics with electric*

buses. The study systematizes the experience of Russian cities in the deployment of electric bus fleets, including a project implemented in the Donetsk People's Republic with the support of the federal government. A three-stage model for integrating electric buses into urban transport systems is proposed, combining a comprehensive approach with a phased resolution of technological, infrastructural, and environmental challenges. The article identifies key barriers to the deployment of electric buses and suggests solutions for their mitigation. The findings provide a foundation for the sustainable transformation of transport systems under ecological and resource constraints.

**Keywords:** electric buses, electric transport, decarbonization, urban transport, carbon footprint, charging infrastructure, transport ecology

## BIBLIOGRAPHY

1. Sytnik E.S., Chernyy A.I. Avtomobil`nyy transport kak osnovnoy potrebitel` topliv neftyanogo proiskhozhdeniya i istochnik vrednykh vybrosov v okruzhayushchuyu sredu // Aktual`nye problemy nauki i tekhniki : materialy Vserossiyskoy (natsional`noy) nauchno-prakticheskoy konferentsii. Rostov-na-Donu: Donskoy gos. tekhn. un-t. 2023. S. 600-602. EDN ISEXCL.
2. Stukanov V.A. Avtomobil`nye ekspluatatsionnye materialy: ucheb. posobie. Laboratornyy praktikum. M.: FORUM: INFA-M, 2003. 208 s.
3. Kokorina T. Zelenoe preobrazhenie: samye ekologichnye tekhnologii - 2024, kotorye menyayut mir [Elektronnyy resurs] / ZHurnal NOZH. 2024. URL: <https://knife.media/eco-technologies/>.
4. Dekarbonizatsiya transportnogo sektora v Rossii [Elektronnyy resurs] / Rossiyskaya akademiya transporta. 2022. URL: <https://rosacademtrans.ru/decarbonizacia/>.
5. Raspredelenie vybrosov uglekislogo gaza v mirovom transportnom sektore, po otrasyam [Elektronnyy resurs]. 2024. URL: <https://topic.ru/statistics/energy/emissions/raspredelenie-vybrosov-uglekislogogaza-v-mirovom-transportnom-sektore-po-otraslyam/>.
6. Timerkhanov A. Na 1 tysyachu rossiyian prikhoditsya 322 legkovykh avtomobiliya [Elektronnyy resurs] / AVTOSTAT. 2024. URL: <https://www.autostat.ru/infographics/57413/>.
7. Elizarov D. Evropa otkazhetся ot DVS k 2035 godu. No ne sovsem [Elektronnyy resurs] / Auto.ru. - 2023. URL: <https://auto.ru/mag/article/parlament-evrosoyuza-utverdil-otkaz-ot-dvs-k-2035-godu-no-s-ogovorkami/>.
8. GUP «Mosgortrans»: Bolee 2 200 elektrobusov sostavlyayut bolee 30% parka nazemnogo gorodskogo transporta Mosgortransa [Elektronnyy resurs]. 2024. URL: <https://mosgortrans.ru/press/news/bolee-2-200-elektrobusov-sostavlyayut-bolee-30-parka-nazemnogo-gorodskogo-transporta-mosgortransa/>.
9. Nadiryan S. L., Kotsurba S. V., Kamyshnikova N. A. Opty primeneniya elektrobusov v krupnykh gorodakh Rossiyskoy Federatsii // Nauka. Tekhnika. Tekhnologii (Politekhnicheskiy vestnik). 2024. №2. S. 69-71. EDN BNVRMA.
10. Tolstosheev D. Poyavlenie elektrobusov v Moskve [Elektronnyy resurs] / MSK1.ru. 2023. URL: <https://msk1.ru/text/transport/2023/01/22/71995652/>.
11. Gen` M. Elektrobusy v Moskve pomogli sokratit` vybrosy uglekislogo gaza v atmosferu [Elektronnyy resurs] / Komsomol`skaya pravda. 2025. URL: <https://www.msk.kp.ru/online/news/6282436/>.
12. Drozd G. YA. Otsenka degradatsii kachestva okruzhayushchey sredy Donbassa vsledstvie godovykh boevykh deystviy // Agrotehnika i energoobespechenie. 2023. №2(39). S. 90-100. EDN JZITUO.
13. Pushilin anonsiroval poyavlenie elektrobusov v DNR [Elektronnyy resurs] / DAN. 2025. URL: <https://dan-news.ru/obschestvo/pushilin-anonsiroval-pojavlenie-elektrobusov-v-dnr/>.
14. Biryukov I.V., Belyaev A.I., Rybnikov E.K. Tyagovye peredachi elektropodvizhnogo sostava zheleznykh dorog. M.: Transport, 1986. 256 s.
15. Razvitie lokomotivnoy tyagi / N.A. Fufryanskiy, A.S. Nestrakhov, A.N. Dolganov, N.N. Kamenev, E.A. Pakhomov; Pod red. N.A. Fufryanskogo i A.I. Bevzenko. M.: Transport, 1982. 303 s.

**Sytnik Elena Sergeevna**

Automobile and Road Institute (Branch) of Federal State Budget Educational Institution of Higher Education «Donetsk National Technical University»  
Address: 284646, Rossia, Gorlovka, Kirova str., 51  
Candidate of Technical Sciences  
E-mail: ess007@bk.ru

УДК 629.113  
doi:10.33979/2073-7432-2025-2-2(89)-104-112

О.П. КОКАРЕВ

## ЭНЕРГОНАГРУЖЕННОСТЬ ТОРМОЗНОЙ СИСТЕМЫ АВТОМОБИЛЕЙ КАТЕГОРИИ М1 НА ДОРОГАХ С РАЗНЫМ ПРОДОЛЬНЫМ УКЛОНОМ

**Аннотация.** В данной статье проводится исследование, направленное на оценку энергонагруженности тормозной системы (ТорС) легковых автомобилей на дорогах с разными продольными уклонами. Результаты теоретического исследования получены для автомобиля марки Kia ceed с задними дисковыми тормозными механизмами и компоновкой антиблокировочной системой тормозов. Применяемые тормозные колодки передней и задней оси имеют коэффициент трения равный 0,3. Энергетический анализ проводился для разных углов уклона дороги и разных скоростей торможения с помощью метода математического моделирования. Результаты данной работы позволяют оценить объективность применения методики прогнозирования остаточного ресурса элементов ТорС на дорогах Европейской части России.

**Ключевые слова:** процесс торможения, энергонагруженность тормозной системы, теория энергетического изнашивания, методика прогнозирования остаточного ресурса

### Введение

Необходимость принятия во внимание показателей, количественно характеризующих воздействия климатических факторов при эксплуатации автомобилей, остается актуальной научно-практической задачей на автомобильном транспорте. На современном этапе развития технической эксплуатации автомобилей (ТЭА) определенное внимание уделяется исследованиям корректирования периодичности [1], трудоемкости технического обслуживания [2], контроля уровня эксплуатационной надежности [3] и пр., которые зависят от условий эксплуатации, регламентированных нормативными актами. Требования нормативных актов не всегда рационально вписываются в современную концепцию ТЭА, а в некоторых случаях возможно снижение эффективности эксплуатации автомобилей. Потребность повышения эффективности ТЭА связана со значительными конструктивными и техническими изменениями выпускаемой продукции в современной автомобильной промышленности. Техническое состояние тормозной системы, как основополагающей активной безопасности автомобиля, должно соответствовать требуемому уровню надежности при эксплуатации. Надежность ТорС зависит от технического состояния ее элементов. Лимитирующими уровень эксплуатационной надежности ТорС являются такие элементы как тормозные колодки (ТК) и тормозные диски (ТД) [4]. ТорС работает в сложных условиях энергетической нагруженности и обеспечение ее безотказности в разных условиях эксплуатации носит актуальный характер.

### Материал и методы

Оценка энергонагруженности тормозной системы осуществлялась с помощью методов теоретического исследования и математического моделирования, которые опирались на базовые положения оценки эффективности работы ТорС [5].

В данном исследовании процесс торможения рассматривается с точки зрения основных положений теории энергетического изнашивания на дорогах с разным продольным уклоном. Результаты проведенного исследования работы ТорС способствуют объективной оценки уровня реализации ресурса ТК и ТД в зависимости от энергонагруженности элементов ТМ в разных условиях эксплуатации.

Теоретические исследования проводились на примере спуска проезжей части на улице Куйбышева в городе Владимир («огуречная гора»), который относится к дороге Р 132, где перепад высот по топографической карте составляет 40 м (115 м над уровнем моря в самой низкой точке и 155 м в самой высокой) и протяженностью 450 м [6]. Применяя тригономет

рический подход оценки угла спуска рассматриваемого участка дороги, получим значение угла продольного уклона равное  $5,1^{\circ}$ . Согласно технической документации дорога Р 132 относится к II и III категориям дорог в соответствии с ГОСТ Р 52398-2005 «Классификация автомобильных дорог. Основные параметры и требования». В соответствии со Сводом Правил 396.1325800.2018 «Улицы и дороги населенных пунктов. Правила градостроительного проектирования (с Изменениями N 1, 2)» на пересечениях улиц и дорог в одном уровне следует исключать продольные уклоны более 40%, что соответствует 4% или  $2,3^{\circ}$ , за исключениями географического рельефа местности.

### Теория и расчет

Процесс торможения автомобиля направлен на снижение его скорости в зависимости от дорожной ситуации в пределах сложившейся необходимости для обеспечения безопасности дорожного движения. При каждом тормозном цикле ТК прижимается к ТД и происходит процесс абразивного изнашивания, когда на поверхности трения образуются частицы при разрушении микрообъемов трущихся элементов. От интенсивности абразивного изнашивания в процессе трения скольжения зависит ресурс ТК и ТД. В нормативно-технической документации (НТД) завода изготовителя, например, для автомобилей марки KIA, с целью обеспечения требуемого уровня работоспособности отражены только предельные значения остаточной толщины ТК и ТД, которые не имеют корреляции с регламентированными режимами ТО. В НТД отсутствуют положения и математический аппарат оценки и прогнозирования остаточного ресурса с учетом установленных режимов ТО. Принятие модели энергетического анализа процесса трения при торможении, оказывающей влияние на остаточную толщину ТК и ТД позволяет объективно оценивать и спрогнозировать остаточный ресурс с учетом режимов ТО и интенсивности работы ТорС [6].

При взаимодействии ТК и ТД реализуется главная функция ТорС – снижение скорости движения автомобиля. Опираясь на базовые аспекты теории автомобиля, принимаем кинематическую схему действующих сил (рис. 1).

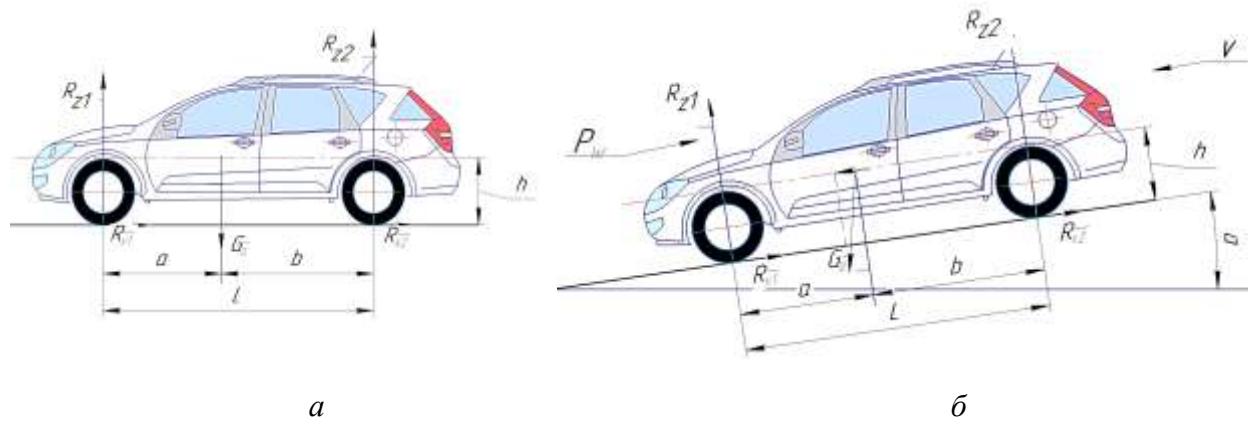


Рисунок 1 – Силы, действующие на автомобиль при торможении: а – по прямой и б – с уклоном

При торможении автомобиля на ровной поверхности (рис.1а), оценка тормозного момента по сцепному весу имеет вид [8]:

$$M_G = \sum R_{zi} \varphi r_k, \quad (1)$$

где  $R_{zi}$  – нормальная нагрузка (реакция дороги) на соответствующую ось (Н);

$\varphi$  – коэффициент сцепления шин с дорогой, применяется от 0,1 до 0,8;

$r_k$  – динамический радиус колес (м).

При движении автомобиля с уклона, уравнение баланса сил запишется в виде:

$$G \sin \alpha = P_w + G \cos f_0 \left( 1 + \frac{v^2}{1500} \right) + \sum P_t, \quad (2)$$

где  $P_w$  – сила сопротивления воздуха (Н);

$f_0$  – коэффициент сопротивления качению;

$P_t$  – тормозные силы, Н.

Силу сопротивления воздуха можно найти из выражения [9]:

$$P_w = \frac{C_x \rho}{2} F_a v^2, \quad (3)$$

где  $C_x$  – коэффициент лобового сопротивления;

$\rho$  - плотность воздуха (кг/м3);

$F_a$  –площадь проекции автомобиля на плоскость, перпендикулярную к его продольной оси (м2);

$v$  – скорость движения автомобиля (м/с).

Рассмотрим уравнение движущих сил при движении автомобиля без работы ТорС:

$$Gsina = \frac{C_x \rho}{2} F_a v^2 + Gcosaf_0 \left( 1 + \frac{v^2}{1500} \right). \quad (4)$$

Коэффициент лобового сопротивления  $C_x$ , плотность воздуха  $\rho$  и коэффициент сопротивления качению  $f_0$  при движении являются константами. Для удобства введем некоторые постоянные  $X = \frac{C_x \rho}{2} F_a$ ,  $Y = Gf_0$  величины, отражающие влияние констант. Тогда:

$$Gsina = Xv^2 + Ycosa + \frac{Ycosa}{1500} v^2. \quad (5)$$

Коэффициент  $f_0$  определим опытным путем на примере автомобиля *Kia ceed*. Чтобы оценить значение коэффициента  $f_0$  необходимо определить значение угла уклона, на котором значение движущей силы превзойдет силу веса с учетом  $f_0$ :  $Gsina \geq Gcosaf_0$ . При рассмотренном условии будет достаточно знать величину угла уклона, с которого автомобиль начнет движения под собственной массой и  $f_0 = \frac{sina}{cosa}$ . Определенное значение угла составляет  $1^\circ$ , синус  $1^\circ = 0,0175$ . Тогда принимаем  $f_0 = 0,015$ , при котором обеспечивается условие  $sina > cosa f_0$  ( $0,0175 > 0,015$ ).

По известным значениям технических характеристик автомобиля (снаряженная масса  $M_a = 1334$  кг), определим его вес  $G$ , следовательно  $Y = 1334 \cdot 9,81 \cdot 0,15 = 196,3$  Н. Коэффициент лобового сопротивления  $C_x$  составляет 0,3 [10]. Затем подставляя найденные значения констант в уравнение (4) при скоростях от 20 до 80 км/ч построим график баланса сил. Разница левой и правой части уравнения (4) будет являться суммарной тормозной силой  $\sum P_t$ , которую необходимо создать для обеспечения равномерного движения с уклона. Такие же вычисления выполним для разных продольных углов уклона дорог.

Теоретические исследования проводятся в соответствии со схемой на рисунке 2.

Из теории торможения автомобиля известно, что тормозной момент по сцепному весу  $M_G$  (1) автомобиля преимущественно зависит от коэффициента сцепления шин с дорогой и рассматривается в качестве максимального результата, когда колеса блокируются. С точки зрения эксплуатационной надежности, при торможении вызывает интерес момент, реализуемый в ТМ, зависящий от параметров процесса торможения (начальной скорости торможения, давления тормозной жидкости в гидравлическом приводе и времени трения пары колодка-диск). В эксплуатации при торможении автомобиля с уклона следует обеспечивать такое значение тормозного момента в ТМ  $M_{TM}$ , чтобы автомобиль не разгонялся, т.е. сохранял равномерное движение.

При найденных значениях членов уравнения (4), определяем тормозную силу из выражения:

$$\sum P_t = Gsina - Xv^2 + Ycosa + \frac{Ycosa}{1500} v^2.$$

По найденной суммарной тормозной силе определим тормозной момент по формуле (1):

$$\sum M_G = \sum P_t r_k = \sum M_{TM}.$$



Рисунок 2 – Схема исследования энергонагруженности TopC

Конкретное значение тормозной силы будет соответствовать тормозному моменту по сцепному весу при конкретном угле уклона и скорости движения автомобиля. Для того, чтобы обеспечить условие торможения в таком же ритме, необходимо в ТМ создать момент  $M_{\text{TM}}$  равный  $M_G$ . Тормозной момент в ТМ определяется как:

$$\sum M_{\text{TM}} = M_{\text{TM1}} + M_{\text{TM2}} = (N_1 r_1 + N_2 r_2) \mu, \quad (6)$$

где  $N_1, N_2$  - сила, прижимающие ТК передней и задней оси соответственно, Н;

$r_1, r_2$  – радиусы приложенной силы в передних и задних ТМ, м;

$\mu$  – коэффициент трения пары колодка-диск.

Сила, прижимающая ТК к ТД определяется  $N_i = \pi d_i^2 p$ , где  $d_i^2$  - площадь тормозного поршня суппорта  $i$ -ой оси  $\text{м}^2$ ,  $p$  – давление тормозной жидкости в приводе TopC,  $\text{kH/m}^2$ . Тогда:

$$\sum M_{\text{TM}} = (2d_1^2 r_1 + 2d_2^2 r_2) \pi p \mu.$$

Отсюда:

$$p = \frac{\sum M_{\text{TM}} \pi \mu}{2(d_1^2 r_1 + d_2^2 r_2)}. \quad (7)$$

Автомобиль, двигаясь по дороге с уклоном обладает определённой кинетической энергией, зависящей от массы автомобиля и скорости его движения. Опираясь на функциональность TopC, которая заключается в преобразовании кинетической энергии в другую, определим необходимый уровень работы трения в ТМ. Рассматривается энергонагруженность TopC при торможении автомобиля с уклона при равномерном движении, т.е.  $v_0 = v_k = v$ . Выражение оценки работы трения  $A_{\text{тр}i}$  примет вид [11]:

$$A_{\text{тр}i} = p B_i v_0 t_{\text{тр}}. \quad (8)$$

где  $B_i$  – комплексный параметр тормозного механизма,  $\text{м}^2$ ;

$v_0$  – начальная скорость торможения, м/с;

$t_{\text{тр}}$  – время трения, с.

Геометрические параметры элементов ТорС передней и задней оси рассматриваемого автомобиля различны, поэтому справедливо оценивать удельную работу трения  $q_A$  отдельно элементов ТМ передней оси и задней.

$$q_{Ai} = \frac{A_{\text{тр}i}}{\sum F_{hi}},$$

где  $\sum F_{hi}$  – суммарная площадь тормозных накладок  $i$ -ой оси, см<sup>2</sup>;

Процесс работы трения всегда сопровождается нагревом элементов, взаимодействующих друг с другом (ТК с ТД). Применяя систему математических моделей и их преобразования [12], получим выражение для оценки приращения нагрева пары трения колодка-диск:

$$\Delta T_i = \frac{A_{\text{тр}i}}{2c_i m_i}, \quad (9)$$

где  $A_{\text{тр}i}$  – работа трения в двух тормозных механизмах  $i$ -ой оси автомобиля, Дж;

$c_i$  – теплоемкость материала тормозного диска, Дж/К;

$m_i$  – масса тормозного диска, кг.

### Результаты и обсуждение

Теоретические зависимости тормозной силы от скорости на разных продольных углах уклона, построенные на основе выражений (4) и (5) отразим на рисунке 3.

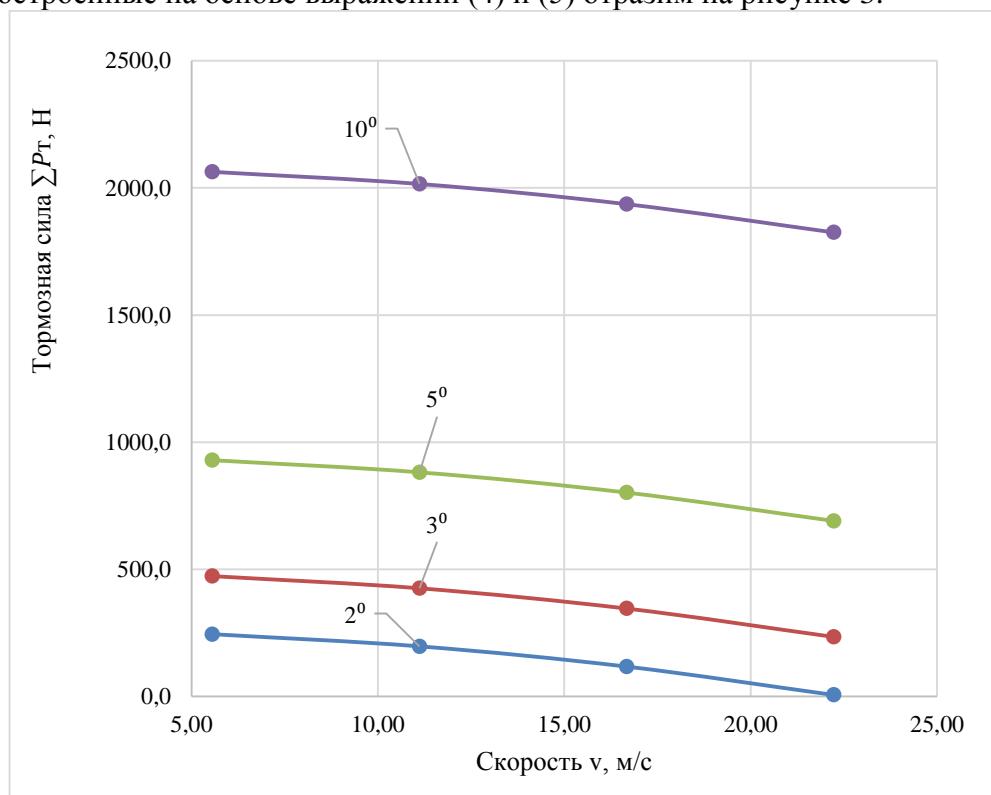


Рисунок 3 – Зависимость тормозной силы от скорости и угла уклона

Анализ зависимостей на рисунке 3 показывает, что для уклона дороги с углом  $2^0$  при скорости 5,56 м/с (20 км/ч) необходимо создать суммарную тормозную силу 245 Н, а при скорости 16,67 м/с (60 км/ч) – 117 Н. При  $10^0$  и скорости 5,56 м/с  $\sum P_t = 2065$  Н, а при скорости 16,67 м/с  $\sum P_t = 1936$  Н.

Полученные значения энергетических характеристик в процессе торможения на дорогах с разным углом уклона отразим в таблице 1.

Таблица 1 – Значения энергетических характеристик в процессе торможения

		Угол уклона дороги, °	Скорость движения с уклона $v$ , м/с	Время торможения $t$ , с	Левая часть уравнения (4) $Gsin\alpha$ , Н	Правая часть уравнения (4) $Xv^2 + Ycos\alpha + \frac{Ycos\alpha}{1500}v^2$ , Н	Тормозная сила $P_t$ , (Н)	Тормозной момент $M_G$ , Нм	Давление тормозной жидкости в природе $p$ , кН/м²	Работа трения $A$ , кДж	Работа трения передней оси $A_1$ , кДж	Работа трения задней оси $A_2$ , кДж	Температура нагрева передних ТМ $T_1$ , °C,	Удельная работа трения передних ТМ $q_{A1}$	Удельная работа трения задних ТМ $q_{A2}$	
2	5,56	81			212,1	244,6	49,7	45,3	83,6	67,3	16,3	9,6	3,3	0,26	0,08	
	11,11	40,5				259,9	196,8	39,9	36,5	67,3	54,2	13,1	7,7	2,6	0,21	0,07
	16,67	27				339,6	117,1	23,8	21,7	40,0	32,2	7,8	4,6	1,6	0,12	0,04
	22,22	20,25				451,1	5,6	1,1	1,0	1,9	1,5	0,4	0,2	0,1	0,01	0,00
3	5,56	81			212,0	472,9	96,0	87,6	161,7	130,1	31,6	18,6	6,3	0,50	0,16	
	11,11	40,5				259,8	425,1	86,3	78,8	145,4	117,0	28,4	16,7	5,7	0,45	0,14
	16,67	27				339,4	345,5	70,1	64,0	118,1	95,1	23,0	13,6	4,6	0,36	0,12
	22,22	20,25				450,9	233,9	47,5	43,4	80,0	64,4	15,6	9,2	3,1	0,25	0,08
5	5,56	81			211,5	929,1	188,6	172,2	317,7	255,7	62,0	36,5	12,4	0,98	0,31	
	11,11	40,5				259,2	881,3	178,9	163,3	301,3	242,5	58,8	34,6	11,8	0,93	0,29
	16,67	27				338,9	801,7	162,7	148,6	274,1	220,6	53,5	31,5	10,7	0,84	0,27
	22,22	20,25				450,3	690,3	140,1	127,9	236,0	190,0	46,0	27,1	9,2	0,73	0,23
10	5,56	81			209,2	2063,3	418,8	382,4	705,4	567,8	137,6	81,1	27,5	<b>2,17</b>	<b>0,69</b>	
	11,11	40,5				256,8	2015,6	409,2	373,5	689,2	554,7	134,5	79,2	26,9	2,12	0,67
	16,67	27				336,2	1936,2	393,1	358,8	662,0	532,8	129,2	76,1	25,8	2,04	0,65
	22,22	20,25				447,3	1825,1	370,5	338,2	624,0	502,3	121,8	71,8	24,4	1,92	0,61

Таблица 2 – Значения энергетических характеристик при торможении на пути 100 м

		Угол уклона дороги, °	Скорость движения с уклона $v$ , м/с	Время торможения $t$ , с	Левая часть уравнения (4) $Gsin\alpha$ , Н	Правая часть уравнения (4) $Xv^2 + Ycos\alpha + \frac{Ycos\alpha}{1500}v^2$ , Н	Тормозная сила $P_t$ , (Н)	Тормозной момент $M_G$ , Нм	Давление тормозной жидкости в природе $p$ , кН/м²	Работа трения $A$ , кДж	Работа трения передней оси $A_1$ , кДж	Работа трения задней оси $A_2$ , кДж	Температура нагрева передних ТМ $T_1$ , °C,	Удельная работа трения передних ТМ $q_{A1}$	Удельная работа трения задних ТМ $q_{A2}$	
2	5,56	18			212,1	244,6	49,7	45,3	18,6	15,0	3,6	2,1	0,7	0,06	0,02	
	11,11	9				259,9	196,8	39,9	36,5	15,0	12,0	2,9	1,7	0,6	0,05	0,01
	16,67	6				339,6	117,1	23,8	21,7	8,9	7,2	1,7	1,0	0,3	0,03	0,01
	22,22	4,5				451,1	5,6	1,1	1,0	0,4	0,3	0,1	0,0	0,0	0,00	0,00
3	5,56	18			212,0	472,9	96,0	87,6	35,9	28,9	7,0	4,1	1,4	0,11	0,04	
	11,11	9				259,8	425,1	86,3	78,8	32,3	26,0	6,3	3,7	1,3	0,10	0,03
	16,67	6				339,4	345,5	70,1	64,0	26,2	21,1	5,1	3,0	1,0	0,08	0,03
	22,22	4,5				450,9	233,9	47,5	43,4	17,8	14,3	3,5	2,0	0,7	0,05	0,02
5	5,56	18			211,5	929,1	188,6	172,2	70,6	56,8	13,8	8,1	2,8	0,22	0,07	
	11,11	9				259,2	881,3	178,9	163,3	67,0	53,9	13,1	7,7	2,6	0,21	0,07
	16,67	6				338,9	801,7	162,7	148,6	60,9	49,0	11,9	7,0	2,4	<b>0,19</b>	<b>0,06</b>
	22,22	4,5				450,3	690,3	140,1	127,9	52,4	42,2	10,2	6,0	2,0	0,16	0,05
10	5,56	18			209,2	2063,3	418,8	382,4	156,8	126,2	30,6	18,0	6,1	0,48	0,15	
	11,11	9				256,8	2015,6	409,2	373,5	153,1	123,3	29,9	17,6	6,0	0,47	0,15
	16,67	6				336,2	1936,2	393,1	358,8	147,1	118,4	28,7	16,9	5,7	0,45	0,14
	22,22	4,5				447,3	1825,1	370,5	338,2	138,7	111,6	27,1	15,9	5,4	0,43	0,14

Результаты в таблице 1 получены для участка дороги, имеющий путь торможения протяжённостью 450 м, о чём указывалось ранее в тексте. Максимальное значение удельной работы трения достигается на уклоне  $10^0$  и скорости 5,56 м/с. Для участка дороги протяженностью 100 м результаты отразим в таблице 2

Анализ таблицы 2 показывает, что энергонагруженность имеет максимальные значения на уклоне  $10^0$  и скорости 5,56 м/с.

Полученные результаты в таблицах 1 и 2 справедливы при торможении для обеспечения равномерного движении автомобиля с уклона. В Европейской части России продольные уклоны характерны для участков дорог, на которых осуществляется прямолинейное движение. Это подтверждает предположение о том, что с уклона зачастую необходимо обеспечить равномерное движение, которое достигается за счет функционирования ТорС [13]. В случае, например, изменения траектории движения с уклона, необходимо снижать скорость для осуществления безопасного маневра, тогда параметры энергонагруженности ТорС будут иметь другие значения [15]. Условия, когда необходимо снижать скорость автомобиля с уклона для маневра, характерны для дорог в горной местности, где следует проводить дополнительные исследования по оценки энергонагруженности ТорС автомобилей категории М1, которая непосредственно влияет на ресурс ТК и ТД.

В данной статье рассматривается энергонагруженность ТорС для пути торможения автомобиля равном 450 м и скоростей движения (начало торможения) от 5,56 м/с (20 км/ч) до 22,22 м/с (80 км/ч) с разными продольными углами дорог. В соответствии с правилами дорожного движения, в населенных пунктах максимально разрешенная скорость составляет 16,67 м/с (60 км/ч). А по полученным результатам прикладных исследований в рамках подготовки докторской работы автора установлено, что максимальный путь торможения составляет 235 м, максимальное время трения пары колодка-диск – 18,8 с [14]. Результаты текущего теоретического исследования получены с учетом пути трения, который превышает максимальное значение пути при экспериментальном исследовании, что свидетельствует об объективности и достоверности полученных теоретических результатов и методики их оценки.

### **Выводы**

В ходе проведенного теоретического исследования установлено, что энергонагруженность ТорС автомобиля *Kia ceed* с задними дисковыми тормозными механизмами и компоновкой антиблокировочной системой тормозов при торможении на дороге с продольным углом уклона в режиме «Город» равном  $5^0$  и начальной скорости торможения 16,67 м/с на протяжении 235 м составляет 0,44 кДж/см<sup>2</sup> для передней оси и 0,14 кДж/см<sup>2</sup> для задней оси. Среднее значение удельной работы трения за один рабочий цикл ТорС для ТМ передней оси равно 0,17 кДж/см<sup>2</sup>, для задней 0,06 кДж/см<sup>2</sup>. При сравнении полученных результатов теоретического исследования данной работы с результатами прикладных исследований, можно сделать вывод: энергонагруженность ТорС на дорогах с продольными углами уклона, на которых реализуется преимущественно прямолинейное движение, оказывает не существенное влияние на ресурс элементов ТорС. В связи с чем справедливо применять методику прогнозирования остаточного ресурса в регионах России без горного рельефа.

## **СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ**

1. Черняев И.О. Способ корректировки периодичности технического обслуживания транспортных средств на основе учёта накопленного нагрузочного воздействия // Вестник гражданских инженеров. 2021. №1(84). С. 178-188.
2. Igor Chernyaev, Elena Oleshchenko, Igor Danilov. Methods for continuous monitoring of compliance of vehicles' technical condition with safety requirements during operation // Transportation Research Procedia. V. 50. 2020. P. 77-85.
3. Загородний Н.А. Определение уровня эксплуатационной надежности транспортных средств [Электронный ресурс] / Транспортное машиностроение. 2025. №1. С. 40-48. URL: <https://doi.org/10.30987/2782-5957-2025-1-40-48>.

4. Кокарев О.П., Кириллов А.Г., Нуждин Р.В. Исследование влияния режимов работы тормозных механизмов на надежность элементов тормозной системы // Технико-технологические проблемы сервиса. 2022. №1(59). С. 23-27.
5. Давлатшоев Р.А. Повышение тормозных свойств автотранспортных средств в горных условиях эксплуатации: Дис. ... канд. техн. наук: 05.22.10. Владимир, 2007. 206 с.
6. Топографическая карта Центральный федеральный округ [Электронный ресурс]. URL: <https://ru-topographic-map.com/map-f4k8kl/Центральный-федеральный-округ/?center=54.52108,31.07483&zoom=8>.
7. Кокарев О.П., Кириллов А.Г. Реализация ресурса элементов тормозной системы в эксплуатации // Мир транспорта и технологических машин. 2024. №3-1(86). С. 83-90.
8. Соцков Д.А. Повышение активной безопасности автотранспортных средств при торможении: дис. ... д-ра техн. наук: 05.05.03. Москва, 1990. 565 с.
9. Локтионова, А. Г. Оценка изменений технических параметров транспортных средств / А. Г. Локтионова, А. Г. Шевцова, Е. А. Новописный // Вестник гражданских инженеров. 2022. №3(92). С. 146-153.
10. Кия Россия и СНГ [Электронный ресурс]. URL: <https://www.kia.ru/>.
11. Карпиневич Ю.Д., Безручко А.Ф., Михалков В.В. Работа трения как интегральный показатель степени выработки ресурса тормозных накладок автомобиля // Вестник Белорусской государственной сельскохозяйственной академии. 2024. №4.
12. Сарычев В.А., Хольщев Н. В., Краюшкин Е. А. Обзор существующих методов оценки тепловой энергонагруженности тормозных механизмов // Устойчивое развитие региона: архитектура, строительство, транспорт. 2019. С. 310-316.
13. Нышанбаева А.Б. Аналитический обзор влияния тяжелых условий на работу тормозных систем автомобилей // Известия вузов. Кыргызстан: Киргизский государственный университет строительства, транспорта и архитектуры им. Н. Исанова. 2011. С. 84-86.
14. Кокарев О.П., Кириллов А.Г., Нуждин Р.В. Оценка ресурса элементов тормозной системы // Мир транспорта и технологических машин. №3-3(82). 2023. Орел.
15. Стуканов В.А. Автомобильные эксплуатационные материалы: учеб. пособие. Лабораторный практикум. М.: ФОРУМ: ИНФА-М, 2003. 208 с.

**Кокарев Олег Петрович**

Владимирский государственный университет  
Адрес: 600000, Россия, г. Владимир, ул. Горького, 87  
Соискатель, заведующий лабораториями  
E-mail: angelok778@mail.ru

---

O.P. KOKAREV

## **ENERGY LOAD OF THE BRAKING SYSTEM OF M1 VEHICLES ON ROADS WITH DIFFERENT LONGITUDINAL SLOPES**

**Abstract.** This article discusses a study aimed at assessing the energy load of the braking system (SARS) of passenger cars on roads with different longitudinal slopes. The results of the theoretical study were obtained using the example of a Kia ceed car with rear disc brakes and an anti-lock braking system. The applied brake pads of the front and rear axles have a coefficient of friction equal to 0.3. The energy analysis was carried out for different angles of the road slope and different braking speeds using the mathematical modeling method. The results of this work will allow us to assess the objectivity of the application of the methodology for predicting the residual resource of SARS elements on the roads of the European part of Russia.

**Keywords:** braking process, energy load of the braking system, theory of energy wear, method of forecasting the residual resource

## **BIBLIOGRAPHY**

1. Chernyaev I.O. Sposob korrektirovki periodichnosti tekhnicheskogo obsluzhivaniya transportnykh sredstv na osnove uchiota nakoplenного nagruzochnogo vozdeystviya // Vestnik grazhdanskikh inzhenerov. 2021. №1(84). S. 178-188.

2. Igor Chernyaev, Elena Oleshchenko, Igor Danilov. Methods for continuous monitoring of compliance of vehicles' technical condition with safety requirements during operation // Transportation Research Procedia. V. 50. 2020. P. 77-85.
3. Zagorodniy N.A. Opredelenie urovnya ekspluatatsionnoy nadezhnosti transportnykh sredstv [Elektronnyy resurs] / Transportnoe mashinostroenie. 2025. №1. S. 40-48. URL: <https://doi.org/10.30987/2782-5957-2025-1-40-48>.
4. Kokarev O.P., Kirillov A.G., Nuzhdin R.V. Issledovanie vliyaniya rezhimov raboty tormoznykh mekhanizmov na nadezhnost` elementov tormoznoy sistemy // Tekhniko-tehnologicheskie problemy servisa. 2022. №1(59). S. 23-27.
5. Davlatshoev R.A. Povyshenie tormoznykh svoystv avtovozov sredstv v gornykh usloviyakh ekspluatatsii: Dis. ... kand. tekhn. nauk: 05.22.10. Vladimir, 2007. 206 s.
6. Topograficheskaya karta Tsentral`nyy federal`nyy okrug [Elektronnyy resurs]. URL: <https://ru.ru.topographic-map.com/map-f4k8kl/Tsentral`nyy-federal`nyy-okrug/?center=54.52108,31.07483&zoom=8>.
7. Kokarev O.P., Kirillov A.G. Realizatsiya resursa elementov tormoznoy sistemy v ekspluatatsii // Mir transporta i tekhnologicheskikh mashin. 2024. №3-1(86). S. 83-90.
8. Sotskov D.A. Povyshenie aktivnoy bezopasnosti avtovozov sredstv pri tormozhenii: dis. ... d-ra tekhn. nauk: 05.05.03. Moskva, 1990. 565 s.
9. Loktionova, A. G. Otsenka izmeneniy tekhnicheskikh parametrov transportnykh sredstv / A. G. Loktionova, A. G. Shevtsova, E. A. Novopisnyy // Vestnik grazhdanskikh inzhenerov. 2022. №3(92). S. 146-153.
10. Kia Rossiya i SNG [Elektronnyy resurs]. URL: <https://www.kia.ru/>.
11. Karpievich YUD., Bezruchko A.F., Mikhalkov V.V. Rabota treniya kak integral`nyy pokazatel` stepeni vyrabotki resursa tormoznykh nakladok avtomobilya // Vestnik Belorusskoy gosudarstvennoy sel'skokhozyaystvennoy akademii. 2024. №4.
12. Sarychev V.A., Hol'shev N. V., Krayushkin E. A. Obzor sushchestvuyushchikh metodov otsenki teplovoy energonagruzhennosti tormoznykh mekhanizmov // Ustoichivoe razvitiye regiona: arkhitektura, stroitel`stvo, transport. 2019. S. 310-316.
13. Nyshanbaeva A.B. Analiticheskiy obzor vliyaniya tyazhelykh usloviy na rabotu tormoznykh sistem avtomobiley // Izvestiya vuzov. Kyrgyzstan: Kirgizskiy gosudarstvennyy universitet stroitel`stva, transporta i arkhitektury im. N. Isanova. 2011. S. 84-86.
14. Kokarev O.P., Kirillov A.G., Nuzhdin R.V. Otsenka resursa elementov tormoznoy sistemy // Mir transporta i tekhnologicheskikh mashin. №3-3(82). 2023. Orel.
15. Stukanov V.A. Avtomobil`nye ekspluatatsionnye materialy: ucheb. posobie. Laboratornyy praktikum. M.: FORUM: INFA-M, 2003. 208 s.

**Kokarev Oleg Petrovich**

Vladimir State University

Address: 600000, Russia, Vladimir, Gorky str., 87

Applicant, head of laboratories

E-mail: angelok778@mail.ru

## **ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫЕ ТРАНСПОРТНЫЕ СИСТЕМЫ**

УДК 656.1

doi:10.33979/2073-7432-2025-2-2(89)-113-119

М.Д. ТЕБЕКИН, Л.О. САВИН, И.В. ГУСЯКОВ

### **АНАЛИЗ РАЗВИТИЯ ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫХ ТРАНСПОРТНЫХ СИСТЕМ В РОССИИ В ПЕРИОД С 2012 ПО 2024 ГОДЫ**

*Аннотация.* В статье поведён анализ развития интеллектуальных транспортных систем в России за период с 2012 года по 2024 год. Рассмотрены наиболее значимые события, разработки и нововведения, связанные с ИТС в исследуемом периоде, а также эффект от их внедрения. Период с 2012 по 2024 год показал существенный, в десятикратном размере, рост систем и устройств ИТС на дорогах нашей страны. Представлен прогноз по развитию систем ИТС в России до 2030 года.

*Ключевые слова:* Россия, интеллектуальная транспортная система, светофор, транспорт, безопасность, дорожное движение

#### ***Введение***

Интеллектуальные транспортные системы (ИТС) представляют собой комплексы аппаратных и цифровых средств, предназначенные для мониторинга, контроля, регулирования движения, сбора данных, безналичной оплаты услуг и др. на дорожной сети городов и областей. ИТС объединяет разносторонние части дорожных информационных систем, имеющих отношение к транспорту: от отслеживания загруженности дорог, контроля за погодными и дорожными условиями, до регулирования движения общественного транспорта и управления городскими парковками.

В настоящее время ИТС Москвы работает в следующих направлениях:

- системы автоматической фиксации нарушений ПДД;
- совершенствование алгоритмов работы светофоров;
- создание выделенных полос для приоритетного движения общественного транспорта;
- внедрение новых платных парковочных зон и ограничения на въезд по отдельным видам транспорта и в некоторые зоны города;
- мониторинг работы коммунальной техники (мусоровозов, строительной техники и др.)
- информирование участников движения о графиках движения общественного транспорта, дорожных условиях, наличии свободных мест на парковках;
- наблюдение за дорожным движением в реальном времени и т.д.

#### ***Материал и методы***

В конце 2012 года начал свою деятельность федеральный пилотный проект «Иновационные дороги». Задумка проекта такова, что применение инновационных технологий позволит в значительной степени улучшить качество и долговечность дорог, вместе с тем ожидается снижение количества ДТП и тяжести их последствий, а также повышение комфорта и безопасности участников дорожного движения.

15 ноября 2015 г является датой запуска большого проекта «Платон» (сокращение от – «плата за тонны»). Целью этой программы является введение и контроль исполнения платы за проезд большегрузных автомобилей полной массой свыше 12 тонн на дорогах общего пользования федерального значения [1]. Основной идеей этого проекта является то, что большегрузные автомобили наносят дополнительный вред дорожному полотну при движении по дорогам из-за больших нагрузок, передающихся от их колес.

В 2016 году был начата реализация второго этапа транспортной стратегии РФ на срок до 2030 года. Особенностью этого этапа является инновационное развитие транспортной системы РФ по всем направлениям [2].

В г. Перми в 2017 году была разработана технология по мониторингу перевозки древесины на грузовых автомобилях. Ее разработчиком является фирма «Азимут», в составе ГК «Урбантех». Этот проект был воплощен в пилотном режиме в августе 2022 г., в частности путем выявления фактов незаконной перевозки древесины в Пермском крае. Анализ внедрения этой технологии показал, что выше 30% перевозок древесины были проведены в обход электронной базы данных, в которой ведется соответствующий учет.

С 2018 года на дорогах Москвы вводится в эксплуатацию комплексная система «Умный перекресток», разработанная компанией «СпецДорПроект» входящей в состав холдинга «Швабе». Эта система работает на базе интегрированных в дорожное покрытие индукционных петель, которые позволяют вести мониторинг плотности потока ТС при приближении к перекрестку. Особенностью системы является реализация новейшей технологии регулирования движения на перекрестках с учетом приоритета проезда общественного транспорта. Это позволяет как увеличить среднюю скорость доставки пассажиров, так и повысить пропускную способность перекрестков. Петлевые индуктивные детекторы вшиваются в дорожное полотно на глубину около 15 см, это позволяет сохранить их в целости при проведении дорожных работ и вместе с тем определять более 99 % ТС проходящих по дороге. Система «Умный перекресток» интегрирована в ИТС Москвы [3].

В 2018 г. ИТС Москвы начал обслуживать холдинг «Швабе» Госкорпорации Ростех. Управление ИТС происходит из централизованного ситуационного центра, который, как отмечают ГКУ ЦОДД (государственное казенное учреждение – Центр организации дорожного движения), считается одним из самых высокоеффективных в Европе [4].

Ноябрь 2019 г. ознаменовался открытием первого участка Центральной Кольцевой Автомобильной Дороги (ЦКАД). Эта магистраль стала самой «продвинутой» по внедрению ИТС на территории России. Здесь одновременно используются новейшая интеллектуальная система управления дорожным движением, безостановочная оплата проезда и единая система взимания платы. Для этого используют дорожные комплексы «АвтоУраган-ВСМ2-М», которые автоматически рассчитывают стоимость проезда для каждого ТС в зависимости от фактически пройденного участка, при этом транспорту не нужно останавливаться или даже притормаживать. Технология «Свободный поток» позволяет классифицировать автомобили, идентифицировать их номерные знаки и направлять счет на оплату владельцу ТС, который в свою очередь может произвести оплату используя мобильное приложение, сайт производителя или транспондер. Соответственно ЦКАД стал первой дорогой в России получившей безбарьерную систему оплаты проезда [5].

Май 2021 года стал новой вехой для беспилотных автомобилей в России – был произведен запуск первой в мире интеллектуальной автомагистрали для таких машин. Такой дорогой стала А-113 (ЦКАД)[5]. Над реализацией этого проекта трудились такие компании как концерн «Национальные телематические системы» (НТС), «Автодор», АО «ГЛОНАСС», «ИТЕКО Россия», «КапшТраффикоРуссия», «Деловые Линии», «Меркатор Холдинг», «ДаймлерКамаз Рус», «Казань-Телематика» [6].

В июле 2021 года было положено начало реализации стратегии цифровой трансформации транспортной отрасли, в которую было заложен бюджет в 60 трлн. Руб. Эта стратегия состоит из шести основных направлений министерства (рисунок 1).

В этом же году в Подмосковье была разработана и введена в действие система цифрового контроля оборота отходов строительства, сноса и грунтов (ОССиГ), на основе искусственного интеллекта, которая была интегрирована с системами Министерства экологии Московской области [7].

Сентябрь 2021 года стал следующим этапом для развития беспилотных автомобилей и охарактеризовался внедрением проекта «Беспилотные логистические коридоры» при одоб-

рении Правительства России. В этом проекте отмечается, что к 2024 году трасса М-11 «Нева» будет готова принять к эксплуатации беспилотные грузовые автомобили, а к 2030 году их применение будет возможно и на протяжении 20 тыс. км. на других федеральных трассах, таких как ЦКАД и М-12 [8].



*Рисунок 1 - Структура стратегии цифровой трансформации транспортной отрасли России*

В 2022 году положено начало внедрению специальных проекторов в качестве дорожной подсветки. Такие решения позволяют значительно повысить безопасность движения в ночное время или в условиях недостаточной видимости, в особенности на пешеходных переходах и основываются на Гобо проекторах. Основой конструкции такого проектора является специальный диск из стекла (гобо-слайд), на нем располагают необходимые изображения. Далее пакет линз проектора перераспределяет свет сквозь гобо-слайд и можно получить изображение на любой поверхности – стена, пол, асфальт и др. Примером внедрения такой технологии является заказчик – логистический оператор «Газпромнефть-Снабжение», разработкой занимается НИИ «Вектор» (в составе концерна «Вега») [9].

В марте 2023 года была представлена еще одна отечественная разработка, это усовершенствованный комплекс фотовидеофиксации, который позволяет распознавать 23 вида нарушений ПДД. Серийное производство и производственные мощности находятся в г. Перми. Внедряются и интеллектуальные светофоры нового поколения, позволяющие кроме основных своих функций также передавать и выводить информацию, например, о чрезвычайных происшествиях, ДТП, дорожной ситуации и др., в том числе и для информирования пешеходов и жителей [10].

В 2023 году был представлен комплекс «Автодискавери», который позволяет создавать цифровых двойников и производить контроль качества дорог и транспортной инфраструктуры (ДТИ). При этом под цифровым двойником понимается цифровая копия объекта или процесса, которая призвана улучшать качество производства, бизнеса, процесса и др. Разработчиком является компания «Цифровые дороги», находящаяся в составе ГК «Урбантех». Разработанный комплекс способен передавать оперативные данные о процессах, происходящих на участках ДТИ, принимать необходимые меры и в автоматическом режиме составлять соответствующую документацию. Для сбора и анализа данных используется специальный автомобиль, оснащенный фото-, видеоФиксаторами и нейросетью, которая может идентифицировать, классифицировать, проводить разметку элементов ДТИ по снимкам, сделанным с автомобиля. При этом комплекс обладает следующими характеристиками: оцифровка 23 классов объектов ДТИ с точностью до 50 элементов на объект; погрешность распо-

ложения объектов 10-100 см; точность оцифровки до 95 %; производительность одного мобильного комплекса составляет до 150 км. в сутки [11].

### Теория

На 2024 г. в России насчитывается более 2,5 тыс. светофоров, находящихся в составе ИТС, и они планомерно перестраиваются на адаптивный режим управления. Аппаратные средства ИТС применяемые в г. Москве в 2024 г. Представлены на рисунке 2.

Все вышеперечисленные решения позволяют организовать круглосуточный мониторинг за ситуацией на дорогах Москвы, таким образом снизить количество ДТП, получать более объективную оценку при возникновении спорных ситуаций и вести фиксацию правонарушений в автоматическом режиме.

Идет работа над внедрением технологии автоматического распознавания ТС движущихся по дорогам без полиса ОСАГО, фиксации соответствующего правонарушения и оформлении штрафа на собственника ТС [12].

В 2024 году Самарская область вышла на первое место по финансированию ИТС (134 млн. руб.), на втором месте Челябинская область (125,8 млн. руб.), на третьем - Свердловская область (116,7 млн. руб.), на четвертом - Республика Татарстан (114,6 млн. руб.).

Количество регионов, развивающих ИТС на своих дорогах в период с 2023 по 2024 гг. выросло в среднем на 20 %. Особенностью развития ИТС является переход с начала 2020-х на замещение импортных компонентов и разработок на отечественные, таким образом идет процесс активного импортозамещения [13].

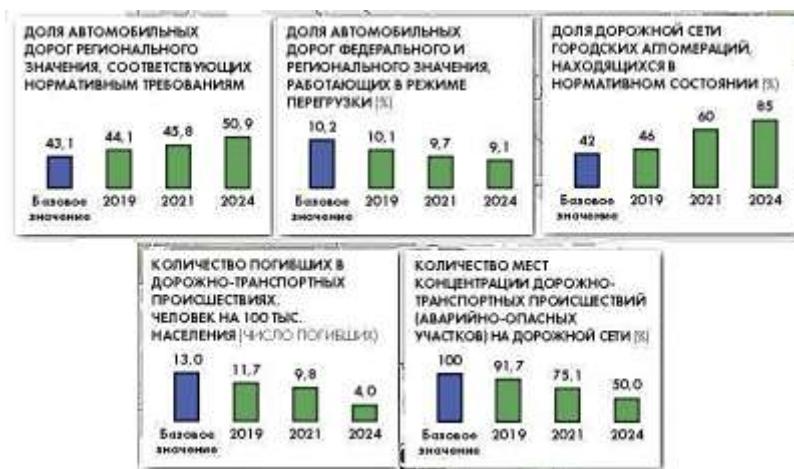


Рисунок 2 - Аппаратные средства ИТС применяемые в г. Москве в 2024 г.

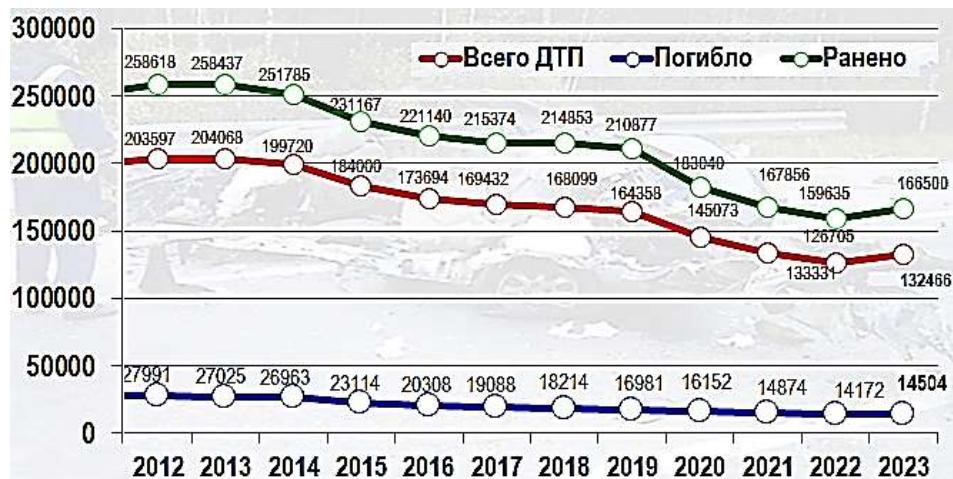
### Результаты

Период с 2020 по 2024 гг. охарактеризовался резким ростом ИТС внедренных на дорогах нашей страны в 56 регионах. К ИТС планомерно подключаются городские округа с населением более 300 тыс. чел., это более 60 городов. Так в 2023 году элементы ИТС были внедрены в 51 регионе нашей страны, при этом в 2022 году их количество составляло 43. Эффект от внедрения ИТС на дорогах России за период 2018-2024 гг. представлен на рисунках 3 и 4.

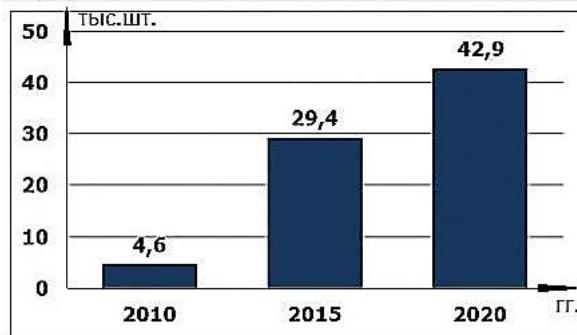
За период с 2010 по 2020 количество устройств ИТС на дорогах России выросло почти в 10 раз, что отражено на рисунке 5 [14].



*Рисунок 3 - Эффект от внедрения ИТС на дорогах России за период 2018-2024 гг.*



*Рисунок 4 - Статистика по дорожно-транспортным происшествиям за период с 2012 по 2023 гг.*



*Рисунок 5 – Общее количество устройств ИТС подключенных в России за период 2010-2020 гг.*

### **Выводы**

Период с 2012 по 2024 год показал существенный, в десятикратном размере, рост систем и устройств ИТС на дорогах нашей страны, это привело к значительному снижению аварийности, смертности, травм и количества ДТП в процентном соотношении от общего числа автомобилей на дорогах. Несмотря на рост количества автомобилей на дорогах внедрение ИТС позволяет контролировать загруженность дорог на приемлемом уровне, таким образом снижая загрязнение атмосферы вредными выбросами, шумами, пылью и др [15].

Одной из основных задач ИТС является снижение плотности транспортных потоков на дорогах, связанной с ростом количества транспорта и урбанизацией населения. ИТС позволяет рационально перераспределять транспорт по дорожной сети снижая его количе-

ство на более загруженных участках, путем направления на менее загруженные участки. Соответственно повышается качество перевозки пассажиров, грузов и оборудования за счет оперативного регулирования дорожного движения, которое позволяет снизить аварийность, заторы на дорогах и время в пути [16].

Основными направлениями дальнейшего развития ИТС на период до 2030 года являются создание и ввод в эксплуатацию умных дорог и умных беспилотных транспортных средств, более широкое внедрение искусственного интеллекта для выявления нарушений как среди водителей, так и среди пешеходов и лиц, управляющих средствами индивидуальной мобильности. Кроме того, в этот период ожидается планомерное внедрение ИТС в городские агломерации с населением более 300 тыс. чел.

## **СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ**

1. Городские и региональные ИТС [Электронный ресурс] / URL: <https://www.tadviser.ru/index.php/>.
2. О развитии искусственного интеллекта в Российской Федерации: Указ Президента РФ от 10 октября 2019 г. № 490 // Собрание законодательства РФ. 2019. №41. С. 5700.
3. Передовые методы управления дорожным движением [Электронный ресурс] / URL: <https://www.tadviser.ru/index.php/>.
4. Безопасные и качественные автодороги: от фотовидеофиксации ДТП – к комплексному интеллектуальному управлению автодорогами [Электронный ресурс] / URL: <https://www.tadviser.ru/index.php/>.
5. Коробеев А.И., Чучаев А.И. Беспилотные транспортные средства: новые вызовы общественной безопасности // Lexrussica. 2019. №2.
6. Цифровая дорога [Электронный ресурс] / URL: <https://www.tadviser.ru/index.php/>
7. Ростовцев В.С. Искусственные нейронные сети: Учебник. Киров: ВятГУ, 2014. 208 с.
8. Как в России внедряют интеллектуальные транспортные системы [Электронный ресурс] / URL: <https://tg.ru/2023/04/25/vzialis-za-um.html>.
9. ГОСТ Р 52289-2019. Технические средства организации дорожного движения. Москва: Стандартинформ, 2019. 58 с.
10. ДТП в России [Электронный ресурс] / URL: <https://www.tadviser.ru/index.php/>.
11. Аналитики рассказали, в каких городах водители дольше всего стоят в пробках [Электронный ресурс] / URL: <https://www.fontanka.ru/2024/01/10/73105460/>.
12. Автомобильные пробки в Москве [Электронный ресурс] / URL: [https://yandex.ru/company/researches/2014/ya\\_traffic\\_msk\\_2014](https://yandex.ru/company/researches/2014/ya_traffic_msk_2014).
13. В Москве зарегистрировано более 4 млн легковых автомобилей [Электронный ресурс] / URL: <https://www.autostat.ru/news/58263/>.
14. Чистяков И.Н. Роль технологий 5G: умные города и интеллектуальные транспортные системы // Студенческий. 2021. №4-1(132). С. 28-35.
15. Донченко Д.С., Садовникова Н.П., Прыгин Д.С. Обзор подходов к применению алгоритмов искусственного интеллекта для выявления факторов, влияющих на риск возникновения ДТП // Вестник воронежского института высоких технологий. Воронеж. 2018. №4(27). С. 54-57.
16. Аджиева А.А., Чекалина Л.А., Тихонова О.В. К вопросу о цифровизации транспортной логистики // Новый технологии в учебном процессе и производстве. Рязань, 2021. С. 166-168.

**Тебекин Максим Дмитриевич**

Академия ФСО России

Адрес: 302015, Россия, г. Орел, ул. Приборостроительная, 35

К.т.н., сотрудник

E-mail: tebekin\_maksim@mail.ru

**Савин Леонид Олегович**

Академия ФСО

Адрес: 302015, Россия, г. Орёл, ул. Приборостроительная, 35

К.т.н., сотрудник

E-mail: leonidys77@yandex.ru

**Гусяков Иван Владимирович**

Академия ФСО России

Адрес: 302015, Россия, г. Орел, ул. Приборостроительная, 35

Сотрудник

E-mail: vanka\_78@mail.ru

M.D. TEBEKIN, L.O. SAVIN, I.V. GUSYAKOV

## **ANALYSIS OF THE DEVELOPMENT OF INTELLIGENT TRANSPORT SYSTEMS IN RUSSIA IN THE PERIOD FROM 2012 TO 2024**

**Abstract.** The article analyzes the development of intelligent transport systems in Russia for the period from 2012 to 2024. The most significant events, developments and innovations related to ITS in the period under study, as well as the effect of their implementation, are considered. The period from 2012 to 2024 showed a significant, tenfold, growth of ITS systems and devices on the roads of our country. A forecast for the development of ITS systems in Russia until 2030 is presented.

**Keywords:** Russia, intelligent transport system, traffic light, transport, safety, road traffic

### **BIBLIOGRAPHY**

1. Gorodskie i regional`nye ITS [Elektronnyy resurs] / URL: <https://www.tadviser.ru/index.php/>.
2. O razvitiu iskusstvennogo intellekta v Rossiyskoy Federatsii: Uzak Prezidenta RF ot 10 oktyabrya 2019 g. № 490 // Sobranie zakonodatel`stva RF. 2019. №41. S. 5700.
3. Peredovye metody upravleniya dorozhnym dvizheniem [Elektronnyy resurs] / URL: <https://www.tadviser.ru/index.php/>.
4. Bezopasnye i kachestvennye avtodorogi: ot fotovideofiksatsii DTP - k kompleksnomu intellektu-al`nomu upravleniyu avtodorogami [Elektronnyy resurs] / URL: <https://www.tadviser.ru/index.php/>.
5. Korobeev A.I., Chuchaev A.I. Bespilotnye transportnye sredstva: novye vyzovy obshchestvennoy bezopasnosti // Lexrussica. 2019. №2.
6. Tsifrovaya doroga [Elektronnyy resurs] / URL: <https://www.tadviser.ru/index.php/>
7. Rostovtsev V.S. Iskusstvennye nevronnye seti: Uchebnik. Kirov: VyatGU, 2014. 208 s.
8. Kak v Rossii vnedryayut intellektual`nye transportnye sistemy [Elektronnyy resurs] / URL: <https://rg.ru/2023/04/25/vzialis-za-um.html>.
9. GOST R 52289-2019. Tekhnicheskie sredstva organizatsii dorozhnogo dvizheniya. Moskva: Standartinform, 2019. 58 s.
10. DTP v Rossii [Elektronnyy resurs] / URL: <https://www.tadviser.ru/index.php/>.
11. Analitiki rasskazali, v kakikh gorodakh voditeli dol`she vsego stoyat v probkakh [Elektronnyy re-surs] / URL: <https://www.fontanka.ru/2024/01/10/73105460/>.
12. Avtomobil`nye probki v Moskve [Elektronnyy resurs] / URL: [https://yandex.ru/company/researches/2014/ya\\_traffic\\_msk\\_2014](https://yandex.ru/company/researches/2014/ya_traffic_msk_2014).
13. V Moskve zaregistrirовано bolee 4 mln legkovykh avtomobiley [Elektronnyy resurs] / URL: <https://www.autostat.ru/news/58263>.
14. Chistyakov I.N. Rol` tekhnologiy 5G: umnye goroda i intellektual`nye transportnye sistemy // Studench-eskiy. 2021. №4-1(132). S. 28-35.
15. Donchenko D.S., Sadovnikova N.P., Prygin D.S. Obzor podkhodov k primeneniyu algoritmov iskusstvennogo intellekta dlya vyyavleniya faktorov, vliyayushchikh na risk vozniknoveniya DTP // Vestnik voronezhskogo instituta vysokikh tekhnologiy. Voronezh. 2018. №4(27). S. 54-57.
16. Adzhieva A.A., Chekalina L.A., Tikhonova O.V. K voprosu o tsifrovizatsii transportnoy logistiki // Novyye tekhnologii v uchebnom protsesse i proizvodstve. Ryazan`, 2021. S. 166-168.

**Tebekin Maxim Dmitrievich**

Academy of the Federal Guard Service

Address: 302015, Russia, Orel, Priborostroitelnaya str., 35

Candidate of Technical Sciences

E-mail: tebekin\_maksim@mail.ru

**Gusyakov Ivan Vladimirovich**

Academy of the Federal Guard Service

Address: 302015, Russia, Orel, Priborostroitelnaya str., 35

Officer of the Federal Security Service Academy

E-mail: vanka\_78@mail.ru

**Leonid Olegovich Savin**

Academy of the Federal Guard Service

Address: 302015, Russia, Orel, Priborostroitelnaya str., 35

Candidate of Technical Sciences

E-mail: leonidys@mail.ru

## ДОПОЛНИТЕЛЬНАЯ ОПТИМИЗАЦИЯ ТРАНСПОРТНОГО ДВИЖЕНИЯ В ГОРОДЕ ОРЛЕ

**Аннотация.** Автор статьи рассматривает способ, с помощью которых появляется возможность повышения эффективности систем управления улично-дорожной сетью Орловской городской агломерации. Будет подробно рассмотрена существующая технология, использующаяся на улицах города.

**Ключевые слова:** транспортные потоки, регулирование дорожного движения, светофоры, интеллектуальная транспортная система, пропускная способность, улично-дорожная сеть

### Введение

С 2020 года на территории города Орла реализуется Интеллектуальная транспортная система (ИТС), в рамках национального проекта «Безопасные и качественные дороги», согласно Распоряжению Минтранса России от 21 марта 2022 г. № АК-74-р «Об утверждении Методических рекомендаций по разработке заявок (включая локальные проекты по созданию и модернизации интеллектуальных транспортных систем) субъектов Российской Федерации на получение иных межбюджетных трансфертов из федерального бюджета бюджетам субъектов Российской Федерации в целях реализации мероприятия «Внедрение интеллектуальных транспортных систем, предусматривающих автоматизацию процессов управления дорожным движением в городских агломерациях, включающих города с населением свыше 300 тысяч человек» в рамках федерального проекта «Общесистемные меры развития дорожного хозяйства» государственной программы Российской Федерации «Развитие транспортной системы»

За время своего существования и активного развития программы, благодаря активной работе ситуационного центра ИТС, дорожная ситуация в городе Орле была существенно улучшена. Были разработаны и улучшены многие приемы по оптимизации транспортных потоков.

### Материал и методы

Одним из самых действенных методов по оптимизации дорожного движения стало предоставления приоритета одному из транспортных направлений, путем удержания встречного транспортного направления. Этот прием доступен при неодновременной активации разрешающего сигнала светофора в начале или конце фазы. На внутреннем сленге ситуационного центра ИТС эти приоритеты называются «задержка и отсечка». Немного подробнее о них:

- «Задержка» транспортного потока применяется на участках улично-дорожной сети города Орла с недостаточным количеством полос для установки дополнительной секции «стрелка налево». «Задержка» реализуется исключительно на X-образных пересечениях, в начале разрешающей светофорной фазы. (можно добавить почему так).

- «Отсечка» транспортного потока применяется на участках улично-дорожной сети города Орла с недостаточным количеством полос для установки дополнительной секции «стрелка налево». «Задержка» реализуется исключительно на Г-образных пересечениях, в конце разрешающей светофорной фазы. (можно добавить почему так).

### Теория / Расчет

Предоставление приоритета при проезде пересечения улично-дорожной сети значительно повысило как пропускную способность перекрестков, так и скорость их проезда. Однако многие перекрестки на территории города Орла имеют равно загруженный трафик для всех направлений, в основном это относится к X-образным перекресткам, поэтому внедрение приоритета в проезде не способствует улучшению транспортной ситуации на них.

Также одной из отличительных особенностей таких пересечений является выделенная светофорная фаза для пешеходов. Подробнее об этом: выделенная светофорная фаза для пешеходов в значительной степени повышает безопасность при переходе улично-дорожной сети пешеходами, но в свою очередь значительно замедляет общее время проезда перекрёстка и заставляет растягивать общее время управляющей программы светофорного объекта.

Такое решение можно наблюдать на многих пересечениях, оборудованных светофорными объектами в городе Орле. Из отмеченных плюсов – данный способ предусматривает максимальную безопасность для пешеходов, в связи с тем, что они движутся во время полной остановки транспортных средств. Нет конфликтных точек между ТС и пешеходами, за счет чего их направления не пересекаются.

Из выявленных минусов – данный вариант предусматривает увеличение времени управляющей программы, тем самым увеличивая время простоя транспортных средств на пересечении. Таким образом собирается больше автомобилей перед пересечением улиц и создается заторовая ситуация.

Есть два пути решения для разгрузки перекрестка. Первый – совмещение транспортного направления с пешеходным. Данный способ уменьшает общее время управляющей программы, но создает опасную ситуацию с возможным наездом транспортного средства на пешехода. Для большей безопасности пешеходов, на таких пересечениях устанавливаются дополнительные секции ИС-300Л и ИС-300П, информирующие водителей, что при повороте налево или направо, соответственно, включен разрешающий сигнал светофора для пешеходов.

Второй – подключение табло вызывного пешеходного. Данное табло является кнопкой активации пешеходной фазы. Такая кнопка устанавливается на участках улично-дорожной сети без пересечений, но с пешеходным переходом. Это повышает безопасность пешеходов и увеличивает пропускную способность на участке УДС.

### ***Результаты и обсуждение***

На территории города Орла значительное время функционируют светофорные объекты с ТВП, которое активирует пешеходную фазу по запросу при нажатии кнопки, в остальное время пропуская транспортные потоки. Так как управляющие контроллеры на циклических светофорных объектах и на светофорных объектах с ТВП идентичны, была предпринята попытка объединить достоинства двух вышеуказанных контроллеров и принципов их работы.

Подробнее: на пересечении улично-дорожной сети с установленным или проектируемым светофорным объектом, этот светофорный объект доукомплектовывается или непосредственно строится с возможностью установки кнопки ТВП, при этом оставаясь циклически работающим. То есть поочередно пропускаются транспортные потоки в попутных направлениях на X-образном перекрестке без активации пешеходной фазы. Такое решение позволяет в значительной мере повысить пропускную способность перекрёстка (рис. 1-4).

Принцип работы выглядит следующим образом: работают два транспортных направления по очереди, пока пешеходом не будет нажата кнопка ТВП. После нажатия кнопки ТВП заканчивается управляющая программа с двумя транспортными фазами и включается управляющая программа с двумя транспортными фазами и одной пешеходной.

Такие светофорные объекты особенно актуальны на перекрёстках с невысоким трафиком пешеходов, переходящих через улично-дорожную сеть. Тем самым разгружая перекресток, так как транспортным средствам не нужно тратить время на ожидание пешеходной фазы в отсутствии самих пешеходов. Также данный способ помогает снизить количество дорожно-транспортных происшествий с участием пешеходов.

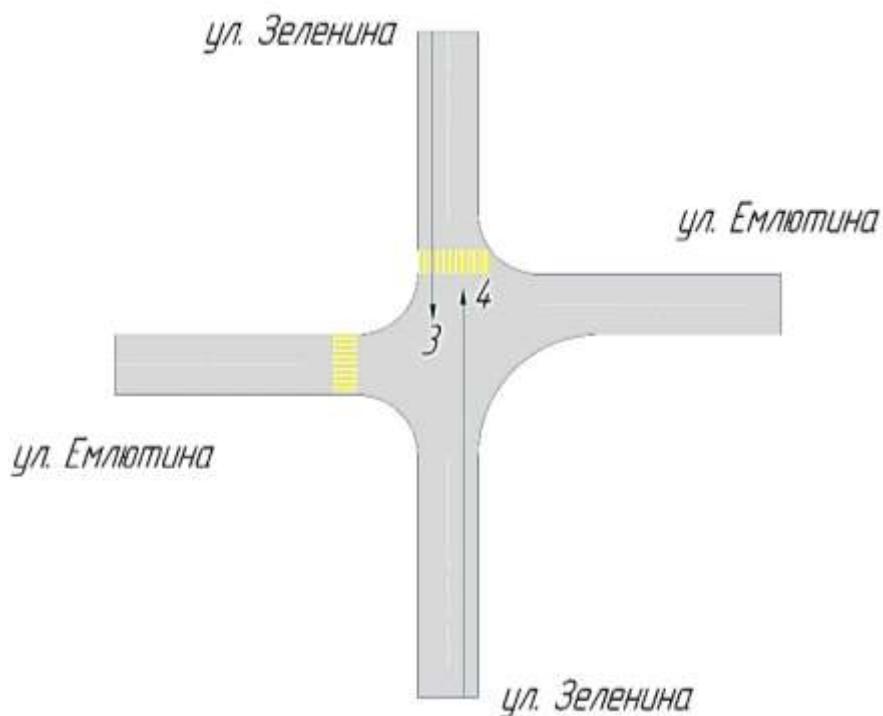


Рисунок 1 – Первая фаза пофазного разъезда на светофорном объекте с ТВП

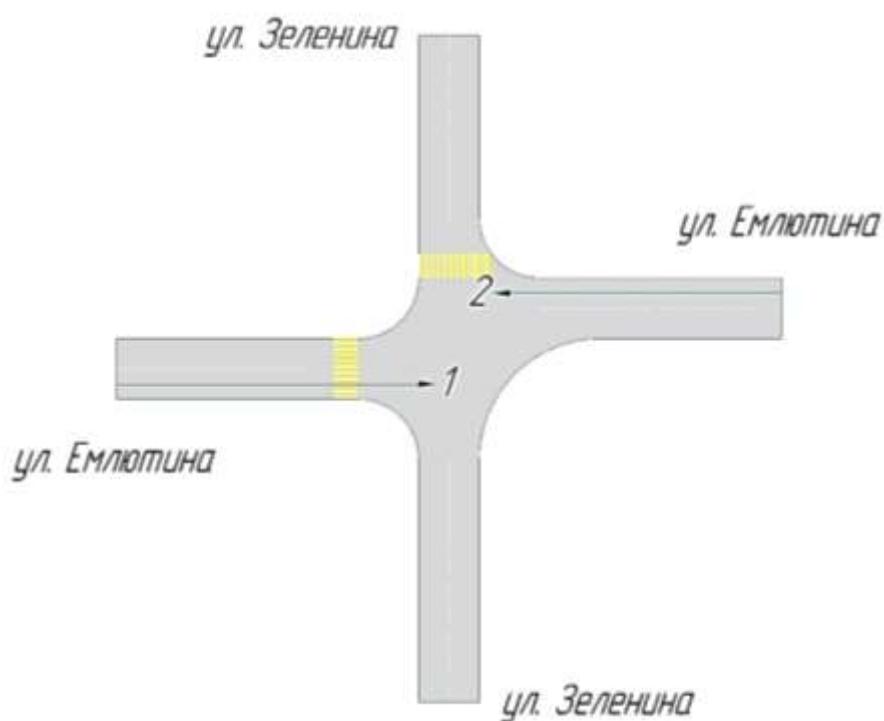


Рисунок 2 – Вторая фаза пофазного разъезда на светофорном объекте с ТВП

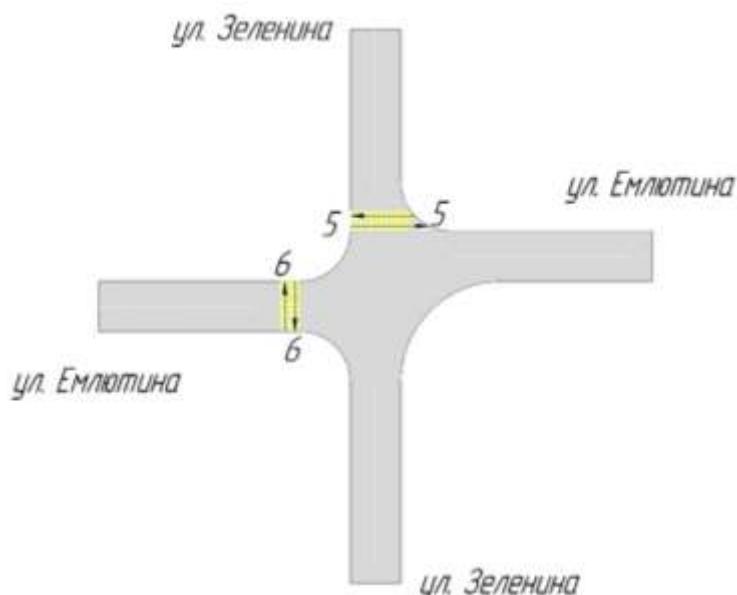


Рисунок 3 – Третья (пешеходная) фаза пофазного разъезда на светофорном объекте с ТВП

№ фазы	Фаза 1			Фаза 2			Фаза 3		
	Общее время 34			24			16		
Время	27	3	3 1	17	3 3	1	12	3	1
Вид такта	OCH	прот	прот прот	OCH	прот	прот	TBP	TBP	TBP
Направление 1	Э	Ж	К	К	К К	К	К	К	К
Направление 2	Э	Ж	К	К	К К	К	К	К	К
Направление 3	К	К	К	Э	Ж	К	К	К	К
Направление 4	К	К	К	Э	Ж	К	К	К	К
Направление 5	К	К	К	К	К	К	Э	Ж	К
Направление 6	К	К	К	К	К	К	Э	Ж	К
TBP									

Рисунок 4 – Управляющая программа на светофорном объекте с ТВП

### Выводы

Циклично работающие светофорные объекты, дополненные кнопками вызова ТВП в значительной степени могут способствовать улучшению транспортной ситуации на улично-дорожной сети города Орла с его не широкой проезжей частью. Таким образом решается вопрос безопасности пешеходов и пропускной способности автотранспорта. На данный момент подобных перекрестков в Орле всего два. Но в планах развития ИТС и безопасности организации дорожного движения решается вопрос о введении большего количества таких светофорных объектов.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Горев А.Э., Прохоров, А.В., Гизатуллин, Р.Р. Основы транспортного моделирования. Санкт-Петербург: ООО «Издательско-полиграфическая компания «КОСТА», 2015. 167 с.
- Горев А.Э., Швецов В.Л. Руководство по применению транспортных моделей в транспортном планировании и оценке проектов. Санкт-Петербург: ООО «Издательско-полиграфическая компания «КОСТА», 2016. 127 с.
- Евстигнеев И.А. Основы создания интеллектуальных транспортных систем в городских агломерациях России. Москва - Санкт-Петербург: Перо, 2021. 294 с.
- Беляев Э.И., Макарова И.В., Хабибуллин Р.Г. Применение современных методов оптимизации транспортной системы / под ред. Я. А. Полонского // Инновации в науке: Материалы науч.-практ. конф. Новосибирск: Сибирская ассоциация консультантов, 2012. 110 с.

5. Дегтяренко В.Н. Автомобильные дороги и автомобильный транспорт. Ростов н/Д: Рост. гос. акад. стр-ва, 2011. 185 с.
6. Евстегнеев И.А. Основы создания интеллектуальных транспортных систем в городских агломерациях России. М.: Пере, 2021. 294 с.
7. Жанказиев С.В., Ефименко Д.Б., Воробьев А.И., Багно А.В., Росланов А.Е. Разработка концепции создания интеллектуальной транспортной системы на автомобильных дорогах федерального значения // Отчет по государственному контракту № УД-47/261 от 07.10.2016 г.
8. Клинковштейн Г.И., Афанасьев М.Б. Организация дорожного движения. М.: Транспорт, 2015. 247 с.
9. Об утверждении правил предоставления и распределения в 2020 - 2024 годах иных межбюджетных трансфертов из федерального бюджета бюджетам субъектов Российской Федерации в целях внедрения интеллектуальных транспортных систем, предусматривающих автоматизацию процессов управления дорожным движением в городских агломерациях, включающих города с населением свыше 300 тысяч человек, в рамках федерального проекта «Общесистемные меры развития дорожного хозяйства» государственной программы Российской Федерации «Развитие транспортной системы: Постановление Правительства Российской Федерации от 21.12.2019г. №1762. 2019.
10. Об утверждении методики оценки и ранжирования локальных проектов в целях реализации мероприятия «Внедрение интеллектуальных транспортных систем, предусматривающих автоматизацию процессов управления дорожным движением в городских агломерациях, включающих города с населением свыше 300 тысяч человек» в рамках федерального проекта «Общесистемные меры развития дорожного хозяйства» национального проекта «Безопасные и качественные автомобильные дороги: Распоряжение Министерства транспорта Российской Федерации от 25 марта 2020 г. п АК-60-р, 2020.
11. Методика оценки и ранжирования локальных проектов в целях реализации мероприятия «Внедрение интеллектуальных транспортных систем, предусматривающих автоматизацию процессов управления дорожным движением в городских агломерациях, включающих города с населением свыше 300 тысяч человек» в рамках федерального проекта «Общесистемные меры развития дорожного хозяйства» национального проекта «Безопасные и качественные автомобильные дороги», утверждена распоряжением Минтранса № АК-60-р от 25.03.2020 г.
12. Методические рекомендации по разработке заявок (включая локальные проекты по созданию и модернизации интеллектуальных транспортных систем) субъектов Российской Федерации на получение иных межбюджетных трансфертов из федерального бюджета бюджетами субъектов Российской Федерации в целях реализации мероприятия «Внедрение интеллектуальных транспортных систем, предусматривающих автоматизацию процессов управления дорожным движением в городских агломерациях, включающих города с населением свыше 300 тысяч человек» в рамках федерального проекта «Общесистемные меры развития дорожного хозяйства» государственной программы Российской Федерации «Развитие транспортной системы» (Распоряжение Минтранса РФ АК-74-р от 21.03.2022г.)
13. ГОСТ Р 56294-2014. Интеллектуальные транспортные системы. Требования к функциональной и физической архитектуре интеллектуальных транспортных систем. Введ. 01.07.15.
14. Жанказиев С.В. Научные основы и методология формирования интеллектуальных транспортных систем в автомобильно-дорожных комплексах городов и регионов: Дис. ... д-ра техн. наук. М., 2012. 450 с.
15. Новиков А., Пржибыл П., Катунин А. Перевозки как наука // Мир транспорта и технологических машин. 2014. №3(46). С. 96-109.
16. Корягин М.Е. Равновесные модели системы городского пассажирского транспорта в условиях конфликта интересов. Новосибирск: Наука, 2011. 40 с.
17. Новиков А.Н., Севостьянов А.Л., Катунин А.А., Кулев А.В. Применение интеллектуальных транспортных систем (ИТС) для повышения эффективности функционирования городского общественного транспорта // Мир транспорта и технологических машин. 2013. №1(40). С. 85-90.

**Кухарев Кирилл Сергеевич**

Брянский государственный инженерно-технологический университет

Адрес: 241037, Россия, г. Брянск, Станке Димитрова пр., д. 3

Аспирант

E-mail: kk1459@ya.ru

**Кулев Андрей Владимирович**

Орловский государственный университет имени И.С. Тургенева

Адрес: 302026, Россия, г. Орел, ул. Московская, д. 77

К.т.н., доцент, доцент кафедры сервиса и ремонта машин

E-mail: srmostu@mail.ru

K.S. KUKHAREV, A.V. KULEV

**REPORT ON THE TOPIC: ADDITIONAL OPTIMIZATION  
OF TRAFFIC IN THE CITY OF OREL**

*Abstract. The author of the article considers the method by which it becomes possible to increase the efficiency of the management systems of the Oryol urban agglomeration's road network. The exist-*

*ing technology used on the streets of the city will be reviewed in detail.*

**Keywords:** traffic flows, traffic regulation, traffic lights, intelligent transport system, capacity, road network

## BIBLIOGRAPHY

1. Gorev A.E., Prokhorov, A.V., Gizatullin, R.R. Osnovy transportnogo modelirovaniya. Sankt-Peterburg: OOO «Izdatel'sko-poligraficheskaya kompaniya «KOSTA», 2015. 167 c.
2. Gorev A.E., SHvetsov V.L. Rukovodstvo po primeneniyu transportnykh modeley v transportnom planirovaniyu i otsenke proektov. Sankt-Peterburg: OOO "Izdatel'sko-poligraficheskaya kompaniya "KOSTA", 2016. 127 c.
3. Evstigneev I.A. Osnovy sozdaniya intellektual'nykh transportnykh sistem v gorodskikh aglomeratsiyakh Rossii. Moskva - Sankt-Peterburg: Pero, 2021. 294 c.
4. Belyaev E.I., Makarova I.V., Habibullin R.G. Primenenie sovremennoykh metodov optimizatsii transportnoy sistemy / pod red. YA. A. Polonskogo // Innovatsii v naune: Materialy nauch.-prakt. konf. Novosibirsk: Sibirskaya asotsiatsiya konsul'tantov, 2012. 110 s.
5. Degtyarenko V.N. Avtomobil'nye dorogi i avtomobil'nyy transport. Rostov n/D: Rost. gos. akad. str-va, 2011. 185 s.
6. Evstegneev I.A. Osnovy sozdaniya intellektual'nykh transportnykh sistem v gorodskikh aglomeratsiyakh Rossii. M.: Pero, 2021. 294 s.
7. ZHankaziev S.V., Efimenko D.B., Vorob'ev A.I., Bagno A.V., Roslanov A.E. Razrabotka kontseptsii sozdaniya intellektual'noy transportnoy sistemy na avtomobil'nykh dorogakh federal'nogo znacheniya // Otchet po gosudarstvennomu kontraktu № UD-47/261 ot 07.10.2016 g.
8. Klinkovshteyn G.I., Afanasyev M.B. Organitsatsiya dorozhnogo dvizheniya. M.: Transport, 2015. 247 s.
9. Ob utverzhdenii pravil predostavleniya i raspredeleniya v 2020 - 2024 godakh inykh mezhbyudzhetnykh transfertov iz federal'nogo byudzhetu byudzhetam sub"ektor Rossiyskoy Federatsii v tselyakh vnedreniya intellektual'nykh transportnykh sistem, predusmistrivayushchikh avtomatizatsiyu protsessov upravleniya dorozhnym dvizheniem v gorodskikh aglomeratsiyakh, vklyuchayushchikh goroda s naseleniem svyshi 300 tysyach chelovek, v ramkakh federal'nogo proekta "Obshchesistemnye mery razvitiya dorozhnogo khozyaystva" gosudarstvennoy programmy Rossiyskoy Federatsii "Razvitie transportnoy sistemy: Postanovlenie Pravitel'stva Rossiyskoy Federatsii ot 21.12.2019g. №1762. 2019.
10. Ob utverzhdenii metodiki otsenki i ranzhirovaniya lokal'nykh proektov v tselyakh realizatsii mero-priyatiya "Vnedrenie intellektual'nykh transportnykh sistem, predusmistrivayushchikh avtomatizatsiyu protsessov upravleniya dorozhnym dvizheniem v gorodskikh aglomeratsiyakh, vklyuchayushchikh goroda s naseleniem svyshi 300 tysyach chelovek" v ramkakh federal'nogo proekta "Obshchesistemnye mery razvitiya dorozhnogo khozyaystva" natsional'nogo proekta "Bezopasnye i kachestvennye avtomobil'nye dorogi: Rasporyazhenie Ministerstva transporta Rossiyskoy Federatsii ot 25 marta 2020 g. n AK-60-r, 2020.
11. Metodika otsenki i ranzhirovaniya lokal'nykh proektov v tselyakh realizatsii meropriyatiya "Vnedrenie intellektual'nykh transportnykh sistem, predusmistrivayushchikh avtomatizatsiyu protsessov upravleniya dorozhnym dvizheniem v gorodskikh aglomeratsiyakh, vklyuchayushchikh goroda s naseleniem svyshi 300 tysyach chelovek" v ramkakh federal'nogo proekta "Obshchesistemnye mery razvitiya dorozhnogo khozyaystva" natsional'nogo proekta "Bezopasnye i kachestvennye avtomobil'nye dorogi", utverzhdena rasporyazheniem Mintransa № AK-60-r ot 25.03.2020 g.
12. Metodicheskie rekomendatsii po razrabotke zayavok (vklyuchaya lokal'nye proekty po sozdaniyu i modernizatsii intellektual'nykh transportnykh sistem) sub"ektor Rossiyskoy Federatsii na poluchenie inykh mezhbyudzhetnykh transfertov iz federal'nogo byudzhetu byudzhetami sub"ektor Rossiyskoy Federatsii v tselyakh realizatsii meropriyatiya "Vnedrenie intellektual'nykh transportnykh sistem, predusmistrivayushchikh avtomatizatsiyu protsessov upravleniya dorozhnym dvizheniem v gorodskikh aglomeratsiyakh, vklyuchayushchikh goroda s naseleniem svyshi 300 tysyach chelovek" v ramkakh federal'nogo proekta "Obshchesistemnye mery razvitiya dorozhnogo khozyaystva" gosudarstvennoy programmy Rossiyskoy Federatsii "Razvitie transportnoy sistemy" (Rasporyazhenie Mintransa RF AK-74-r ot 21.03.2022g.)
13. GOST R 56294-2014. Intellektual'nye transportnye sistemy. Trebovaniya k funktsional'noy i fizicheskoy arkhiteturam intellektual'nykh transportnykh sistem. Vved. 01.07.15.
14. ZHankaziev S.V. Nauchnye osnovy i metodologiya formirovaniya intellektual'nykh transportnykh sistem v avtomobil'no-dorozhnykh kompleksakh gorodov i regionov: Dis. ... d-ra tekhn. nauk. M., 2012. 450 s.
15. Novikov A., Przhibyl P., Katunin A. Perevozki kak nauka // Mir transporta i tekhnologicheskikh mashin. 2014. №3(46). S. 96-109.
16. Koryagin M.E. Ravnovesnye modeli sistemy gorodskogo passazhirskogo transporta v usloviyakh konflikta interesov. Novosibirsk: Nauka, 2011. 40 s.
17. Novikov A.N., Sevost'yanov A.L., Katunin A.A., Kulev A.V. Primenenie intellektual'nykh transportnykh sistem (ITS) dlya povysheniya effektivnosti funktsionirovaniya gorodskogo obshchestvennogo transporta // Mir transporta i tekhnologicheskikh mashin. 2013. №1(40). S. 85-90.

**Kukharev Kirill Sergeevich**

Bryansk State University of Engineering and Technology  
Address: 241037, Russia, Bryansk, Stank Dimitrova ave.  
Graduate student  
E-mail: kk1459@ya.ru

**Kulev Andrei Vladimirovich**

Orel State University  
Address: 302026, Russia, Orel, Moskovskaya str., 77  
Candidate of Technical Sciences  
E-mail: srmostu@mail.ru

С.С. ЕВТЮКОВ, Я.В. ВАСИЛЬЕВ, Д.С. ГОЛУБЕВ

## МОДЕЛЬ ПРОГНОЗИРОВАНИЯ АВАРИЙНОСТИ НА ОСНОВЕ АДАПТИВНОГО НЕЙРО-НЕЧЕТКОГО ВЫВОДА

**Аннотация.** В статье представлена модель прогнозирования аварийности на основе адаптивного нейро-нечёткого вывода. Показаны результаты применения разработанной модели и определены пути ее дальнейшего совершенствования.

**Ключевые слова:** аварийность, ДТП, прогнозирование, временные ряды, моделирование, адаптивный нейро-нечеткий вывод

### Введение

Одной из наиболее распространенных причин травматизма и смерти во всем мире являются ДТП, при этом для людей всех возрастных групп это 8-я ведущая причина наступления летального исхода [1]. Для минимизации рисков аварийности, во всем мире, как правило, применяются комплексные меры. Однако, проблема аварийности остаётся все еще актуальной, несмотря на большую глубину исследований по теории и практике разработки и применения данных мер, регулярность и востребованность применения мероприятий по обеспечению безопасности дорожного движения, повышению пассивной безопасности автобусов и т.д. В этом ключе, прогнозирование аварийности на основе анализа данных о прошлых ДТП, погодных условиях, состоянии дорожного покрытия и других факторов позволяет заранее выявлять потенциальные угрозы и разрабатывать мероприятия по их предотвращению. Кроме того, для эффективного внедрения компонентов интеллектуальной транспортной системы (ИТС) и в целом формирования условий для цифровой трансформации как в области БДД, так и в области предоставления транспортных услуг в городских автобусных пассажирских перевозках, необходимо с учетом результатов анализа в [1, 2] сформировать модель прогнозирования аварийности. При этом, в последние годы на ряду с широко используемыми статистическими и вероятностно-статистическими подходами [3-6], все активнее начали использоваться исследования по прогнозированию аварийности на основе применения машинного обучения и нейронных сетей (НС) различного типа [7], что обуславливается не только развитием методов и средств реализации НС, но стремительным ростом накапливаемых и обрабатываемых больших объемов данных [8-11].

Этому сопутствуют также изменение технологического ландшафта, в части эволюции инструментальных средств разработки решений по прогнозированию аварийности, в котором все больший объем работ (как в отечественных, так и в зарубежных публикациях) использует язык Python, который приобретает доминирующее положение благодаря широким возможностям для машинного обучения, наличию специализированных библиотек и поддержке работы с большими объемами данных [12].

В опубликованных ранее работах [1, 2] для анализа и сравнения моделей использовались: корень из средней квадратической ошибки RMSE (Root Mean Square Error), средняя абсолютная ошибка MAE (Mean Absolute Error) и коэффициент детерминации  $R^2$ . При этом была определена перспективность построения модели прогнозирования аварийности на основе адаптивного нейро-нечеткого вывода (АННВ).

### Материал и методы

В обобщенном виде, модель прогнозирования аварийности - это модель описания взаимосвязи между вероятностью возникновения дорожно-транспортных происшествий и различными условиями дорожного движения, геометрическими характеристиками дорог, факторами окружающей среды, а также поведением водителей, что фактически в такой весьма

общей формулировке отражает общую направленность микро и макроописания моделей от общепринятой, в практике исследований области БДД, системы ВАДС [1].

Модель адаптивного нейро-нечеткого вывода (АННВ) или ANFIS (Adaptive Network-based Fuzzy Inference System) объединяет нечеткую логику и нейронные сети для прогнозирования числа ДТП на 1 км маршрута, приводимых к усредненным единицам времени (месяц, квартал, год) – горизонтам прогноза. Модель АННВ в настоящем исследовании включает нечеткую систему вывода (для обработки качественных зависимостей), нейронную сеть (для автоматической настройки параметров на основе данных) и метод редуцирования временных рядов (для выделения значимых циклов).

Схема реализации модели АННВ включает следующие основные этапы: 1. Сбор данных; 2. Предобработка; 3. Нормализация; 4. Построение нечетких правил; 5. Обучение нейро-нечеткой сети; 6. Валидация модели на тестовых данных; 7. Прогнозирование аварийности; 8. Визуализация результатов и метрик качества; 9. Адаптация параметров под региональные; 10. Интеграция с транспортной инфраструктурой; 11. Мониторинг и обновление модели в реальном времени.

Входные данные включали подготовку данных в наборы по следующим группам [1]: аварийность (группа А), режим перемещения на маршруте (группа Б), состояние транспортного потока на маршруте (группа В), данные по травмированию в ДТП (группа Г, полученная из данных использованных ранее в группе А [2]). Обобщенные индексы входных данных модели показаны в таблицах 1-4. В развитие выводов изложенных в [1] также помимо оценки травмирования были введены 22 дополнительных параметра, показанных в таблице 5, охватывающих временные, транспортные, городские и погодные особенности для Санкт-Петербурга.

Модель АННВ была реализована на языке Python 3.11 с использованием библиотек, среди которых для реализации машинного обучения использованы: scikit-fuzzy, scikit-learn, tensorflow/keras.

Таблица 1 - Входные данные модели для подсистем «Дорога-Среда» системы ВАДС

№ п/п	Индекс	Описание	Тип данных
1	RE1	Интенсивность движения (авт./ч)	Числовой
2	RE2	Число рядов движения	Числовой
3	RE3	Скорость потока (км/ч)	Числовой
4	RE4	Плотность потока (авт./км)	Числовой
5	RE5	Состояние покрытия (1–5, где 1 – отличное, 5 – аварийное)	Категориальный
6	RE6	Число остановок на 1 км	Числовой
7	RE7	Количество регулируемых пересечений	Числовой
8	RE8	Плотность заторов (0–1, где 1 – максимальный затор)	Числовой

Таблица 2 - Входные данные модели для подсистемы «Автомобиль» системы ВАДС

№ п/п	Показатель	Описание	Тип данных
1	A1	Перемещения в координатах (GPS-трек)	Временной ряд
2	A2	Пробег (км)	Числовой
3	A3	Максимальная скорость (км/ч)	Числовой
4	A4	Средняя скорость (км/ч)	Числовой
5	A5	Время без движения (мин)	Числовой
6	A6	Время в движении (мин)	Числовой

При начальной обработке данных также был использован метод редуцирования временных рядов, который включал выделение циклов, для этого использовался непрерывный вейвлет-анализ для обнаружения периодичностей в данных (например, суточные/сезонные колебания скорости и т.д.). После чего выделенные циклы ранжировались по величине влияния на риск ДТП (на основе корреляции с историческими данными аварий).

Таблица 3 - Входные данные модели для подсистемы «Водитель» системы ВАДС

№ п/п	Показатель	Описание	Тип данных
1	D1	Нарушение ПДД (перестройки)	Бинарный (0/1)
2	D2	Нарушение дистанции	Бинарный (0/1)
3	D3	Ошибки при проезде регулируемых перекрестков	Бинарный (0/1)
4	D4	Нарушения скорости	Бинарный (0/1)
5	D5	Ошибки на нерегулируемых перекрестках	Бинарный (0/1)

Таблица 4 - Входные данные модели по индексам травмирования

№ п/п	Показатель	Описание	Тип данных
1	HIC	Критерий травмы головы (0–1000)	Числовой
2	ASI	Сокращенная шкала травм (0–6)	Числовой
3	AIS	Индекс опасности ускорения (0–5)	Числовой

Таблица 5 - Входные данные, группы дополнительных параметров

№ п/п	Показатель	Описание	Тип данных
1	BR1	Статус моста (разведен/сведен)	Бинарный (0/1)
2	BR2	Задержка у моста (мин)	Числовой
3	BR3	Длина очереди у моста (м)	Числовой
4	BR4	Перепад высот на подъезде (м)	Числовой
5	FOG	Интенсивность тумана (м видимости)	Числовой
6	SURF	Уровень увлажнения покрытия	Категориальный (1-5)
7	WI	Порывы ветра (м/с)	Числовой
8	RS	Тип осадков (0-нет, 1-дождь, 2-снег)	Категориальный
9	TP	Наличие трамвайных путей	Бинарный (0/1)
10	PP	Интенсивность пешеходов (чел/час)	Числовой
11	LW	Ширина полосы (м)	Числовой
12	TU	Уровень туристической активности	Числовой
13	EI	Влияние мероприятий (коэффициент)	Числовой
14	RW	Наличие дорожных работ	Бинарный (0/1)
15	HD	Нахождение в историческом центре	Бинарный (0/1)
16	OLD	Возраст автобуса (лет)	Числовой
17	FT	Тип топлива (1-дизель, 2-электро)	Категориальный
18	LF	Загрузка автобуса (%)	Числовой
19	DE	Стаж водителя (лет)	Числовой
20	WN	Период белых ночей	Бинарный (0/1)
21	SP	Учебный период	Бинарный (0/1)
22	HD	Предпраздничный день	Бинарный (0/1)

При краткосрочном прогнозе (неделя) использовались данные за последние 7 дней, учитываются текущие значения RE, A, D и индексы травмирования, производится корректировка на основе погодных условий и событий (например, ремонт дорог).

При среднесрочном прогнозе (месяц) выполнялся анализ сезонных тенденций (например, рост аварийности в дождь) и учитываются плановые изменения (например, введение или закрытие маршрутов).

При долгосрочном прогнозе (более квартала, год и более) использовались агрегированные данные за 3–5 лет, при этом прогноз строится на основе обобщенных трендов и введение макрофакторов (например, увеличение автопарка).

Валидация модели основывалась на метриках RMSE, MAE и R<sup>2</sup>. Тестирование выполнялось на накопленных данных за 3 года (2019-2022) с разделение 70% на обучение и 30% на тестирование.

Также в модель были введены сезонные коэффициенты (СК) для корректировки базовой модели прогнозирования с учетом временных изменений условий движения. Их выбор был основан на:

А) историческом анализе аварийности, включающем анализ данных за 3-5 лет по дням недели, месяцам, погодным условиям и выявление устойчивых сезонных паттернов (например, прирост ДТП зимой в %).

Б) факторном анализе, использующем выделение ключевых изменяющихся параметров, например:

Горизонт «Зима»: RE5, D3, A4 (Состояние дорог, ошибки водителей, скорость);

Горизонт «Лето»: RE1, RE8, D5 (Интенсивность, заторы, поведение на перекрестках);

Горизонт «Дождь»: RE5, RE8, D4 (Покрытие, заторы, нарушения скорости) и т.д.

В) экспертной оценке, для учета плановых мероприятий (ремонты, изменения маршрутов), подразумевающей корректировку по данным дорожных служб.

Таблица 6 - Средние значения сезонных коэффициентов для СПб и Москвы

№ п/п	Сезон/Условия	Санкт-Петербург	Москва	Основные влияющие факторы
1	Зима (декабрь-февраль)	1,35-1,60	1,20-1,45	Гололед (RE5), видимость (D3)
2	Весенняя распутица	1,25-1,40	1,15-1,30	Ямы (RE5), лужи (D4)
3	Лето (туристический сезон)	1,15-1,30	1,05-1,15	Интенсивность (RE1), пешеходы (D5)
4	Дождь	1,20-1,35	1,25-1,50	Аквапланирование (A4), заторы (RE8)
5	Снегопад	1,50-1,80	1,60-2,00	Сцепление (RE5), видимость (D3)
6	Ремонтные работы	1,30-1,50	1,40-1,70	Сужение полос (RE2), перестроения (D1)

Сезонный коэффициент (СК) определялся как отношение фактической аварийности в период к базовому нормативу, где базовый норматив (норма), рассчитывался как медианное значение количества ДТП на 1 км (плотность ДТП на 1 км маршрута) для типовых условий (сухая погода, будний день вне часа пик) и конкретного участка дороги за последние 2-3 года. Средние значения сезонных коэффициентов для СПб и Москвы показаны в таблице 6.

Пример обобщенного расчета нормативных значений плотности для различных типов автобусных маршрутов (ДТП/1 км/месяц) показан в таблице 7. На примере Санкт-Петербурга, по предыдущим периодам среднее значение нормы на год 26,5 для Невского пр. и 27,3 для Лиговского пр., в месяц соответственно: 2,2 и 2,3.

Таблица 7 - Результаты определения нормы плотности ДТП в горизонте на 1 месяц

№ п/п	Тип маршрута	Характеристики	Норма плотности, ДТП/1 км/месяц		Критерии расчета	Основные факторы риска
			Санкт- Петербург	Москва		
1	Магистральный	Выделенные полосы, минимум светофоров	2,1-2,8	2,4-3,2	Длина >20 км, Vср >35 км/ч	RE8 (0,55), D2 (0,40), A4 (0,35)
2	Радиальный	Связь центра с окраинами, >15 км	3,2-3,9	3,5-4,3	Проход через ≥3 района	RE1 (0,60), RE7 (0,45), D5 (0,38)
3	Кольцевой	Связь районов между собой	2,8-3,5	3,0-3,8	Связность узлов	RE6 (0,50), A5 (0,42), D1 (0,30)
4	Лучевой	Выезд за город, скоростные участки	1,8-2,4	2,0-2,7	Сочетание города/трасса	RE3 (0,58), A3 (0,47), D4 (0,33)
5	Локальный	Обслуживание внутри района, <10 км	1,2-1,7	1,5-2,0	<15 остановок	RE2 (0,52), RE4 (0,39), D3 (0,25)

### **Результаты**

Результаты применения разработанной модели АННВ при прогнозирования аварийности с разными горизонтами прогноза и для различных типов маршрутов показаны в таблицах 8 и 9.

По результатам, показанным в таблице 8, были сделаны следующие выводы:

- лучшие результаты были достигнуты на краткосрочных горизонтах ( $R^2$  порядка 0,91-0,92), при этом средняя ошибка увеличивается с ростом горизонта прогноза;

- наиболее значимыми факторами в оценке стали RE1 (интенсивность движения) и RE8 (плотность заторов), при этом факторы водителя (D1-D5) особенно важны в сложных условиях;

- производительность модели снижается при долгосрочных прогнозах, где имеет место наибольшая вычислительная нагрузка, соответственно время выполнения возрастает с увеличением горизонта прогноза;

- худшие результаты были получены в снегопады и на аварийных участках, в свою очередь лучшая точность - ночью и в выходные дни;

- наибольший разброс ошибок имеет место в экстремальных условиях.

По таблице 9 можно наблюдать сезонные эффекты, выражющиеся в максимальных коэффициентах для СПб зимой (гололед +1,40) и появление пиковых значений в Москве при снегопаде (+1,75).

Также наблюдалось снижение точности прогнозирования при экстремальных погодных условиях, при этом лучшие результаты достигаются на коротких горизонтах ( $R^2$  порядка 0,92-0,94).

В обобщенном виде, можно отметить наличие региональных (городских) особенностей, в частности для СПб наиболее значимы состояние покрытия (RE5) и работа светофоров (D3), для Москвы закономерно наблюдается доминирование влияния заторов (RE8) и интенсивности (RE1). Также имеются временные закономерности, например, в утренние часы пик - сочетание RE1 и D2 (нарушения дистанции).

Таблица 8 - Результаты работы модели АННВ для прогнозирования аварийности с разными горизонтами прогноза

№	Горизонт прогноза	MSE	RMSE	MAE	$R^2$	Значимый фактор	Второй по значимости фактор
1	Краткосрочный (7 дней)	1,24	1,11	0,89	0,92	RE1 (0,32)	A5 (0,21)
2	Краткосрочный (14 дней)	1,31	1,14	0,91	0,91	RE8 (0,29)	D4 (0,23)
3	Среднесрочный (30 дней)	1,47	1,21	0,97	0,89	RE3 (0,27)	A4 (0,19)
4	Среднесрочный (45 дней)	1,52	1,23	0,99	0,88	D5 (0,25)	RE7 (0,18)
5	Долгосрочный (90 дней)	1,89	1,37	1,12	0,82	RE1 (0,31)	RE8 (0,22)
6	Долгосрочный (120 дней)	1,95	1,40	1,15	0,81	A5 (0,28)	D2 (0,20)
7	Пиковые нагрузки	2,11	1,45	1,21	0,78	RE8 (0,33)	RE1 (0,25)
8	Ночное время	1,02	1,01	0,82	0,94	A3 (0,35)	D4 (0,27)
9	Утренний час пик	1,87	1,37	1,10	0,83	RE1 (0,38)	RE4 (0,24)
10	Вечерний час пик	1,92	1,39	1,13	0,82	RE8 (0,36)	D5 (0,26)
11	Выходные дни	1,45	1,20	0,95	0,90	A4 (0,30)	RE3 (0,22)
12	Праздничные дни	1,78	1,33	1,07	0,85	D1 (0,29)	RE6 (0,21)
13	Дождь	2,05	1,43	1,18	0,80	RE5 (0,34)	A5 (0,23)
14	Снег	2,34	1,53	1,27	0,76	RE5 (0,39)	D3 (0,25)
15	Туман	2,18	1,48	1,22	0,77	RE3 (0,36)	A4 (0,24)
16	Ремонт дорог	1,67	1,29	1,04	0,86	RE7 (0,31)	RE1 (0,20)
17	Новые маршруты	1,89	1,37	1,11	0,83	A2 (0,28)	RE2 (0,19)
18	Туристический сезон	1,76	1,33	1,06	0,85	RE1 (0,33)	D5 (0,22)
19	Школьные каникулы	1,55	1,25	1,00	0,87	RE6 (0,27)	A5 (0,20)
20	Аварийные участки	2,22	1,49	1,24	0,75	RE8 (0,40)	D4 (0,28)

Таблица 9 - Примеры результатов прогнозирования аварийности для городских пассажирских перевозок

№	Город/ Участок/маршрут	Временной период	Горизонт прогноза	R <sup>2</sup>	RMSE	MAE	Наиболее значимые факторы риска (вес)	СК	Прогноз плотности ДТП (ДТП/км/горизонт)
1	Санкт-Петербург, Невский проспект (центральный участок)	Будни 07:00-22:00	7 дней	0,94	0,89	0,71	1. RE1 (0,41) 2. RE8 (0,33) 3. D4 (0,28)	1,15 (туристический сезон)	1,2 ± 0.8
2	Санкт-Петербург, Васильевский остров (линии 1-10)	Зимний период	30 дней	0,86	1,24	1,05	1. RE5 (0,47) 2. D3 (0,35) 3. RE7 (0,22)	1,40 (гололед)	3,3 ± 1.1
3	Санкт-Петербург, Выборгское шоссе	Утренний час пик 07:30-10:00	14 дней	0,91	0,97	0,82	1. RE1 (0,38) 2. D2 (0,30) 3. A4 (0,25)	1,10	3,7 ± 0.9
4	Москва, Садовое кольцо (северный сектор)	Дождливая погода	7 дней	0,87	1,15	0,95	1. RE5 (0,55) 2. RE8 (0,42) 3. D5 (0,30)	1,35	5,1 ± 1.3
5	Москва, Выхино-Жулебино (районные маршруты)	Выходные дни	7 дней	0,93	0,85	0,68	1. RE6 (0,43) 2. A3 (0,32) 3. D1 (0,25)	0,95	3,2 ± 0.6
6	Москва, Проспект Мира (центральный участок)	Праздничные дни	14 дней	0,88	1,18	0,97	1. D5 (0,49) 2. RE8 (0,36) 3. RE1 (0,28)	1,45	5,5 ± 1.4
7	Санкт-Петербург, Лиговский проспект	Ночное время 22:00-06:00	7 дней	0,92	0,78	0,65	1. A3 (0,51) 2. D4 (0,39) 3. RE3 (0,21)	1,60 (летние ночи)	2,1 ± 0.8
8	Москва, Кутузовский проспект	Снегопад	3 дня	0,82	1,45	1,18	1. RE5 (0,62) 2. D3 (0,41) 3. RE8 (0,33)	1,75	6,2 ± 2.1

### *Обсуждение*

Ограничения применения и направления дальнейшего развития предложенной модели можно обобщить в следующий тезис: зависимость от качества входных данных и большая вычислительная сложность при большом числе правил являются ограничением применения модели, однако, данная модель может быть расширена за счет добавления данных передаваемых внутри промышленного интернета вещей и разработки решений по интеграции с системами управления трафиком в реальном времени.

Показанное решение по композиции модели АННВ, требует существенной адаптации под каждый город, но сохраняет представленную методическую основу, при этом наибольший эффект достигается при комплексном внедрении технических и организационных мер.

### *Выводы*

Предложенная модель прогнозирования аварийности на основе адаптивного нейронечеткого вывода позволяет эффективно прогнозировать аварийность на разных временных горизонтах, сочетая гибкость нечеткой логики и точность нейросетевых методов. Преимуществами использования предложенного решения являются адаптивность модели, а именно возможность ее настройки под изменяющиеся условия эксплуатации автобусов в городских пассажирских перевозках, интерпретируемость модели через нечеткие правила и ее масштабируемость, в части возможности увеличения количества входных параметров.

Развитие методов искусственного интеллекта открывает новые перспективы для создания высокоточных прогностических моделей. Однако их дальнейшее эффективное внед-

рение требует решения ряда методологических и организационных задач, включая стандартизацию данных и разработку нормативной базы.

## **СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ**

1. Евтуков С.С., Голубев Д.С. Прогнозирование аварийности на сети городских пассажирских перевозок с использованием нейронных сетей и машинного обучения // Грузовик. 2025. №2. С. 30-34. DOI 10.36652/1684-1298-2025-2-30-34. EDN HYWONC.
2. Евтуков С.С., Васильев Я.В., Голубев Д.С. Сравнительная оценка точности прогнозирования аварийности на сети городских пассажирских перевозок // Грузовик. 2025. №1. С. 23-26. DOI 10.36652/1684-1298-2025-1-23-26. EDN KVYWQZ.
3. Капский Д.В., Волынец А.С. Анализ применимости методов прогнозирования и оценки аварийности на конфликтных объектах транспортной сети и перспективы их развития // Транспорт и транспортные системы: конструирование, эксплуатация, технологии: Сборник научных статей. Минск: Белорусский национальный технический университет. 2023. С. 38-48. EDN ZEOUOF.
4. Новиков И.А. Методология прогнозирования и предупреждения дорожно-транспортных происшествий: Дис. ... д-ра техн. наук: 05.22.10, 2020. 305 с. EDN JMDRCC.
5. Куракина Е.В. Методология обеспечения безопасности дорожного движения по критерию "нулевой смертности" в дорожно-транспортных происшествиях: Дис. ... д-ра техн. наук: 29.50.00, 2022. 424 с. EDN SOEVJE.
6. Чубуков А.Б. Методология оценки состояния дорожно-транспортной аварийности в регионах Российской Федерации: Дис. ... д-ра техн. наук: 05.22.10. Орел, 2016. 22 с. EDN ZPYEKV.
7. Shaik Md, Islam Md, Hossain Quazi. A review on neural network techniques for the prediction of road traffic accident severity. 2021. №7. 100040. 10.1016/j.eastsj.2021.100040.
8. Богданович С.В., Капский Д.В. Анализ возможностей применения методов машинного обучения и анализа больших данных для выявления факторов риска в управлении безопасностью дорожной инфраструктуры // Современные технологии в транспортной отрасли: Сборник статей Международной научно-технической конференции. Новополоцк: Полоцкий государственный университет имени Евфросинии Полоцкой. 2024. С. 114-117. EDN UJTJNC.
9. Абалаев А.Ю., Грунская Л.В. Особенности нейронных сетей в задаче прогнозирования уровня аварийности на дорогах общего пользования // V Международная конференция по нейронным сетям и нейротехнологиям (NeuroNT'2024): Сборник докладов конференции. Санкт-Петербург: Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет ЛЭТИ им. В.И. Ульянова (Ленина). 2024. С. 119-122. EDN CAOLEM.
10. Yannis G., Dragomanovits A., Laiou A., Richter T., Ruhl S., La F., Torre L., Domenichini D., Graham N., Karathodorou H. Use of Accident Prediction Models in Road Safety Management – An International Inquiry // Transportation Research Procedia. Vol. 14. 2016. P. 4257-4266.
11. Sameen M.I., Pradhan B., Shafri H.Z.M., Hamid H.B. Applications of Deep Learning in Severity Prediction of Traffic Accidents // Lecture Notes in Civil Engineering. Vol. 9. Springer, Singapore.
12. Полежаев М.Н., Финогеев А.А. Предиктивный анализ показателей критических событий с помощью рекуррентной нейронной сети с трансформером // Современные научно-исследовательские технологии. 2024. №4. С. 63-68. DOI 10.17513/snt.39974. EDN QQCVMI.
13. Горев А.Э., Прохоров, А.В., Гизатуллин, Р.Р. Основы транспортного моделирования. Санкт-Петербург: ООО «Издательско-полиграфическая компания «КОСТА», 2015. 167 с.
14. Горев А.Э., Швецов В.Л. Руководство по применению транспортных моделей в транспортном планировании и оценке проектов. Санкт-Петербург: ООО «Издательско-полиграфическая компания «КОСТА», 2016. 127 с.
15. Евстигнеев И.А. Основы создания интеллектуальных транспортных систем в городских агломерациях России. Москва - Санкт-Петербург: Перо, 2021. 294 с.

**Евтуков Станислав Сергеевич**

Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет

Адрес: 190005, Россия, г. Санкт-Петербург, 2-я Красноармейская ул., д. 4

Д.т.н., зав. кафедрой ТСиДМС

E-mail: ese-89@yandex.ru

**Васильев Ярослав Владимирович**

Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет

Адрес: 190005, Россия, г. Санкт-Петербург, 2-я Красноармейская ул., д. 4

К.т.н., доцент кафедры НТТМ

E-mail: xen2k@rambler.ru

**Голубев Дмитрий Сергеевич**

Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет

Адрес: 190005, Россия, г. Санкт-Петербург, 2-я Красноармейская ул., д. 4.

Соискатель

E-mail: golubevds@inbox.ru

## **ACCIDENT PREDICTION MODEL ON THE BASIS OF ADAPTIVE NEURO-FUZZY INFERENCE**

**Abstract.** The paper presents a model of accident rate forecasting on the basis of adaptive neuro-fuzzy inference. The results of application of the developed model are shown and the ways of its further improvement are determined.

**Keywords:** accident rate, traffic accidents, forecasting, time series, modeling, adaptive neuro-fuzzy inference

### **BIBLIOGRAPHY**

1. Evtyukov S.S., Golubev D.S. Prognozirovanie avariynosti na seti gorodskikh passazhirskikh perevozok s ispol'zovaniem neyronnykh setey i mashinnogo obucheniya // Gruzovik. 2025. №2. S. 30-34. DOI 10.36652/1684-1298-2025-2-30-34. EDN HYWONC.
2. Evtyukov S.S., Vasil'ev Y.A.V., Golubev D.S. Sravnitel'naya otsenka tochnosti prognozirovaniya avariynosti na seti gorodskikh passazhirskikh perevozok // Gruzovik. 2025. №1. S. 23-26. DOI 10.36652/1684-1298-2025-1-23-26. EDN KVYWQZ.
3. Kapskiy D.V., Volynets A.S. Analiz primenimosti metodov prognozirovaniya i otsenki avariynosti na konfliktnykh ob'ektakh transportnoy seti i perspektivy ikh razvitiya // Transport i transportnye sistemy: konstruirovaniye, eksploatatsiya, tekhnologii: Sbornik nauchnykh statey. Minsk: Belorusskiy natsional'nyy tekhnicheskiy universitet. 2023. S. 38-48. EDN ZEOUOF.
4. Novikov I.A. Metodologiya prognozirovaniya i preduprezhdeniya dorozhno-transportnykh proisshestviy: Dis. ... d-ra tekhn. nauk: 05.22.10, 2020. 305 s. EDN JMDRCC.
5. Kurakina E.V. Metodologiya obespecheniya bezopasnosti dorozhnogo dvizheniya po kriteriyu "nulevoy smertnosti" v dorozhno-transportnykh proisshestviyakh: Dis. ... d-ra tekhn. nauk: 29.50.00, 2022. 424 s. EDN SOEVJE.
6. Chubukov A.B. Metodologiya otsenki sostoyaniya dorozhno-transportnoy avariynosti v regionakh Rossiyskoy Federatsii: Dis. ... d-ra tekhn. nauk: 05.22.10. Orel, 2016. 22 s. EDN ZPYEKV.
7. Shaik Md, Islam Md, Hossain Quazi. A review on neural network techniques for the prediction of road traffic accident severity. 2021. №7. 100040. 10.1016/j.eastsj.2021.100040.
8. Bogdanovich S.V., Kapskiy D.V. Analiz vozmozhnostey primeneniya metodov mashinnogo obucheniya i analiza bol'sikh dannykh dlya vyvayleniya faktorov risika v upravlenii bezopasnost'yu dorozhnoy infrastruktury // Sovremennye tekhnologii v transportnoy otrassli: Sbornik statey Mezhdunarodnoy nauchno-tehnicheskoy konferentsii. Novopolotsk: Polotskiy gosudarstvennyy universitet imeni Efrosinii Polotskoy. 2024. S. 114-117. EDN UJTJHC.
9. Abalyaev A.YU., Grunskaya L.V. Osobennosti neyronnykh setey v zadache prognozirovaniya urovnya avariynosti na dorogakh obshchego pol'zovaniya // V Mezhdunarodnaya konferentsiya po neyronnym setyam i neyrotekh-nologiyam (NeuroNT'2024): Sbornik dokladov konferentsii. Sankt-Peterburg: Sankt-Peterburgskiy gosudarstvennyy elektrotehnicheskiy universitet LETI im. V.I. Ul'yanova (Lenina). 2024. S. 119-122. EDN CAOLEM.
10. Yannis G., Dragomanovits A., Laiou A., Richter T., Ruhl S., La F., Torre L., Domenichini D., Graham N., Karathodorou H. Use of Accident Prediction Models in Road Safety Management - An International Inquiry // Transportation Research Procedia. Vol. 14. 2016. P. 4257-4266.
11. Sameen M.I., Pradhan B., Shafri H.Z.M., Hamid H.B. Applications of Deep Learning in Severity Prediction of Traffic Accidents // Lecture Notes in Civil Engineering. Vol. 9. Springer, Singapore.
12. Polezhaev M.N., Finogeev A.A. Prediktivnyy analiz pokazateley kriticheskikh sobytiy s pomoshch'yu rekurrentnoy neyronnoy seti s transformerom // Sovremennye naukoemkie tekhnologii. 2024. №4. S. 63-68. DOI 10.17513/snt.39974. EDN QQCVMI.
13. Gorev A.E., Prokhorov, A.V., Gizatullin, R.R. Osnovy transportnogo modelirovaniya. Sankt-Peterburg: OOO "Izdatel'sko-poligraficheskaya kompaniya "KOSTA", 2015. 167 c.
14. Gorev A.E., SHvetsov V.L. Rukovodstvo po primeneniyu transportnykh modeley v transportnom planirovaniyi i otsenke proektorov. Sankt-Peterburg: OOO "Izdatel'sko-poligraficheskaya kompaniya "KOSTA", 2016. 127 c.
15. Evstigneev I.A. Osnovy sozdaniya intellektual'nykh transportnykh sistem v gorodskikh aglomeratsiyakh Rossii. Moskva - Sankt-Peterburg: Pero, 2021. 294 c.

**Evtyukov Stanislav Sergeyevich**

St. Petersburg State University of Architecture and Civil Engineering  
Address: 190005, Russia, St. Petersburg, 2nd Krasnoarmeyskaya St., 4  
Doctor of Technical Sciences, E-mail: ese-89@yandex.ru

**Vasiliev Yaroslav Vladimirovich**

St. Petersburg State University of Architecture and Civil Engineering  
Address: 190005, Russia, St. Petersburg, 2nd Krasnoarmeyskaya St., 4  
Candidate of Technical Sciences, E-mail: xen2k@rambler.ru

**Golubev Dmitry Sergeyevich**

St. Petersburg State University of Architecture and Civil Engineering  
Address: 190005, Russia, St. Petersburg, 2nd Krasnoarmeyskaya St., 4  
Applicant, E-mail: golubevds@inbox.ru

## ЛОГИСТИЧЕСКИЕ ТРАНСПОРТНЫЕ СИСТЕМЫ

УДК 338.47

doi:10.33979/2073-7432-2025-2-2(89)-134-141

А.Н. ДОРОФЕЕВ

### ФОРМИРОВАНИЕ ЦИФРОВОГО ДВОЙНИКА АВТОТРАНСПОРТНОГО ПРЕДПРИЯТИЯ НА ОСНОВЕ ЕГО ДИНАМИЧЕСКОЙ БИЗНЕС-МОДЕЛИ

**Аннотация.** В статье рассмотрена концепция формирования цифрового двойника автотранспортного предприятия на основе системно-динамической модели с обратными связями. В данной концепции с помощью петель обратной связи на основе модели Ф. Басса реализована зависимость спроса на услуги АТП от удовлетворенности потребителей. Реализация данной концепцией цифрового двойника АТП непосредственна связана развитием цифровых транспортных платформ в России. С помощью представленной модели цифрового двойника АТП становится возможным сценарный анализ его развития с учетом внешних и внутренних факторов.

**Ключевые слова:** цифровой двойник, автопредприятие, системная динамика, бизнес-модель, цифровая транспортная платформа

С 1 августа 2024 года в Российской Федерации согласно Постановлению Правительства РФ от 3 июля 2024 г. № 908 начался эксперимент по созданию, апробации и внедрению информационной системы "Национальная цифровая транспортно-логистическая платформа" ("ГосЛог") по оформлению перевозок грузов, который продлится до 1 июня 2025 года [1]. Целью проведения этого эксперимента и последующего внедрения "Национальная цифровая транспортно-логистическая платформа" (НЦТЛП) является формирование единого цифрового пространства в масштабах всей транспортной отрасли России наподобие аналогичных платформ в Китае (Logink) и Индии (ULIP) [2]. Архитектура НЦТЛП предполагает реализацию сервисов, позволяющих осуществлять мониторинг грузов, централизованное оформление всех необходимых документов для перевозки грузов в режиме «единого окна», формирование аналитической и статистической отчетности и др. Важным аспектом данной архитектуры национальной цифровой платформы является реализация цифрового профиля перевозчика, в том числе отражающего его рейтинг «базирующегося на данных о временных и качественных характеристиках выполненной перевозки грузов» [3]. Это перекликается с законодательной инициативой Государственной Думы РФ о создании единого реестра ответственных перевозчиков, которая уже в первом чтении уже рассмотрела соответствующий законопроект.

Вместе с тем, согласно прогнозам Министерства Транспорта РФ [4], переход на электронный документооборот в рамках НЦТЛП позволит существенно сократить время взаимодействия различных заинтересованных лиц как со стороны бизнеса, так и со стороны государственных структур при оформлении перевозочных документов, а также управленческие расходы на бумагу на 170 млрд. рублей и в целом транспортно-логистические издержки на 16,5%. Кроме того, сервисы «ГосЛог» позволяют осуществлять аналитическую оценку вариантов перевозки груза, т.е. проводить анализ экономической целесообразности ее осуществления. Очевидные преимущества при внедрении НЦТЛП получают различные государственные органы и службы, которые ратуют за повышение прозрачности транспортного бизнеса в России, в том числе улучшения контроля за доходами перевозчиков. Это, как предполагается, позволит в более полной мере осуществлять фискальную политику в транспортной отрасли. При этом одним обсуждаемых вариантов развития «ГосЛог» является реализация единой

тарифной политики на перевозки по Российской Федерации [5]. Вместе с тем как, показывает мировая практика эксплуатации подобных цифровых платформ, контролируемых государственными службами, прежде китайской Logink, данные решения являются эффективным инструментом проведения активной политики государственного регулирования рынка транспортных услуг [6].

Ожидаемо, что инициатива по созданию и развитию НЦТЛП вызвала настороженность со стороны коммерческих автоперевозчиков, которые в большинстве своем уже достаточно давно используют российскую негосударственную цифровую транспортную платформу ATI.SU. Эта платформа является ведущей российской транспортной биржей, в значительной степени отражающей состояние отечественного рынка грузовых автомобильных перевозок, в том числе спрос на перевозки, предложения свободных грузовых автомобилей, стоимость транспортировки по различным маршрутам. Успех данной платформы у транспортных предприятий малого и среднего бизнеса обуславливается возможностями масштабирования своей деятельности за счет привлечения клиентов из разных городов и регионов благодаря сервисам платформы. В тоже время, другим важным аспектом востребованности данной цифровой платформы как у перевозчиков, так и у заказчиков транспортных услуг является возможность проверки репутации контрагентов, выявления его надёжности. На платформе ATI.SU данная опция реализована с помощью различных методов, в том числе и с помощью анализа отзывов клиентов о выполненных перевозках [7]. Эти отзывы создают цифровой портрет компании-перевозчика, выступая своего рода виртуальным отражением ее репутации на платформе. Этот цифровой образ можно рассматривать гораздо шире, принимая во внимание не только репутацию компанию за счет отзывов, но также ее бизнес-активности на платформе по поиску грузов, заключению договоров на перевозки и другие виды деятельности, которые представляют своего цифровые следы. Исследуя данные цифровые следы с помощью методов интеллектуального анализа процессов (Process Mining) и методов анализа отзывов о деятельности компании (Text Mining) можно сформировать цифровую модель, описывающую коммерческую деятельность автотранспортного предприятия. Данная цифровая модель АТП может быть представлена как его цифровой двойник [8], в котором с помощью соответствующего математического аппарата можно воспроизвести различные сценарии деятельности конкретного автотранспортного предприятия.

Для формирования данной модели цифрового двойника необходимо выбрать соответствующий математический аппарат, а также теоретический базис, на основе которого и будет осуществляться компоновка модели. В настоящее время в качестве теоретической основы моделирования деятельности коммерческих предприятий наиболее предпочтаемой является канва бизнес-модели (Business Model Canvas) А.Остервальдера [9]. Эту бизнес-модель он представил в своей докторской диссертации, разработав ее на основе сбалансированной системы показателей (Balanced Scorecard) Р.НORTона и Д. Каплана. В научном и деловом сообществах данная модель фактически стала бизнес-стандартом, в котором описывается взаимодействие 9 элементов, характеризующих деятельность коммерческого предприятия:

- потребительские сегменты;
- ценностное предложение;
- каналы сбыта;
- взаимоотношения с клиентами;
- потоки поступления доходов;
- структура издержек;
- ключевые партнеры;
- ключевые ресурсы.

Однако, данная бизнес-модель по сути является статической, не отражая динамику изменения показателей деятельности АТП с течением времени. Для ее использования в качестве основ формирования цифрового двойника АТП необходимо оснастить данную бизнес-модель математическим аппаратом, позволяющим при расчетах не только учитывать зависи-

мость показателей от времени, но и влияние их друг на друга. Анализ литературных источников показал, что в настоящее время основными методами для построения данных моделей является дискретно-событийное моделирование, агентное моделирование, системная динамика, нейронные сети. Существуют также способы их комбинирования в различных вариантах.



Рисунок 1 - Бизнес-модель АТП на основе канвы А. Остервальдера с причинно-следственными связями

Несмотря на то, для проведения анализа в транспортных системах в отечественных исследованиях предпочтение отдается дискретно-событийному моделированию, была выбрана системная динамика ввиду следующих преимуществ:

- модели системной динамики позволяют исследовать сложные причинно-следственные связи и обратные связи в системах, что помогает выявить скрытые зависимости и последствия принимаемых решений;
- даже при ограниченном количестве входных данных модели системной динамики могут создавать прогнозируемые сценарии, используя качественную информацию;
- модели системной динамики особенно эффективны для оценки долгосрочных результатов действий и стратегического планирования, в то время как дискретно-событийные модели больше ориентированы на краткосрочный анализ текущих событий.

Агентное моделирование и нейронные сети являются перспективными методами, позволяющими учитывать нюансы поведения сложных систем. Однако, для использования этих методов требуются большие массивы данных, отражающие различные аспекты поведения элементов системы за предыдущие отрезки времени.

Использование системной динамики происходит в два этапа. На первом этапе формируется причинно-следственная диаграмма, которая дает визуально представление о характере взаимодействия показателей деятельности АТП. На рисунке 1 представлена причинно-следственная диаграмма, отражающая взаимное влияние элементов бизнес-модели АТП друг на друга. На втором этапе на основании причинно-следственной диаграммы формируется так называемая потоковая диаграмма, в которой зависимости элементов системы друг от друга характеризуются дифференциальными или интегральными уравнениями. Данные уравнения позволяют оценивать изменения показателей деятельности АТП с течением времени. На рисунке 2 представлена бизнес-модель АТП, реализованная с помощью потоковой диаграммы системной динамики (рис. 2).

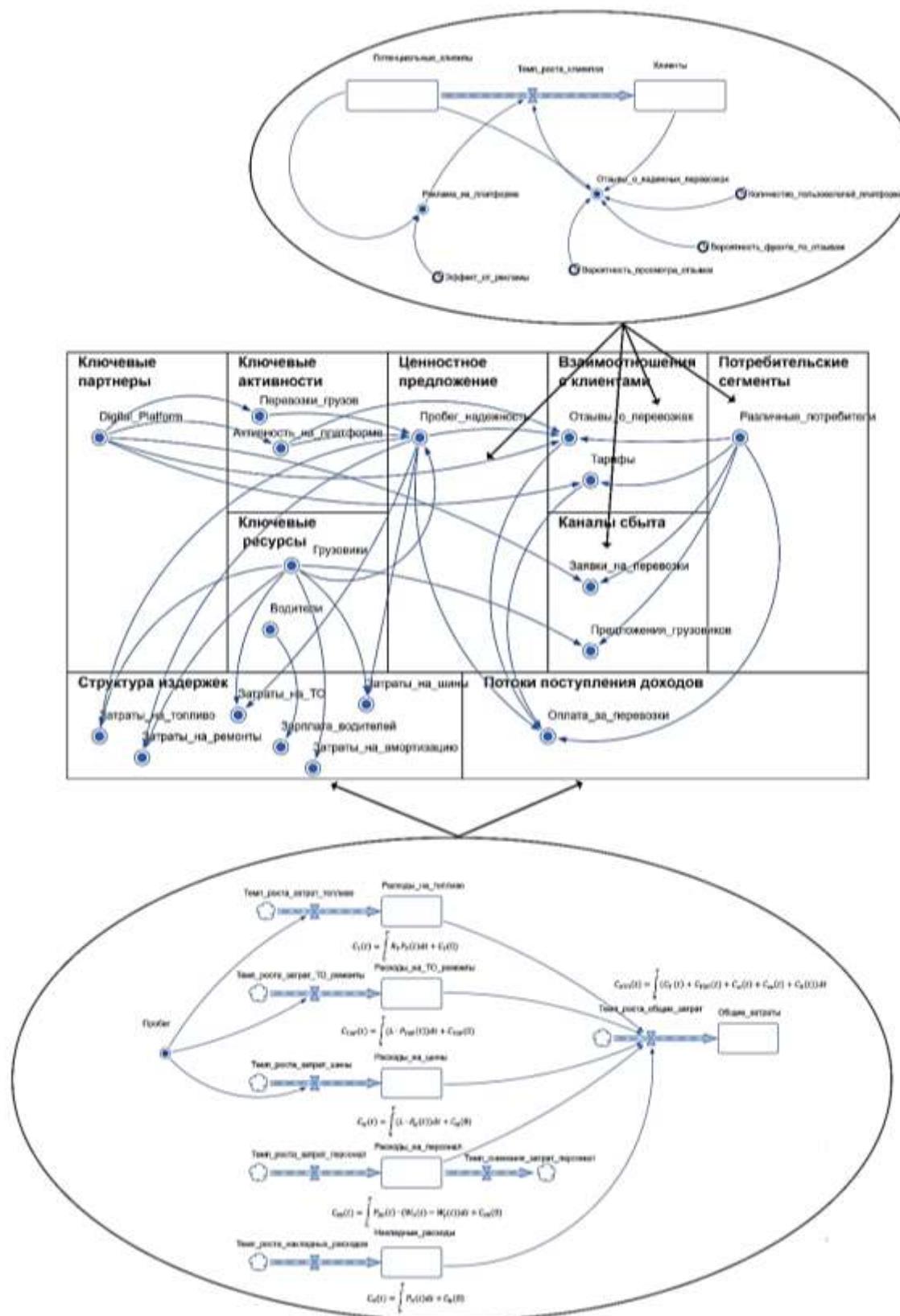


Рисунок 2 - Бизнес-модель АТП, представленная с модели системной динамики.

В частности, в этой бизнес-модели характер взаимодействия элементов «Взаимоотношения с потребителями», «Потребительские сегменты», «Каналы сбыта», «Ценностное предложение» реализован с помощью математической модели диффузии Ф.Басса (1)

$$\frac{dD(t)}{dt} = p \cdot (m - D(t)) + \frac{q}{m} \cdot D(t) \cdot (m - D(t)), \quad (1)$$

где  $p$  – коэффициент влияния внешних факторов на ситуацию на рынке перевозок на цифровой транспортной платформе;

$m$  – потенциальное количество потребителей цифровой транспортной платформы, которые еще не воспользовались услугами данной фирмы по транспортировке;

$q$  – коэффициент, отражающий конверсию, т.е. процент новых потребителей, которые изучив отзывы предыдущих посетителей на цифровой транспортной платформе решат воспользоваться услугами компании;

Модель Ф.Басса [10] отражает поведение пользователей цифровой транспортной платформы, которые выбирают перевозчика, ориентируясь на отзывы о ранее выполненных перевозках. Таким образом исходными данными для моделирования являются отзывы, размещенные на цифровой транспортной платформе, общее количество посетителей цифровой транспортной платформы, а также коэффициенты, отражающие вероятность просмотра отзывов и вероятность выбора транспортной компании (рис. 3).



Рисунок 3 - Потоковая диаграмма системной динамики на основе модели Ф. Басса

На предварительном этапе исследования для последующего моделирования была выбрана транспортная компания ООО «Вилтранс» (Смоленск). Данные о ее экономической деятельности приведены на Рис. 4. На цифровой транспортной платформе ATI.SU была также собрана статистика отзывов о деятельности данного АТП, которая приведена на рисунке 5.

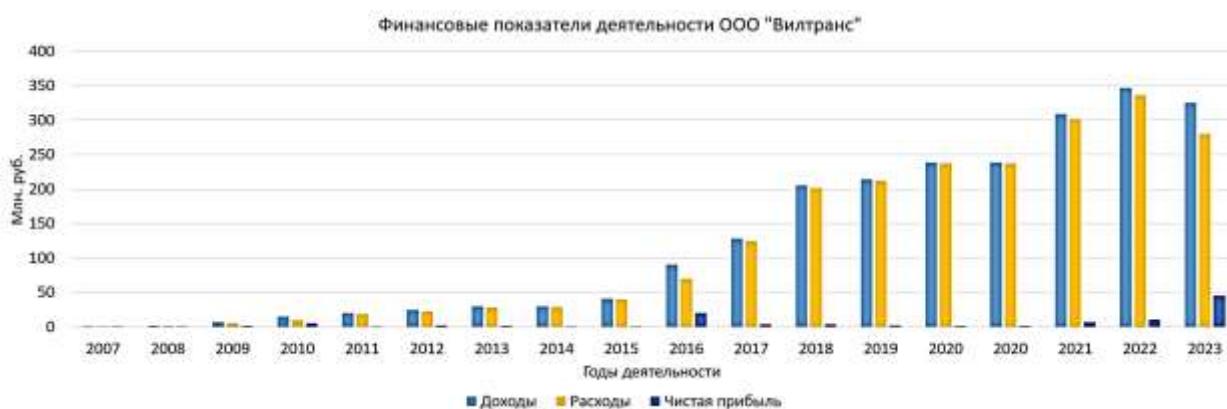
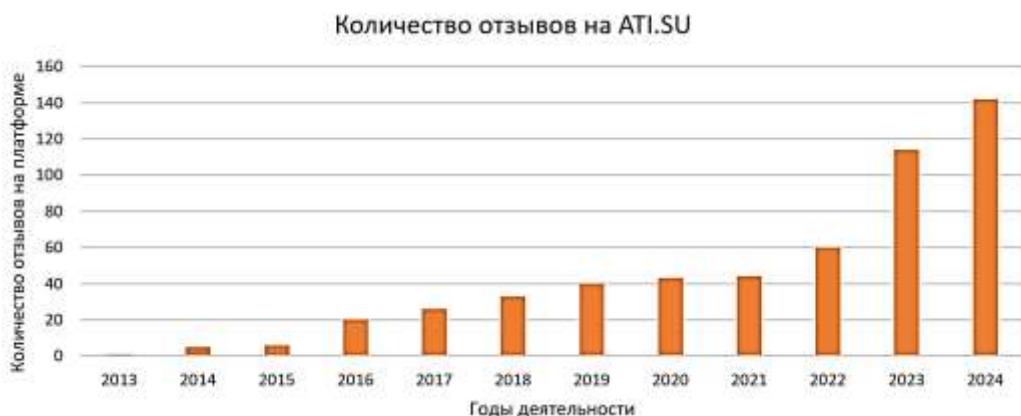
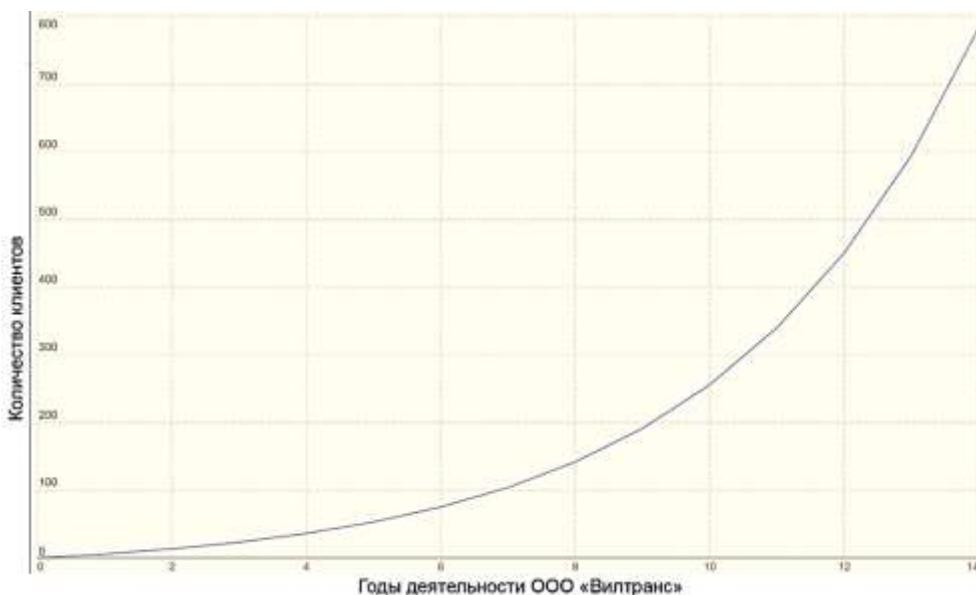


Рисунок 4 - Динамика результатов экономической деятельности ООО «Вилтранс»



*Рисунок 5 - Статистика накопленных отзывов о деятельности ООО «Вилтранс» на платформе ATI.SU*



*Рисунок 6 - Прогноз динамики увеличения спроса на транспортные услуги ООО «Вилтранс»*

Формирование рассмотренных моделей системной динамики осуществлялось в среде AnyLogic. При осуществлении симуляции в этой среде для модели Ф.Басса были использованы следующие значения  $p=0,00000004$ ,  $q=0,29749485$ ,  $M=126574536$ , полученные на основании оценки динамики отзывов об ООО «Вилтранс» на платформе ATI.SU. С использованием данных параметров в среде AnyLogic была проведена симуляция, которая показала следующий рост клиентов для ООО «Вилтранс» на протяжении 14 лет (рис. 6).

Таким образом, предложенная модель позволяет осуществлять прогнозирование спроса на услуги транспортной компании, рост или спад которого в свою очередь зависит о деятельности самой компании в контексте удовлетворённости клиентов компании. Реализация данной модели стала возможной благодаря активному развитию цифровых транспортных платформ в Российской Федерации, в которых на основе отзывов клиентов формируется ее виртуальный образ. В этой связи повышение качества транспортных услуг повышает ее рейтинг в глазах клиента и повышает привлекательность ее виртуального образа, тем самым стимулируя спрос на ее услуги. И наоборот, снижение качества услуг по перевозке грузов будет вызывать негативные отзывы клиентов на цифровой транспортной платформе, тем самым снижая рейтинг АТП и спрос на его услуги. В контексте развития национальной логистической платформы «ГосЛог» разработанная концепция модели цифрового двойника АТП представит возможность для руководителей проводить сценарный анализ деятельности своих компаний в зависимости от влияния различных факторов на транспортном рынке.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Бусленко Н.П. Белозерцева Н. П., Блюдик А. Р., Несповитый А. В. Перспективы применения цифровых логистических платформ в мультимодальных перевозках // Финансовые рынки и банки. №12. 2024. Р. 540-547. doi:10.24412/2658-3917-2024-12-540-547.
2. Дроздова М.А. Опыт создания китайской цифровой платформы Logink как пример успешной практики формирования единого цифрового логистического пространства для трансграничного сотрудничества // Азиатско-тихоокеанский регион: экономика, политика, право. Т.25. №2. 2023. С. 27-38. DOI: 10.24866/1813-3274/2023-2/27-38.
3. Арестова Ю.А., Артамонова М.Ю. Исследование вопросов внедрения НЦТЛП и проблемных аспектов интеграции в её информационные сервисы // Вестник академии знаний. №6(65). 2024. С. 47-54. EDN: VAYBOA.
4. Глаголев С.Н., Новиков И.А., Линник Ю.Н., Акулов А.А. Государственная поддержка работы грузовой транспортно-логистической системы // Вестник Ростовского государственного университета путей сообщения. №2(94). 2024. С. 119-131. DOI: 10.46973/0201-727X\_2024\_2\_119.
5. Бубнова Г.В., Борейко А.Е. Концептуальные и организационно-технологические решения по формированию цифровых платформ управления перевозками по международным транспортным коридорам // Мир транспорта. №20(4). 2022. С. 86-97.
6. Барыкин С.Е., Егерева Ю.Б., Корчагина Е.В., Калинина О.В., Федорова Е.С. Крупнейшие международные цифровые логистические платформы: сравнительный анализ // Омский научный вестник. Серия «Общество. История. Современность». №1. 2022. С. 97-103. DOI: 10.25206/2542-0488-2022-7-1-97-103.
7. Дорофеев А.Н., Курганов В.М., Король А.А., Лим Д.Ю., Захаров З.З. Оценка надежности автомобильного перевозчика в цифровой транспортной платформе // Мир транспорта и технологических машин. №2-2(85). 2024. С.115-122. DOI: 10.33979/2073-7432-2024-2-2(85)-115-122
8. Dorochev A., Kurganov V., Filippova N., Petrov A., Zakharov D., Iarkov S. Improving Transportation Management Systems (TMSs) Based on the Concept of Digital Twins of an Organization // Applied Sciences. №14(4). 2024.
9. Дорофеев А.Н. Информационные технологии для управления автомобильным транспортом. Москва: ООО "Издательство Прометей", 2020. 164 с. EDN ERSOQN.
10. Каталевский Д. Ю., Гареев Т. Р. Имитационное моделирование для прогнозирования развития автомобильного электротранспорта на уровне региона // Балтийский регион. 2020. Т. 12. №2. С. 118-139. doi: 10.5922/2079-8555-2020-2-8.
11. Беляев Э.И., Макарова И.В., Хабибуллин Р.Г. Применение современных методов оптимизации транспортной системы / под ред. Я. А. Полонского // Инновации в науке: Материалы науч.-практ. конф. Новосибирск: Сибирская ассоциация консультантов, 2012. 110 с.
12. Дегтяренко В.Н. Автомобильные дороги и автомобильный транспорт. Ростов н/Д: Рост. гос. акад. стр-ва, 2011. 185 с.
13. Евстегнеев И.А. Основы создания интеллектуальных транспортных систем в городских агломерациях России. М.: Пере, 2021. 294 с.
14. Грязнов М.В., Гинятизов М.З. Обоснование затрат на производственно-техническую базу при эксплуатации газодизельного парка // Актуальные проблемы современной науки, техники и образования: Тез. докл. 78-й междунар. науч.-техн. конференции. Магнитогорск: МГТУ им. Г.И. Носова, 2020. С. 25-26.
15. Якунин Н.Н. Грязнов М.В., Андриянов Н.С. Преимущества и недостатки использования газомоторных автомобилей на промышленном предприятии // Прогрессивные технологии в транспортных системах: Материалы XVII междунар. науч.-практ. конф. Оренбург: ОГУ. 2022. С. 625-629.

**Дорофеев Алексей Николаевич**

Финансовый университет при Правительстве Российской Федерации

Адрес: 125167, Москва, пр-кт Ленинградский, д. 49/2

К-т техн. наук, доцент кафедры «Финансовые технологии»

E-mail: andorofeev@fa.ru

---

A.N. DOROFEEV

## FORMATION OF A DIGITAL TWIN OF A MOTOR TRANSPORT ENTERPRISE BASED ON ITS DYNAMIC BUSINESS MODEL

*Abstract. The article considers the concept of forming a digital twin of a motor transport enter-*

prise based on a system-dynamic model with feedback. In this concept, using feedback loops based on the F. Bass model, the dependence of demand for motor transport enterprise services on customer satisfaction is realized. The implementation of this concept of a digital twin of a motor transport enterprise service is directly related to the development of digital transport platforms in Russia. With the help of the presented model of a digital twin of a motor transport enterprise service, it becomes possible to perform a scenario analysis of its development taking into account external and internal factors.

**Keywords:** digital twin, road transport enterprise, system dynamics, business model, digital transport platform

## BIBLIOGRAPHY

1. Buslenko N.P. Belozertseva N. P., Blyudik A. R., Nespoivityy A. V. Perspektivy primeneniya tsifrovych logisticheskikh platform v mul'timodal'nykh perevozkakh // Finansovye rynki i banki. №12. 2024. R. 540-547. doi:10.24412/2658-3917-2024-12-540-547.
2. Drozdova M.A. Opyt sozdaniya kitayskoy tsifrovoy platformy Logink kak primer uspeshnoy praktiki formirovaniya edinogo tsifrovogo logisticheskogo prostranstva dlya transgranichnogo sotrudничestva // Aziatskotikhookeanskiy region: ekonomika, politika, pravo. T.25. №2. 2023. S. 27-38. DOI: 10.24866/1813-3274/2023-2/27-38.
3. Arrestova YU.A., Artamonova M.YU. Issledovanie voprosov vnedreniya NTSTLP i problemnykh aspektorov integratsii v eio informatsionnye servisy // Vestnik akademii znaniy. №6(65). 2024. S. 47-54. EDN: VAYBOA.
4. Glagolev S.N., Novikov I.A., Linnik YU.N., Akulov A.A. Gosudarstvennaya podderzhka raboty gruzovoy transportno-logisticheskoy sistemy // Vestnik Rostovskogo gosudarstvennogo universiteta putey soobshcheniya. №2(94). 2024. S. 119-131. DOI: 10.46973/0201-727X\_2024\_2\_119.
5. Bubnova G.V., Boreyko A.E. Kontseptual'nye i organizatsionno-tehnologicheskie resheniya po formirovaniyu tsifrovych platform upravleniya perevozkami po mezhdunarodnym transportnym koridoram // Mir transporta. №20(4). 2022. C. 86-97.
6. Barykin S.E., Egereva YU.B., Korchagina E.V., Kalinina O.V., Fedorova E.S. Krupneye mezhdunarodnye tsifrovye logisticheskie platformy: sravnitel'nyy analiz // Omskiy nauchnyy vestnik. Seriya "Obshchestvo. Istoriya. Sovremennost". №1. 2022. S. 97-103. DOI: 10.25206/2542-0488-2022-7-1-97-103.
7. Dorofeev A.N., Kurganov V.M., Korol' A.A., Lim D.YU., Zakharov Z.Z. Otsenka nadezhnosti avtomobil'nogo perevozchika v tsifrovoy transportnoy platforme // Mir transporta i tekhnologicheskikh mashin. №2-2(85). 2024. S.115-122. DOI: 10.33979/2073-7432-2024-2-2(85)-115-122
8. Dorofeev A., Kurganov V., Filippova N., Petrov A., Zakharov D., Iarkov S. Improving Transportation Management Systems (TMSs) Based on the Concept of Digital Twins of an Organization // Applied Sciences. №14(4). 2024.
9. Dorofeev A.N. Informatsionnye tekhnologii dlya upravleniya avtomobil'nym transportom. Moskva: OOO "Izdatel'stvo Prometey", 2020. 164 s. EDN ERSOQN.
10. Katalevskiy D. YU., Gareev T. R. Imitatsionnoe modelirovanie dlya prognozirovaniya razvitiya avtomobil'nogo elektrotransporta na urovne regiona // Baltiyskiy region. 2020. T. 12. №2. C. 118-139. doi: 10.5922/2079-8555-2020-2-8.
11. Belyaev E.I., Makarova I.V., Habibullin R.G. Primenenie sovremennykh metodov optimizatsii transportnoy sistemy / pod red. YA. A. Polonskogo // Innovatsii v nauke: Materialy nauch.-prakt. konf. Novosibirsk: Sibirskaya assotsiatsiya konsul'tantov, 2012. 110 s.
12. Degtyarenko V.N. Avtomobil'nye dorogi i avtomobil'nyy transport. Rostov n/D: Rost. gos. akad. str-va, 2011. 185 s.
13. Evstegneev I.A. Osnovy sozdaniya intellektual'nykh transportnykh sistem v gorodskikh aglomeratsiyakh Rossii. M.: Pero, 2021. 294 s.
14. Gryaznov M.V., Giniyatov M.Z. Obosnovanie zatrata na proizvodstvenno-tehnicheskuyu bazu pri ekspluatatsii gazodizel'nogo parka // Aktual'nye problemy sovremennoy nauki, tekhniki i obrazovaniya: Tez. dokl. 78-y mezhdunar. nauch.-tekhn. konferentsii. Magnitogorsk: MGTU im. G.I. Nosova, 2020. S. 25-26.
15. YAkunin N.N. Gryaznov M.V., Andriyanov N.S. Preimushchestva i nedostatki ispol'zovaniya gazomotornykh avtomobiley na promyshlennom predpriyatiy // Progressivnye tekhnologii v transportnykh sistemakh: Materialy XVII mezhdunar. nauch.-prakt. konf. Orenburg: OGU. 2022. S. 625-629.

**Dorofeev Alexey Nikolaevich**

Financial University under the Government of the Russian Federation

Address: 125167, Moscow, Leningradsky Ave., 49/2

Candidate of technical sciences

E-mail: andorofeev@fa.ru

**Уважаемые авторы!  
Просим Вас ознакомиться с требованиями  
к оформлению научных статей.**

**ОБЩИЕ ТРЕБОВАНИЯ**

- Представляемый материал должен быть оригинальным (оригинальность не менее 70 %), не опубликованным ранее в других печатных изданиях;
- объем материала, предлагаемого к публикации, измеряется страницами текста на листах формата А4 и содержит от 4 до 9 страниц;
- статья предоставляется в электронном виде (по электронной почте или на любом электронном носителе);
- в одном номере может быть опубликована только одна статья одного автора, включая соавторство;
- если статья возвращается автору на доработку, исправленный вариант следует присыпать в редакцию повторно, приложив письмо с ответами на замечания. Доработанный вариант статьи рецензируется и рассматривается редакционной коллегией вновь. Датой представления материала считается дата поступления в редакцию окончательного варианта исправленной статьи;
- аннотации всех публикуемых материалов, ключевые слова, информация об авторах, списки литературы будут находиться в свободном доступе на сайте соответствующего журнала и на сайте Российской научной электронной библиотеки - РУНЭБ (Российский индекс научного цитирования).

**ТРЕБОВАНИЯ К СОДЕРЖАНИЮ НАУЧНОЙ СТАТЬИ**

Научная статья, предоставляемая в журнал, должна иметь следующие **обязательные элементы**:

**Введение**

Укажите цели работы и предоставьте достаточный накопленный опыт, избегая подробного обзора литературы или обобщенных результатов.

**Материал и методы**

Предоставьте достаточно подробных сведений, чтобы можно было воспроизвести работу независимым исследователем. Методы, которые уже опубликованы, должны быть обобщены и указаны ссылкой. Если вы цитируете непосредственно из ранее опубликованного метода, используйте кавычки и также ссылайтесь на источник. Любые изменения существующих методов также должны быть описаны.

**Теория / расчет**

Раздел «Теория» должен продлить, а не повторять предысторию статьи, уже рассмотренную во введении, и заложить основу для дальнейшей работы. Напротив, раздел «Расчет» представляет собой практическое развитие с теоретической основы.

**Результаты**

Результаты должны быть четкими и краткими.

**Обсуждение**

Здесь необходимо рассмотреть значимость результатов работы, а не повторять их. Часто целесообразен комбинированный раздел «Результаты и обсуждение». Избегайте подробных цитат и обсуждений опубликованной литературы.

**Выходы**

Основные выводы исследования могут быть представлены в кратком разделе «Выходы», который может стоять отдельно или составлять подраздел раздела «Обсуждение» или «Результаты и обсуждение».

В тексте статьи **не рекомендуется**:

- применять обороты разговорной речи, техницизмы, профессионализмы;
- применять для одного и того же понятия различные научно-технические термины, близкие по смыслу (синонимы), а также иностранные слова и термины при наличии равнозначных слов и терминов в русском языке;
- применять произвольные словообразования;
- применять сокращения слов, кроме установленных правилами русской орфографии, соответствующими стандартами;

Сокращения и аббревиатуры должны расшифровываться по месту первого упоминания (вхождения) в тексте статьи.

**ТРЕБОВАНИЯ К ОФОРМЛЕНИЮ НАУЧНОЙ СТАТЬИ**

Статья должна быть набрана шрифтом Times New Roman, размер 12 pt с одинарным интервалом, текст выравнивается по ширине; абзацный отступ - 1,25 см, правое поле - 2 см, левое поле - 2 см, поля внизу и вверху - 2 см.

**Обязательные элементы:**

**заглавие** (на русском и английском языке) публикуемого материала - должно быть точным и ёмким; слова, входящие в заглавие, должны быть ясными сами по себе, а не только в контексте; следует избегать сложных синтаксических конструкций, новых словообразований и терминов, а также слов узкопрофессионального и местного значения;

**аннотация** (на русском и английском языке) - описывает цели и задачи проведенного исследования, а также возможности его практического применения, указывает, что нового несет в себе материал; рекомендуемый средний объем - 500 печатных знаков;

**ключевые слова** (на русском и английском языке) - это текстовые метки, по которым можно найти статью при поиске и определить предметную область текста; обычно их выбирают из текста публикуемого материала, достаточно 5-10 ключевых слов;

**список литературы** должен содержать 15-20 источников. В списке литературы количество источников, принадлежащих любому автору не должно превышать 30% от общего количества.

**ПОСТРОЕНИЕ СТАТЬИ**

- Индекс универсальной десятичной классификации (УДК) - сверху слева с абзацным отступом.
- С пропуском одной строки - выровненные по центру страницы, без абзацного отступа и набранные прописными буквами светлым шрифтом 12 pt инициалы и фамилии авторов (И.И. ИВАНОВ).

- С пропуском одной строки - название статьи, набранное без абзацного отступа прописными буквами полужирным шрифтом 14 pt и расположено по центру страницы.
- С пропуском одной строки - краткая (не более 10 строк) аннотация, набранная с абзацного отступа курсивным шрифтом 10 pt на русском языке. С абзацного отступа - ключевые слова на русском языке.
- Текст статьи, набранный обычным шрифтом прямого начертания 12 pt, с абзацной строкой, расположенный по ширине страницы.
- Список литературы, набранный обычным шрифтом прямого начертания 10 pt, помещается в конце статьи. Заголовок «**СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ**» набирается полужирным шрифтом 12 pt прописными буквами с выравниванием по центру.
- После списка литературы, с абзацного отступа, приводятся набранные обычным шрифтом 10 pt сведения об авторах (на русском языке) в такой последовательности:
  - Фамилия, имя, отчество (полужирный шрифт)
  - Учреждение или организация
  - Адрес
  - Ученая степень, ученое звание, должность
  - Электронная почта (обычный шрифт), не может повторяться у двух и более авторов
- С пропуском одной строки - выровненные по центру страницы, без абзацного отступа и набранные прописными буквами светлым шрифтом 12 pt инициалы и фамилии авторов (на английском языке).
- С пропуском одной строки - название статьи, набранное без абзацного отступа прописными буквами полужирным шрифтом 14 pt и расположено по центру страницы (на английском языке).
- Краткая (не более 10 строк) аннотация, набранная с абзацного отступа курсивным шрифтом 10 pt, с абзацного отступа - ключевые слова (на английском языке).
- С абзацного отступа, приводятся набранные обычным шрифтом 10 pt сведения об авторах (на английском языке).

## **ТАБЛИЦЫ, РИСУНКИ, ФОРМУЛЫ**

Все таблицы, рисунки и основные формулы, приведенные в тексте статьи, должны быть пронумерованы.

**Формулы** следует набирать в редакторе формул Microsoft Equation 3.0 с размерами: обычный шрифт - 12 pt, крупный индекс - 10 pt, мелкий индекс - 8 pt.

Формулы, внедренные как изображение, не допускаются!

Русские и греческие буквы, а также обозначения тригонометрических функций, набираются прямым шрифтом, латинские буквы - курсивом.

Формулы располагают по центру страницы и нумеруют (только те, на которые приводят ссылки); порядковый номер формулы обозначается арабскими цифрами в круглых скобках около правого поля страницы.

В формулах в качестве символов следует применять обозначения, установленные соответствующими стандартами. Описание начинается со слова «где» без двоеточия, без абзацного отступа; пояснение каждого символа дается с новой строки в той последовательности, в которой символы приведены в формуле. Единицы измерения даются в соответствии с Международной системой единиц СИ.

Переносить формулы на следующую строку допускается только на знаках выполняемых операций, причем знак в начале следующей строки повторяют.

### **Пример оформления формулы в тексте**

$$q_1 = (\alpha - 1)^2 \left(1 + \frac{1}{2\alpha}\right) / d, \quad (1)$$

где  $\alpha = 1+2\alpha/b$  - коэффициент концентрации напряжений;

$d = 2a$  - размер эллиптического отверстия вдоль опасного сечения.

**Рисунки** и другие иллюстрации (чертежи, графики, схемы, диаграммы, фотоснимки) следует располагать непосредственно после текста, в котором они упоминаются впервые. Рисунки, число которых должно быть логически оправданным, представляются в виде отдельных файлов в формате \*.eps (Encapsulated PostScript) или TIF размером не менее 300 dpi.

Если рисунок небольшого размера, желательно его обтекание текстом.

Подписи к рисункам (полужирный шрифт курсивного начертания 10 pt) выравнивают по центру страницы, в конце подписи точка не ставится, например:

### **Рисунок 1 - Текст подписи**

Пояснительные данные набираются светлым шрифтом курсивного начертания 10 pt и ставят после наименования рисунка.

**Таблицы** должны сопровождаться ссылками в тексте.

Заголовки граф и строк таблицы пишутся с прописной буквы, а подзаголовки - со строчной, если они составляют одно предложение с заголовком, или с прописной буквы, если они имеют самостоятельное значение. В конце заголовков и подзаголовков таблиц точки не ставятся. Текст внутри таблицы в зависимости от объема размещаемого материала может быть набран шрифтом меньшего кегля, но не менее 10 pt. Текст в столбцах располагают от левого края либо центрируют.

Слово «Таблица» размещается по левому краю, после него через тире располагается название таблицы, например: Таблица 1 - Текст названия

Если в конце страницы таблица прерывается и ее продолжение будет на следующей странице, нижнюю горизонтальную линию в первой части таблицы не проводят. При переносе части таблицы на другую страницу над ней пишут слово «Продолжение» и указывают номер таблицы: Пример: Продолжение таблицы 1

Нумерация граф таблицы арабскими цифрами необходима только в тех случаях, когда в тексте имеются ссылки на них, при делении таблицы на части, а также при переносе части таблицы на следующую страницу.

*Адрес издателя:*

федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования  
«Орловский государственный университет имени И.С. Тургенева»  
302026, Орловская обл., г. Орёл, ул. Комсомольская, 95  
Тел.: (4862) 75-13-18  
[www.oreluniver.ru](http://www.oreluniver.ru).  
E-mail: [info@oreluniver.ru](mailto:info@oreluniver.ru)

*Адрес редакции:*

федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования  
«Орловский государственный университет имени И.С. Тургенева»  
302030, Орловская обл., г. Орёл, ул. Московская, 77  
Тел.+7 905 856 6556  
[www.oreluniver.ru](http://www.oreluniver.ru).  
E-mail: [srmostu@mail.ru](mailto:srmostu@mail.ru)

Материалы статей печатаются в авторской редакции

Право использования произведений предоставлено авторами на основании  
п. 2 ст. 1286 Четвертой части Гражданского Кодекса Российской Федерации

Технический редактор, корректор,  
компьютерная верстка И.В. Акимочкина

Подписано в печать 25.06.2025 г.  
Дата выхода в свет 17.07.2025 г.  
Формат 70x108/16. Усл. печ. л. 9  
Цена свободная. Тираж 500 экз.  
Заказ № 119

Отпечатано с готового оригинал-макета  
на полиграфической базе ФГБОУ ВО «ОГУ имени И.С. Тургенева»  
302026, г. Орёл, ул. Комсомольская, 95