

ISSN 2073-7432. МИР ТРАНСПОРТА И ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ МАШИН 2025 3-2 (90) Индекс 16376 ("Пресса России")

ISSN 2073-7432

# МИР ТРАНСПОРТА И ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ МАШИН

НАУЧНО - ТЕХНИЧЕСКИЙ ЖУРНАЛ

№ 3-2 (90) 2025

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.

Редакция:

Агеев Е.В. д-р техн. наук, проф. (Россия)

Агуреев 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)

Евтюков 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)

Пржибыл П. д-р техн. наук, проф. (Чехия)

Пугачев И.Н. д-р техн. наук, доц. (Россия)

Пушкарев 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.prima-rt.ru](http://www.prima-rt.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*

Д. Ци Оценка уязвимости городского рельсового транспорта с учетом пересадок на автобусы.....	3
А.А. Широких, В.С. Котов, К.Н. Гусинский, И.Ю. Талабира Перспективы применения аддитивных технологий для ремонта судового энергетического оборудования.....	10
А.И. Петров, С.А. Евтюков Тяжесть дорожно-транспортных происшествий как производная автомобилизации российских регионов (2024) и качества жизни населения.....	16
Е.А. Чеботарева, Е.В. Рязанова, С.М. Наурузбаев Цифровые и информационные технологии управления железнодорожными припортовыми транспортно-технологическими системами.....	24

### Управление процессами перевозок

Н.А. Загородний, А.Н. Дегтярь, В.А. Шаповалова Анализ дорожно-транспортных происшествий, связанных со средствами индивидуальной мобильности. Моделирование перемещения электросамоката (человека) при взаимодействии с транспортным средством.....	34
Ю.А. Колебер, С.М. Мочалин, Е.В. Пискунов Применение нечеткой логики для оценки результативности функционирования систем городского пассажирского транспорта общего пользования.....	41
Д.В. Енин, С.А. Чернышов, Д.А. Овсеев Сравнительная характеристика видов расписаний движения маршрутов регулярных перевозок при равномерном распределении пассажиропотока.....	51

### Эксплуатация автомобильного транспорта

Н.Н. Трушин, А.В. Плясов Варианты синтеза кинематических схем планетарных коробок передач с двумя степенями свободы и минимизацией замкнутых контуров.....	59
И.Б. Ахунова, А.З. Уджуху, Г.А. Гук Зависимость спроса на услуги выездного автомобильного сервиса и интенсивности туристического транспортного потока в условиях Адыгеи.....	68
С.А. Суханов, А.Н. Новиков, Х.М. Тахтамыев К вопросу диагностирования процесса приработки капитально отремонтированных двигателей внутреннего сгорания грузовых автомобилей.....	77
В.Е. Селон, Л.С. Трофимова Моделирование работы подвижного состава для планирования перевозок замороженных и охлажденных продуктов питания.....	85
Е.В. Парсаев Обзор методов определения шума от транспортных потоков для оценки организации движения.....	94
И.А. Новиков, Д.А. Лазарев, Д.П. Стрекалов Применение цифровых технологий при расследовании дорожно-транспортных происшествий.....	100

### Интеллектуальные транспортные системы

Е.И. Игнатенко, А.Н. Новиков, В.Э. Клявин, А.С. Сысоев Интеллектуальная транспортная система на основе светофорных объектов с адаптивным управлением.....	109
Д.С. Корчагин, Д.В. Поморцев, С.С. Евтюков Интеллектуальный анализ данных о маршрутной сети городского общественного пассажирского транспорта.....	116
Д.В. Капский, С.В. Богданович Роль искусственного интеллекта в преодолении фрагментарности транспортных систем.....	126

### Логистические транспортные системы

А.С. Гришин, В.И. Сарбаев, С. Джованис Имитационная модель производственного процесса дилерского автотехцентра.....	135
---	-----

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

# World of transport and technological machines

Scientific and technical journal

Published since 2003

A quarterly review

№ 3-2(90) 2025

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

<b>Editor-in-Chief</b> <b>A.N. Novikov</b> Doc.Eng., Prof	<b>Contents</b>
<b>Associates Editor</b> <b>V.V. Vasileva</b> Can. Eng. <b>S.A. Rodimzev</b> Doc. Eng.	<i>Transport and transport-technological systems of the country, its regions and cities, organization of production in transport</i>
<b>Editorial Board:</b> <b>E.V. Ageev</b> Doc. Eng., Prof. (Russia) <b>I.E. Agureev</b> Doc. Eng., Prof. (Russia) <b>V.N. Baskov</b> Doc. Eng., Prof. (Russia) <b>V.M. Vlasov</b> Doc. Eng., Prof. (Russia) <b>S.N. Glagolev</b> Doc. Eng., Prof. (Russia) <b>M. Demic</b> Doc. Eng., Prof. (Serbia) <b>A.S. Denisov</b> Doc. Eng., Prof. (Russia) <b>S.A. Evtyukov</b> Doc. Eng., Prof. (Russia) <b>L. Żakowska</b> Ph.D., Doc. Sc., Prof. (Poland) <b>S.V. Zhankaziev</b> Doc. Eng., Prof. (Russia) <b>N.S. Zaharov</b> Doc. Eng., Prof. (Russia) <b>V.V. Zyryanov</b> Doc. Eng., Prof. (Russia) <b>T.Y. Matkerimov</b> Doc. Eng., Prof. (Kyrgyzstan) <b>O. Prentkovskis</b> Doc. Eng., Prof. (Lithuania) <b>P. Pribyl</b> Doc. Eng., Prof. (Czech Republic) <b>I.N. Pugachev</b> Doc. Eng. (Russia) <b>A.E. Pushkarev</b> Doc. Eng., Prof. (Russia) <b>V.I. Rassoha</b> Doc. Eng., Prof. (Russia) <b>A.N. Rementsov</b> Doc. Edc., Prof. (Russia) <b>Yu.N. Rizaeva</b> Doc. Eng. (Russia) <b>V.I. Sarbaev</b> Doc. Eng., Prof. (Russia) <b>Yu.V. Trofimenko</b> Doc. Eng., Prof. (Russia) <b>L.S. Trofimova</b> Doc. Eng. (Russia) <b>A. Szarata</b> Ph.D., Doc. Sc., Prof. (Poland)	<i>D. Qi</i> Vulnerability assessment of urban rail transport taking into account bus trans- fers ..... 3 <i>A.A. Shirokikh, V.S. Kotov, K.N. Gusinsky, I.Y. Talabira</i> Prospects of application of additive technologies for repair of ship power equipment ..... 10 <i>A.I. Petrov, S.A. Evtukov</i> Severity of road traffic accidents as a derivative of the mo- torization of russian regions (2024) and the quality of life of the population ..... 16 <i>E.A. Chebotareva, E.V. Ryazanova, S.M. Nauruzbaev</i> Digital and information technolo- gies for managing railway port transport and technological systems ..... 24
<b>Person in charge for publication:</b> <b>I.V. Akimochkina</b>	<i>Management of transportation processes</i>
<b>Editorial Board Address:</b> 302030, Russia, Orel, Orel Region, Moskovskaya str., 77 Tel. +7 (905)8566556 <a href="https://oreluniver.ru/science/journal/mtitm">https://oreluniver.ru/science/journal/mtitm</a> E-mail: <a href="mailto:srmostu@mail.ru">srmostu@mail.ru</a>	<i>N.A. Zagorodnij, A.N. Degtyar, V.A. Shapovalova</i> Analysis of accidents involving means of individual mobility (mim). Simulation of the system «man-electric scooter» movements when interacting with a vehicle fundamentals of the methodology for calculating interaction based on the «man-electric scooter» system with a fixed ob- stacle, without taking into account deformations of the system ..... 34 <i>Yu.A. Koleber, S.M. Mochalin, E.V. Piskunov</i> Applying fuzzy logic to evaluation the effectiveness of the functioning of the public urban passenger transport systems ..... 41 <i>D.V. Yenin, S.A. Chernyshov, D.A. Ovsenev</i> Comparative analysis of public transport scheduling types under uniform passenger flow distribution ..... 51
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	<i>Operation of motor transport</i>
Subscription index: <b>16376</b> in a union catalog «The Press of Russia» on sites <a href="http://www.pressa-rt.ru">www.pressa-rt.ru</a> <a href="http://www.akc.ru">www.akc.ru</a>	<i>N.N. Trushin, A.V. Plyasov</i> Variants of two-dof planetary gearboxes kinematics dia- grams with minimum closed circuits ..... 59 <i>I.B. Akhunova, A.Z. Udzhukhu, G.A. Guk</i> Dependence of demand for outgoing car services and intensity of tourist transport flow in Adygea ..... 68 <i>S.A. Sukhanov, A.N. Novikov, H.M. Takhtamyshev</i> On the question of diagnosing the running-in process of overhauled internal combustion engines of trucks ..... 77 <i>V.E. Selyun, L.S. Trofimova</i> Modeling of rolling stock operation for planning of trans- portation of frozen and chilled food products ..... 85 <i>E.V. Parsaev</i> An overview of methods for determining noise from traffic flows to assess traffic management ..... 94 <i>I.A. Novikov, D.A. Lazarev, D.P. Strekalov</i> The application of digital technologies in investigating road traffic accidents ..... 100
© Registration. Orel State University, 2025	<i>Intelligent transport systems</i>
	<i>E.I. Ignatenko, A.N. Novikov, V.E. Klyavin, A.S. Sysoev</i> Intelligent transport system based on traffic lights with adaptive control ..... 109 <i>D.S. Korchagin, D.V. Pomortsev, S.S. Evtiukov</i> Intelligent analysis of data on the route network of urban public passenger transport ..... 116 <i>D.V. Kapski, S.V. Bogdanovich</i> The role of artificial intelligence in overcoming the fragmentation of transport systems ..... 126
	<i>Logistic transport systems</i>
	<i>A.S. Grishin, V.I. Sarbayev, S. Tzjovanniss</i> Simulation model of the production process of a car dealership ..... 135

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 656.2:656.1:658.58

doi:10.33979/2073-7432-2025-3-2(90)-3-9

Д. ЦИ

**ОЦЕНКА УЯЗВИМОСТИ ГОРОДСКОГО РЕЛЬСОВОГО ТРАНСПОРТА  
С УЧЕТОМ ПЕРЕСАДОК НА АВТОБУСЫ**

***Аннотация.** Для точной оценки уязвимости сети рельсового транспорта и повышения её устойчивости к рискам требуется учет влияния пассажиропотока в сети и роли автобусных пересадок при выходе остановок из строя. Предлагается метод оценки уязвимости на основе средних потерь времени в пути пользователей, проведено моделирование и расчет уязвимости после отказа остановок. Проанализировано влияние коэффициента эффективности автобусных пересадок на уязвимость сети. Результаты показывают, что пересадки на автобусы на остановках с большим количеством соседних узлов вызывают большие средние потери времени. При эффективности пересадок выше 0,8 средние потери времени снижаются до 10 % и менее.*

***Ключевые слова:** городской рельсовый транспорт, устойчивость, уязвимость, пассажиропоток, автобусные пересадки*

**Введение**

Современные исследования устойчивости транспортных систем активно интегрируют инновационные подходы, сочетая математическое моделирование с анализом операционных данных. Например, Novikov и Shevtsova [1] экспериментально доказали, что использование интеллектуальных средств индивидуальной мобильности (СИМ) сокращает время поездок на короткие дистанции на 18-25 %, снижая нагрузку на транспортные узлы через перераспределение пассажиропотоков. Работа Зырянова В.В. [2] методологически усовершенствовала оценку уязвимости сетей через взвешенные графы: блокировка стратегического узла снижает пропускную способность сети на 2,6 %, подтверждая важность межмодальности. Исследование Ширяева С.А. [3] выявило 15 % расхождений между методами оценки пассажиропотоков, требующие эталонных стандартов для минимизации погрешностей.

Актуальность этих работ подчеркивается текущими вызовами. По состоянию на конец 2024 года в 54 городах Китая эксплуатировались 325 маршрутов городского рельсового транспорта общей протяженностью 10945,6 км, с годовым пассажиропотоком 32,24 млрд. человек [4]. На текущем этапе исследования уязвимости транспортных сетей преимущественно ориентированы на дорожные сети [5]. Около 70 % исследовательских работ сосредоточены на автомобильных дорогах, тогда как целенаправленные методологические исследования рельсовых систем, включая метрополитен, легкорельсовый транспорт и многоуровневые железные дороги, остаются недостаточными: доля железнодорожных сетей составляет лишь 3 %, а метрополитенов – 7 % [6]. Однако уязвимость рельсовых сетей выше из-за меньшей доступности альтернативных маршрутов при сбоех, выход остановки из строя влияет на несколько маршрутов одновременно, повышая риски [7].

В последние годы, с продвижением глобального климатического регулирования и целей низкоуглеродных городов, устойчивость транспортных систем постепенно становится фокусом исследований [8]. Рельсовый транспорт считается как основной носитель устойчивого городского транспорта, поскольку его энергоемкость на единицу пассажирооборота составляет всего 15-20 % от таковой у легковых автомобилей, а коэффициент выбросов углерода значительно ниже, чем у автомобильного транспорта [9]. Однако его высокая уязвимость может нивелировать это преимущество: внезапные сбои на остановках или маршрутах не только приводят к задержкам пассажиров и росту операционных расходов [10], но также,

из-за вовлечения автобусов для экстренной перевозки пассажиров возникают дополнительные выбросы углекислого газа. [11], что ослабляет общую устойчивость системы [12].

Исследования показывают, что особенности межмодальной связи в транспортных сетях существенно усиливают риск каскадных отказов в локальных узлах. Например, Sun и др. с помощью теории сложных сетей выявили синергетическую уязвимость системы взаимодействия метро и системы автобусных пересадок [13]; Liu и др. на основе динамических данных о пассажиропотоке подтвердили нелинейное влияние отказа остановки метро на эффективность проезда по региональной дорожной сети [14]; а Drabicki и др. на примере города Краков количественно оценили общий выброс углекислого газа при использовании аварийных автобусов для экстренной пересадки [15]. Однако существующие методы оценки уязвимости в основном сосредоточены на отдельном виде транспорта [16] или опираются на статический топологический анализ [17], что затрудняет количественную оценку динамического влияния отказа узлов на межмодальную эффективность передвижения. Для решения указанных проблем в работе предлагается метод оценки уязвимости мультимодальной транспортной сети, основанный на приращении времени поездки.

### Материал и методы

Для количественной оценки влияния отказа узлов на транспортную сеть в данной статье предлагается метод оценки уязвимости мультимодальной транспортной сети, основанный на приращении времени поездки. Данный метод базируется на модели отказа узлов мультимодальной сети, разработанной Lu и др. [18], с введением коэффициента эффективности пересадки  $\alpha$  для сценариев взаимодействия метро-автобус, что позволяет динамически регулировать временные затраты альтернативных автобусных маршрутов.

Мы определяем отказ узла как полную потерю транспортной способности данного узла вследствие внезапного события (например, аварии оборудования, природных катаклизмов и т.п.), что приводит к прерыванию всех маршрутов, проходящих через этот узел. Для наглядного сравнения состояний сети до и после отказа узла на рисунке 1 представлены две схемы: нормальное состояние городской рельсовой транспортной сети ( I ) и состояние после отказа узла а ( II ).

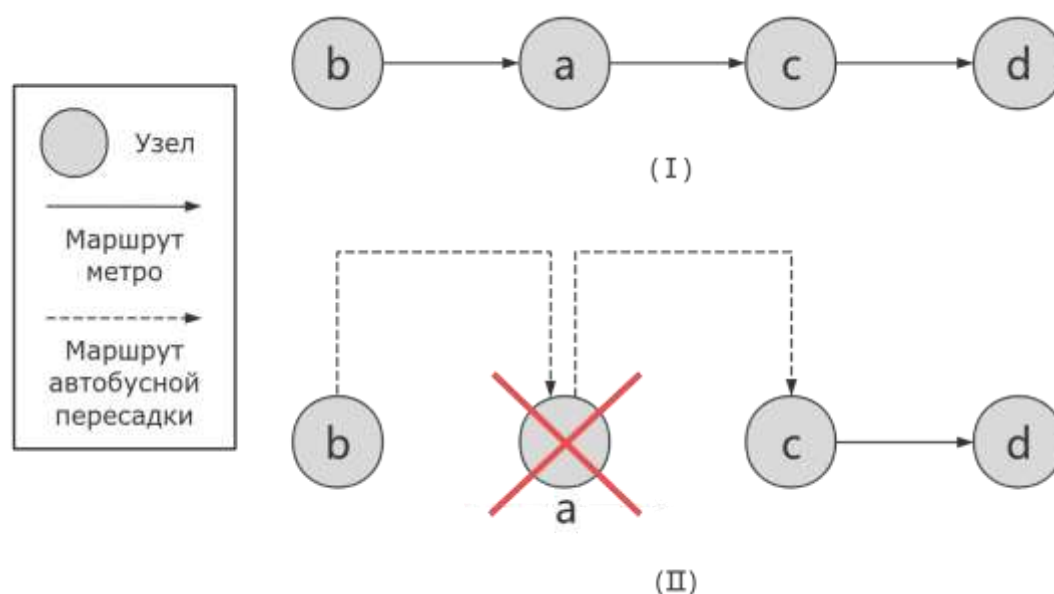


Рисунок 1 – Сети с нормальной ситуацией и отказа узлов ситуацией

### Теория / Расчет

При моделировании транспортной сети на основе теории графов сеть абстрагируется в виде графа  $G = (V, E)$ , состоящего из множества узлов  $V$  и множества рёбер  $E$ :

$$V = \{v_1, v_2, \dots, v_n\}; \quad (1)$$

$$E = \{(v_i, v_j) \mid v_i, v_j \in V, i \neq j\}, \quad (2)$$

где  $v_i, v$  - узлы;

$n$  - количество узлов в сети.

При нормальном функционировании транспортной сети среднее время поездки пользователей принимается за базовое значение  $T_0$ :

$$T_0 = \frac{\sum_i^n \sum_j^{n-1} t_{ij} f_{ij}}{\sum_i^n \sum_j^{n-1} f_{ij}}, \quad (3)$$

где  $f_{ij}$  - пассажиропоток от узла  $i$  к узлу  $j$  (пасс./час);

$t_{ij}$  - минимальное время в пути от узла  $i$  к узлу  $j$ .

При отказе узла  $a$  в сети предполагается, что пользователи продолжат поездку через альтернативные маршруты рельсовой транспортной сети или автобусные пересадочные маршруты. При этом среднее время поездки пользователей определяется как  $T_a$ :

$$T_a = \frac{\sum_i^n \sum_j^{n-1} (t_{ij}^{sr} + t_{ia}^{sp} + t_{aj}^{sp}) f_{ij}}{\sum_i^n \sum_j^{n-1} f_{ij}}, \quad (4)$$

где  $t_{ij}^{sr}$  - время, затраченное пользователем на маршруте рельсовой транзитной системы  $sr$  в процессе поездки из узла  $i$  в узел  $j$  при отказе узла сети;

$t_{ia}^{sp} = \frac{t_{ia}^{sr}}{\alpha}$  - время пересадки от узла  $i$  к узлу  $a$  по пересадочному автобусному маршруту  $sp$ ;

$t_{aj}^{sp} = \frac{t_{aj}^{sr}}{\alpha}$  - время пересадки от узла  $a$  к узлу  $j$  по пересадочному маршруту  $sp$ ;

$\alpha$  - коэффициент эффективности автобусной пересадки.

Чем больше значение  $\alpha$ , тем меньше времени затрачивается на пересадочные автобусные маршруты. В рамках последующих расчетов принимается допущение о равенстве коэффициента пересадочной эффективности  $\alpha$  для направлений  $i \rightarrow a$  и  $a \rightarrow j$ .

В данном исследовании уязвимость определяется как степень потери в среднем времени путешествия пользователей после отказа сетевых узлов, при этом  $V_a$  - это уязвимость сети при отказе узла  $a$ .

$$V_a = \frac{T_a - T_0}{T_0} \times 100\%. \quad (5)$$

При оценке уязвимости реальных транспортных сетей, когда масштаб транспортной сети очень велик, моделирование отказа каждого узла сети по очереди и последующее вычисление потерь времени в пути пользователей, вызванных отказом узла сети, требует больших вычислительных затрат. В данной работе создается небольшая сеть городского рельсового транспорта с целью демонстрации работы метода оценки уязвимости: последовательно моделируются отказы узлов и определяются ключевые узлы сети в зависимости от величины уязвимости после отказа узла. Такой подход позволяет показать эффективность метода и понять его работу.

### Результаты и обсуждение

В данной работе применяется методология моделирования транспортных сетей, предложенная Mishra и др. [19]. На её основе построена упрощенная модель городской рельсовой сети, представленная на рисунке 2. В построенной рельсовой сети имеется 10 остановок и 5 маршрутов. В дополнение к основной информации о маршрутах пассажиропоток между остановками представлен в таблице 1.

На основе матрицы смежности с наименьшим временем (shortest time adjacency matrix) и данных о пассажиропотоке по происхождению-назначению (OD) рассчитывается среднее время в пути пользователей  $T_0$  в нормальном состоянии. Поскольку средняя скорость движения метро примерно вдвое превышает скорость автобуса, коэффициент эффективности пересадки  $\alpha$  принимается равным 0.5. Далее моделируется отказ каждой остановки поочередно, вычисляются уязвимость  $V_a$  и суммарные временные потери, значения которых приведены в таблице 2.

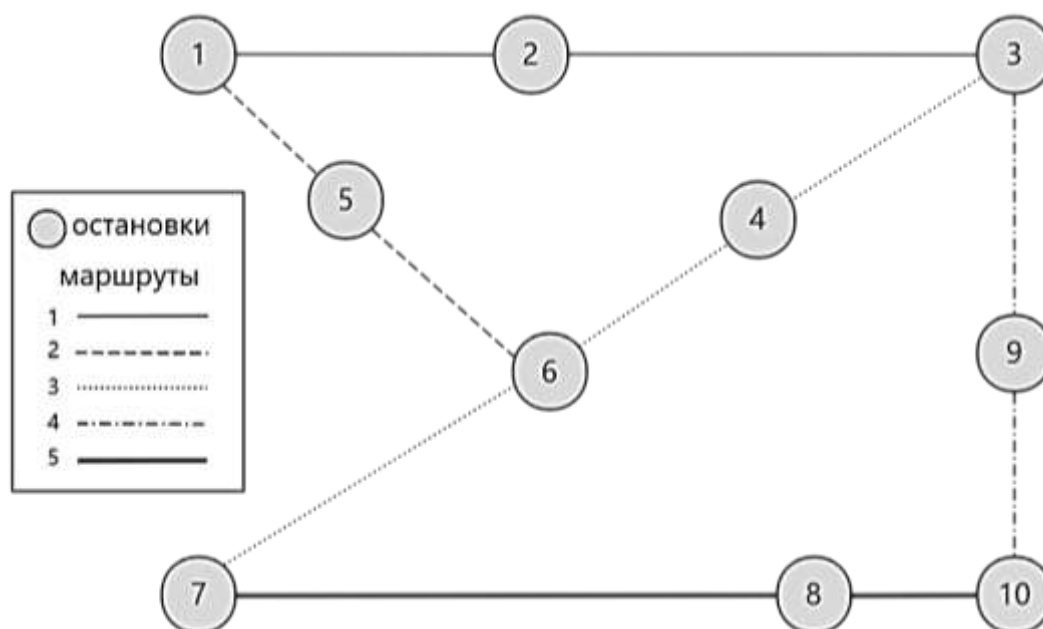


Рисунок 2 – Сети для городского рельсового транспорта

Таблица 1 – Данные о пассажиропотоке между остановками в сети

Пассажиропоток на остановках	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1	0	100	400	300	400	800	300	700	800	200
2	300	0	600	800	800	200	100	200	300	600
3	300	200	0	800	1100	600	100	200	300	200
4	200	800	100	0	900	1000	200	500	300	1100
5	400	600	200	800	0	900	300	300	200	200
6	600	200	900	700	900	0	300	200	100	300
7	200	200	300	300	200	300	0	200	100	300
8	300	100	200	200	100	300	200	0	400	400
9	200	200	100	200	300	200	300	300	0	200
10	100	100	200	100	900	200	200	200	200	0

Таблица 2 – Суточная потеря времени и уязвимость на остановках

№	Минимум суточных потерь времени	Уязвимость, %	№	Минимум суточных потерь времени	Уязвимость, %
1	25920	18.55	6	45480	32.55
2	22080	15.80	7	29400	21.04
3	44880	32.12	8	17700	12.67
4	28200	20.18	9	15360	10.99
5	38400	27.48	10	12060	8.63

Как показано в таблице 2 суточная потеря времени в пути пользователей сети, вызванная отказом 10 остановок, превышает 12000 мин, при этом наибольшее влияние на время в пути в сети оказывает отказ автобусной остановки №6, за которой следуют остановки №3 и №5. Таким образом, среди всех смоделированных остановок эти три ключевые остановки являются теми, которыми необходимо управлять с особым вниманием, и когда сеть подвергается стихийному бедствию или повреждению, приоритет должен быть отдан составлению расписания движения автобусов, чтобы минимизировать воздействие на пользователей из-за отказа остановок сети. Кроме того, при управлении системой метрополитена в чрезвычайных ситуациях следует создавать аварийно-спасательные пункты в привязке к расположению ключевых остановок, чтобы повысить эффективность обслуживания и уровень аварийно-спасательных работ в транспортной системе.



Если в качестве объекта исследования взять 10 остановок, то при выходе из строя остановки, с изменением эффективности автобуса  $\alpha$ , уязвимость рельсовой сети также меняется, как показано на рисунке 3 (из-за того, что значение уязвимости сети слишком велико при  $\alpha < 0,3$ , нет эталонного значения, поэтому оно не показано). Как видно на рисунке 3 с увеличением эффективности автобусных пересадок уязвимость рельсовой сети снижается. Это объясняется тем, что с увеличением эффективности автобусной пересадки время, затрачиваемое на пересадку, уменьшается, влияние на потерю времени в пути пользователя снижается, соответственно, снижается уязвимость транспортной сети. Поэтому при практическом управлении чрезвычайными ситуациями на транспорте следует максимально повысить эффективность автобусных пересадок, что поможет снизить уязвимость сети рельсового транспорта.

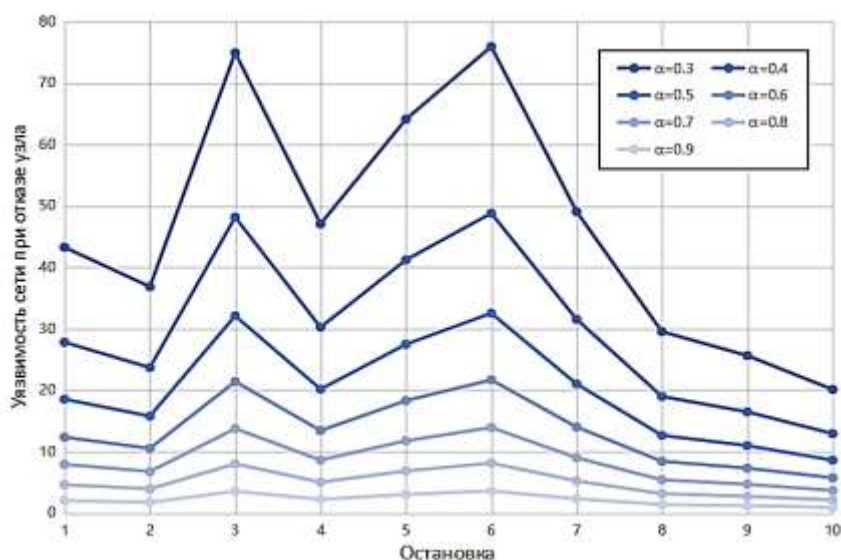


Рисунок 3 – Уязвимость городской рельсовой сети с различными коэффициентами эффективности автобусных пересадок

### Выводы

Предлагаемый метод оценки уязвимости мультимодальной транспортной сети, основанный на приращении времени поездки, дает возможность принимать решения об организации пассажирских перевозок с учетом общей устойчивости системы. Автобусные пересадки являются эффективной стратегией для снижения уязвимости рельсовой сети. Чем выше эффективность автобусных пересадок, тем ниже уязвимость транспортной сети. Когда эффективность автобусных пересадок меньше 0,8, средние потери времени в пути, вызванные отказом остановки, составляют от 15 % до 75 %; когда эффективность автобусных пересадок выше 0,8, средние потери времени в пути, вызванные отказом остановки, могут быть сокращены до менее чем 10 %. При фактическом управлении подачей автобусов приоритет должен отдаваться остановкам с более высокой уязвимостью, чтобы эффективно снизить воздействие крупных аварийных ситуаций, вызванных отказом остановки, на пользователей сети. В последующих исследованиях уязвимость рельсовой сети в случае автобусных развязок может быть использована в качестве важного фактора при размещении остановок пересадки и оптимизации маршрутов пересадки.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Novikov A.I., Shevtsova A.G., Jung A.A. Evaluation of the effectiveness of the use of intellectual systems of individual mobility devices in the urban transport system // E3S Web of Conferences. 2024. T. 583. C. 08021. DOI: 10.1051/e3sconf/202458308021.
2. Дэй Х., Зырянов В.В., Булатова О.Ю., Кулев А.В. Оценка условий движения с целью обеспечения безопасности дорожного движения // Мир транспорта и технологических машин. 2024. №4-2(87). С. 62–73. DOI: 10.33979/2073-7432-2024-4-2(87)-62-73.



3. Егоров К.В., Ширяев С.А., Комаров Ю.Я., Ковалев А.М. Результаты практического определения точности используемых в г. Волгограде методов натурных обследований пассажиропотоков городского общественного транспорта (с использованием «эталонных» значений) // Проблемы качества и эксплуатации автомобильных транспортных средств: материалы XV Национальной научно-технической конференции. Пенза: ПГУАС. 2019. С. 25–35. EDN: TGWBFL.
4. Ministry of Transport of the People's Republic of China [Электронный ресурс] // 2024 Statistical Bulletin on Transportation Industry Development. 2024. URL: [https://www.mot.gov.cn/jiaotongyaowen/202501/t20250122\\_4](https://www.mot.gov.cn/jiaotongyaowen/202501/t20250122_4).
5. Liu B., Zhu G., Li X., Sun R. Vulnerability assessment of the urban rail transit network based on travel behavior analysis // IEEE Access. 2020. Т. 9. №24. С. 1407–1419.
6. Wang Z., Chan A.P., Yuan J. и др. Recent advances in modeling the vulnerability of transportation networks // Journal of Infrastructure Systems. 2015. Т. 21. №2. С. 06014002.
7. Lu Q. Modeling network resilience of rail transit under operational incidents // Transportation Research Part A: Policy and Practice. 2018. Т. 117. №11. С. 227–237.
8. Shah K.J., Pan S.Y., Lee I. и др. Green transportation for sustainability: Review of current barriers, strategies, and innovative technologies // Journal of Cleaner Production. 2021. Т. 326. С. 129392.
9. Lin J., Lin W. Transportation system vulnerability assessment considering environmental impact // Journal of Advanced Transportation. 2022. Т. 2022. №1. С. 8711894.
10. Mouronte-López M.L. Analysing the vulnerability of public transport networks // Journal of Advanced Transportation. 2021. Т. 2021. №1. С. 5513311.
11. Yu X., Bi Y., Chen P., Liu X. Determining a Key Service Area of Feeder Buses for Rail Transit Station Based on Potential Railway Demand // KSCE Journal of Civil Engineering. 2023. Т. 27. №12. С. 5338–5349.
12. Gonçalves L.A.P.J., Ribeiro P.J.G. Resilience of urban transportation systems. Concept, characteristics, and methods // Journal of Transport Geography. 2020. Т. 85. С. 102727.
13. Sun J., Bathgate K., Pan S., Zhang Z. Network-based method for assessing multi-modal transportation network vulnerability to cascading failures // Sustainability Analytics and Modeling. 2024. Т. 4. С. 100034.
14. Liu T. Data-driven analytics to mitigate metro system crowding and disruption impacts: PhD dissertation / Northeastern University. 2022. 133 с.
15. Drabicki A.A., Islam M.F., Szarata A. Investigating the impact of public transport service disruptions upon passenger travel behavior-Results from Krakow City // Energies. 2021. Т. 14. №16. С. 4889.
16. Szymula C., Bešinovic N. Passenger-centered vulnerability assessment of railway networks // Transportation Research Part B: Methodological. 2020. Т. 136. С. 30–61.
17. Wang Z., Pei Y., Zhang J. и др. Vulnerability analysis of public transit systems from the perspective of the traffic situation // Physica A: Statistical Mechanics and its Applications. 2024. Т. 634. С. 129441.
18. Lu Q.C., Cui X., Xu B. и др. Vulnerability research of rail transit network under bus connection scenarios // China Safety Science Journal. 2021. Т. 31. №8. С. 141–146.
19. Mishra S., Welch T.F., Jha M.K. Performance indicators for public transit connectivity in multi-modal transportation networks // Transportation Research Part A: Policy and Practice. 2012. Т. 46. №7. С. 1066–1085.

**Ци Ди**

Донской государственный технический университет  
Адрес: 344003, РФ, г. Ростов-на-Дону, пл. Гагарина, 1  
Аспирант  
E-mail: 151438058@qq.com

D. Qi

**VULNERABILITY ASSESSMENT OF URBAN RAIL TRANSPORT TAKING  
INTO ACCOUNT BUS TRANSFERS**

**Abstract.** To accurately assess the vulnerability of urban rail transit networks and enhance their resistance to operational risks, it is essential to consider the influence of passenger flow within the network and the role of bus transfers when stops fail. This study proposes a vulnerability assessment method based on quantifying average passenger travel time losses. Simulations and calculations were conducted to evaluate network vulnerability following station failures. The impact of bus transfer efficiency coefficients on network vulnerability was systematically analyzed. The results show that transfers to buses at stops with a high number of neighboring nodes cause greater average travel time losses. When bus transfer efficiency exceeds 0.8, average travel time losses reduce to 10% or less, demonstrating significant resilience improvements.

**Keywords:** *urban rail transit, sustainability, vulnerability, passenger flow, bus transfers*

## BIBLIOGRAPHY

1. Novikov A.I., Shevtsova A.G., Jung A.A. Evaluation of the effectiveness of the use of intellectual systems of individual mobility devices in the urban transport system // E3S Web of Conferences. 2024. T. 583. S. 08021. DOI: 10.1051/e3sconf/202458308021.
2. Dey H., Zyryanov V.V., Bulatova O.YU., Kulev A.V. Otsenka usloviy dvizheniya s tsel'yu obespecheniya bezopasnosti dorozhnogo dvizheniya // Mir transporta i tekhnologicheskikh mashin. 2024. №4-2(87). S. 62-73. DOI: 10.33979/2073-7432-2024-4-2(87)-62-73.
3. Egorov K.V., Shiryayev S.A., Komarov YU.YA., Kovalev A.M. Rezul'taty prakticheskogo opredeleniya tochnosti ispol'zuemykh v g. Volgograde metodov naturnykh obsledovaniy passazhiropotokov gorodskogo obshchestvennogo transporta (s ispol'zovaniem «etalonnykh» znacheniy) // Problemy kachestva i ekspluatatsii avto-transportnykh sredstv: materialy XV Natsional'noy nauchno-tekhnicheskoy konferentsii. Penza: PGUAS. 2019. S. 25-35. EDN: TGWBFL.
4. Ministry of Transport of the People's Republic of China [Elektronnyy resurs] // 2024 Statistical Bulletin on Transportation Industry Development. 2024. URL: [https://www.mot.gov.cn/jiaotongyaowen/202501/t20250122\\_4](https://www.mot.gov.cn/jiaotongyaowen/202501/t20250122_4).
5. Liu B., Zhu G., Li X., Sun R. Vulnerability assessment of the urban rail transit network based on travel behavior analysis // IEEE Access. 2020. T. 9. №24. S. 1407-1419.
6. Wang Z., Chan A.P., Yuan J. i dr. Recent advances in modeling the vulnerability of transportation networks // Journal of Infrastructure Systems. 2015. T. 21. №2. S. 06014002.
7. Lu Q. Modeling network resilience of rail transit under operational incidents // Transportation Research Part A: Policy and Practice. 2018. T. 117. №11. S. 227-237.
8. Shah K.J., Pan S.Y., Lee I. i dr. Green transportation for sustainability: Review of current barriers, strategies, and innovative technologies // Journal of Cleaner Production. 2021. T. 326. S. 129392.
9. Lin J., Lin W. Transportation system vulnerability assessment considering environmental impact // Journal of Advanced Transportation. 2022. T. 2022. №1. S. 8711894.
10. Mouronte-Lopez M.L. Analysing the vulnerability of public transport networks // Journal of Advanced Transportation. 2021. T. 2021. №1. S. 5513311.
11. Yu X., Bi Y., Chen P., Liu X. Determining a Key Service Area of Feeder Buses for Rail Transit Station Based on Potential Railway Demand // KSCE Journal of Civil Engineering. 2023. T. 27. №12. S. 5338-5349.
12. Gonçalves L.A.P.J., Ribeiro P.J.G. Resilience of urban transportation systems. Concept, characteristics, and methods // Journal of Transport Geography. 2020. T. 85. S. 102727.
13. Sun J., Bathgate K., Pan S., Zhang Z. Network-based method for assessing multimodal transportation network vulnerability to cascading failures // Sustainability Analytics and Modeling. 2024. T. 4. S. 100034.
14. Liu T. Data-driven analytics to mitigate metro system crowding and disruption impacts: PhD dissertation / Northeastern University. 2022. 133 s.
15. Drabicki A.A., Islam M.F., Szarata A. Investigating the impact of public transport service disruptions upon passenger travel behavior-Results from Krakow City // Energies. 2021. T. 14. №16. S. 4889.
16. Szymula C., Beńinowicz N. Passenger-centered vulnerability assessment of railway networks // Transportation Research Part B: Methodological. 2020. T. 136. S. 30-61.
17. Wang Z., Pei Y., Zhang J. i dr. Vulnerability analysis of public transit systems from the perspective of the traffic situation // Physica A: Statistical Mechanics and its Applications. 2024. T. 634. S. 129441.
18. Lu Q.C., Cui X., Xu B. i dr. Vulnerability research of rail transit network under bus connection scenarios // China Safety Science Journal. 2021. T. 31. №8. S. 141-146.
19. Mishra S., Welch T.F., Jha M.K. Performance indicators for public transit connectivity in multimodal transportation networks // Transportation Research Part A: Policy and Practice. 2012. T. 46. №7. S. 1066-1085.

**Qi Di**

Don State Technical University

Adress: 344003, Russia, Rostov-on-Don, Gagarin Square, 1

Postgraduate student

E-mail: 151438058@qq.com

УДК 621.039

doi:10.33979/2073-7432-2025-3-2(90)-10-15

А.А. ШИРОКИХ, В.С. КОТОВ, К.Н. ГУСИНСКИЙ, И.Ю. ТАЛАБИРА

## ПЕРСПЕКТИВЫ ПРИМЕНЕНИЯ АДДИТИВНЫХ ТЕХНОЛОГИЙ ДЛЯ РЕМОНТА СУДОВОГО ЭНЕРГЕТИЧЕСКОГО ОБОРУДОВАНИЯ

**Аннотация.** Стремительное развитие аддитивного производства открывает новые пути для его применения. В статье рассматриваются перспективы, возможности и проблемы применения аддитивных технологий для проведения ремонта судового энергетического оборудования, а также существующие примеры использования аддитивных технологий в данных целях.

**Ключевые слова:** Аддитивные технологии, аддитивное производство, 3D-печать, судоремонт, судовое энергетическое оборудование, оперативный ремонт

### Введение

Распространение аддитивного производства (АП) на современном этапе определяет перспективы применения данных технологий во многих отраслях промышленности. Согласно отчету [1], опубликованному консалтинговой компанией Wohlers Associates, специализирующейся на аддитивных технологиях (АТ), в сравнении с 2022 годом мировой рынок аддитивного производства вырос на 11,1 % и оценивается в 20 млрд долларов, а объем поставок систем АП для металлических деталей, как показано на рисунке 1, увеличился на 24,4 % в 2023 году.

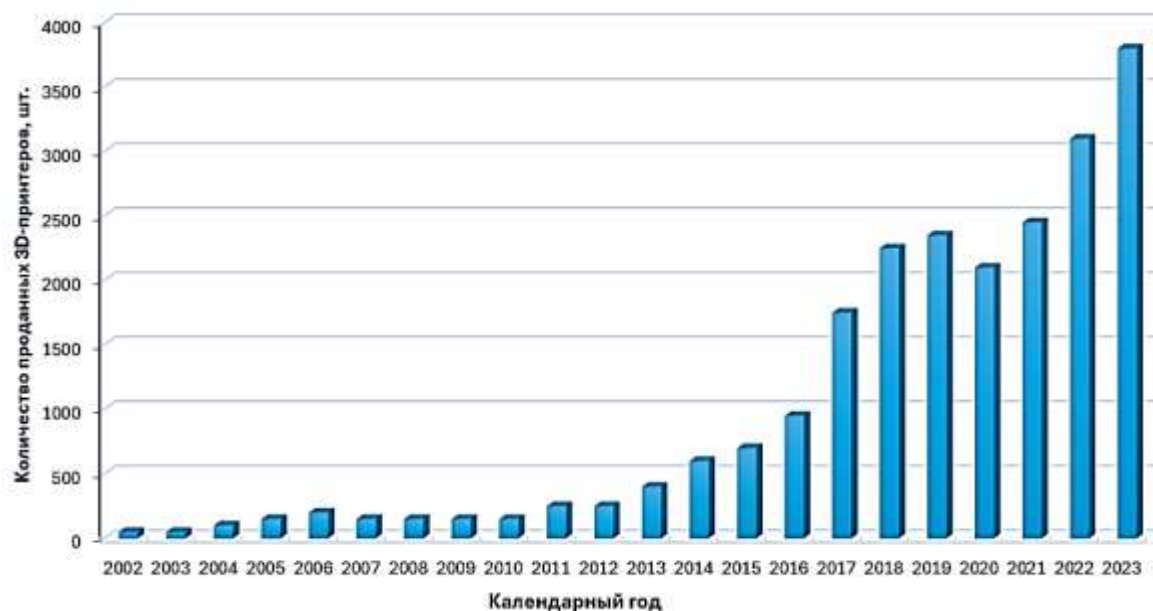


Рисунок 1 – Данные отчета Wohlers 2024, показывающие рост продаж 3D-принтеров по металлу

Согласно аналитическим данным организации «Ассоциация развития аддитивных технологий», объем рынка АТ в Российской Федерации оценивается в размере 6 млрд рублей, а к 2030 году прогнозируется рост до 23 млрд, что составляет лишь малую долю от мировых темпов развития АП. Такие показатели обозначают проблему технологического отставания отечественной промышленности в данной области [2].

### Материал и методы

Для решения этой проблемы и создания внутри государства конкурентоспособной отрасли распоряжением Правительства РФ от 14 июля 2021 г. N 1913-р была принята стратегия развития АТ в РФ на период до 2030 года, где, в том числе, были определены основные потребители АТ в промышленности, которые представлены на рисунке 2.



Рисунок 2 – Основные потребители АТ в промышленности РФ

Применение АТ в оборонно-промышленном комплексе (ОПК) и судостроении является востребованным направлением технического развития, поэтому материалы данной научной статьи актуальны (рис. 2).

В сравнении с традиционными методами производства, такими как литье и механическая обработка, использование АТ обладает рядом преимуществ. Рассмотрим некоторые из них подробнее:

– скорость производства: АТ используют компьютерные модели будущих

изделий, которые можно за короткое время передать в разработку без наличия традиционной конструкторской документации;

– экономичность производства: программное обеспечение используемого оборудования точно рассчитывает количество потребляемых материалов, а технология производства позволяет получать изделия без избыточной обработки;

– эффективность производства сложных форм: аддитивный подход позволяет создавать уникальные изделия с внутренней полой структурой, например: теплообменники со сложной системой каналов охлаждения любой формы, литейную оснастку для создания корпусов новых двигателей и насосов, фильтрующие элементы с сетчатой структурой;

– мобильность: применяемое для производства изделий оборудование можно разместить в отдалении от основных производственных и ремонтных мощностей, что исключает затраты на логистику и позволяет изготавливать детали и осуществлять их ремонт на месте эксплуатации [3].

### Теория

Тенденции потребления АТ в судостроении и ОПК в совокупности с перечисленными преимуществами позволяют развивать техническое обслуживание и ремонт, а также оперативный ремонт судового энергетического оборудования. Понятие «оперативный ремонт» можно рассматривать как комплекс операций по восстановлению исправности или работоспособности технических устройств в данный момент времени и в динамике [4].

Применение АТ в ремонте и оперативном ремонте судовых энергетических установок разрабатывается и совершенствуется более 10 лет. Существуют экспериментальные примеры использования 3D-печати как в береговой составляющей ремонтной судовой инфраструктуры, так и непосредственно на борту судна. Согласно [5] со ссылкой на представителей американского флота в 2022 году на универсальный десантный корабль ВМС США «Батаан» впервые была установлена система «Phillips Additive Hybrid» для производства металлических деталей, необходимых при обслуживании корабельных систем в море. Система состоит из 3D-принтера с головкой для лазерного наплавления металла и фрезерного станка с численным программным управлением. Также известны примеры использования на американских авианосцах устройств для производства изделий из полимерных материалов.

В отечественной промышленности лидером по внедрению АТ в оперативный ремонт является дочерняя компания госкорпорации «Росатом» – «Русатом – Аддитивные технологии». В компании ведутся работы по разработке и внедрению аддитивных ремонтных комплексов, работающих в тяжелых климатических и логистических условиях Крайнего Севера, концепция подобного ремонтного комплекса представлена на рисунке 3 [6].



Рисунок 3 – Эскизная модель мобильного ремонтного комплекса

Данные комплексы реализованы в габаритах морского контейнера и могут быть установлены на палубу судна или включены в инфраструктуру береговой системы ремонта. Размеры современных кораблей и их энергетических установок позволяют разместить и применить в составе судовой мастерской весь цикл производства деталей с применением АП.

Цикл применения АП включает в себя следующие этапы [7, 8]:

- проектирование 3D-моделей;
- перенос 3D-моделей в машину аддитивного производства и манипулирование этими файлами;
- настройка машины;
- изготовление (3D-печать);
- последующая обработка (постобработка);
- применение.

Первый этап цикла АП заключается в получении трехмерной модели изготавливаемой детали, что может осуществляться путем сканирования детали 3D-сканером, входящим в состав аддитивной мастерской. В данном случае, после сканирования, полученные данные электронным пакетом отправляются в инженерный отдел, который может находиться на любом удалении от судна, где специалисты создают и отправляют обратно 3D-модель готовой для 3D-печати непосредственно на борту.

Примером успешного опыта использования технологий 3D-сканирования является работа специалистов российской компании «КейсТор 3D Group» по реверс-инжинирингу шестерней в винторулевой колонке (ВРК) морского буксира по заказу компании «Северный Альянс», пример такого применения 3D-сканирования представлен на рисунке 4 [9].

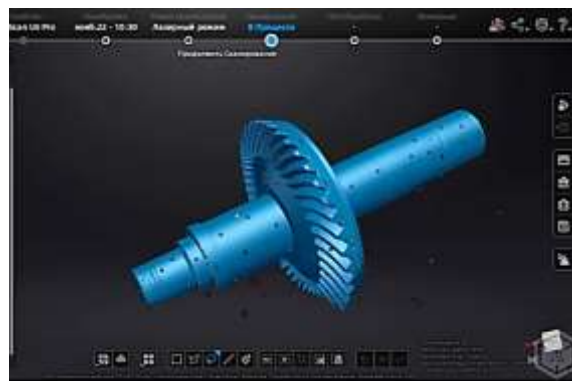


Рисунок 4 – Реверс-инжиниринг ВРК морского буксира



Проблемой 3D-сканирования является то, что 3D-сканер не учитывает внутренние и теневые полости детали, измерение и моделирование этих элементов необходимо выполнять отдельно [10].

Последующие этапы цикла АП полностью выполняются на борту судна с использованием аддитивной мастерской.

Однако применение АТ в судоремонте имеет ряд недостатков [11]:

1) отсутствие механизмов прогнозирования прочностных характеристик деталей;  
2) на этапе проектирования для деталей, изготавливаемых аддитивными способами, затруднительно корректно спрогнозировать прочностные характеристики, что ограничивает сферу применения АТ. Исходя из этого, появляется проблема обоснования возможности применения распечатанной детали;

3) отсутствие единой системы сертификации материалов.

Существование различных систем сертификации для всех отраслей промышленности удорожает внедрение АТ в ремонте механизмов и устройств, в том числе снижает эффективность применения АТ для оперативного ремонта непосредственно на борту корабля, судна.

### **Результаты и обсуждение**

Ввиду своих преимуществ использование АТ для проведения ремонта судового энергетического оборудования в составе судовой мастерской или береговой системы ремонта обладает большим потенциалом для внедрения и применения [12]. Данные преимущества повысят автономность судна в отдельных вопросах материально-технического обеспечения, а именно:

– скорость производства позволит в самые короткие сроки провести замену вышедшего из строя узла судового энергетической установки;

– экономичность позволит рационально использовать сырье, что обеспечит большие ремонтные мощности;

– эффективность производства сложных форм позволит выполнить деталь, входящую в состав энергетического оборудования, с любой заданной геометрией [13];

– мобильность позволит создавать детали непосредственно на борту судна, что исключит необходимость создания и перемещения больших запасов запасных частей.

Однако внедрение АТ в судоремонт имеет ряд ограничений:

– отсутствуют механизмы оценки и прогнозирования прочностных характеристик деталей, полученных с применением АТ – решить данную проблему позволит создание единой системы сертификации и нормативно-технической документации;

– отсутствуют методики замены вышедших из строя механизмов – для преодоления данного ограничения требуется разработка научно-методического аппарата организации и управления процессом восстановления работоспособности механизма, который позволит проводить замену неисправных деталей.

### **Выводы**

Применение АТ открывает новые возможности и является перспективным инструментом в ремонте судового энергетического оборудования. Ключевыми преимуществами АТ являются мобильность, сокращение сроков производства и снижение зависимости от традиционных цепочек поставок. Однако успешное внедрение АТ требует преодоления существующих технологических и нормативных барьеров, включая стандартизацию материалов и разработку надежных методов контроля качества изделий и выполняемых работ.

Реальные проекты, такие как мобильные ремонтные комплексы и применение 3D-сканирования, демонстрируют практическую ценность АТ, но их масштабирование возможно только при комплексном подходе, от совершенствования инженерных методик до адаптации законодательной базы.

## **СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ**

1. Wohlers Associates Shows Metal Additive Manufacturing Growth of 24.4% in New Report [Электронный ресурс]. URL: <https:// WohlersAssociates.com/news/wohlers-report-2024-shows-metal-am-growth-in-new-report/>.
2. Тенденции применения аддитивных технологий в российской промышленности [Электронный ресурс]. URL: <https://aatd.ru/news/tendentsii-primeneniya-additivnykh-tehnologiy-v-rossiyskoy-promyshlennostisphse>.

3. Григорьев С.Н. Проблемы и перспективы развития отечественного машиностроительного производства // Справочник. Инженерный журнал с приложением. 2011. С. 3–7.
4. Туричин А.Г., Котов В.С., Барсков В.В., Резникова Р.К. Аддитивные технологии в качестве основы внедрения оперативного ремонта энергетического оборудования кораблей и судов ВМФ // Транспортное дело России. 2021. №1. С. 144–147. EDN CVPFCN.
5. HII gets Navy's green light to expand use of 3D printed parts in shipyards [Электронный ресурс]. URL: <https://breakingdefense.com/2023/04/hii-gets-navys-green-light-to-expand-use-of-3d-printed-parts-in-shipyards/>
6. 3D-принтер как первая помощь при ремонте судов в Арктике [Электронный ресурс]. URL: <https://www.eastrussia.ru/material/raspechatyvaya-arktiku-3d-printer-kak-pervaya-pomoshch-pri-remonte-sudov-v-arktike/>.
7. Рудской А.И., Попович А.А., Григорьев А.В., Каледина Д.Е. Аддитивные технологии // Учебное пособие. 2017. 123 с.
8. Иванов А.В., Ваганов В.В., Билецкий Н.А. Особенности организации судового ремонта с помощью аддитивных технологий // Морская индустрия и технологии. 2020. Т. 47. №1. С. 58–66.
9. 3D-сканирование и реверс-инжиниринг для морских буксиров [Электронный ресурс]. URL: <https://www.shining3d.ru/blog/3d-skanirovanie-i-revers-inzhiniring-dlya-morskih-buksirov/>.
10. Толочко М., Синельников В., Сокол О. Проблемы применения аддитивных технологий для изготовления запасных деталей машин // Инженерия природопользования. 2020. №3(13). С. 92–101.
11. Федорова И.Г., Филимонова Т.С., Журавлев Е.В., Васильев В.В. Оценка возможности применения реверс-инжиниринга в авиационной промышленности // Computational nanotechnology. 2019. №3.
12. Петров Н.В., Нозирзода Ш.С., Петрова Е.Д. Применение технологий 3D-сканирования в реверсивном инжиниринге корпусных деталей // Вестник Кузбасского государственного технического университета. 2023. №1(155). С. 34–41.
13. Torims T., Morales Casas A., Gutierrez Rubert S.C. Additive manufacturing as a technique for in situ repair and renovation of marine crankshaft journals // Key Engineering Materials. 2019. Vol. 799. P. 263–268.
14. Котов В.С., Панкратов А.В., Резникова Р.К. Реализация возможностей аддитивных технологий в техническом обслуживании газотурбинных двигателей // Вестник ВУНЦ ВМФ «Военно-морская академия». 2021. №3(47). С. 78–85.
15. Шулепов А.В., Пьей Сони Вин Исследование погрешности измерения геометрических параметров деталей в зависимости от цвета покрытия поверхности в лазерных сканирующих оптоэлектронных измерительных системах // Измерение. Мониторинг. Управление. Контроль. 2019. №1(27). С. 55–62.

**Широких Андрей Антонович**

Высшая школа энергетического машиностроения, Института энергетики, Санкт-Петербургского политехнического университета Петра Великого

Адрес: 195251, Россия, г. Санкт-Петербург, ул. Политехническая, д. 29

Студент

E-mail: shirokih\_aa@spbstu.ru

**Котов Валентин Сергеевич**

Высшая школа энергетического машиностроения, Института энергетики, Санкт-Петербургского политехнического университета Петра Великого

Адрес: 195251, Россия, г. Санкт-Петербург, ул. Политехническая, д. 29

К.т.н., старший преподаватель

E-mail: kotov\_vs@spbstu.ru

**Гусинский Константин Николаевич**

Высшая школа энергетического машиностроения, Института энергетики, Санкт-Петербургского политехнического университета Петра Великого

Адрес: 195251, Россия, г. Санкт-Петербург, ул. Политехническая, д. 29

К.т.н., эксперт промышленной безопасности

E-mail: guskon7@yandex.ru

**Талабира Иван Юрьевич**

Высшая школа энергетического машиностроения, Института энергетики, Санкт-Петербургского политехнического университета Петра Великого

Адрес: 195251, Россия, г. Санкт-Петербург, ул. Политехническая, д. 29

Студент

E-mail: talabira\_iyu@spbstu.ru

---

A.A. SHIROKIKH, V.S. KOTOV, K.N. GUSINSKY, I.Y. TALABIRA

## PROSPECTS OF APPLICATION OF ADDITIVE TECHNOLOGIES FOR REPAIR OF SHIP POWER EQUIPMENT

*Abstract. Rapid development of additive manufacturing opens new ways for its application. The*



*article considers prospects, possibilities and problems of application of additive technologies for repair of ship power equipment, and existing examples of use of additive technologies for these purposes.*

**Keywords:** Additive technologies, additive manufacturing, 3D-printing, ship repair, ship power equipment, operational repair

## **BIBLIOGRAPHY**

1. Wohlers Associates Shows Metal Additive Manufacturing Growth of 24.4% in New Report [Elektronnyy resurs]. URL: <https://wohlersassociates.com/news/wohlers-report-2024-shows-metal-am-growth-in-new-report/>.
2. Tendentsii primeneniya additivnykh tekhnologiy v rossiyskoy promyshlennosti [Elektronnyy resurs]. URL: [https://aatd.ru/news/tendentsii-primeneniya-additivnykh-tekhnologiy-v-rossiyskoy-promyshlennostisphrase\\_id](https://aatd.ru/news/tendentsii-primeneniya-additivnykh-tekhnologiy-v-rossiyskoy-promyshlennostisphrase_id).
3. Grigor'ev S.N. Problemy i perspektivy razvitiya otechestvennogo mashinostroitel'nogo proizvodstva // Spravochnik. Inzhenernyy zhurnal s prilozheniem. 2011. S. 3-7.
4. Turichin A.G., Kotov V.S., Barskov V.V., Reznikova R.K. Additivnye tekhnologii v kachestve osnovy vnedreniya operativnogo remonta energeticheskogo oborudovaniya korabley i sudov VMF // Transportnoe delo Rossii. 2021. №1. S. 144-147. EDN CVPFCN.
5. HII gets Navy's green light to expand use of 3D printed parts in shipyards [Elektronnyy resurs]. URL: <https://breakingdefense.com/2023/04/hii-gets-navys-green-light-to-expand-use-of-3d-printed-parts-in-shipyards/>.
6. 3D-printer kak pervaya pomoshch' pri remonte sudov v Arktike [Elektronnyy resurs]. URL: <https://www.eastrussia.ru/material/raspechatyvaya-arktiku-3d-printer-kak-pervaya-pomoshch-pri-remonte-sudov-v-arktike/>.
7. Rudskoy A.I., Popovich A.A., Grigor'ev A.V., Kaledina D.E. Additivnye tekhnologii // Uchebnoe posobie. 2017. 123 s.
8. Ivanov A.V., Vaganov V.V., Biletskiy N.A. Osobennosti organizatsii sudovogo remonta s pomoshch'yu additivnykh tekhnologiy // Morskaya industriya i tekhnologii. 2020. T. 47. №1. S. 58-66.
9. 3D-skanirovanie i reversinzhiniring dlya morskikh buksirov [Elektronnyy resurs]. URL: <https://www.shining3d.ru/blog/3d-skanirovanie-i-revers-inzhiniring-dlya-morskih-buksirov/>.
10. Tolochko M., Sinel'nikov V., Sokol O. Problemy primeneniya additivnykh tekhnologiy dlya izgotovleniya zapasnykh detaley mashin // Inzheneriya prirodopol'zovaniya. 2020. №3(13). S. 92-101.
11. Fedorova I.G., Filimonova T.S., ZHuravlev E.V., Vasil'ev V.V. Otsenka vozmozhnosti primeneniya revers-inzhiniringa v aviatsionnoy promyshlennosti // Computational nanotechnology. 2019. №3.
12. Petrov N.V., Nozirezoda SH.S., Petrova E.D. Primenenie tekhnologiy 3Dskanirovaniya v reversivnom inzhiniringe korpusnykh detaley // Vestnik Kuzbasskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. 2023. №1(155). S. 34-41.
13. Torims T., Morales Casas A., Gutierrez Rubert S.C. Additive manufacturing as a technique for in situ repair and renovation of marine crankshaft journals // Key Engineering Materials. 2019. Vol. 799. P. 263-268.
14. Kotov V.S., Pankratov A.V., Reznikova R.K. Realizatsiya vozmozhnostey additivnykh tekhnologiy v tekhnicheskoy obsluzhivaniy gazoturbinnnykh dvigateley // Vestnik VUNTS VMF "Voenno-morskaya akademiya". 2021. №3(47). S. 78-85.
15. Shulepov A.V., P'ey Soni Vin Issledovanie pogreshnosti izmereniya geometricheskikh parametrov detaley v zavisimosti ot tsвета pokrytiya poverkhnosti v lazernykh skaniruyushchikh optoelektronnykh izmeritel'nykh sistemakh // Izmerenie. Monitoring. Upravlenie. Kontrol'. 2019. №1(27). S. 55-62.

### **Shirokikh Andrey Antonovich**

Graduate School of Power Engineering, Institute of Power Engineering, Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University

Address: 195251, Russia, St. Petersburg, Polytechnicheskaya St., 29

Student

E-mail: shirokih\_aa@spbstu.ru

### **Kotov Valentin Sergeyevich**

Graduate School of Power Engineering, Institute of Power Engineering, Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University.

Address: 195251, Russia, St. Petersburg, Polytechnicheskaya St., 29

Candidate of Technical Sciences

E-mail: kotov\_vs@spbstu.ru

### **Gusinsky Konstantin Nikolaevich**

Graduate School of Power Engineering, Institute of Power Engineering, Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University.

Address: 195251, Russia, St. Petersburg, Polytechnicheskaya St., 29

Candidate of Technical Sciences

E-mail: guskon7@yandex.ru

### **Talabira Ivan Yurievich**

Graduate School of Power Engineering, Institute of Power Engineering, Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University.

Address: 195251, Russia, St. Petersburg, Polytechnicheskaya St., 29

Student

E-mail: talabira\_iyu@spbstu.ru

УДК 656.086

doi:10.33979/2073-7432-2025-3-2(90)-16-23

А.И. ПЕТРОВ, С.А. ЕВТЮКОВ

## ТЯЖЕСТЬ ДОРОЖНО-ТРАНСПОРТНЫХ ПРОИСШЕСТВИЙ КАК ПРОИЗВОДНАЯ АВТОМОБИЛИЗАЦИИ РОССИЙСКИХ РЕГИОНОВ (2024) И КАЧЕСТВА ЖИЗНИ НАСЕЛЕНИЯ

**Аннотация.** В статье представлены результаты изучения статистической связи между уровнем региональной автомобилизации и важнейшим относительным показателем дорожно-транспортной аварийности Тяжестью ДТП. Установлено, что в условиях низкой автомобилизации степень выживаемости пострадавших в ДТП значительно ниже, чем в регионах с высокой автомобилизацией. Высокая Тяжесть ДТП характерна для национальных регионов с низким уровнем качества жизни, что влияет и на уровень автомобилизации. Очевидно, именно качество жизни населения определяет качественную сторону процессов формирования дорожно-транспортной аварийности. Как следствие этого, безопасность дорожного движения во многом зависит от качества жизни населения страны.

**Ключевые слова:** безопасность дорожного движения, дорожно-транспортная аварийность, российские регионы, автомобилизация, тяжесть ДТП, статистическая связь, качество жизни

### Введение

В рамках данной статьи рассматриваются вопросы статистической связи (на данных 2024 г.) между уровнем российской региональной автомобилизации и Тяжестью ДТП – важнейшим относительным показателем, характеризующим дорожно-транспортную аварийность.

Рост автомобилизации в России можно характеризовать как непрерывный в течение всей истории [1]. Во многих странах мира процессы автомобилизации уже развернулись вспять, и уровень обеспеченности населения транспортными средствами (ТС) постепенно снижается. В большинстве европейских стран этот процесс идет уже 20-30 лет, но в России пока наблюдается только рост автомобилизации во времени [1, 2]. Сегодня (по состоянию на конец 2024 г.) в России зарегистрировано 64,2 млн. ТС [2], что определяет уровень общероссийской автомобилизации как  $A_{РФ-2024} = 441$  ТС/1000 чел. При этом уровень региональной автомобилизации  $A_{\text{регион РФ-2024}}$  изменяется от 226 ТС/1000 чел. (Республика Ингушетия) до 785 ТС/1000 чел. (Камчатский край), т.е. различается почти в 3,5 раза [2].

При высокой дифференциации уровня региональной автомобилизации достаточно сильно различается и уровень Тяжести ДТП в различных регионах России [2]. Максимально высокое значение Тяжести ДТП в 2024 г. зафиксировано в Республике Ингушетия ( $\text{Тяж}_{ДТП\ 2024} = 16,5$  % погибших в ДТП от числа пострадавших). Максимальные значения Тяжести ДТП в 2024 г. характерны для городов федерального значения – Санкт-Петербурга ( $\text{Тяж}_{ДТП\ 2024} = 3,3$  % погибших в ДТП от числа пострадавших) и Москвы ( $\text{Тяж}_{ДТП\ 2024} = 3,4$  % погибших в ДТП от числа пострадавших).

Как было указано выше, гипотеза исследования формулируется следующим образом: «Существует статистическая связь между уровнем региональной автомобилизации  $A_{\text{регион РФ-2024}}$  и общесистемным для региона уровнем Тяжести ДТП  $\text{Тяж}_{ДТП\ 2024}$ ».

### Материал и методы

Тяжесть ДТП (или, более корректно, тяжесть последствий ДТП) – важнейший относительный показатель дорожно-транспортной аварийности, используемый для оценки соотношения числа погибших в числе пострадавших вследствие участия в ДТП.

Тяжесть ДТП зависит от множества факторов, суммарное воздействие которых может быть оценено как кинетическая энергия  $E_k$ , испытываемая людьми-участниками ДТП. При высоких значениях  $E_k$  шансов вероятности остаться в живых у участников ДТП невелика. В результате полученного удара замедление на уровне груди достигает 30-40 g, т.е. почти со-роkokратные перегрузки, а на уровне головы около 70 g. Это приводит к очень серьезным травмам и, зачастую к смерти участников ДТП.

В случае, если же  $E_k$  была все же невысока и полученные людьми травмы несмертельны, то тяжесть ДТП определяется возможностями быстрого оказания медицинской помощи на месте ДТП, скорости доставки в реанимационные отделения больниц и т.п. факторами.

В ходе кульминационной фазы ДТП (непосредственно при столкновении транспортных средств, наезде на препятствие, наезде на пешехода) кинетическая энергия  $E_k$  автомобиля гасится в течение очень малых промежутков времени, при этом часть энергии теряется при деформациях корпуса транспортного средства, но часть передается телам людей, находящихся в автомобиле. Мгновенные (ударные) силы, приходящиеся на тела участников ДТП, могут достигать очень значительных величин. Например, при фронтальном столкновении легковых автомобилей (ТС категории М1) ударные силы на тела людей могут достигать 25-40 тыс. кгс. В случае столкновения легкового автомобиля с транспортными средствами категорий М3 (автобусы технически допустимая максимальная масса которых превышает 5 т) или N3 (грузовые автомобили с максимальной массой более 12 т) эта ударная сила возрастает до нескольких сотен тыс. кгс, а энергии удара достигают сотен тыс. кДж [3, 4].

В ходе двухфазного процесса столкновения автомобилей кинетическая энергия  $E_k$  относительного движения автомобилей трансформируется дважды [3, 4]. В процессе непосредственного столкновения (обычно в течение 0,01-0,06 сек)  $E_k$  в большей степени в энергию реализуется в форме остаточной деформации кузовов и в меньшей степени в форме тепловой энергии и потенциальной энергии  $E_p$  упругой деформации (1 фаза). После разъединения кузовов автомобилей энергия вновь трансформируется (в течение 0,01-0,08 сек) в остаточную кинетическую энергию  $E_k$  автомобилей за счет потенциальной энергии  $E_p$  упругой деформации (2 фаза).

Кинетическая энергия  $E_k$ , высвобождаемая в процессе удара, определяется разницей квадратов скоростей автомобиля до столкновения и после него. При этом часть кинетической энергии удара трансформируется в энергию пластического деформирования кузова автомобиля (табл. 1) [3, 4].

Таблица 1 - Доля кинетической энергии  $E_k$  переходящая в энергию пластического деформирования кузова и частей автомобиля при столкновении  $E_p$  [3]

Виды столкновения по направлению движения и	Доля $E_k \rightarrow E_p$ , %
Лобовой удар в жесткое и неподвижное препятствие	до 97...98
Лобовое столкновение с однотипным ТС	до 85...90
Центральный боковой удар в однотипное ТС	до 75...80
Ударе с перекрытием три четверти передней части однотипного ТС	≈ 60...70
Боковой нецентральный удар	≈ 40

Для больших массивов данных о ДТП (например, в случае сравнительных межрегиональных исследований) Тяжесть ДТП  $Тяж_{ДТП}$  является основным относительным показателем, характеризующим специфику дорожно-транспортной аварийности. Этот показатель более информативен и в большей степени, по сравнению с другими относительными показателями, характеризует специфику дорожно-транспортной аварийности.

#### Теория / Расчет

Для больших массивов данных о ДТП (например, в случае сравнительных межрегиональных исследований) Тяжесть ДТП  $Тяж_{ДТП}$  является основным относительным показателем, характеризующим специфику дорожно-транспортной аварийности. Этот показатель более информативен и в большей степени, по сравнению с другими относительными показателями, характеризует специфику дорожно-транспортной аварийности.

Тяжесть ДТП  $Тяж_{ДТП}$  определяется как (1) [5]:

$$\text{Тяж ДТП} = N_{\text{пог.}} / N_{\text{постр.}} = N_{\text{пог.}} / (N_{\text{пог.}} + N_{\text{ран.}}), \quad (1)$$

где  $N_{\text{пог.}}$  - число погибших в ДТП в течение года, чел.;  
 $N_{\text{постр.}}$  - число пострадавших в ДТП в течение года, чел.;  
 $N_{\text{ран.}}$  - число раненых в ДТП в течение года, чел.

Уровень региональной автомобилизации  $A$  определяется по формуле (2) [5]:

$$A_{\text{регион РФ}} = N_{\text{ТС}} / P, \quad (2)$$

где  $N_{\text{ТС}}$  - число зарегистрированных в регионе транспортных средств, ед.;  
 $P$  - численность населения региона, чел.

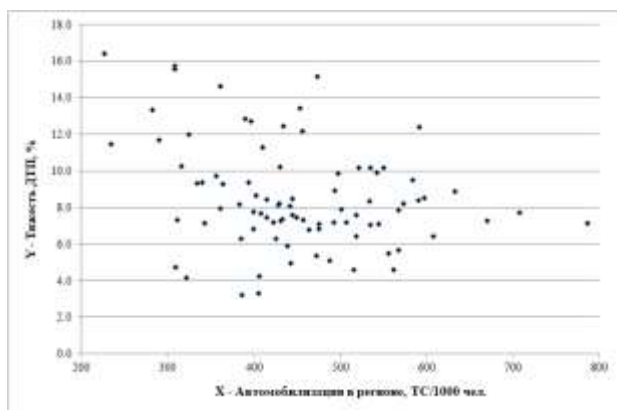
В процессе доказательства гипотезы, представленной во введении, необходимо установить на основе анализа данных 2024 г. [2] общий вид зависимости и параметры модели зависимости  $\text{Тяж ДТП}_{\text{регион 2024}} = f(A_{\text{регион РФ-2024}})$ .

### Результаты

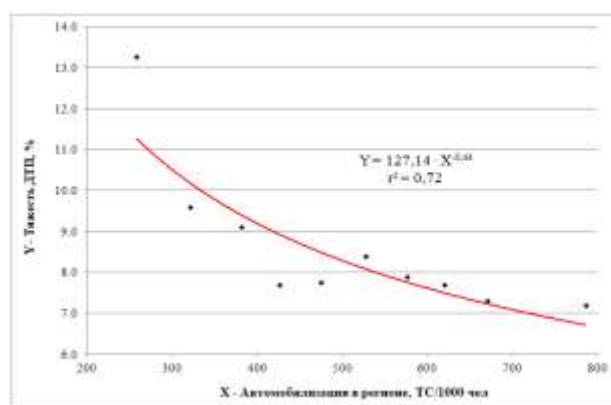
С учетом отчетных данных о региональной дорожно-транспортной аварийности (2024), полученных на сайте ГИБДД МВД РФ [2], были рассчитаны фактические значения показателей Тяжесть ДТП  $\text{Тяж ДТП}$  и Автомобилизация  $A$ , характерных для всех 85 субъектов Российской Федерации.

Фрагмент (в отношении регионов Центрального Федерального округа) необходимых для построения зависимости  $\text{Тяж ДТП}_{\text{регион 2024}} = f(A_{\text{регион РФ-2024}})$  представлен в таблице 2. Аналогичные данные были получены и для других региональных систем обеспечения БДД.

На рисунке 1 представлены два варианта искомой зависимости – по всем 85 экспериментальным точкам и по результатам усреднения экспериментальных данных  $\text{Тяж ДТП}_{\text{регион 2024}}$  по интервалам показателя  $A_{\text{регион РФ-2024}}$ .



а



б

**Рисунок 1 – Зависимость  $\text{Тяж ДТП}_{\text{регион 2024}} = f(A_{\text{регион РФ-2024}})$ : а - вся совокупность экспериментальных данных; б - по результатам усреднения экспериментальных данных по интервалам**

Зависимость рис. 1Б можно рассматривать и как кусочно-линейную [6] (рис. 2). Зачастую использование кусочно-линейной модели с целью формализации исследуемой зависимости более адекватно с позиций логики формирования физического процесса.

Пожалуй, форма кусочно-линейная форма [6] зависимости  $\text{Тяж ДТП}_{\text{регион 2024}} = f(A_{\text{регион РФ-2024}})$  описывает изучаемую статистическую связь более наглядно. При относительно высоких уровнях региональной автомобилизации  $A_{\text{регион.}}$  (т.е. превосходящих уровень общероссийской автомобилизации, равный  $A_{\text{РФ-2024}} = 441 \text{ ТС/1000 чел.}$ ) влияние автомобилизации  $A$  на Тяжесть ДТП  $\text{Тяж ДТП}$  значительно снижается и переходит практически на стационарный уровень. В условиях относительно низкой (в сравнении с общероссийским уровнем) автомо-

билизации (при  $A = [226; 360]$ ) влияние региональной автомобилизации на Тяжесть ДТП весьма велико. Причины этого будут рассмотрены чуть ниже.

Таблица 2 - Фрагмент данных (для регионов Центрального Федерального округа), использованных при построении модели  $Тяж_{ДТП\ регион\ 2024} = f(A_{\text{регион РФ-2024}})$

Регион ЦФО РФ	Население региона РФ (2024), чел.	Парк ТС региона (2024), ед.	Число погибших в ДТП (2024), чел.	Число раненых в ДТП (2024), чел.	Число пострадавших в ДТП (2024), чел.	Тяжесть ДТП $Тяж_{ДТП}$ , % погибших в числе пострадавших	Автомобилизация, ТС/1000 чел.
Белгородская область	1500659	643586	178	1555	1733	10,3	429
Брянская область	1142404	351298	109	580	689	15,8	308
Владимирская область	1309942	521795	182	2458	2640	6,9	398
Воронежская область	2273417	1128358	366	3322	3688	9,9	496
Ивановская область	905900	468583	91	1312	1403	6,5	517
Калужская область	1068410	408142	126	1406	1532	8,2	382
Костромская область	566266	266929	68	1190	1258	5,4	471
Курская область	1060892	452925	139	1565	1704	8,2	427
Липецкая область	1116265	613545	163	1433	1596	10,2	550
г. Москва	13149803	5313123	346	9920	10266	3,4	404
Московская область	8651260	3422957	649	4434	5083	12,8	396
Орловская область	692486	328201	65	847	912	7,1	474
Рязанская область	1082231	576624	182	1983	2165	8,4	533
Смоленская область	863987	307451	112	1036	1148	9,8	356
Тамбовская область	956292	547741	130	1444	1574	8,3	573
Тверская область	1199747	679246	151	1764	1915	7,9	566
Тульская область	1471140	786120	162	2118	2280	7,1	534
Ярославская область	1187558	508256	161	1792	1953	8,2	428

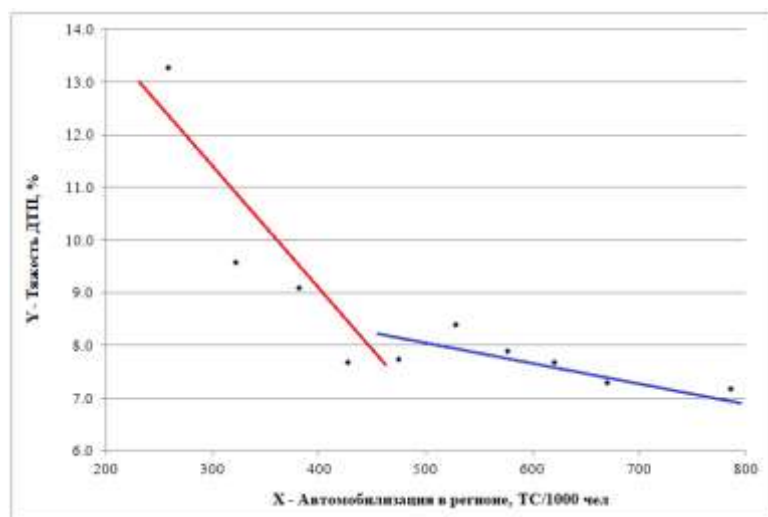


Рисунок 2 – Кусочно-линейная форма представления зависимости  $Тяж_{ДТП\ регион\ 2024} = f(A_{\text{регион РФ-2024}})$

### Обсуждение

Очень низкий уровень автомобилизации ( $A < 300$  ТС/1000 чел.) характерен для четырех российских регионов – Республики Ингушетия ( $A = 226$  ТС/1000 чел.), Республики Тыва ( $A = 233$  ТС/1000 чел.), Карачаево-Черкесской Республики ( $A = 282$  ТС/1000 чел.), Республики Дагестан ( $A = 289$  ТС/1000 чел.). В этих национальных регионах зафиксированы максимально высокие значения Тяжести ДТП. В Республике Ингушетия  $Тяж_{ДТП} = 16,5\%$ ; в Республике Тыва  $Тяж_{ДТП} = 11,5\%$ ; в Карачаево-Черкесской Республике  $Тяж_{ДТП} = 13,4\%$ ; в Республике Дагестан  $Тяж_{ДТП} = 11,8\%$ . Усреднение этих данных показало, что для при

усредненной автомобилизации  $A = 258$  ТС/1000 чел. усредненная Тяжесть ДТП составляет  $Тяж_{ДТП} = 13,3 \%$ .

Для других регионов РФ характерны как более высокие уровни автомобилизации  $A$ , так и более низкие уровни Тяжести ДТП. Однако с учетом достаточно широкой вариативности данных как по  $A$ , так и по  $Тяж_{ДТП}$  также можно отследить обратную связь между  $Тяж_{ДТП}$  и  $A$ . Так, зависимость  $Тяж_{ДТП \text{ регион } 2024} = f(A_{\text{регион РФ-2024}})$ , построенная на данных, характерных для регионов Центрального Федерального округа (табл. 2), представлена на рис. 3.

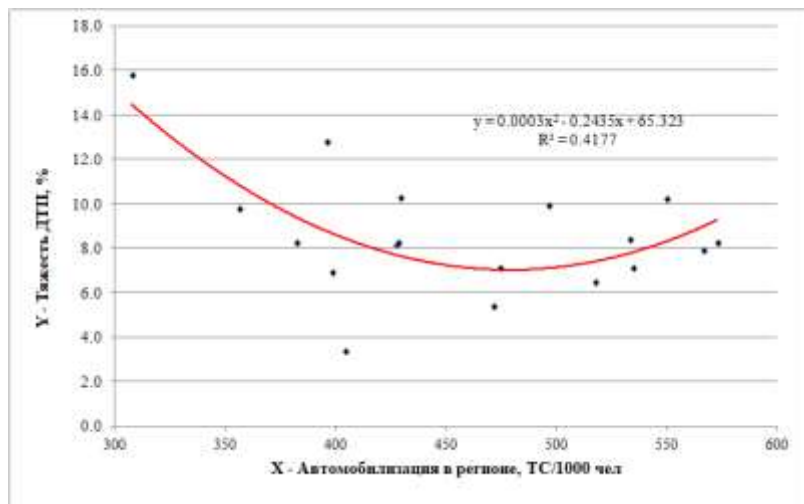


Рисунок 3 – Вариант зависимости  $Тяж_{ДТП \text{ ЦФО } 2024} = f(A_{\text{ЦФО } 2024})$  для 18 регионов Центрального федерального округа

Максимально высокий уровень Тяжести ДТП ( $Тяж_{ДТП} = 15,8$  погибших в ДТП/100 тыс. чел.) характерен для региональной системы обеспечения БДД Брянской области, уровень автомобилизации которой достаточно низкий ( $A = 308$  ТС/1000 чел.). Исключив из рассмотрения экспериментальную точку, соответствующую г. Москва, можно сделать вывод о переходе зависимости  $Тяж_{ДТП \text{ регион ЦФО } 2024} = f(A_{\text{регион ЦФО-2024}})$  в относительно стационарный режим начиная с уровня автомобилизации  $A \geq 440$  ТС/1000 чел. Таким образом, исследовательские результаты масштабируются при изменении масштаба исследуемой системы. Итак, статистическая связь между уровнем региональной автомобилизации  $A_{\text{регион РФ-2024}}$  и общесистемным для региона уровнем Тяжести ДТП  $Тяж_{ДТП \text{ 2024}}$  существует и, скорее, описывается кусочно-линейной моделью [6]. Начиная с уровней  $A \geq 440$  ТС/1000 чел влияние на автомобилизации  $A$  на  $Тяж_{ДТП}$  малозначительно; при низких уровнях региональной автомобилизации  $A \leq 440$  ТС/1000 чел это влияние весьма значительно и является обратным.

Рассуждения о причинах того, что с низкой автомобилизацией связан высокий уровень тяжести ДТП в основном могут быть сведены к объяснению этого феномена, ранее представленного в статьях [7-8] одного из авторов данной статьи. В частности, установлено, что объективно существует цепочка причинно-следственных связей между благосостоянием людей и уровнем и особенностями проявления автотранспортной аварийности. Эта цепочка может быть описана как (1) [7]:

«Уровень развития общественных институтов – Качество жизни населения – Обеспеченность благами и бытовое дружелюбие – Экономическое благосостояние населения – Владение и использование транспортных средств с высоким уровнем активной, пассивной и послеаварийной безопасности – Транспортная культура – Сохранение жизни потерпевшего по факту ДТП – Показатель аварийности, оценивающий вероятность гибели в ДТП среднестатистического гражданина страны – Тяжесть ДТП» (3)

С учетом особенностей (рис. 2) кусочно-линейной формы зависимости  $Тяж_{ДТП_{\text{регион}} 2024} = f(A_{\text{регион РФ-2024}})$ , пожалуй, можно допустить, что при достижении определенного уровня качества жизни, выражающегося в нашем случае в форме возможности для семьи приобрести и эксплуатировать автомобиль, изменяется общее отношение к жизни, понимание ее ценности, формируется бытовое дружелюбие и повышается уровень транспортной культуры. Все это ведет к соблюдению требований скоростного режима, росту качества выполнения требований Правил дорожного движения, и, как следствие общему повышению БДД. Тяжесть ДТП – один из важнейших относительных показателей дорожно-транспортной аварийности – объективно связан с БДД логической связью. При общем повышении БДД Тяжесть ДТП снижается. Аналогичные выводы, но на основе других исходных данных, были сделаны многократно самыми разными авторами [9-16].

### Выводы

Резюмируя, отметим следующие основные выводы.

1. Для России характерно широкое разнообразие как показателей дорожно-транспортной аварийности, так и уровня развития региональных транспортных систем. Уровень региональной автомобилизации  $A_{\text{регион РФ-2024}}$  в регионах Российской Федерации в 2024 г. различался почти в 3,5 раза. Тяжесть ДТП  $Тяж_{ДТП_{\text{регион РФ-2024}}}$  в субъектах Российской Федерации в 2024 г. варьировал в диапазоне значений  $Тяж_{ДТП_{\text{регион РФ-2024}}} = [3,3; 16,5]$ .

2. Установлено, что для зависимости  $Тяж_{ДТП_{\text{регион}} 2024} = f(A_{\text{регион РФ-2024}})$  возможны варианты описания как степенной, так и кусочно-линейной моделями. При повышении уровня региональной автомобилизации Тяжесть ДТП снижается. Особенно интенсивно этот процесс протекает до уровня автомобилизации, равного среднероссийскому. Далее фиксируется незначительное изменение Тяжести ДТП.

3. Этот вывод может масштабироваться и распространяться не только на суперсистему «Российская Федерация, состоящая из 85 субъектов», но и на отдельный Федеральный округ. Например, для Центрального Федерального округа это иллюстрируется высоким уровнем Тяжести ДТП в Брянской области при низком уровне региональной автомобилизации.

4. Установленный тренд объясняется тем, что автомобилизация – один из индикаторов общего качества жизни граждан страны. При повышении качества жизни людей изменяется их общее отношение к жизни, растет ее ценность, трансформируются поведенческие реакции. В сфере БДД это выражается в повышении качества соблюдения требований Правил дорожного движения и снижении уровня дорожно-транспортных рисков.

5. Таким образом, стремление к достижению целевой задачи Стратегии БДД РФ [1] во многом зависит от желания государства и наличия возможностей повышения общего качества жизни россиян и должно обеспечиваться в первую очередь посредством повышения их экономического благосостояния и его трансформации в обеспеченность благами и бытовое дружелюбие. Данная задача является чрезвычайно ресурсоемкой, но, очевидно, это единственный способ достичь целевые установки Стратегии БДД к 2030 г. В целом, анализируя временные ряды (2000-2025 гг.) изменения основных показателей дорожно-транспортной аварийности в России, можно утверждать, что данная задача медленно, но достаточно устойчиво решается.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Стратегия безопасности дорожного движения в Российской Федерации на 2018-2024 гг.: Распоряжение Правительства РФ от 8.01.2018 г. № 1-р.
2. Показатели состояния БДД: Официальный сайт ГИБДД МВД РФ [Электронный ресурс]. URL: <https://stat.gibdd.ru/>.
3. Евтюков С.А., Васильев Я.В. Экспертиза ДТП: Справочник. Санкт-Петербург: ДНК. 2006. 536 с.
4. Евтюков С.А., Васильев Я.В. Дорожно-транспортные происшествия: расследование, реконструкция, экспертиза. Санкт-Петербург: ДНК. 2008. 392 с.
5. Дорожно-транспортная аварийность в Российской Федерации в 2023 году. Информационно-аналитический обзор. М.: ФКУ «НЦ БДД МВД России». 2024. 154 с.
6. Кусочно-линейная функция // Экономико-математический словарь: Словарь современной экономической науки. М.: Дело. Л.И. Лопатников. 2003. 520 с.



7. Петров А.И. Автотранспортная аварийность как идентификатор качества жизни граждан // Экономические и социальные перемены: факты, тенденции, прогноз. 2016. №3(45). С. 154-172.
8. Петров А.И., Колесов В.И. Дорожно-транспортная аварийность в России: основные социально-экономические факторы ее формирования и пространственно-временные особенности // Экономические и социальные перемены: факты, тенденции, прогноз. 2021. Т. 14. №1. С. 199-220.
9. Ешуткин Д.Н., Кулев М.В. Анализ проблем экологической и дорожной безопасности автотранспортных средств в России // Мир транспорта и технологических машин. 2009. №3(26). С. 79-82.
10. Novikov A., Novikov I., Shevtsova A. Modeling of traffic-light signalization depending on the quality of traffic flow in the city // Journal of applied engineering science. 2019. Vol. 17. №2. P. 175-181.
11. Новиков А.Н., Новиков И.А., Шевцова А.Г. Современная оценка проблемы безопасности дорожного движения. Белгород: Белгородский госуд. технологич. университет им. В.Г. Шухова. 2021. 108 с.
12. Новиков А.Н., Мирошников Е.В., Кулев А.В., Кулев М.В. Повышение безопасности дорожного движения на основе интеллектуальных транспортных систем // Мир транспорта и технологических машин. 2022. №4-1(79). С. 86-93.
13. Новиков А.Н., Шевцова А.Г. Безопасное и эффективное управление транспортными потоками в городской транспортной системе. М: Академия. 2022. 205 с.
14. Кравченко П.А. Организация и безопасность дорожного движения в больших городах // Наука и техника в дорожной отрасли. 2013. №1(64). С. 1-2.
15. Zhankaziev S.V., Vorobyev A.I., Morozov D.Y., Novikov A.N., Kulev A.V. Efficiency of operation and functioning of the system of an indirect transport flow regulation and control // International journal of applied engineering research. 2017. Vol. 12. №13. P. 3645-3652.
16. Morozov V., Petrov A.I., Shepelev V., Balfaqih M. Ideology of Urban Road Transport Chaos and Accident Risk Management for Sustainable Transport Systems // Sustainability. 2024. Vol. 16(6). Pp. 2596. doi: 10.3390/su16062596.

**Петров Артур Игоревич**

Тюменский индустриальный университет

Адрес: 625027, Россия, г. Тюмень, ул. Мельникайте, 72

К.т.н., доцент кафедры эксплуатации автомобильного транспорта

E-mail: artigpetrov@yandex.ru

**Евтюков Сергей Аркадьевич**

Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет

Адрес: 190005, Россия, г. Санкт-Петербург, 2-я Красноармейская ул., д. 4

Д.т.н., директор института безопасности дорожного движения.

E-mail: s.a.evt@mail.ru

A.I. PETROV, S.A. EVTUKOV

**SEVERITY OF ROAD TRAFFIC ACCIDENTS AS A DERIVATIVE  
OF THE MOTORIZATION OF RUSSIAN REGIONS (2024)  
AND THE QUALITY OF LIFE OF THE POPULATION**

**Abstract.** The article presents the results of a study of the statistical relationship between the level of regional motorization and the most important relative indicator of road traffic accidents rate, the severity of road accidents. It was found that in conditions of low motorization, the survival rate of victims of road accidents is significantly lower than in regions with high motorization. The high severity of road accidents is typical for national regions with a low level of quality of life, which also affects the level of motorization. Obviously, it is the quality of life of the population that determines the qualitative side of the processes of road traffic accident formation. As a result, road safety largely depends on the quality of life of the country's population.

**Keywords:** Road safety, road traffic accidents, Russian regions, motorization, Severity of accidents, statistical relationship, quality of life

**BIBLIOGRAPHY**

1. Strategiya bezopasnosti dorozhnogo dvizheniya v Rossiyskoy Federatsii na 2018-2024 gg.: Rasporyazhenie

Pravitel'stva RF ot 8.01.2018 g. № 1-r.

2. Pokazateli sostoyaniya BDD: Ofitsial'nyy sayt GIBDD MVD RF [Elektronnyy resurs]. URL: <https://stat.gibdd.ru/>.

3. Evtyukov S.A., Vasil'ev YA.V. Ekspertiza DTP: Spravochnik. Sankt-Peterburg: DNK. 2006. 536 s.

4. Evtyukov S.A., Vasil'ev YA.V. Dorozhno-transportnye proisshestiya: rassledovanie, rekonstruktsiya, ekspertiza. Sankt-Peterburg: DNK. 2008. 392 s.

5. Dorozhno-transportnaya avariynost' v Rossiyskoy Federatsii v 2023 godu. Informatsionno-analiticheskiy obzor. M.: FKU «NTS BDD MVD Rossii». 2024. 154 s.

6. Kusochno-lineynaya funktsiya // Ekonomiko-matematicheskiy slovar': Slovar' sovremennoy ekonomicheskoy nauki. M.: Delo. L.I. Lopatnikov. 2003. 520 s.

7. Petrov A.I. Avtotransportnaya avariynost' kak identifikator kachestva zhizni grazhdan // Ekonomicheskie i sotsial'nye peremeny: fakty, tendentsii, prognoz. 2016. №3(45). S. 154-172.

8. Petrov A.I., Kolesov V.I. Dorozhno-transportnaya avariynost' v Rossii: osnovnye sotsial'no-ekonomicheskie faktory ee formirovaniya i prostranstvenno-vremennye osobennosti // Ekonomicheskie i sotsial'nye peremeny: fakty, tendentsii, prognoz. 2021. T. 14. №1. S. 199-220.

9. Eshutkin D.N., Kulev M.V. Analiz problem ekologicheskoy i dorozhnoy bezopasnosti avtotransportnykh sredstv v Rossii // Mir transporta i tekhnologicheskikh mashin. 2009. №3(26). S. 79-82.

10. Novikov A., Novikov I., Shevtsova A. Modeling of traffic-light signalization depending on the quality of traffic flow in the city // Journal of applied engineering science. 2019. Vol. 17. №2. P. 175-181.

11. Novikov A.N., Novikov I.A., Shevtsova A.G. Sovremennaya otsenka problemy bezopasnosti dorozhnogo dvizheniya. Belgorod: Belgorodskiy gosud. tekhnologich. universitet im. V.G. Shukhova. 2021. 108 s.

12. Novikov A.N., Miroshnikov E.V., Kulev A.V., Kulev M.V. Povyshenie bezopasnosti dorozhnogo dvizheniya na osnove intellektual'nykh transportnykh sistem // Mir transporta i tekhnologicheskikh mashin. 2022. №4-1(79). S. 86-93.

13. Novikov A.N., Shevtsova A.G. Bezopasnoe i effektivnoe upravlenie transportnymi potokami v go-rodskoy transportnoy sisteme. M: Akademiya. 2022. 205 s.

14. Kravchenko P.A. Organizatsiya i bezopasnost' dorozhnogo dvizheniya v bol'shikh gorodakh // Nauka i tekhnika v dorozhnoy otrasli. 2013. №1(64). S. 1-2.

15. Zhankaziev S.V., Vorobyev A.I., Morozov D.Y., Novikov A.N., Kulev A.V. Efficiency of operation and functioning of the system of an indirect transport flow regulation and control // International journal of applied engineering research. 2017. Vol. 12. №13. P. 3645-3652.

16. Morozov V., Petrov A.I., Shepelev V., Balfaqih M. Ideology of Urban Road Transport Chaos and Accident Risk Management for Sustainable Transport Systems // Sustainability. 2024. Vol. 16(6). Pp. 2596. doi: 10.3390/su16062596.

**Petrov Artur Igorevich**

Industrial University of Tyumen

Address: 625027, Russia, Tyumen, Mel'nikayte str., 72

Candidate of Technical Sciences

E-mail: artigpetrov@yandex.ru

**Evtukov Sergey Arkadievich**

Saint Petersburg State University of Architecture and Civil Engineering

Address: 190005, Russia, St. Petersburg, 2nd Krasnoarmeyskaya St., 4

Doctor of Technical Sciences

E-mail: s.a.evt@mail.ru

Е.А. ЧЕБОТАРЕВА, Е.В. РЯЗАНОВА, С.М. НАУРУЗБАЕВ

## ЦИФРОВЫЕ И ИНФОРМАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ УПРАВЛЕНИЯ ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНЫМИ ПРИПОРТОВЫМИ ТРАНСПОРТНО- ТЕХНОЛОГИЧЕСКИМИ СИСТЕМАМИ

**Аннотация.** В исследовании проводится обзор опыта развития цифровых и информационных систем управления грузовыми железнодорожными перевозками в адрес морских портов. Выявлены области использования технологий искусственного интеллекта в задачах управления подводом поездов на припортовые станции. Предложена концепция использования цифрового двойника железнодорожного участка припортовой железной дороги с целью анализа параметров пропуска поездов по железнодорожному участку. Создана экспериментальная площадка, позволяющая для каждого поезда отслеживать скоростные характеристики пропуска по участку при ручном и нейросетевом управлении. Приведена методология разработки плана подвода поездов на базе существующих автоматизированных систем управления и с применением технологий искусственного интеллекта. Программа предназначена для создания подготовительной базы данных для обучения искусственной нейронной сети в задаче управления подводом поездов на припортовые станции.

**Ключевые слова:** интеллектуальные технологии, цифровизация, автоматизированные системы управления, транспортное производство, железнодорожные перевозки, морские порты

### Введение

Наибольшая доля грузов в морские порты Российской Федерации доставляется железнодорожным видом транспорта [1]. Организация транспортного производства в припортовых транспортно-технологических системах выстраивается на технологических процессах и информационных технологиях в системе «железная дорога - порт». Планирование перевозок грузов в железнодорожно-морском сообщении – одна из важнейших функций в системе распределения продукции. Планирование позволяет предвидеть то, как будет развиваться система перевозок грузов в будущем, более рационально использовать и распределять ресурсы, повышать качество транспортных услуг, повышать устойчивость транспортных предприятий и избегать риски, эффективнее использовать взаимодействующие виды транспорта, контролировать действия поставщиков и потребителей, контрагентов; совершенствовать контроль за транспортировкой и перевалкой грузов. Планирование осуществляется на стратегическом, текущем и оперативном уровне. Именно для указанных уровней формируются подзадачи в действующих автоматизированных системах управления перевозками на железнодорожном транспорте.

Задачей управления работой различных видов транспорта является эффективная деятельность железнодорожного транспорта и морского транспорта на базе высоких характеристик использования технических средств и подвижного состава [2]. Поэтому вопросы автоматизации, интеллектуализации и цифровизации транспортного производства при взаимодействии видов транспорта всегда остаются актуальными. Большой вклад в развитие теории и практики моделирования сложных систем, информационного обеспечения перевозок грузов и автоматизации управления перевозочного процесса на транспорте внесли ученые А.Э. Александров, Г.И. Белявский, А.Ф. Бородин, Н.П. Бусленко, В.А. Буянов, И.А. Гильденгорн, С.Ю. Елисеев, Е.Г. Жданова, В.Н. Иванченко, Н.Д. Иловайский, А.А. Козлов, В.С. Колокольников, В.А. Кудрявцев, Д.А. Ломаш, Н.Н. Ляхах, Э.А. Мамаев, А.С. Мишарин, О.В. Осокин, А.Т. Осьминин, А.П. Петров, Ю.И. Рыжиков, Б.Я. Советов, В.Н. Томашевский, Л.П.

Тулупов, Е.М. Ульяницкий, С.А. Яковлев и др. Среди иностранных исследователей отметим Дж. Форрестера, Р. Шеннона, Б. Шмидта, Т.Дж. Шрайбера и др. Представляет значительные интерес работа по применению технологий искусственного интеллекта на морском транспорте [3].

### Материал и методы

Автоматизированные системы управления грузовыми железнодорожными перевозками в направлении морских портов. Отметим сложность управления производственными процессами на железнодорожном транспорте, которая обусловлена значительным количеством управляемых объектов, многообразием связей между объектами и большим количеством индикаторов управления, неравномерностью распределения транспортной работы, разнородностью источников получения информации на больших территориях. Традиционно эксплуатируемые корпоративные информационные системы ОАО «РЖД» в области управления перевозочным процессом формировали поездную и вагонную модели (в частности, автоматизированная система управления процессами перевозок (АСОУП)). Отдельные автоматизированные системы (АС) ориентированы на выделенные функции и объекты управления. Например, АСУ РЖД включает более 600 интегрированных автоматизированных систем и клиентских приложений, однако гораздо меньшее количество из указанных систем используется в части базы для научных исследований и имеют возможность гибкой адаптации к изменяющимся условиям работы. Информационное обеспечение на полигонах железных дорог в направлении портов включает комплекс АС, позволяющих выполнять планирование и нормирование перевозочного процесса с согласованием объемов перевозок и перевалки грузов в морских портах, оперативное управление, ведение статистической отчетности. Одной из важных форм для оперативного и текущего планирования является план подвода поездов на припортовые станции, который формируется в ручном и автоматизированном режимах. Цель АС для припортовых железных дорог – увеличение объемов выгрузки в портах за счет оптимального использования портовой и железнодорожной инфраструктуры. Инновацией является модуль автоматического планирования подвода поездов на припортовые станции. Приведем пример эволюции информационного обеспечения в задачах управления грузовыми железнодорожными перевозками в адрес морских портов (табл. 1).

Таблица 1 – Эволюция информационного обеспечения в задачах управления грузовыми железнодорожными перевозками в адрес морских портов

Период, год	Изменения в информационной логистике
2013-2014	Создан единый интерфейс планирования подвода, внедрены и автоматизированы единые критерии оценки качества планирования на припортовых железных дорогах
2015-2016	Развитие АС Дорожная информационно-логистическая система. (ДИЛС) Разработаны и внедрены специальные отчетные формы для контроля перевозки и перевалки различных видов грузов, реализовано взаимодействие с другими системами для получения и передачи необходимых данных по условиям перевозки [4]
2017-2018	Разработан комплекс задач по управлению подводом поездов, следующих в адрес припортовых станций во взаимодействии с другими АС, подключение новых портовых операторов и других станций. Реализован алгоритм автоматизированного расчета плана подвода на основе многокритериальной оценки востребованности груза, рассчитанной с учетом данных, полученных от порта, реализован обмен данными с морскими портами, автоматизирован комплекс задач по работе с судовыми партиями
2019-2024	Развитие и опытная эксплуатация Динамической модели загрузки инфраструктуры (ДМЗИ), учет возможностей припортовой дороги и припортовых станций по переработке вагонопотоков

Таким образом анализ отечественного опыта развития информационного обеспечения в области управления железнодорожно-морскими перевозками позволяет выделить два основных блока задач. Первый связан с вопросами организации и планирования подвода по-

ездо- и вагонопотоков, второй – с задачами максимизации пропускной способности железнодорожных подходов в направлении морских портов.

Поэтому на следующем этапе исследования приведем основные положения авторской концепции развития интеллектуальных и цифровых технологий в транспортном производстве припортовых железных дорог по указанным блокам.

Концепция развития интеллектуальных и цифровых технологий в транспортном производстве припортовых железных дорог. В рамках программы «Цифровая железная дорога» внедряются технологии искусственного интеллекта [5]. При этом недостаточно исследований и разработок в области применения искусственной нейронной сети (ИНС) для управления перевозками на железнодорожном транспорте. Современные концепции управления производственными, технологическими и транспортными процессами базируются на использовании накопленной базы данных и знаний об эффективных траекториях их реализации, использовании передового опыта и компетенций для поиска и реализации креативных решений на базе цифровых технологий [6], включающих в себя создание цифровых двойников [7]. Железнодорожный транспорт один из наиболее продвинутых видов транспорта для реализации интеллектуальных цифровых решений в национальной транспортной системе [8], которая предпринимает активные действия по поиску и реализации интеллектуального управления перевозками.

Актуальность интенсификации развития искусственного интеллекта определена национальными стратегиями развития искусственного интеллекта, и в управлении перевозками на железнодорожном транспорте обусловлена рядом факторов, в числе которых:

- исчерпание резервов пропускных и провозных способностей на грузонапряженных участках и направлениях, включая подходы к припортовым станциям;
- необходимость обеспечения конкурентоспособности национальной экономики в мировом разделении труда за счет уменьшения транспортно-логистических издержек;
- сложность управления перевозочным процессом в условиях многоагентности, многокритериальности и влияния большого числа внешних и внутренних факторов, обусловленные первыми;
- потребность использования безлюдных и (или) малолюдных технологий управления, снижающие влияние человеческого фактора на принятие решения в условиях роста когнитивных связей в перевозочном процессе;
- большая загрузка транспортной инфраструктуры, вследствие оставления от движения грузовых поездов, которые снижают маневренность на станциях и усложняют организацию поездной работы на железнодорожных участках;
- необходимость поэтапной реализации цифровых технологий на железнодорожном транспорте, определенные стратегическими программными документами железнодорожного транспорта и другие.

Современные исследования по внедрению в системы управления перевозочным процессом железнодорожного транспорта искусственных нейронных сетей (ИНС) связаны с различными областями их применения. Большая их часть ориентирована на применение методов и технологий ИНС в задачах технического обслуживания подвижного состава.

Направления развития информационного обеспечения в задачах управления грузовыми железнодорожными перевозками в адрес морских портов приведены на рисунке 1.

В данном исследовании круг задач связан с реализацией нейросетей для управления перевозочным процессом на железнодорожных подходах к морским портам. В качестве объекта исследования выделим:

- участок железной дороги, включающим ряд станций и обозначим методические подходы к формализации объектов и процессов железнодорожного транспорта для разработки и внедрения интеллектуальных технологий управления перевозочным процессом.
- план подвода поездов на припортовые станции.



Рисунок 1 - Направления развития информационного обеспечения в задачах управления грузовыми железнодорожными перевозками в адрес морских портов

### Теория

Разработка цифрового двойника железнодорожного участка с применением нейросетевого управления движением поездов. За объект исследования взят реальный участок от станции Высочино до станции Тимашевская припортовой Северо-Кавказской железной дороги. Цифровой двойник данного участка представляет собой комплекс учебно-лабораторных тренажеров, а также дополнительных вспомогательных программных продуктов, которые объединены между собой по локально-вычислительной сети. Целью исследования является создание автоматизированных систем управления железнодорожными перевозками на базе разработки нейросетевого управления движением поездов, с применением математических моделей деятельности участка, построенных на базе его цифрового двойника, направленное на исследование механизмов увеличения пропускной способности участка железной дороги. При разработке мероприятий по усилению пропускной способности железнодорожных участков и направлений нужно учитывать, что управление железнодорожной инфраструктурой и перевозочным процессом на современном этапе носит характер «управление по состоянию», а изменяя параметры перевозочного процесса, такие как характеристики подвижного состава и инфраструктуры [9] или порядка пропуска поездов [10], можно управлять пропускной способностью железнодорожных направлений.

В компании ОАО «РЖД» развитие цифровых технологий предусмотрено научно-техническим проектом «Цифровая железная дорога». В рамках данного проекта выполняется ряд инновационных разработок, касающихся самых актуальных областей: технологии интернета вещей, больших данных, интеллектуальных систем, а также современных сетей передачи данных. В пределах программы «Цифровая железная дорога» также стали внедряться технологии искусственного интеллекта, среди которых следует выделить: интеллектуальное управление движением; системы предикативной аналитики [11]; интеллектуальные логистические системы [12]; распознавание объектов на основе нейросетей [13]; беспилотные транспортные средства [14], автоматизация и интеллектуализация мест работников станций и машинистов [15].

Искусственные нейронные сети (ИНС) – представляют собой модели, строящиеся аналогично естественным нейронным сетям головного мозга. Основной характерной чертой ИНС является способность к самообучению. Модель нейрона, как и его биологический аналог, имеет несколько входов и выходов. На каждом входе нейрона имеется вес. Вес действует как входной синаптический резистор. Чтобы вычислить, выдаст ли нейрон выходной сигнал, сначала необходимо рассчитать сумму произведений между каждым входом и синаптическим весом входа. Далее результат подается в функцию активации. Применение той или иной архитектуры ИНС зависит от конкретной практической задачи. Нейросети постоянно совершенствуются. Вместе с этим растет их точность. Если несколько лет назад результаты

работы нейросетей часто давали неудовлетворительные результаты, то сейчас они иногда превосходят результат работы классических алгоритмов. Вместе с тем растет и сложность нейросетей – растет количество слоев, усложняется архитектура. Нейросети требуют больших объемов данных для обучения и анализа, следовательно, и больших вычислительных мощностей.

Цифровой двойник (ЦД) – это точная модель физического объекта, которая поддерживается в рабочем состоянии во время выполнения и обновляется данными, собираемыми с устройств мониторинга в режиме реального времени. С точки зрения создания модели работы железнодорожного участка цифровой двойник – это динамичная и саморазвивающаяся виртуальная копия физических объектов и процессов, характеризующаяся двунаправленной бесперебойной связью, которая позволяет обмениваться данными в реальном времени между физическим и цифровым миром. С помощью технологии ЦД можно реализовать несколько сервисов (например, моделирование, мониторинг, прогнозирование). В исследовании реализуются следующие компоненты системы:

Имитационная модель поезда - учебно-лабораторные тренажерные комплексы подвижных составов (УЛТК), такие как: высокоскоростной электропоезд ЭВС2 «Сапсан» с дополнительным информационным выводом работы внутренних систем в реальном масштабе времени в процессе его работы, электропоезд ЭС1 «Ласточка», электровоз ЧС2Т, тепловоз 2ТЭ116; универсальный программный тренажер машиниста (Универсальное АРМ машиниста); модель имитации движения поездного состава (Поезд-Бот); сервер управления поездами-ботами (моделями, имитирующими движения подвижных составов);

2. Интерфейс управления деловой игрой (формирование тренировки (деловой игры) – выбор сценария деловой игры и участников: поезда, управляемые человеком и боты); тренажерный комплекс ДНЦ/ДСП, реализующий рабочие места дежурных по станции и поездных диспетчеров (рис. 2).



Рисунок 2 - Интерфейс пульта управления поездного диспетчера

3. Тренажер энергодиспетчера, реализующий имитацию рабочего места энергодиспетчера, а также модель инфраструктуры электроснабжения участка железной дороги;

4. База данных, в которой хранится топологическая структура участка, его инфраструктуры, а так же информация о поездах-ботах;

5. Нормативный график движения, график исполненного движения;

6. Сервер виртуальной железной дороги (ВЖД), в котором реализуются: построение



топологии участка железной дороги; создание графа электрической схемы участка железной дороги; модуль связи с имитационной моделью поезда; симулятор контроллера имитационной модели поезда; алгоритм поиска возможных маршрутов по станции; модуль связи с пультом ДНЦ и пультом ДСП; модуль связи с АРМ Энергодиспетчера; расчет напряжения на секциях электрической схемы участка железной дороги; устройства сигнализации, централизации и блокировки (СЦБ).

Формирование данных о состоянии железнодорожной станции осуществляется логированием каждого изменившего свое состояние объекта инфраструктуры или действию поездного диспетчера или дежурного по станции. Каждый объект имеет свои состояния и уникальные обозначения для идентификации его на всем полигоне. Логирование происходит в реальном масштабе времени в процессе деловой игры. Внедрение нейросетевого управления должно позволить облегчить работу диспетчерского аппарата и делегировать часть функций по принятию решений о пропуске поездов нейросети. С практической точки зрения очень важно, чтобы нейросетевое управление было оптимальным по отношению к заданному функционалу качества. При этом нейросеть должна обеспечить управление с учетом динамических ограничений в реальном масштабе времени, параметры которых не известны.

Методика проведения вычислительного эксперимента заключается в управлении движением поездов на реальном участке железной дороги в рамках учебно-лабораторного комплекса «Виртуальная железная дорога» (ВЖД). Решение такой задачи будет происходить на основе той информации, которую модель нейронной сети получает от системы комплекса ВЖД. Для полученных в результате нейросетевого управления пропуском поездов по железнодорожному участку графика исполненного движения производится оценка качества перевозочного процесса. Приведем пример анализа для исполненного графика движения поездов (рис. 3), полученного в результате нейросетевого управления пропуском поездов по участку.

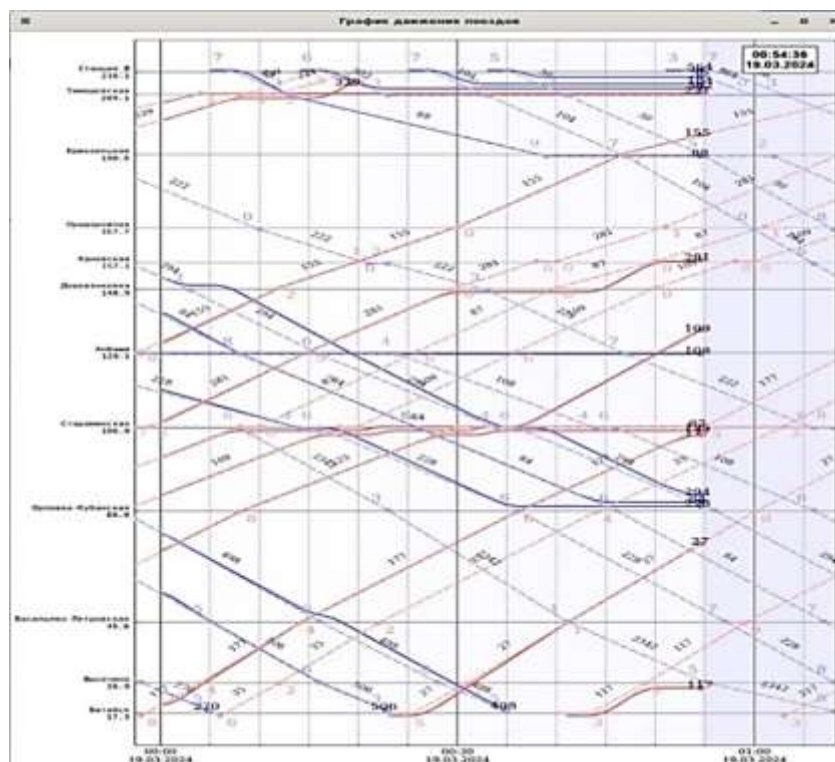


Рисунок 3 - Фрагмент исполненного графика движения при нейросетевом управлении пропуском поездов по участку

Развитие технологий искусственного интеллекта в задачах управления подводом поездов на припортовые станции. С учетом сложности поставленной задачи предложено в разработку программы включить 3 модуля.

Первый модуль (1-я нейросеть) позволяет осуществить генерацию данных с учетом возможных вероятностных характеристик по параметрам подвода поездов и судовых партий. Алгоритм формирует данные на основании теории надежности и вероятности отказов элементов транспортной сети. Генерация данных включает в себя информацию о составе поездов, времени хода до припортовой станции, номенклатуре, признаке отправки и статусе отправки (наличие вагонов с истекающим сроком доставки, договорных поездов и прочее) груза, что является необходимой базой для обучения нейросети (рис. 4).

Train ID	Cargo Types	Unloading Track	Time to Station	Initial Station	Train ID: 7FXUI Cargo Types: Ore Unloading Track: 6 Time to Station: 1.13 hours Initial Station: Station E
TIU5HK	Grain, Ore	5	1.01	Station C	
OFAGDU	Chemicals, Containers, Coal, Ore, W	2	1.01	Station C	
UWEZTL	Containers, Coal, Wood, Grain, Chen	8	1.04	Station B	
MONP4G	Grain, Containers	9	1.05	Station A	
EPONRM	Chemicals, Coal	4	1.06	Station C	
7FXUI	Ore	6	1.13	Station E	
4ZKCS1	Grain, Containers, Chemicals, Wood	3	1.14	Station B	
1N0XWA	Wood, Ore, Coal	9	1.14	Station E	
BHW8XC	Coal, Containers, Wood	1	1.2	Station D	
7QADGT	Grain, Coal, Wood	5	1.22	Station E	
MIKW8VE	Coal, Grain, Wood	4	1.25	Station B	
SXXJNU	Coal, Ore, Chemicals, Containers, Gr	4	1.29	Station E	
UBT3JS	Chemicals, Ore, Containers	6	1.33	Station E	
GTGVSM	Chemicals	2	1.35	Station E	
2C1LDC	Grain	5	1.38	Station D	
YYOYMB	Ore, Containers, Coal, Grain, Chemic	5	1.4	Station A	
L71HSJ	Ore, Containers, Wood, Grain, Coal	9	1.41	Station C	
KVZMRL	Coal, Chemicals, Grain	1	1.41	Station A	

*Рисунок 4 - Формирование данные для первого модуля программы*

Второй модуль (2-ая нейросеть) на основании сгенерированных данных, приближенных к реальной поездной обстановке, определяет очередность подвода поездов с учетом логистических принципов управления.

Третий модуль формирует план подвода для диспетчерского аппарата с учетом погодных условий, востребованности вагонов на терминалах порта и других параметров.

### **Результаты и обсуждение**

Современные концепции управления производственными, технологическими и транспортными процессами базируются на использовании накопленной базы данных и знаний об эффективных траекториях их реализации, использовании передового опыта и компетенций для поиска и реализации креативных решений на базе цифровых технологий. В условиях высокой ресурсоемкости развития инфраструктуры железнодорожного транспорта, внедрение цифровых и интеллектуальных технологий управления железнодорожным транспортом становится вполне актуальным и востребованным. В исследовании приведена концепция развития информационного инструментария для управления транспортным производством припортовых железных дорог, включающая создание цифровых двойников железнодорожных участков и развития технологий искусственного интеллекта. Моделирование производится в учебно-лабораторном комплексе «Виртуальная железная дорога», включающей все элементы управления движения поездов в реальном времени с привлечением диспетчеров, дежурных станций, машинистов-поездов и других работников в системе управления перевозками.

В данном исследовании произведен сбор и анализ 1070 графиков исполненного движения с применением нейросетевого управления пропуском поездов с учетом данных циф-

рового двойника железнодорожного участка. Анализ графиков исполненного движения при нейросетевом управлении показал, что модель нуждается в доработках и обучении принятия решений по пропуску поездов. Учитывая сторонний опыт создания подобных сетей, данная разработка на сегодняшний день показывает достаточно хорошие результаты.

Представленный подход обеспечивает апробацию модели интеллектуального управления без экспериментов на реальном полигоне железной дороги с использованием корпоративных информационных систем, которые требуют использования сертифицированных программных продуктов

### **Выводы**

Концепция использования цифрового двойника железнодорожного участка для изучения проблем развития технологий искусственного интеллекта при организации транспортного производства показала свою эффективность, а в части анализа параметров пропуска поездов по железнодорожному участку создана экспериментальная площадка, позволяющая для каждого поезда отслеживать скоростные характеристики пропуска по участку при ручном и нейросетевом управлении. Программа, предназначенная для создания подготовительной базы данных для обучения искусственной нейронной сети (ИНС) в задаче управления подводом поездов на припортовые станции, направленной на оптимизацию и улучшение пропуска вагонопотоков в адрес грузовых фронтов морских операторов с учетом востребованности грузов, эксплуатационной обстановки на железнодорожном направлении, на припортовой станции и грузовых фронтах, а также других внешних и внутренних факторов, также показала эффективность. Результаты, полученные с помощью алгоритма генерации, заложенного в программу, обеспечивают получение данных сходных с реальными, а также формирование обучения на основе данных, содержащих ошибку, с целью получения алгоритма фильтрации входящего трафика и исправления аномалий, вызванных отказами или сбоями системы. Может использоваться для проведения вычислительных экспериментов в рамках испытания прототипа нейросетевой системы управления железнодорожным участком и станцией при различных эксплуатационных режимах и параметрах надежности работы железнодорожных объектов.

### **Благодарности**

Публикация осуществлена в рамках реализации гранта ОАО «РЖД» на развитие научно-педагогических школ в области железнодорожного транспорта.

### **СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ**

1. Соколов Ю.И., Коцоева В.С. Экономические проблемы сложившегося распределения грузопотоков по видам транспорта // Транспортное дело России. 2023. №3. С. 161-163. DOI 10.52375/20728689\_2023\_3\_161. EDN MBRCRG.
2. Chislov O.N., Bezusov D. Actualization of technological interaction managing methods in portside transport systems // E3S Web of Conferences. Vol. 389. 05033DOI 10.1051/e3sconf/202338905033.
3. Farzadmehr Mehran AI-powered solutions assessment in port and maritime sector // A dissertation submitted. Antwerp, Belgium. 2025. P. 191.
4. Zubkov V.N., Ryazanova E.V., Anoshkin K.V. Proposals for the Development of the Road Information Logistics System (RILS) // Proceedings-2022: International Russian Automation Conference, RusAutoCon. 2022. P. 527-536. DOI 10.1109/RusAutoCon54946.2022.9896277.
5. Дривольская Н.А. Цифровая трансформация логистических процессов: Преимущества и недостатки в современных экономических условиях // Наука и образование транспорту. 2023. №1. С. 145-148. EDN MVCSSI.
6. Василенко В.Л., Круглова А.И., Алексашина Е.И., Негреева В.В., Пластунова С.А. Основные тренды цифровой логистики // Научный журнал НИУ ИТМО. Серия: экономика и экологический менеджмент. 2020. №1. С. 69-78. DOI 10.17586/2310-1172-2020-13-1-69-78.
7. Столяров А.Д., Файзуллина А.М., Абрамов В.И. Цифровая трансформация логистики предприятия с использованием цифровых двойников // BENEFICIUM. 2024. №2(51). С. 23-31. DOI: 10.34680/BENEFICIUM.2024.2(51). С. 23-31.
8. Косарев А.Б., Римская О.Н., Анохов И.В. Опережающее развитие железнодорожного транспорта с помощью цифровых технологий // Инновационные транспортные системы и технологии. 2021. Т. 7. №4. С. 90-105. DOI 10.17816/transsyst20217490-105. EDN TIQTRJ.

9. Kendra M., Babin M., Barta D. Changes of the Infrastructure and Operation Parameters of a Railway Line and Their Impact to the Track Capacity and the Volume of Transported Goods *Procedia // Social and Behavioral Sciences*. Vol. 48. P. 743-752. doi:10.1016/j.sbspro.2012.06.105.
10. Ljubaj Iv., Josip T. Mlinaric The Possibility of Utilising Maximum Capacity of the Double-Track Railways By Using Innovative Traffic Organisation // *Transportation Research Procedia*. Vol. 40. P. 346-353. doi: 0.1016/j.trpro.2019.07.051.
11. Kolesnikov M., Lyabakh N., Bakalov M., Kirill Godovany. Development of Digital, Intelligent Technologies for Analysis and Synthesis of Complex Systems // *Proceedings-2023: International Russian Automation Conference (RusAutoCon)*. P. 854-859. DOI 10.1109/RusAutoCon58002.2023.10272963.
12. Guda A.N., Ilicheva V.V., Chislov O.N. Executable logic prototypes of systems engineering complexes and processes on railway transport // *Advances in Intelligent Systems and Computing*. P. 161-170.
13. Mamaev E.A., Ignatieva O.V., Bulavin Yu.P. [et al.]. Neural Network Control of the Transportation Process in Railway Transport: Problems and Future Tasks // *Lecture Notes in Networks and Systems. LNNS*. 2024. Vol. 1209. P. 91-107. DOI 10.1007/978-3-031-77688-5\_10.
14. Lyashchenko Z.V., Ignatieva O.V., Lyashchenko A.M., Glazunov D.V. Mechanism for Automating the Workstation of a Rolling Stock Driver // *Journal of Machinery Manufacture and Reliability*. 2023. Vol. 52. P. S62-S67. DOI 10.1134/S1052618823090054.
15. Quentin Gadmer et al. Automation: A framework for authority transfers in a remote environment // *IFAC-Papers OnLine*. 2022. P. 85-90.

**Чеботарева Евгения Андреевна**

Ростовский государственный университет путей сообщения (РГУПС)

Адрес: 344038 г. Ростов-на-Дону, пл. Ростовского стрелкового полка народного ополчения, 2

К.т.н., доцент, заведующая кафедрой

E-mail: abrosimova@yandex.ru

**Рязанова Екатерина Владимировна**

Ростовский государственный университет путей сообщения (РГУПС)

Адрес: 344038 г. Ростов-на-Дону, пл. Ростовского стрелкового полка народного ополчения, 2

К.т.н., доцент, доцент

E-mail: ekaryazanova@gmail.com

**Наурузбаев Сабир Мансурович**

Ростовский государственный университет путей сообщения (РГУПС)

Адрес: 344038 г. Ростов-на-Дону, пл. Ростовского стрелкового полка народного ополчения, 2

Аспирант

E-mail: sabir.nauruzbayev@mail.ru

---

E.A. CHEBOTAREVA, E.V. RYAZANOVA, S.M. NAURUZBAEV**DIGITAL AND INFORMATION TECHNOLOGIES FOR MANAGING  
RAILWAY PORT TRANSPORT AND TECHNOLOGICAL SYSTEMS**

**Abstract.** *The study provides an overview of the experience in the development of digital and information management systems for freight rail transportation to seaports. The areas of using artificial intelligence technologies in the tasks of controlling the supply of trains to port stations have been identified. The concept of using a digital twin of a railway section of a port railway is proposed in order to analyze the parameters of passing trains along the railway section. An experimental platform has been created that allows each train to track the speed characteristics of the passage along the section with manual and neural network control. A methodology of compilation a train supply plan based on existing automated control systems and using artificial intelligence technologies is presented. The program is designed to create a preparatory database for training an artificial neural network in the task of controlling the supply of trains to port stations.*

**Keywords:** *intelligent technologies, digitalization, automated control systems, transport production, rail transportation, sea ports*

**Acknowledgments**

The publication was carried out within the framework of the implementation of the grant of JSC Russian Railways for the development of scientific and pedagogical schools in the field of railway transport.

## BIBLIOGRAPHY

1. Sokolov YU.I., Kotsoeva V.S. Ekonomicheskie problemy slozhivshegosya raspredeleniya gruzopotokov po vidam transporta // Transportnoe delo Rossii. 2023. №3. S. 161-163. DOI 10.52375/20728689\_2023\_3\_161. EDN MBRCRG.
2. Chislov O.N., Bezusov D. Actualization of technological interaction managing methods in portside transport systems // E3S Web of Conferences. Vol. 389. 05033DOI 10.1051/e3sconf/202338905033.
3. Farzadmehr Mehran AI-powered solutions assessment in port and maritime sector // A dissertation submitted. Antwerp, Belgium. 2025. P. 191.
4. Zubkov V.N., Ryazanova E.V., Anoshkin K.V. Proposals for the Development of the Road Information Logistics System (RILS) // Proceedings-2022: International Russian Automation Conference, RusAutoCon. 2022. P. 527-536. DOI 10.1109/RusAutoCon54946.2022.9896277.
5. Drivol'skaya N.A. Tsifrovaya transformatsiya logisticheskikh protsessov: Preimushchestva i nedostatki v sovremennykh ekonomicheskikh usloviyakh // Nauka i obrazovanie transportu. 2023. №1. S. 145-148. EDN MVCSSI.
6. Vasilenko V.L., Kruglova A.I., Aleksashina E.I., Negreeva V.V., Plastunova S.A. Osnovnye trendy tsifrovoy logistiki // Nauchnyy zhurnal NIU ITMO. Seriya: ekonomika i ekologicheskiy menedzhment. 2020. №1. S. 69-78. DOI 10.17586/2310-1172-2020-13-1-69-78.
7. Stolyarov A.D., Fayzullina A.M., Abramov V.I. Tsifrovaya transformatsiya logistiki predpriyatiya s ispol'zovaniem tsifrovyykh dvoynikov // BENEFICIUM. 2024. №2(51). S. 23-31. DOI: 10.34680/BENEFICIUM.2024.2(51). S. 23-31.
8. Kosarev A.B., Rimskaya O.N., Anokhov I.V. Operezhayushchee razvitie zheleznodorozhnogo transporta s pomoshch'yu tsifrovyykh tekhnologiy // Innovatsionnye transportnye sistemy i tekhnologii. 2021. T. 7. №4. S. 90-105. DOI 10.17816/transsyst20217490-105. EDN TIQTRJ.
9. Kendra M., Babin M., Barta D. Changes of the Infrastructure and Operation Parameters of a Railway Line and Their Impact to the Track Capacity and the Volume of Transported Goods Procedia // Social and Behavioral Sciences. Vol. 48. P. 743-752. doi:10.1016/j.sbspro.2012.06.105.
10. Ljubaj Iv., Josip T. Mlinaris The Possibility of Utilising Maximum Capacity of the Double-Track Railways By Using Innovative Traffic Organisation // Transportation Research Procedia. Vol. 40. P. 346-353. doi: 0.1016/j.trpro.2019.07.051.
11. Kolesnikov M., Lyabakh N., Bakalov M., Kirill Godovany. Development of Digital, Intelligent Technologies for Analysis and Synthesis of Complex Systems // Proceedings-2023: International Russian Automation Conference (RusAutoCon). P. 854-859. DOI 10.1109/RusAutoCon58002.2023.10272963.
12. Guda A.N., Ilicheva V.V., Chislov O.N. Executable logic prototypes of systems engineering complexes and processes on railway transport // Advances in Intelligent Systems and Computing. R. 161-170.
13. Mamaev E.A., Ignatieva O.V., Bulavin Yu.P. [et al.]. Neural Network Control of the Transportation Process in Railway Transport: Problems and Future Tasks // Lecture Notes in Networks and Systems. LNNS. 2024. Vol. 1209. P. 91-107. DOI 10.1007/978-3-031-77688-5\_10.
14. Lyashchenko Z.V., Ignatieva O.V., Lyashchenko A.M., Glazunov D.V. Mechanism for Automating the Workstation of a Rolling Stock Driver // Journal of Machinery Manufacture and Reliability. 2023. Vol. 52. P. S62-S67. DOI 10.1134/S1052618823090054.
15. Quentin Gadmer et al. Automation: A framework for authority transfers in a remote environment // IFAC-Papers OnLine. 2022. R. 85-90.

**Chebotareva Evgeniia Andreevna**

Rostov State Transport University (RSTU)

Adress: 344038, Russia, Rostov-on-Don, sq. Rostovskogo Strelkovogo Polka Narodnogo Opolchenia, 2

Candidate of Technical Sciences

E-mail: abrosimova@yandex.ru

**Ryazanova Ekaterina Vladimirovna**

Rostov State Transport University (RSTU)

Adress: 344038, Russia, Rostov-on-Don, sq. Rostovskogo Strelkovogo Polka Narodnogo Opolchenia, 2

Candidate of Technical Sciences, Associated Professor

E-mail: ekaryazanova@gmail.com

**Nauruzbayev Sabir Mansurovich**

Rostov State Transport University (RSTU)

Adress: 344038, Russia, Rostov-on-Don, sq. Rostovskogo Strelkovogo Polka Narodnogo Opolchenia, 2

Graduate student

E-mail: sabir.nauruzbayev@mail.ru

---

**УПРАВЛЕНИЕ ПРОЦЕССАМИ ПЕРЕВОЗОК**

---

УДК: 629-118

doi: 10.33979/2073-7432-2025-3-2(90)-34-40

Н.А. ЗАГОРОДНИЙ, А. Н. ДЕГТЯРЬ, В. А. ШАПОВАЛОВА

**АНАЛИЗ ДОРОЖНО-ТРАНСПОРТНЫХ ПРОИСШЕСТВИЙ,  
СВЯЗАННЫХ СО СРЕДСТВАМИ ИНДИВИДУАЛЬНОЙ  
МОБИЛЬНОСТИ. МОДЕЛИРОВАНИЕ ПЕРЕМЕЩЕНИЯ  
ЭЛЕКТРОСАМОКАТА (ЧЕЛОВЕКА) ПРИ ВЗАИМОДЕЙСТВИИ С  
ТРАНСПОРТНЫМ СРЕДСТВОМ**

***Аннотация.** Проведен анализ аварийности при использовании средств индивидуальной мобильности. Предложена разработка математической модели движения участников дорожного движения (СИМ, автотранспорт) при столкновении, на стадии взаимодействия и отброса. Предложена модель взаимодействия человека, движущегося на электросамокате с автомобилем.*

***Ключевые слова:** дорожно-транспортное происшествие (ДТП) средство индивидуальной мобильности (СИМ), электросамокат, механизм дорожно-транспортного происшествия, место первоначального контакта, аварийность, динамические характеристики движения, скорость в момент столкновения, дальность отлета*

**Введение**

С момента появления нового вида транспорта – средств индивидуальной мобильности (СИМ) появилось новое определение – мобильная безопасность. Мобильная безопасность является необходимым условием смены парадигмы в сторону дорожной безопасности городов. Тем не менее, значительное увеличение статистики дорожно-транспортных происшествий с участием данного вида транспорта несет серьезные опасения по поводу дорожной безопасности с использованием новых видов транспорта, что является серьезной проблемой для беспрепятственного внедрения СИМ.

Для общества в целом, применение электротранспорта имеет ряд преимуществ, такие как:

- снижение экологических проблем, по сравнению с использованием моторизованных транспортных средств, работающих на продуктах нефтепереработки;
- снижение риска ожирения у населения;
- уменьшение заторов улично-дорожной сети.

Средства индивидуальной мобильности, включая электровелосипеды и электросамокаты, являются новыми видами мобильности, но, несмотря на это, рынок данного вида транспорта быстро расширился по всему миру.

СИМ обеспечивают уникальную мобильность, которая, в первую очередь решает проблемы с преодолением «первого и последнего километра». При этом, отсутствие значительных физических усилий человека при езде на электротранспорте способствует потенциальному влиянию на выбор, замену и дополнение других видов транспорта, таких как общественный транспорт и автомобили, а технологическое развитие возможностей СИМ – увеличивает дальность поездок. Относительно небольшие размеры и высокая скорость СИМ повышают их маневренность и облегчают навигацию в различных инфраструктурах, в том числе при движении по тротуарам и велосипедным дорожкам. Однако, несмотря на все перечисленные преимущества, эксплуатация данного вида транспорта на улицах дорожной сети сопряжена с серьезными проблемами безопасности. Одной из основных проблем является скоростной режим СИМ и пешеходов, которые значительно отличаются, данный фактор приво-

дит к высокому риску возникновения конфликтных точек между ними, а также значительной травмоопасности, в том числе и на тротуарах. Кроме того, проблема неправильно припаркованных СИМ в различных типах городской инфраструктуры может создавать проблемы для безопасности и комфорта всех участников дорожного движения.

Анализ мировой статистики демонстрирует растущее количество ДТП с участием СИМ. По сведениям комиссии по безопасности потребительских товаров США (CPSC) количество травм, связанных с СИМ, увеличилось почти на 21 % в 2024 году по сравнению с 2023 годом. С 2017 года наблюдается тенденция к росту травматизма, и, по оценкам аналитиков, ежегодно показатель увеличивается в среднем на 23 %. Число жертв также резко возросло, в Англии, по данным официальной статистики количество травмированных и погибших только в Лондоне составляет 3 % от числа всех погибших или тяжело травмированных людей. В соответствии с исследованиями Артура Джеймса, доктора медицинских наук, на улицах Франции смертность, связанная с дорожно-транспортными происшествиями с использованием СИМ, составляет 9,2 % по сравнению с 10,0 % для велосипедов и 5,2 % для мотоциклов.

Аварийность с участием СИМ в период с 2020 по 2024 года в России неумолимо растет. Так рост количества ДТП с участием данного вида перемещения выросла с 410 ед. в 2020 году до 4426 единиц в 2024 году. Согласно официальной статистики ГИБДД, в 2024 году с участием таких транспортных средств произошло 4,426 тыс. аварий и выросла на 42,8%, (погибло 54 человека, в том числе 6 детей (+25,6 %), ранено 4591 тыс. человек (+48,8 %), включая 1,4 тыс. детей в возрасте до 18 лет).

Данные статистики сведены в диаграммы 1 и 2.

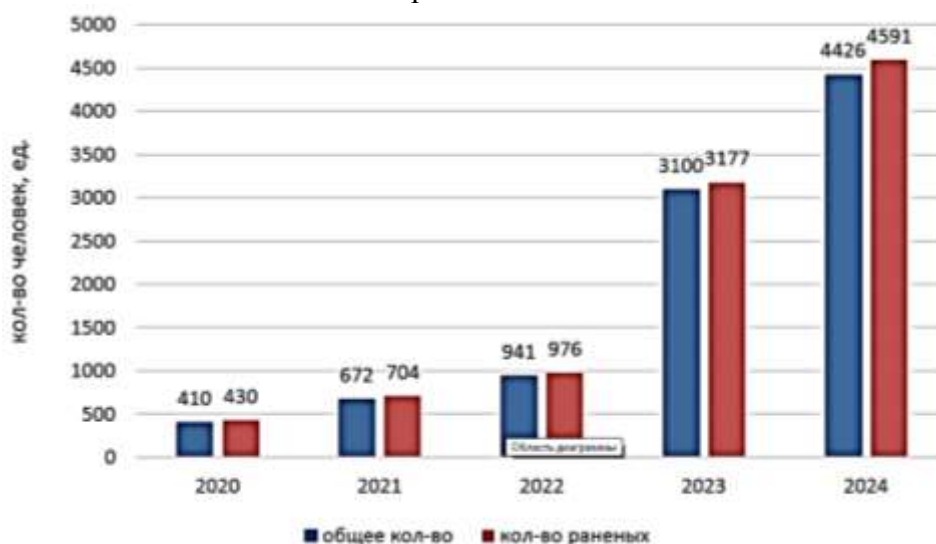


Рисунок 1 - Аварийность с участием СИМ в России

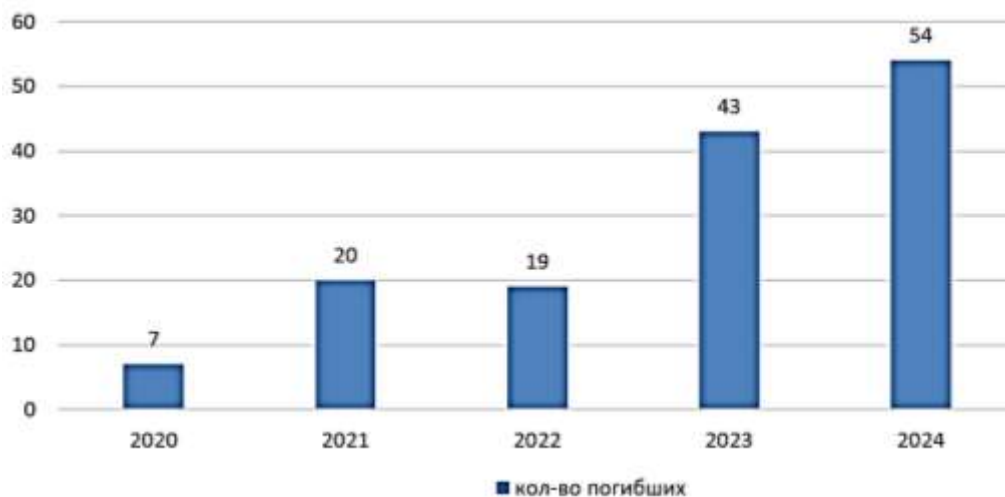


Рисунок 2 - Количество погибших в авариях с участием СИМ



Большинство происшествий с участием СИМ, в 2024 году зарегистрировано в городе Москва – 1323 фактов, Красноярском крае – 406 фактов, Нижегородской области – 234 факта, Краснодарском крае и городе Санкт-Петербурге – по 202 факта.

При этом следует отметить, что для данного вида дорожно-транспортных происшествий, в большинстве своем характерно полное, либо частичное отсутствие следовой информации, которая зачастую ограничивается описанием повреждений транспортных средств и их конечным положением. Данный комплекс следовой информации не дает возможности экспертам-автотехникам восстановить картину произошедшего дорожно-транспортного происшествия, что впоследствии приводит к неразрешенным противоречиям и ставит лиц, расследующих данный вид происшествий, в тупик.

Данная статистика подчеркивает важность проведения исследований, помогающих и способствующих, восстановить механизм дорожно-транспортного происшествия в общем а, и также на стадии сближения в частности.

Оценка научной литературы по электротранспорту демонстрирует отсутствие всесторонних исследований проблем безопасности при применении данного вида транспорта. Центральной темой предыдущих исследований в основном касалась оценки моделей СИМ и его использования, в то время как исследований в области безопасности крайне мало или практически отсутствуют.

Ранее нами была предложена математическая модель взаимодействия транспортного средства (электросамоката с человеком) с некоторой преградой, например, автомобиль, бордюр и т.п. с неподвижной преградой, без учета деформаций системы. В данной статье предлагаем рассмотреть механику движение тела, представляющего полет человека после взаимодействия системы «человек-электросамокат» с препятствием.

Движение тела на стадии отброса представляет собой полет человека (материальной точки массой  $m_1$ ) по параболической траектории (рис. 3).

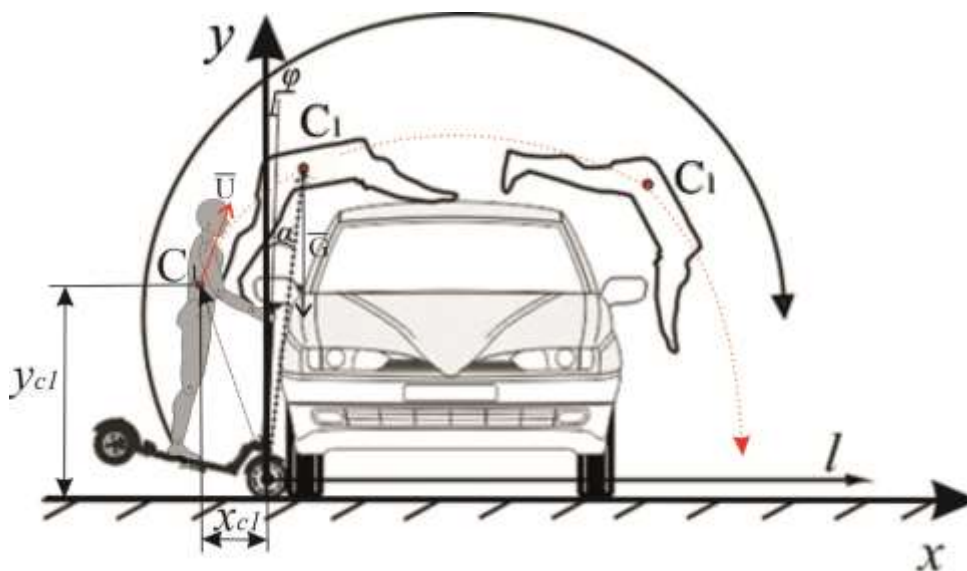


Рисунок 3 - Математическая модель: «человек – электросамокат – автомобиль»

$$\dot{\varphi} = \omega = \sqrt{\frac{g}{\sqrt{x_{C1}^2 + y_{C1}^2}} [\cos \alpha - 2 \cos(\alpha - \varphi)] + \frac{v_1^2}{2(x_{C1}^2 + y_{C1}^2)}}. \quad (1)$$

Полученное уравнение представляет собой закон изменения угловой скорости на участке вращения тела 1.

Дифференциальные уравнения движения принимают следующий вид:  $\alpha$

$$\begin{aligned} m_1 \ddot{x} &= \sum_{k=1}^n F_{kx}; \\ m_1 \ddot{y} &= \sum_{k=1}^n F_{ky}. \end{aligned}$$

На этом участке движения на человека действует только сила тяжести, сопротивлением воздуха в силу малости скорости можно пренебречь.

$$\begin{aligned} m_1 \ddot{x} &= 0; \\ m_1 \ddot{y} &= -G. \end{aligned} \quad (2)$$

Интегрируя уравнения (2) дважды получаем уравнения движения человека.

$$\begin{aligned} \dot{x} &= R\omega \cos(\alpha - \phi); \\ \dot{y} &= -gt + R\omega \sin(\alpha - \phi); \\ x &= R\omega \cos(\alpha - \phi)t; \\ y &= -g \frac{t^2}{2} + R\omega \sin(\alpha - \phi)t + y_{c1}, \end{aligned} \quad (3)$$

где  $R$  – радиус отлета точки, расстояние от центра колеса электросамоката до центра тяжести человека.

Уравнения (3) представляют собой уравнения движения человека после взаимодействия с транспортным средством, происходящее в одной плоскости, в соответствии с условиями поставленной задачи.

Обозначим  $l$  – дальность полета,  $t_1$  – время полета, тогда уравнения движения примут следующий конечный вид

$$\begin{aligned} v_{cx} &= R\omega \cos(\alpha - \phi); \\ v_{cy} &= -gt_1 + R\omega \sin(\alpha - \phi); \\ l &= R\omega \cos(\alpha - \phi)t_1; \\ 0 &= -g \frac{t_1^2}{2} + R\omega \sin(\alpha - \phi)t_1 + y_{c1}. \end{aligned} \quad (4)$$

С учетом (1) уравнения (4) будут иметь следующий вид

$$\begin{aligned} v_{1cx} &= R \sqrt{\frac{g}{\sqrt{x_{c1}^2 + y_{c1}^2}}} [\cos \alpha - 2 \cos(\alpha - \phi)] + \frac{v_1^2}{2(x_{c1}^2 + y_{c1}^2)} \cos(\alpha - \phi); \\ v_{1cy} &= -gt_1 + R \sqrt{\frac{g}{\sqrt{x_{c1}^2 + y_{c1}^2}}} [\cos \alpha - 2 \cos(\alpha - \phi)] + \frac{v_1^2}{2(x_{c1}^2 + y_{c1}^2)} \sin(\alpha - \phi); \\ l &= R \sqrt{\frac{g}{\sqrt{x_{c1}^2 + y_{c1}^2}}} [\cos \alpha - 2 \cos(\alpha - \phi)] + \frac{v_1^2}{2(x_{c1}^2 + y_{c1}^2)} \cos(\alpha - \phi)t_1; \\ 0 &= -g \frac{t_1^2}{2} + R \sqrt{\frac{g}{\sqrt{x_{c1}^2 + y_{c1}^2}}} [\cos \alpha - 2 \cos(\alpha - \phi)] + \frac{v_1^2}{2(x_{c1}^2 + y_{c1}^2)} \sin(\alpha - \phi)t_1 + y_{c1}. \end{aligned} \quad (5)$$

## Результаты

Уравнения (5) позволяют определить динамические характеристики движения системы человек-самокат. В зависимости от входных параметров можно определить такие кинематические характеристики движения как начальная скорость (скорость в момент столкновения) и конечная скорость, дальность полета, высоту подъема. Хотя в исследовании препятствие (автомобиль) находится в состоянии покоя, полученные зависимости позволяют оценить также скорость автомобиля в момент столкновения, если он совершает движение.

**Обсуждение**

Предложен способ определения перемещения человека в пространстве, после столкновения с автотранспортным средством и признаков возникновения опасной дорожно-транспортной обстановки.

**Выводы**

Получена математическая модель перемещения человека на электросамокате в системе ВАДС (водитель – автомобиль – дорога – среда) на стадии отброса механизма дорожно-транспортного происшествия.

**СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ**

1. Евтюков С.А., Пучкин В.А. Судебная автотехническая экспертиза дорожно-транспортных происшествий // Санкт-Петербург: ИД «Петрополис». 2017. 416 с.
2. Правила дорожного движения Российской Федерации. Основные положения по допуску транспортных средств к эксплуатации и обязанности должностных лиц по обеспечению безопасности дорожного движения. Москва, 2023. 43 с.
3. Российская академия транспорта: официальный сайт [Электронный ресурс]. URL: <https://rosacademtrans.ru/itogi-sim>.
4. Министерства внутренних дел Российской Федерации [Электронный ресурс]. Москва. URL: <http://stat.gibdd.ru/>.
5. Домке Э.Р. Расследование и экспертиза дорожно-транспортных происшествий. М.: Издательский центр «Академия», 2009. 288 с.
6. Сведения о показателях состояния безопасности дорожного движения в Англии и США [Электронный ресурс]. URL: <https://www.cpsc.gov/Newsroom/News-Releases/2024/E-Scooter-and-E-Bike-Injuries-Soar-2022-Injuries-Increased-Nearly-21>.
7. Сведения о показателях состояния безопасности дорожного движения во Франции [Электронный ресурс]. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2210670722006175>.
8. Сивухин Д.В. Общий курс физики. Механика. М.: Наука, 1975. 215 с.
9. Стрелков С.П. Общий курс физики. Механика. М.: Наука, 1975. 215 с.
10. Иванов А.И. Закономерности удара в механических системах. М.: Природа, 1999. №10. 38 с.
11. Герц Г. Принципы механики, изложенные в новой связи (Соударение двух систем (228)) / Под ред. И. И. Артоболевского. М.: АН СССР, 1959. 386 с.
12. Голубев А.В. [и др.] Проблемы экологической безопасности автомобилей // Сборник статей X Международной научно-технической конференции. Современные автомобильные материалы и технологии (САМИТ-2018). К.: Курск. 2018. С. 71-74.
13. А.С. Семькина [и др.] Исследование транспортных характеристик автомобильного транспорта // Автомобили, транспортные системы и процессы: настоящее, прошлое и будущее: Сборник статей 4-й Международной научно-технической конференции. Курск. 2022. С. 115-118.
14. Загородний Н.А. [и др.] К вопросу определения момента возникновения опасности для движения водителю АТС по видеозаписи регистратора // Информационные технологии и инновации на транспорте: Материалы VII Международной научно-практической конференции. Орел. 2021. С. 350-363.
15. Семькина А.С., Загородний Н.А. Повышение безопасности дорожного движения за счет снижения тяжести последствий ДТП // Мир транспорта и технологических машин. Орел: ОГУ им. И. С. Тургенева, 2018. №3(62). С. 88-95.
16. Болотов Р.А., Загородний Н.А. Методы снижения тяжести последствий ДТП // Автомобильная промышленность. Белгород. 2017. №11. С. 232-237.
17. Шаповалова В.А. [и др.] Основы методики расчета взаимодействия на основе системы «человек-электросамокат» с неподвижной преградой, без учета деформаций системы // Мир транспорта и технологических машин. Орел: ОГУ им. И.С. Тургенева, 2024. №1-2(84). С. 30-35.
18. Дрогачева Я.А. [и др.] Безопасное применение гироскутеров, сигвеев, электросамокатов и иных современных средств передвижения // Магистратура – автотранспортной отрасли: Материалы V Всероссийской межвузовской конференции. СПб.: Санкт-Петербург. 2021. С. 232-237.
19. И.А. Новиков [и др.] Использование интеллектуальных транспортных систем для повышения качества организации дорожного движения // Мир транспорта и технологических машин. Орел: ОГУ им. И. С. Тургенева, 2022. № 3-4 (78). С. 49-54.
20. А.Н. Новиков [и др.] Комплексный подход к определению механизма дорожно-транспортного происшествия. // Мир транспорта и технологических машин. Орел: ОГУ им. И. С. Тургенева, 2022. № 3-3 (78). С. 60-67.

**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.zagorodnij@yandex.ru

**Дегтярь Андрей Николаевич**

Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова

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

К.т.н., доцент, заведующий кафедрой «Теоретической механики и сопротивления материалов»

E-mail: andrey-dandr@yandex.ru

**Шаповалова Виктория Александровна**

ЭКЦ МВД России

Адрес: 125130, Россия, г. Москва, ул. Зои и Александра Космодемьянских, д. 5

Эксперт ЭКЦ МВД России

E-mail: sevevi@mail.ru

---

N.A. ZAGORODNIJ, A.N. DEGTYAR, V.A. SHAPOVALOVA

**ANALYSIS OF ACCIDENTS INVOLVING MEANS OF INDIVIDUAL MOBILITY (MIM). SIMULATION OF THE SYSTEM «MAN-ELECTRIC SCOOTER» MOVEMENTS WHEN INTERACTING WITH A VEHICLE FUNDAMENTALS OF THE METHODOLOGY FOR CALCULATING INTERACTION BASED ON THE «MAN-ELECTRIC SCOOTER» SYSTEM WITH A FIXED OBSTACLE, WITHOUT TAKING INTO ACCOUNT DEFORMATIONS OF THE SYSTEM**

**Abstract.** Was conducted the analysis of the accident rate when using personal mobility equipment. Is it proposed to develop a mathematical model of the movements of road users in a collision at the stage of interaction and scum. Has been proposed a model of the interaction of a person moving on an electric scooter with a car.

**Keywords:** traffic accident (road accident), means of individual mobility (MIM), electric scooter, the mechanism of a traffic accident, accident rate, causal relationship of accidents, accidents, dynamic characteristics of the movements, speed is the moment of collision, departure range

**BIBLIOGRAPHY**

1. Evtyukov S.A., Puchkin V.A. Sudebnaya avtotekhnicheskaya ekspertiza dorozhno-transportnykh proisshestviy // Sankt-Peterburg: ID "Petropolis". 2017. 416 s.
2. Pravila dorozhnogo dvizheniya Rossiyskoy Federatsii. Osnovnye polozheniya po dopusku transportnykh sredstv k ekspluatatsii i obyazannosti dolzhnostnykh lits po obespecheniyu bezopasnosti dorozhnogo dvizheniya. Moskva, 2023. 43 s.
3. Rossiyskaya akademiya transporta: ofitsial'nyy sayt [Elektronnyy resurs]. URL: <https://rosacademtrans.ru/itogi-sim>.
4. Ministerstva vnutrennikh del Rossiyskoy Federatsii [Elektronnyy resurs]. Moskva. URL: <http://stat.gibdd.ru/>.
5. Domke E.R. Rassledovanie i ekspertiza dorozhno-transportnykh proisshestviy. M.: Izdatel'skiy tsentr "Akademiya", 2009. 288 s.
6. Svedeniya o pokazatelyakh sostoyaniya bezopasnosti dorozhnogo dvizheniya v Anglii i SSHA [Elektronnyy resurs]. URL: <https://www.cpsc.gov/Newsroom/News-Releases/2024/E-Scooter-and-E-Bike-Injuries-Soar-2022-Injuries-Increased-Nearly-21>.
7. Svedeniya o pokazatelyakh sostoyaniya bezopasnosti dorozhnogo dvizheniya vo Frantsii [Elektronnyy resurs]. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2210670722006175>.
8. Sivukhin D.V. Obshchiy kurs fiziki. Mekhanika. M.: Nauka, 1975. 215 s.
9. Strelkov S.P. Obshchiy kurs fiziki. Mekhanika. M.: Nauka, 1975. 215 s.
10. Ivanov A.I. Zakonomernosti udara v mekhanicheskikh sistemakh. M.: Priroda, 1999. №10. 38 s.

11. Gerts G. Printsipy mekhaniki, izlozhennyye v novoy svyazi (Soudarenie dvukh sistem (228)) / Pod red. I. I. Artobolevskogo. M.: AN SSSR, 1959. 386 s.
12. Golubev A.V. [i dr.] Problemy ekologicheskoy bezopasnosti avtomobiley // Sbornik statey H Mezhdunarodnoy nauchno-tekhnicheskoy konferentsii. Sovremennyye avtomobil'nye materialy i tekhnologii (SAMIT-2018). K.: Kursk. 2018. S. 71-74.
13. A.S. Semykina [i dr.] Issledovanie transportnykh kharakteristik avtomobil'nogo transporta // Avtomobili, transportnye sistemy i protsessy: nastoyashchee, proshloe i budushchee: Sbornik statey 4-y Mezhdunarodnoy nauchno-tekhnicheskoy konferentsii. Kursk. 2022. S. 115-118.
14. Zagorodniy N.A. [i dr.] K voprosu opredeleniya momenta vozniknoveniya opasnosti dlya dvizheniya voditelyu ATS po videozapisi registratora // Informatsionnye tekhnologii i innovatsii na transporte: Ma-terialy VII Mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii. Orel. 2021. S. 350-363.
15. Semykina A.S., Zagorodniy N.A. Povyshenie bezopasnosti dorozhnogo dvizheniya za schet snizheniya tyazhesti posledstviy DTP // Mir transporta i tekhnologicheskikh mashin. Orel: OGU im. I. S. Turgeneva, 2018. №3(62). S. 88-95.
16. Bolotov R.A., Zagorodniy N.A. Metody snizheniya tyazhesti posledstviy DTP // Avtomobil'naya promyshlennost'. Belgorod. 2017. №11. S. 232-237.
17. Shapovalova V.A. [i dr.] Osnovy metodiki rascheta vzaimodeystviya na osnove sistemy "chelovek-elektrosamokat" s nepodvizhnoy pregradoy, bez ucheta deformatsiy sistemy // Mir transporta i tekhnologicheskikh mashin. Orel: OGU im. I.S. Turgeneva, 2024. №1-2(84). S. 30-35.
18. Drogacheva YA.A. [i dr.] Bezopasnoe primeneniye giroskuterov, sigveev, elektrosamokatov i inyykh so-vremennykh sredstv peredvizheniya // Magistratura - avtotransportnoy otrasli: Materialy V Vserossiyskoy mezhvuzovskoy konferentsii. SPb.: Sankt-Peterburg. 2021. S. 232-237.
19. I.A. Novikov [i dr.] Ispol'zovanie intellektual'nykh transportnykh sistem dlya povysheniya kachestva organizatsii dorozhnogo dvizheniya // Mir transporta i tekhnologicheskikh mashin. Orel: OGU im. I. S. Turgeneva, 2022. № 3-4 (78). S. 49-54.
20. A.N. Novikov [i dr.] Kompleksnyy podkhod k opredeleniyu mekhanizma dorozhno-transportnogo pro-isshestviya. // Mir transporta i tekhnologicheskikh mashin. Orel: OGU im. I. S. Turgeneva, 2022. № 3-3 (78). S. 60-67.

**Zagorodny Nikolay Alexandrovich**

Belgorod State Technological University  
Address: 308012, Russia, Belgorod, st. Kostyukova, 46  
Candidate of technical science  
E-mail: n.zagorodnij@yandex.ru

**Degtyar Andrey Nikolaevich**

Belgorod State Technological University  
Address: 308012, Russia, Belgorod, st. Kostyukova, 46  
Candidate of technical science  
E-mail: n.zagorodnij@yandex.ru

**Shapovalova Victoria Alexandrovna**

ECC of the Ministry of Internal Affairs of Russia  
Address: 125130, Russia, Moscow, Zoya and Aleksandra Kosmodemyanskies street, 5  
Expert of the FEC of the Ministry of Internal Affairs of Russia  
E-mail: sevevi@mail.ru

Ю.А. КОЛЕБЕР, С.М. МОЧАЛИН, Е.В. ПИСКУНОВ

## ПРИМЕНЕНИЕ НЕЧЕТКОЙ ЛОГИКИ ДЛЯ ОЦЕНКИ РЕЗУЛЬТАТИВНОСТИ ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ СИСТЕМ ГОРОДСКОГО ПАССАЖИРСКОГО ТРАНСПОРТА ОБЩЕГО ПОЛЬЗОВАНИЯ

**Аннотация.** В статье проведен анализ математических моделей оценки результативности систем и процессов. Выбрана и обоснована модель, базирующаяся на положениях теории нечеткой логики для сложных, стохастических систем с множеством исходных показателей. Описаны понятия и математический аппарат нечеткой логики, на базе которых сформирован алгоритм реализации данной модели для оценки результативности функционирования систем городского пассажирского транспорта общего пользования. Полученный алгоритм реализован в разработанном авторами исследования программном обеспечении, позволяющим снизить трудоемкость процесса обработки данных и расчета результативных значений.

**Ключевые слова:** нечеткая логика, результативность, городской пассажирский транспорт общего пользования, система, программное обеспечение

### Введение

В современных динамичных условиях развития систем городского пассажирского транспорта общего пользования возникает потребность в качественно новых моделях оценки их функционирования. Однако применение таких моделей может вызвать сложности, связанные с многогранностью рассматриваемой системы. Возникает необходимость учитывать множество показателей (исходных данных), принимающих самые разные диапазоны значений и имеющих разные единицы измерения. А также учитывать тот фактор, что в системе городского пассажирского транспорта общего пользования не всегда снижение значения показателя свидетельствует о снижении результативности.

Комплексный подход к оценке результативности требует введения большого набора исходных данных. В таком случае возникает потребность в изыскании способов снижения трудоемкости обработки большого объема исходных данных и расчета итоговой оценки результативности системы. Такую потребность может обеспечить формирование соответствующего программного обеспечения.

В результате представляется актуальным выбор и обоснование модели оценки результативности систем городского пассажирского транспорта общего пользования и создание программного обеспечения для его реализации.

### Материал и методы

К настоящему времени учеными накоплена большая методологическая база в области формирования оценочных механизмов. Анализ существующих работ позволил выделить следующие самые распространенные модели оценки результативности комплексных систем.

1. Классическая модель, использованная в работе [1] и основанная на определении понятия «результативность» согласно ГОСТ Р ИСО 9000-2015, согласно которому результативность ( $P$ ) отражает «степень реализации запланированной деятельности и достижения запланированных результатов» и рассчитывается по формуле (1):

$$P = \frac{\Phi}{\Pi}, \quad (1)$$

где  $\Phi$  - фактическое значение оцениваемого показателя;

$\Pi$  - плановое (эталонное) значение оцениваемого показателя.

Классическая модель является с одной стороны достаточно простой, с другой стороны она стала исходной для всех существующих в настоящее время моделей оценки результативности и получила следующие такие модификации, предлагаемые учеными для оценки процессов и систем, как критериальный подход [2], использование коэффициента значимости [3].

2. Модель, основанная на коэффициенте, устанавливающем влияние факторов на величину итогового значения [4]. Результативность ( $P$ ), согласно данной модели, рассчитывается по формуле (2):

$$P = \frac{\sum_{i=1}^n P_i \cdot w_i}{\sum_{i=1}^n w_i}, \quad (2)$$

где  $P_i$  –  $i$ -й критерий результативности;

$W_i$  – вес (важность)  $i$ -го критерия результативности;

$n$  – количество критериев.

Главным недостатком рассматриваемой модели применительно к оценке результативности систем городского пассажирского транспорта общего пользования является необходимость предварительной нормализации большого объема исходных данных – приведения разных масштабов и единиц измерения значений показателей к значениям единого интервала.

3. Средневзвешенный геометрический показатель результативности ( $P$ ), который [3] рассчитывается по формуле (3):

$$P = \sqrt[n]{\prod_{i=1}^n P_i^{w_i}} \quad (3)$$

Данный показатель применяется в тех случаях, когда неприемлемо низкий уровень значения одного или нескольких показателей должен найти отражение в итоговой оценке. В результате если, согласно формуле (3), хотя бы один из показателей примет значение 0, то итоговая результативность тоже станет равна 0. Данная функция ветирования [3, с. 84] является недостатком использования рассматриваемой модели для оценки результативности систем городского пассажирского транспорта общего пользования, поскольку в таком случае при большом наборе показателей оценка будет не точной, заниженной.

4. Модель индексного нормирования предполагает преобразование всей совокупности ключевых показателей из абсолютных значений в относительные - в цепные темпы роста данных показателей [5]. Результативность ( $P$ ), согласно данной модели, рассчитывается по формуле (4):

$$P = \frac{(1 + K_{откл.}) \cdot (1 + K_{инв.})}{4} \cdot 100 \%, \quad (4)$$

где  $K_{откл.}$  – коэффициент ранговой корреляции (по отклонениям) Спирмена;

$K_{инв.}$  – коэффициент ранговой корреляции (по инверсиям) Кендалла.

Модель индексного нормирования позволяет учитывать динамику системы, и это является ее главным достоинством. Однако в процессе определения результативности по рассматриваемой модели ставится акцент на приращении показателя результативности, а не на ее достигнутом абсолютном уровне [6]. Это значит, что модель индексного нормирования невозможно применить в случае наличия данных только по одному периоду.

Компенсировать недостатки описанных выше моделей в рамках оценки результативности функционирования системы городского пассажирского транспорта общего пользования поможет модель, основанная на положениях теории нечеткой логики. Нечеткая логика (fuzzylogic) предложена американским учёным Лотфи Заде в 1965 году [7]. Нечеткая логика способна описывать нечеткие понятия и знания и делать нечеткие выводы. Она позволяет определять промежуточные значения для общепринятых оценок: да–нет, ложь–истина. В



этом заключается главное отличие нечеткой логики от булевой логики [8].

В результате нечеткая логика способна устранить противоречия, возникающие в случае применения булевой логики к оценке такой сложной, динамичной, многокритериальной системы, как система городского пассажирского транспорта общего пользования. Например, если в булевой логике можно ответить либо 0, либо 1, то нечеткая логика даст возможность определить промежуточное значение на интервале  $[0;1]$ . Это достаточно удобный инструмент управления сложными процессами и системами.

Главными достоинствами нечеткой логики являются следующие.

1. Возможность обработки показателей, имеющих разные размерности и единицы измерения посредством приведения их к интервалу от 0 до 1.
2. Возможность обработки большого объема данных.
3. Возможность учета компонентов, не имеющих четкой формализации [9].
4. Возможность получения значений результативности не только для всей системы, но и для каждого из анализируемых показателей.
5. Возможность производить как горизонтальный анализ (по периодам), так и вертикальный анализ (рейтинг участников системы в рамках одного периода).
6. Возможность получения не только четких числовых значений результативности, но и интерпретации их в лингвистические значения (возможность описания результата словами).
7. Позволяет оценивать системы и процессы не только в динамике, но и по данным только одного периода, в отличие от модели индексного нормирования.
8. Нечеткая логика уже содержит в себе классическую модель оценки результативности, поскольку переводит результативные значения показателей в интервал от 0 до 1.

Недостатком нечеткой логики является зависимость от субъективного мнения экспертов при определении термов и их границ. Однако если рассматривать систему городского пассажирского транспорта общего пользования, то можно сказать, что эта система постоянно требует привлечения экспертов для управления, поскольку является достаточно сложной, динамичной и стохастичной для того, чтобы применять к ней четко формализованные методы [10].

Вопросы оценки функционирования городских пассажирских перевозок отражены в работах таких выдающихся ученых, как Варелопуло Г.А. [11], Володькин П.П. [12], Миротин Л.Б., Гудков В.А. [13], Якунина Н.В. [14]. Их исследования имеют большое научное и практическое значение. Однако авторами, как правило, предлагаются решения по оценке качества городских пассажирских перевозок, ориентированные на отдельные аспекты качества или эффективности функционирования системы, например, оценка временных затрат пассажиров на передвижения по городу. При этом, с точки зрения авторов работ [15], [16] качество является составной частью эффективности. Учет всех параметров сложной системы можно реализовать в процессе оценки результативности, которая включает в себя как оценку качественных показателей, так и показателей эффективности [17].

Научные положения теории нечеткой логики применительно к оценке функционирования городских пассажирских перевозок достаточно хорошо изучены и используются как отечественными, так и зарубежными авторами [18-23]. Работы этих авторов взяты за основу для формирования модели оценки результативности систем городского пассажирского транспорта общего пользования в настоящем исследовании.

### **Теория**

Нечеткая логика оперирует следующими понятиями.

1. Лингвистическая переменная ( $x_i; i = 1 \dots n$ ) – это переменная, которая может принимать одно из лингвистических значений из терм-множества, т. е. описываться словом или словосочетанием [7].
2. Терм ( $A_j; j = 1 \dots m$ ) – это лингвистическое значение (высказывание), которое может принимать переменная [7].

3. Нечеткое терм-множество – это такое множество результатов наблюдений оцениваемых показателей, в котором каждому значению носителя сопоставляется степень его соответствия данному нечеткому множеству [8].

4. Функция принадлежности ( $\mu_j^A(x_i) \in [0;1]; j = 1 \dots m$ ) – это некоторая невероятностная субъективная мера нечеткости, определяемая в результате заданных правил о степени соответствия переменной понятию, формализуемому нечетким множеством [8, с. 248].

5. Набор правил (база правил) – это совокупность правил «если, то», определяющих взаимосвязь между входящими и исходящими переменными (ЕСЛИ  $x_i^{\text{вход}} = B$ , ТО  $x_i^{\text{выход}} = C$ ) [24].

6. Фазификация (введение нечеткости) – это преобразование четких (числовых) переменных в лингвистические переменные [24].

7. Дефазификация – это переход от функции принадлежности выходной лингвистической переменной к ее четкому (числовому) значению на основе выбранного метода [24].

В нечеткой логике существуют различные типы функции принадлежности. Самыми распространенными из них являются треугольные, трапециевидные и гауссовы функции.

Треугольная функция принадлежности – это функция треугольной формы, которая используется для определения отношения между входными данными перед фазификацией и фазифицированными выходными данными [8]. Согласно этой функции для переменной  $x$  по каждому терму экспертным путем определяются три вершины значений. Треугольная функция принадлежности ( $\mu_j^A(x_i)$ ) рассчитывается по формуле (5):

$$\mu_j^A(x_i) = \begin{cases} 0, x \leq a \\ 1 - \frac{x-a}{m-a}, a < x \leq m \\ 1 - \frac{b-x}{b-m}, m < x \leq b \\ 0, x \geq b \end{cases}, \quad (5)$$

где  $x_i$  – численное значение  $i$ -ой входящей переменной;

$a, m, b$  – это значения вершин функции принадлежности.

Трапециевидная функция принадлежности – это функция трапециевидной формы, согласно которой для переменной  $x$  по каждому терму экспертным путем определяются четыре вершины значений [8]. Трапециевидная функция принадлежности ( $\mu_j^A(x_i)$ ) рассчитывается по формуле (6):

$$\mu_j^A(x_i) = \begin{cases} 0, (x \leq a) \text{ or } (x > d) \\ \frac{x-a}{b-a}, a \leq x \leq b \\ 1, b \leq x \leq c \\ \frac{d-x}{d-c}, c \leq x \leq d \end{cases}, \quad (6)$$

где  $a, b, c, d$  – это значения вершин функции принадлежности.

Гауссова функция принадлежности – это функция кривой гаусса, которая представлена центральным/средним значением « $m$ » и среднеквадратичным отклонением  $k > 0$  [8]. При этом значение « $k$ » определяет ширину «колокола». Гауссова функция принадлежности ( $\mu_j^A(x_i)$ ) рассчитывается по формуле (7):

$$\mu_j^A(x_i) = \exp \left[ - \left( \frac{x - m}{\varphi} \right)^2 \right], \quad (7)$$

где  $m$  - это центральное/среднее значение нечеткого множества;

$\varphi$  – коэффициент, задающий ширину функции принадлежности.

Выбор функции принадлежности в процессе оценки результативности зависит от конкретных задач, специфики оцениваемого объекта, а также применяемого программного обеспечения. Для динамично развивающихся систем, параметры которых могут меняться за короткие промежутки времени, рекомендуется использовать треугольную и трапециевидную функции принадлежности. Эти две функции принадлежности чаще всего применяются на практике, имеют достаточно близкие друг к другу выходные значения [25] и отличаются простотой получения выходных данных. Для получения точных результатов управления, следует выбрать гауссову функцию принадлежности [8].

В процессе дефазификации необходимо выбрать метод определения четкого (числового) значения из следующих существующих методов: метод центра тяжести, метод среднего максимума, наименьшее из максимального значения, наибольшее из максимального значения, биссектриса области. Согласно исследованиям [8] не существуют определенно лучшего метода дефазификации. Однако самым распространенным является метод центра тяжести (Centroid), согласно которому находится центр тяжести области, полученной в результате агрегации функций принадлежности по всем термам. Значение центра тяжести является четким значением выходной переменной [8]. Метод центра тяжести рекомендуется при ограниченном наборе данных на начальных стадиях исследования [8], и одновременно является достаточно простым методом дефазификации. В связи с этим для нахождения значения четкой (числовой) выходной переменной в процессе оценки результативности функционирования системы городского пассажирского транспорта общего пользования выбран метод центра тяжести, в соответствии с которым четкая выходная переменная ( $U_i$ ) рассчитывается по формуле (8):

$$U_i = \frac{\sum_{i=1}^n x_i \cdot \mu(x_i)}{\sum_{i=1}^n \mu(x_i)}, \quad (8)$$

где  $x_i$  - значение результата для  $i$ -ой термы;

$\mu(x_i)$  - значение функции принадлежности для  $i$ -ой термы.

Полученное числовое значение выходной переменной – это и есть рассчитанная результативность процесса в рамках рассматриваемой переменной, основанная на аппарате нечеткой логики.

### **Результаты и обсуждение**

Для автоматизации оценки результативности функционирования систем городского пассажирского транспорта общего пользования с применением инструмента нечеткой логики авторами настоящего исследования было разработано программное обеспечение, позволяющее производить оценку в автоматизированном режиме и значительно снижать трудоемкость процесса [26].

На рисунке 1 представлены этапы реализации математической модели оценки результативности функционирования систем городского пассажирского транспорта общего пользования, основанной на представленных выше положениях теории нечеткой логики с применением разработанного программного обеспечения.

Необходимо дать некоторые пояснения к рисунку 1.

## 1. Подготовительный этап

1. Создание терм-множества (диапазонов лингвистических значений) для каждой входящей ( $x_i^{сход.} = 1...n$ ) и исходящей ( $x_i^{исход.} = 1...n$ ) переменных.
2. Выбор типа функции принадлежности для каждого терма ( $A_j = 1...m$ ) в сформированном терм-множестве.
3. Задание правил первого уровня – задание для каждого терма ( $A_j = 1...m$ ) значений входящих и исходящих лингвистических переменных - вершин функций принадлежности.

## 2. Дефазификация

- 2.1 Формирование базы правил нечеткого вывода - задание правил второго уровня типа: ЕСЛИ  $x_i^{сход.} = B$ , ТО  $x_i^{исход.} = C$ .
- 2.2. Расчет функций принадлежности ( $\mu_j^A(x_i) \in [0;1]$ ; ( $j = 1...m$ ) для каждого терма ( $A_j = 1...m$ ), в которые попадает значение входящей переменной  $x_i$ .
- 2.3. Агрегация функций принадлежности ( $\mu_j^A(x_i) \in [0;1]$ ; ( $j = 1...m$ ).
- 2.4. Вычисление значений ( $x_i^{исход.} = 1...n$ ) для исходящих переменных на основе полученных значений функций принадлежности ( $\mu_j^A(x_i) \in [0;1]$ ; ( $j = 1...m$ ).
- 2.5. Получение четкого значения исходящей переменной ( $U_i; i = 1...n$ ).

## 3. Получение и обработка результата

- 3.1. Расчет интегрального показателя результативности ( $ИПР \in [0;1]$ ) для всей системы городского пассажирского транспорта общего пользования на основе полученных четких значений результативности ( $U_i; i = 1...n$ ) всех исходящих переменных ( $x_i^{сход.}$ ).
- 3.2. Фаификация: преобразование числового значения интегрального показателя результативности ( $ИПР \in [0;1]$ ) в лингвистическую интерпретацию.

*Рисунок 1 - Алгоритм реализации математической модели оценки результативности функционирования систем городского пассажирского транспорта общего пользования на основе теории нечеткой логики*

Под входящей переменной в данном случае подразумевается показатель (критерий результативности). Исходящая переменная – это результативность входящей переменной. Поскольку для оценки результативности функционирования всей системы городского пассажирского транспорта общего пользования в качестве исходных данных (критериев) выступает целый перечень показателей, в соответствии с правилами нечеткой логики на первых этапах рассчитывается результативность для каждого показателя из сформированного для расчета перечня.

Разработанное авторами настоящего исследования программное обеспечение позволяет выбрать любой из трех типов функции принадлежности: треугольную, трапециевидную или гауссову.

Расчет функции принадлежности для каждого терма производится в программном обеспечении по формуле (5), (6) или (7) в зависимости от выбранного типа.

Вычисление значения для каждой исходящей переменной также производится по формулам (5), (6) или (7) в зависимости от выбранного типа функции принадлежности, толь-

ко «в обратную сторону»: на основе рассчитанного на предыдущем этапе значения функции принадлежности рассчитывается значение исходящей переменной.

Получение четкого значения исходящей переменной реализуется на основе описанного выше метода центра тяжести по формуле (8).

В созданном программном обеспечении расчет интегрального показателя результативности для всей системы городского пассажирского транспорта общего пользования реализуется на основе метода нахождения среднеарифметической величины по формуле (9):

$$ИПР = \frac{\sum_{i=1}^n U_i}{n}, \quad (9)$$

где  $U_i$  - значение  $i$ -ой четкой исходящей переменной;

$n$  - общее количество исходящих переменных.

Для случая, когда пользователь считает нужным при расчете учесть весовые коэффициенты каждого из показателей, в разработанном программном обеспечении предусмотрена возможность расчета интегрального показателя результативности по формуле (10):

$$ИПР = \frac{\sum_{i=1}^n U_i \cdot k_i}{\sum_{i=1}^n k_i}, \quad (10)$$

где  $k_i$  - коэффициент весомости  $i$ -ой четкой исходящей переменной.

### Выводы

Анализ работ в области формирования моделей оценки результативности сложных систем и процессов показал, что модель, основанная на теоретических положениях теории нечеткой логики является в настоящее время наиболее перспективной: она с одной стороны компенсирует недостатки остальных моделей, с другой стороны обладает дополнительными возможностями в области формирования оценочных механизмов. В частности, нечеткая логика может быть хорошо применима для оценки развития городских пассажирских перевозок, характеризующихся масштабностью, динамичностью и значительной неопределенностью.

В рамках исследования литературных источников была раскрыта терминология и описан математический аппарат нечеткой логики, на основе которых разработан алгоритм рассматриваемой модели для оценки результативности систем городского пассажирского транспорта общего пользования. Реализация предложенного алгоритма в автоматизированном режиме обеспечивается созданным специально для этой цели программным обеспечением. Разработанное программное обеспечение позволяет снизить трудоемкость процесса обработки большого количества исходных данных и расчета итогового показателя результативности.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Стародубцева Е.Д. Совершенствование методики оценки результативности системы менеджмента качества на промышленном предприятии // Теория и практика общественного развития. 2019. №9(139). С. 18-23. DOI 10.24158/tipor.2019.9.2. EDN NQMJOE.
2. Самородов В.А. Разработка и оценка результативности системы менеджмента качества промышленного предприятия: Автореф. Москва, 2004. 20 с.
3. Ямная Д.А., Станкевич М.В. Методика оценки результативности процессов систем менеджмента качества // Вестник БИТУ. 2010. №5. С. 83-85.
4. Хадасевич Н.Р., Семенюк Е.В. К вопросу оценки результативности управления персоналом в организации // Управление экономическими системами: электронный научный журнал. 2018. №1(107). С. 18. EDN VVFRNZ.
5. Мочалин С.М., Каспер М.Е. Оценка результатов работы городского наземного пассажирского транспорта // Информационные технологии и инновации на транспорте: материалы 5-ой Международной науч-

но-практической конференции. Орёл: Орловский государственный университет им. И.С. Тургенева. 2020. С. 3-14. EDN DHOJAF.

6. Лескова Т.М., Груздева Л.С. Оценка эффективности системы менеджмента качества в условиях предприятия // Экономика: вчера, сегодня, завтра. 2018. Т. 8. №4А. С. 196-203. EDN XWEOGT.

7. Кушаков М.Н. Формирование современного подхода к оценке эффективности маркетинга инновационных образовательных услуг на основе теории нечеткой логики // Управленческий учет. 2022. №6. С. 419-429.

8. Ермаков С.А., Болгов А.А., Чурсин А.Г. Нечеткая логика на основе экспертных оценок как альтернативный инструмент для оценки риска в условиях неопределенности // Информация и безопасность. 2022. Т. 25. №2. С. 247-262. DOI 10.36622/VSTU.2022.25.2.009. EDN AKMKSC.

9. Myachin V., Yudina O. Fuzzy-logical approach to constructing an integral indicator in a level estimation model significant market advantage // Baltic Journal of Economic Studies. 2021. Vol. 7. №(2). P. 139-145. DOI: 10.30525/2256-0742/2021-7-2-139-145.

10. Анализ методов оценки эффективности городских пассажирских перевозок / Дрючин Д.А., Конова Т.В., Коцурба С.В., Надирян С.Л., Рассоха В.И. // Наука. Техника. Технологии (политехнический вестник). 2024. №2. С. 33-36. EDN LPZIOX.

11. Варелопупо Г.А. Организация движения и перевозок на городском пассажирском транспорте. М.: Транспорт, 1990. 208 с.

12. Володькин П.П. Оптимизация транспортного обслуживания населения муниципальных образований с учетом социальных факторов: Автореф. Хабаровск, 2011. 42 с.

13. Гудков В.А., Миротин Л.Б. Технология, организация и управление пассажирскими автомобильными перевозками: учебник. М.: Транспорт, 1997, 255 с.

14. Якунина Н.В. Методология повышения качества перевозок пассажиров общественным автомобильным транспортом: Автореф. Оренбург, 2013. 32 с.

15. Курганов В.М. Управление автомобильными перевозками на основе ситуационного подхода: Автореф. Москва, 2004. 40 с.

16. Рассоха В.И. Повышение эффективности эксплуатации автомобильного транспорта на основе разработанных научно-технических, технологических и управленческих решений: Автореф. Оренбург, 2010. 35 с.

17. Колебер Ю.А., Мочалин С.М. Развитие понятийного аппарата в области оценки организации городских пассажирских перевозок // International Journal of Advanced Studies. 2024. Т. 14. №1. С. 136-155. DOI 10.12731/2227-930X-2024-14-1-273. EDN IFJLTD.

18. Гусев С.А., Славина Ю.А. Сравнительный анализ методик оценки качества функционирования системы городского наземного пассажирского транспорта // Научная мысль. 2015. №2. С. 25-29. EDN TUFJSN.

19. Клявин, В.Э., Ризаева Ю.Н., Гринченко А.В. Комплексный показатель качества пассажирских перевозок автомобильным транспортом // Мир транспорта и технологических машин. 2023. №2(81). С. 51-57. DOI 10.33979/2073-7432-2023-2(81)-51-57. EDN CFZFIH.

20. Alkharabsheh A., Moslem, S., Duleba S., Oubahman L. An integrated approach of multi-criteria decision-making and grey theory for evaluating urban public transportation systems. Sustainability. 13(5), 2740. DOI: 10.3390/su13052740.

21. Awasthi A., Chauhan S. S. A fuzzy-based decision support system for urban public transport planning under uncertainty // Transportation Research Part A: Policy and Practice. 2021. №147. P. 1-15.

22. Li X-H., Huang L., Li Q., Liu H-C. Passenger Satisfaction Evaluation of Public Transportation Using Pythagorean Fuzzy MULTIMOORA Method under Large Group Environment // Sustainability. 2020. №12. 4996. DOI: 10.3390/su12124996.

23. Ottomanelli M., Bray S., Caggiani L., Dell'Orco M. Features Selection based on Fuzzy Entropy for Data Envelopment Analysis Applied to Transport Systems // Sustainability. №13(5). 2740. DOI: 10.3390/su13052740.

24. Свиридова И.Ю. Принятие управленческих решений: метод нечеткой логики [Электронный ресурс] / Вектор экономики. 2023. №5. URL: <https://vectoreconomy.ru/images/publications/2023/5/economicsmanagement/Sviridova.pdf>.

25. Сапрунов С.О., Ехлаков Ю.П., Погуда А.А. Сравнительный анализ использования треугольных и трапециальных чисел в системах нечеткой логики // Интеллектуальные системы 4-й промышленной революции: сборник материалов V Международного форума. Томск: ООО «СТТ». 2023. С. 92-94. EDN AYFMBI.

26. Оценка результативности функционирования городского наземного пассажирского транспорта общего пользования с применением метода нечеткой логики: Свид-во о государственной регистрации программы для ЭВМ Российская Федерация. № 2025616632 / Ю.А. Колебер, С.М. Мочалин, Е.В. Пискунов; заявл. 12.03.25; опубл. 18.03.25. EDN XLYRMX.

**Колебер Юлия Андреевна**

Сибирский государственный автомобильно-дорожный университет

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

Преподаватель кафедры «Экономика, логистика и управление качеством»

E-mail: [uljachabol@mail.ru](mailto:uljachabol@mail.ru)

**Мочалин Сергей Михайлович**

Сибирский государственный автомобильно-дорожный университет

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

Д.т.н., профессор кафедры «Экономика, логистика и управление качеством»,

E-mail: mochalin\_sm@mail.ru

**Пискунов Евгений Валерьевич**

Сибирский государственный автомобильно-дорожный университет

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

Магистрант

E-mail: mr.piskunoff2017@yandex.ru

---

YU.A. KOLEBER, S.M. MOCHALIN, E.V. PISKUNOV

**APPLYING FUZZY LOGIC TO EVALUATION  
THE EFFECTIVENESS OF THE FUNCTIONING OF THE  
PUBLIC URBAN PASSENGER TRANSPORT SYSTEMS**

**Abstract.** *The article analyzes mathematical models for evaluating the effectiveness of systems and processes. A model based on the theory of fuzzy logic for complex stochastic systems with multiple initial indicators is selected and substantiated. The concepts and mathematical apparatus of fuzzy logic are described, on the basis of which an algorithm for the implementation of this model is formed to assess the effectiveness of the functioning of public urban passenger transport systems. The obtained algorithm, which reduces the complexity of the data processing and the calculation of effective values, has been implemented in the software developed by the authors of the study.*

**Keywords:** *fuzzy logic, efficiency, urban public passenger transport, system, software*

**BIBLIOGRAPHY**

1. Starodubtseva E.D. Sovershenstvovanie metodiki otsenki rezul'tativnosti sistemy menedzhmenta kachestva na promyshlennom predpriyatii // Teoriya i praktika obshchestvennogo razvitiya. 2019. №9(139). S. 18-23. DOI 10.24158/tipor.2019.9.2. EDN NQMJOJF.
2. Samorodov V.A. Razrabotka i otsenka rezul'tativnosti sistemy menedzhmenta kachestva promyshlennogo predpriyatiya: Avtoref. Moskva, 2004. 20 s.
3. YAmnaya D.A., Stankevich M.V. Metodika otsenki rezul'tativnosti protsessov sistem menedzhmenta kachestva // Vestnik BITU. 2010. №5. S. 83-85.
4. Hadasevich N.R., Semenyuk E.V. K voprosu otsenki rezul'tativnosti upravleniya personalom v organizatsii // Upravlenie ekonomicheskimi sistemami: elektronnyy nauchnyy zhurnal. 2018. №1(107). S. 18. EDN VVFRNZ.
5. Mochalin S.M., Kasper M.E. Otsenka rezul'tatov raboty gorodskogo nazemnogo passazhirskogo transporta // Informatsionnye tekhnologii i innovatsii na transporte: materialy 5-oy Mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii. Oriol: Orlovskiy gosudarstvennyy universitet im. I.S. Turgeneva. 2020. S. 3-14. EDN DHOJAF.
6. Leskova T.M., Gruzdeva L.S. Otsenka effektivnosti sistemy menedzhmenta kachestva v usloviyakh predpriyatiya // Ekonomika: vchera, segodnya, zavtra. 2018. T. 8. №4A. S. 196-203. EDN XWEOGT.
7. Kushakov M.N. Formirovanie sovremennogo podkhoda k otsenke effektivnosti marketinga innovatsiy obrazovatel'nykh uslug na osnove teorii nechetkoy logiki // Upravlencheskiy uchët. 2022. №6. S. 419-429.
8. Ermakov S.A., Bolgov A.A., Chursin A.G. Nechetkaya logika na osnove ekspertnykh otsenok kak al'ternativnyy instrument dlya otsenki riska v usloviya neopredelennosti // Informatsiya i bezopasnost'. 2022. T. 25. №2. S. 247-262. DOI 10.36622/VSTU.2022.25.2.009. EDN AKMKSC.
9. Myachin V., Yudina O. Fuzzy-logical approach to constructing an integral indicator in a level estimation model significant market advantage // Baltic Journal of Economic Studies. 2021. Vol. 7. №(2). R. 139-145. DOI: 10.30525/2256-0742/2021-7-2-139-145.
10. Analiz metodov otsenki effektivnosti gorodskikh passazhirskikh perevozok / Dryuchin D.A., Konovalova T.V., Kotsurba S.V., Nadiryan S.L., Rassokha V.I. // Nauka. Tekhnika. Tekhnologii (politekhnikheskiy vestnik). 2024. №2. S. 33-36. EDN LPZIOX.
11. Varelopupo G.A. Organizatsiya dvizheniya i perevozok na gorodskom passazhirskom transporte. M.: Transport, 1990. 208 s.



12. Volod`kin P.P. Optimizatsiya transportnogo obsluzhivaniya naseleniya munitsipal`nykh obrazovaniy s uchetom sotsial`nykh faktorov: Avtoref. Habarovsk, 2011. 42 s.
13. Gudkov V.A., Mirotn L.B. Tekhnologiya, organizatsiya i upravlenie passazhiskimi avtomobil`nymi perevozkami: uchebnik. M.: Transport, 1997, 255 s.
14. YAkunina N.V. Metodologiya povysheniya kachestva perevozok passazhirov obshchestvennym avtomobil`nym transportom: Avtoref. Orenburg, 2013. 32 s.
15. Kurganov V.M. Upravlenie avtomobil`nymi perevozkami na osnove situatsionnogo podkhoda: Avtoref. Moskva, 2004. 40 s.
16. Rassokha V.I. Povysenie effektivnosti ekspluatatsii avtomobil`nogo transporta na osnove razrabotannykh nauchno-tehnicheskikh, tekhnologicheskikh i upravlencheskikh resheniy: Avtoref. Orenburg, 2010. 35 s.
17. Koleber YU.A., Mochalin S.M. Razvitie ponyatiynogo apparata v oblasti otsenki organizatsii gorodskikh passazhiskikh perevozok // International Journal of Advanced Studies. 2024. T. 14. №1. S. 136-155. DOI 10.12731/2227-930X-2024-14-1-273. EDN IFJLTD.
18. Gusev S.A., Slavina YU.A. Sravnitel`nyy analiz metodik otsenki kachestva funktsionirovaniya sistemy gorodskogo nazemnogo passazhiskogo transporta // Nauchnaya mysl`. 2015. №2. S. 25-29. EDN TUFJSN.
19. Klyavin, V.E., Rizaeva YU.N., Grinchenko A.V. Kompleksnyy pokazatel` kachestva passazhiskikh perevozok avtomobil`nym transportom // Mir transporta i tekhnologicheskikh mashin. 2023. №2(81). S. 51-57. DOI 10.33979/2073-7432-2023-2(81)-51-57. EDN CFZFIH.
20. Alkharabsheh A., Moslem, S., Duleba S., Oubahman L. An integrated approach of multicriteria decisionmaking and grey theory for evaluating urban public transportation systems. Sustainability. 13(5), 2740. DOI: 10.3390/su13052740.
21. Awasthi A., Chauhan S. S. A fuzzy-based decision support system for urban public transport planning under uncertainty //Transportation Research Part A: Policy and Practice. 2021. №147. R. 1-15.
22. Li X-H., Huang L., Li Q., Liu H-C. Passenger Satisfaction Evaluation of Public Transportation Using Pythagorean Fuzzy MULTIMOORA Method under Large Group Environment // Sustainability. 2020. №12. 4996. DOI: 10.3390/su12124996.
23. Ottomanelli M., Bray S., Caggiani L., Dell'Orco M. Features Selection based on Fuzzy Entropy for Data Envelopment Analysis Applied to Transport Systems // Sustainability. №13(5). 2740. DOI: 10.3390/su13052740.
24. Sviridova I.YU. Prinyatie upravlencheskikh resheniy: metod nechotkoy logiki // Vektor ekonomiki. 2023. №5. URL: <https://vectoreconomy.ru/images/publications/2023/5/economicsmanagement/Sviridova.pdf>.
25. Saprunov S.O., Ekhlakov YU.P., Poguda A.A. Sravnitel`nyy analiz ispol`zovaniya treugol`nykh i trapetseidal`nykh chisel v sistemakh nechotkoy logiki // Intellektual`nye sistemy 4-y promyshlennoy revolyutsii: sbornik materialov V Mezhdunarodnogo foruma. Tomsk: OOO «STT». 2023. S. 92-94. EDN AYFMBI.
26. Otsenka rezul'tativnosti funktsionirovaniya gorodskogo nazemnogo passazhiskogo transporta obshchego pol`zovaniya s primeneniem metoda nechotkoy logiki: Svid-vo o gosudarstvennoy registratsii programmy dlya EVM Rossiyskaya Federatsiya. № 2025616632 / YU.A. Koleber, S.M. Mochalin, E.V. Piskunov; zayavl. 12.03.25; opubl. 18.03.25. EDN XLYRMX.

**Koleber Yulia Andreevna**

Siberian State Automobile and Highway University

Адрес: 644080, Russia, Omsk, Mira Avenue, 5

Lecturer of the Department of Economics, Logistics and Quality Management

E-mail: [uljachabol@mail.ru](mailto:uljachabol@mail.ru)**Mochalin Sergey Mikhailovich**

Siberian State Automobile and Highway University

Адрес: 644080, Russia, Omsk, Mira Avenue, 5

Doctor of Technical Sciences

E-mail: [mochalin\\_sm@mail.ru](mailto:mochalin_sm@mail.ru)**Piskunov Evgeny Valerievich**

Siberian State Automobile and Highway University

Адрес: 644080, Russia, Omsk, Mira Avenue, 5

Master's student of the Department of Digital Technologies

E-mail: [mr.piskunoff2017@yandex.ru](mailto:mr.piskunoff2017@yandex.ru)

Д.В. ЕНИН, С.А. ЧЕРНЫШОВ, Д.А. ОВСЕНЕВ

## СРАВНИТЕЛЬНАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА ВИДОВ РАСПИСАНИЙ ДВИЖЕНИЯ МАРШРУТОВ РЕГУЛЯРНЫХ ПЕРЕВОЗОК ПРИ РАВНОМЕРНОМ РАСПРЕДЕЛЕНИИ ПАССАЖИРОПОТОКА

**Аннотация.** В статье рассматривается влияние вида расписания движения маршрутных транспортных средств на показатели заполняемости подвижного состава и среднее время ожидания пассажирами. Проведён сравнительный анализ двух систем организации движения: с фиксированным и неравномерным интервалом. Сформирована математическая модель, учитывающая интенсивность пассажиропотока и интервалы движения, которая позволяет оценить среднюю загрузку транспортных средств и продолжительность ожидания на остановочных пунктах. Проведены расчёты на основе различных сценариев движения и получены данные, подтверждающие преимущество тактового расписания в условиях равномерного пассажиропотока. Сделан вывод о необходимости обеспечения стабильности интервалов движения и предложены меры для её достижения, включая организацию выделенных полос и ускоренную посадку пассажиров.

**Ключевые слова:** расписание движения, общественный транспорт, интервал движения, пассажиропоток, модель заполняемости, среднее время ожидания, регулярные перевозки

### Введение

Для большей части городов Российской Федерации актуальны проблемы, связанные с работой транспорта общего пользования, при этом одной из основных проблем жители городов часто называют нерегулярность его движения. Так, согласно социологическому исследованию аналитического центра НАФИ «Доступность и экологичность общественного транспорта в городах-миллионниках», 46 % населения городов-миллионников в России оценивают неудовлетворительно частоту движения наземного городского пассажирского транспорта, при этом за исключением Москвы, 48 % респондентов оценивают удовлетворительно интервалы движения транспортных средств общего пользования [1]. Результаты исследования представлены на рисунке 1.

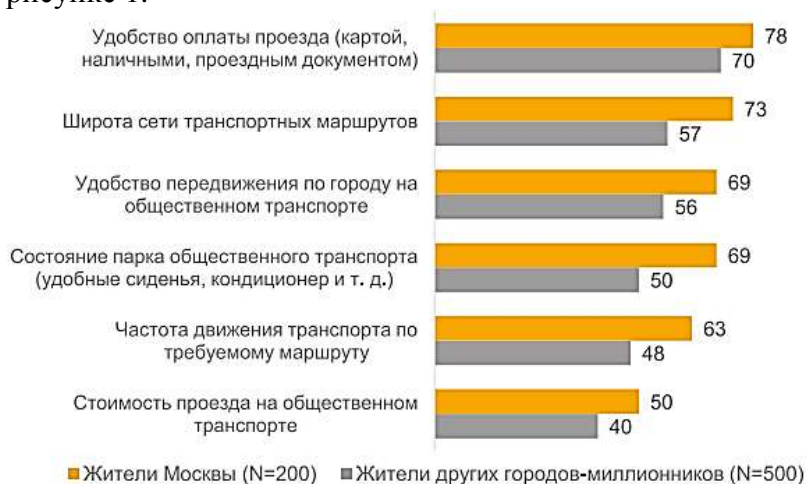


Рисунок 1 – Степень удовлетворенности населением транспортом общего пользования [1]

Среди основных причин возникновения жалоб на частоту движения транспортных средств общего пользования можно выделить состояние расписания его движения. Зачастую расписания составляются без внимания к вопросам постоянства интервалов движения и их синхронизации с расписанием маршрутов регулярных перевозок, которые дублируют рас-

смаатриваемый на значительном участке. В результате этого пассажиры могут столкнуться с ситуацией, когда несколько транспортных средств следуют друг за другом с минимальным интервалом, а затем пассажирам приходится долго ждать прибытие следующего транспортного средства. Такая ситуация особенно характерна для крупных и крупнейших городов, где одновременно работают несколько маршрутов с пересекающимися участками пути.

### **Материал и методы**

В области исследования расписания движения городского транспорта общего пользования работали такие ученые, как Г.А. Варелопуло, М.В. Хрущев, Д.В. Енин, Г.В. Таубкин, З. Рюгер, А.М. Горбачев и др.

Варелопуло Г.А. разработал математическую основу для планирования расписаний общественного транспорта, особенно автобусов, с учетом сложной структуры городского движения. Его подход включал моделирование пассажиропотоков, оптимизацию интервалов и синхронизацию пересадок, что позволяло повысить удобство и снизить затраты [2]. Он ввёл понятие «согласованного расписания», при котором автобусы разных маршрутов прибывают с минимальным временем ожидания на узловых остановках. Это стало ключевым принципом в построении эффективной транспортной сети с прогнозируемым и устойчивым движением.

В Научно-исследовательском институте автомобильного транспорта (НИИАТ) в советское время были разработаны методические рекомендации по формированию расписаний движения автобусов на городских маршрутах, включающая принципы нормирования интервалов, расчёта оборотных рейсов и оптимизации загрузки подвижного состава в зависимости от суточной неравномерности пассажиропотока. Представлены алгоритмы и графические методы построения расписаний, обеспечивающие согласование с другими видами транспорта и повышение эффективности использования автобусного парка [4].

Г.В. Таубкин исследовал требования к составлению расписаний движения наземного общественного транспорта в России, без рассмотрения необходимости синхронизации расписания движения различных маршрутов [3].

А.М. Горбачев разработал математическую модель аperiodических маршрутных расписаний для наземного городского электрического транспорта. В модели используется линейное программирование с критерием равномерности интервалов движения. Особенностью работы является учёт специфики организации транспортных систем в России и странах СНГ, где периодические расписания часто неприменимы из-за технологических и инфраструктурных ограничений. Модель была внедрена в систему автоматизированного проектирования расписаний трамваев и троллейбусов в Санкт-Петербурге, что позволило повысить стабильность и предсказуемость движения транспорта (Горбачев, 2020) [6]. В 2022 году А.М. Горбачев продолжил исследования и представил обзор моделей и методов оптимизации расписаний шаттлового городского и магистрального транспорта. Он детально рассмотрел различия между западными и постсоветскими подходами к созданию периодических, аperiodических и гибридных расписаний. Особое внимание уделено вопросам автоматизации процессов планирования с использованием современных информационных систем и алгоритмов. Автор подчеркнул важность разработки адаптивных моделей, учитывающих местные особенности организации перевозок [7].

И.Н. Кравченя, С.А. Аземша и А.Е. Башаримов сосредоточили своё внимание на оптимизации расписаний городского общественного транспорта на дублирующих участках. Авторы разработали методику выравнивания интервалов движения транспортных средств разных маршрутов с использованием имитационного моделирования. Разработанная модель позволила минимизировать очереди на остановках и сократить время ожидания пассажиров. Проведённые имитационные эксперименты подтвердили эффективность предложенного подхода для повышения качества обслуживания и рационального использования подвижного состава [8].

Tao Liu, Wen Ji, K. Gkiotsalitis и Oded Cats предложили интеграцию координации расписаний и планирования подвижного состава в системах BRT. Их модель позволила значительно снизить операционные расходы и улучшить логистику пересадок [9].

Kang Huang, Jianjun Wu, Huijun Sun, Xin Yang, Ziyao Gao и Xujie Feng разработали модель синхронизации расписаний метро и автобусов на пересадочных узлах, что позволило существенно сократить время ожидания пассажиров и повысить удобство пересадок [10].

Gang Cheng и Yijie He применили многокритериальную оптимизацию для балансировки интересов пассажиров и транспортных операторов, обеспечив снижение затрат и повышение удовлетворенности пользователей [11].

Alfonso Corrado, Simona Barba, Isabel Carozzo и Simone Nardi внедрили интеллектуальную систему Smart Passenger Center для оптимизации расписаний в реальном времени на основе данных о пассажиропотоке и состоянии подвижного состава [15].

Renjie Zhang, Shisong Yin, Mao Ye, Zhiqiang Yang и Shanglu He сосредоточили внимание на оптимизации расписаний рельсового транспорта в режимах "экспресс/обычный маршрут". Их работа направлена на снижение общего времени в пути за счёт оптимального распределения остановок экспресс маршрутов. Модель позволила достичь сокращения времени ожидания пассажиров на 9,3%, улучшив при этом пропускную способность линии [13].

Seyedeh Simin Mousavi, Alireza Pooya, Pardis Roozkhosh и M. Pakdaman разработали би-целевую модель для одновременной оптимизации расписаний и графиков движения автобусов с применением эволюционных алгоритмов. В основе их подхода лежат эволюционные алгоритмы, позволяющие находить компромисс между минимизацией времени ожидания пассажиров и эффективным использованием подвижного состава. Модель продемонстрировала высокую гибкость и применимость к реальным условиям мегаполисов [14].

Rakhi J. Bharadwaj, Sandeep Shinde и Sakshi Oswal предложили динамическую систему формирования расписаний и оптимизации маршрутов городского транспорта, которая в реальном времени анализирует данные о пассажиропотоке и состоянии транспорта. Система автоматически корректирует расписания в зависимости от текущей загруженности маршрутов и дорожной обстановки, что позволило снизить число задержек и повысить оперативность реагирования на внештатные ситуации [12].

3. Рюгер привёл методику согласования графиков движения для маршрутов, имеющих протяженный участок совместного движения, с применением матриц согласования [5].

В городских транспортных системах наземного пассажирского транспорта общего пользования нередко применяют тактовый метод составления расписаний регулярных перевозок. Принцип тактового расписания заключается в том, что транспортные средства движутся с постоянными интервалами, в отличие от расписания, составляемого в зависимости от пассажиропотока или с целью минимизации простоев транспортных средств на конечных пунктах и имеющих нерегулярные интервалы. Основная цель составления тактового расписания – повышение привлекательности транспорта общего пользования и более равномерная его загрузка пассажирами.

3. Рюгер считает, что тактовое расписание (он его называет «ритмичным графиком») применимо для маршрутов с большим пассажиропотоком в крупных городах, тогда как для маршрутов с небольшим числом пассажиров, для пригородного сообщения и для городов с населением до 40 тысяч жителей, более применим переменный (скользящий) график движения транспортных средств по маршруту, в котором не предусматривается соблюдение равномерных интервалов.

Во многих городах России зачастую используется скользящий график движения даже для загруженных маршрутов, наблюдается проблема слабой согласованности маршрутов, дублируемых на значительном участке. Это приводит к необоснованным перепробегам подвижного состава практически без пассажиров с одной стороны (если автобусы идут с минимальным интервалом) и к переполненности салонов автобусов и жалобам на долгое ожидание транспорта с другой (если автобусы идут с максимальным интервалом).

**Теория / Расчет**

В рамках настоящей работы предлагается модель расчёта средней наполняемости автобуса и среднего времени ожидания пассажирами прибытия транспортного средства общего пользования на остановочном пункте при неравномерных и равномерных интервалах движения подвижного состава на маршрутах.

В данной модели принимается то, что пассажиры приходят на остановочный пункт с равномерной частотой (в пассажирах в минуту), а автобусы приезжают на остановку пустыми. Также считается, что на маршрутах регулярных перевозок в городском сообщении нет очереди на посадку. Потому среднее время ожидания маршрутного транспортного средства для тех, кто в него может войти, будет равно времени ожидания теми, кто в него не смог попасть.

Заполняемость остановочного пункта пассажирами к моменту приезда  $j$ -го транспортного средства рассчитывается по следующей формуле:

$$P_j = V * i_j, \quad (1)$$

где  $V$  – интенсивность подхода пассажиров к остановке, пасс./мин;  $i$  – интервал движения транспортных средств, мин.

В случае, если заполняемость остановочного пункта превышает вместимость подъехавшего  $j$ -го транспортного средства, часть пассажиров пропускает это транспортное средство и ждёт следующее. Тогда заполняемость остановочного пункта пассажирами к моменту приезда следующего,  $j+1$ -го транспортного средства, составит:

$$P_{j+1} = V * i_{j+1} + P_{j\_fail}, \quad (2)$$

где  $P_{j\_fail}$  – число пассажиров, подошедших на остановочный пункт до прибытия  $j$ -го транспортного средства, но в него не попавших из-за переполненности салона.

Для демонстрации основного преимущества фиксированного интервала в дальнейшем будут рассматриваться ситуации, при которых в случае неравномерного интервала часть пассажиров не смогут войти в первое пришедшее транспортное средство (далее – ТС). Поэтому формула для нахождения среднего времени ожидания пассажиром транспортного средства для двух сценариев будет различаться.

Для случая фиксированного интервала, если учесть равномерный приход пассажиров на остановочный пункт, функция  $P(t)$  зависимости числа пассажиров на остановочном пункте от времени на интервале  $[x \cdot i, (x + 1)i]$ , где  $x = 1, 2, \dots$ , будет выглядеть следующим образом (3):

$$P(t) = V(t - xi). \quad (3)$$

В таком случае величина ожидания пассажирами ТС на остановочном пункте имеет непрерывное равномерное распределение на интервале  $[x \cdot i, (x + 1)i]$ . Тогда математическое ожидание значения времени, которое пассажир проводит на остановочном пункте перед посадкой в ТС, рассчитывается по формуле (4):

$$\bar{t}_{wait} = \int_{x \cdot i}^{(x+1)i} \frac{t}{(x+1)i - xi} dt = \int_{x \cdot i}^{(x+1)i} \frac{t}{i} dt = \frac{i}{2}. \quad (4)$$

Таким образом, среднее время ожидания пассажиром транспортного средства общего пользования будет равно половине интервала движения маршрутных транспортных средств.

Для интервальной системы вводятся три категории ТС, время ожидания которых пассажирами будет отличаться:

1-е транспортное средство, которое приедет в момент времени  $t = i_{min}$  и которое заберёт всех подошедших к данному моменту времени пассажиров. Для него среднее время ожидания рассчитывается по формуле (4), где  $i = i_{min}$ .

Чётные ТС (2, 4, 6, ...), которые будут приезжать через время  $i_{max}$  после предыдущего. В данной модели предполагается, что эти ТС не смогут забрать всех пассажиров с остановочного пункта и будут заполнены максимально. Для тех пассажиров, которые смогли

сесть в первое подошедшее ТС время ожидания рассчитывается по формуле (4), где  $i = i_{max}$ .

Нечётные ТС, начиная с третьего (3, 5, 7, ...) которые будут приезжать через время  $i_{min}$  после предыдущего. В этом случае, помимо пассажиров, пришедших на остановочный пункт после отправления предыдущего ТС, в эти ТС будут осуществлять посадку те пассажиры, кто не смог сесть в предыдущее ТС. Из-за этого заполнение третьего, пятого и т.д. ТС будет отличаться от заполнения первого.

Пусть те пассажиры, которые не смогли осуществить посадку в первое подошедшее после начала ожидания прибытия ТС, выбираются случайным образом (их время ожидания ТС, в которое они не смогли сесть из-за его перегруженности, будет стремиться к половине максимального интервала движения маршрута регулярных перевозок). Тогда полное время ожидания ТС будет равно сумме половины максимального интервала движения и полного минимального интервала движения транспортных средств на маршруте регулярных перевозок, т.е.  $\frac{i_{max}}{2} + i_{min}$ .

Таким образом, имеется три категории пассажиров, для которых значение среднего времени ожидания ТС отличается. Для нахождения среднего времени ожидания транспортного средства необходимо учесть каждую категорию и её долю в общем числе пассажиров. Стоит также отметить, что так как число пассажиров в 1-м ТС отличается от числа пассажиров в 3-м, 5-м и т.д. ТС, в зависимости от числа ТС, которые учитываются в расчёте, среднее время ожидания пассажиров будет меняться и по мере увеличения числа учитываемых ТС будет стремиться к определённому значению.

Пусть  $x$  – это число временных интервалов между отправлениями нечётных ТС (1-го и 3-го, 3-го и 5-го, ...), в каждый из которых в автобус садится одинаковое количество пассажиров, относящихся ко всем трём категориям. При этом надо также учесть отдельно тех, кто осуществил посадку в первое ТС и ожидал его в среднем половину минимального интервала движения на маршруте регулярных перевозок.

Тогда среднее время ожидания ТС при интервальной системе может быть рассчитано по формуле (5):

$$\overline{t_{wait}} = \lim_{x \rightarrow \infty} \left( \frac{P(x+1) \frac{i_{min}}{2} + 85x \frac{i_{max}}{2} + P_{fail}x \left( \frac{i_{max}}{2} + i_{min} \right)}{P(x+1) + (85 + P_{fail})x} \right), \quad (5)$$

где  $P$  – число пассажиров в ТС, идущим с наименьшим интервалом, пасс.;

$P_{fail}$  – число пассажиров, не попавших в первое ТС, пасс.;

$i_{min}$  – наименьший интервал движения, мин;

$i_{max}$  – наибольший интервал движения, мин;

85 – вместимость ТС (в данной задаче), пасс.

### Результаты и обсуждение

Рассчитаем 4 сравнительных варианта интенсивности подхода пассажиров к остановочному пункту со случайными значениями на основе созданной модели. Они показаны в таблице 1.

Таблица 1 – Варианты расчёта модели заполняемости автобусов

Показатель	Единица измерений	Вариант 1	Вариант 2	Вариант 3	Вариант 4
Интенсивность подхода пассажиров на остановку $V$	пасс./мин	13	7	5	4
Интервал движения при фиксированном интервале $i$	мин	5	10	15	20
Минимальный интервал движения при неравномерном интервале, $i_{min}$	мин	3	7	10	15
Максимальный интервал движения при неравномерном интервале, $i_{max}$	мин	7	14	20	25

В качестве транспортного средства будет использоваться транспортное средство с расчётной вместимостью 85 пассажиро-мест. Были получены данные по наполняемости ав-

тобусов и среднему времени ожидания пассажирами автобуса на остановочном пункте в случае фиксированного интервала и неравномерного. Результаты представлены в таблице 2.

Таблица 2 – Результаты расчётов

Показатель	Вариант 1		Вариант 2		Вариант 3		Вариант 4	
	5	3-7	10	7-14	15	10-20	20	15-25
Интервал движения, мин	5	3-7	10	7-14	15	10-20	20	15-25
Новых пассажиров на остановке при минимальном интервале	65	39	70	49	75	50	80	60
Новых пассажиров на остановке при максимальном интервале	65	<b>91</b>	70	<b>98</b>	75	<b>100</b>	80	<b>100</b>
Число пассажиров, не попавших в первый подошедший автобус	0	6	0	13	0	15	0	15
Среднее время ожидания автобуса пассажирами, мин	2,5	3,0	5,0	6,5	7,5	9,3	10,0	12,0

По результатам расчётов видно, что выдерживание равномерного интервала в условиях стабильного пассажиропотока на протяжении нескольких десятков минут позитивно влияет на стабильность заполняемости транспортных средств. В то же время при неравномерном интервале половина автобусов заполняется меньше, чем при равномерном интервале, но вторая половина следует на пределе максимальной загрузки, а часть пассажиров даже не могут войти в первое подошедшее маршрутное транспортное средство. Последняя ситуация негативно влияет на среднее время ожидания прибытия транспортного средства пассажирами при неравномерных интервалах.

### Вывод

Разработанная модель показала позитивное влияние стабильной частоты движения транспортных средств общего пользования на такие показатели, как заполняемость подвижного состава и среднее время ожидания пассажирами прибытия транспортного средства. Более стабильная заполняемость влияет на уменьшение экономических издержек и повышение среднего уровня комфортности перевозок (в работе не рассматривались), а среднее время ожидания пассажирами транспортного средства становится меньше.

Для выдерживания равномерного интервала между подвижными единицами необходимо стремиться к одинаковому времени в пути между одними и теми же пунктами маршрута для каждого транспортного средства. Для этого на практике могут использоваться такие мероприятия, как организация выделенных полос для маршрутных транспортных средств, чтобы на скорость движения транспортных средств общего пользования не оказывал влияние основной транспортный поток, а также осуществление посадки и высадки пассажиров с использованием всех пассажирских дверей в транспортных средствах общего пользования для сокращения и стабилизация времени стоянки на остановочных пунктах.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Аналитический центр НАФИ. Доступность и экологичность общественного транспорта в городах-миллионниках [Электронный ресурс]. URL: <https://nafi.ru/projects/proekty/dostupnost-i-ekologichnost-obshchestvennogo-transporta/>, свободный.
2. Варелопуло Г.А. Организация движения и перевозок на городском пассажирском транспорте. М.: Транспорт, 1990. 208 с.
3. Таубкин Г.В. Требования к составлению расписаний движения наземного общественного транспорта в России // Социально-экономические проблемы развития и функционирования транспортных систем городов и зон их влияния: Материалы XXIV Международной (XXVII Екатеринбургской, II Минской) научно-практической конференции/ Минск: БНТУ, 2018. С. 268–279.
4. Методические рекомендации по формированию расписаний движения автобусов на городских маршрутах. НИИАТ. М.: Транспорт, 1986. 72 с.
5. Рюгер З. Эксплуатация городского пассажирского транспорта // Москва «Транспорт». 1977. С. 51-81.
6. Горбачев А.М. Математическая модель аperiodических маршрутных расписаний городского электрического транспорта // Автоматика на транспорте. 2020. Т. 6. №4. С. 499–517. DOI: 10.20295/2412-9186-2020-



6-4-499-517.

7. Горбачев А.М. Обзор моделей и методов оптимизации расписаний шаттлового городского и магистрального транспорта // Автоматика на транспорте. 2022. Т. 8. №3. С. 287–295. DOI: 10.20295/2412-9186-2022-8-03-287-295.

8. Кравченя И.Н., Аземша С.А., Башаримов А.Е. Оценка эффективности оптимизации расписания городского общественного транспорта на дублирующих участках методами имитационного моделирования // Белорусский государственный университет транспорта. 2023. С. 244–246.

9. Liu T., Ji W., Gkiotsalitis K., Cats O. Optimizing public transport transfers by integrating timetable coordination and vehicle scheduling // Computers & Industrial Engineering. 2023. Vol. 184. P. 109577. DOI: 10.1016/j.cie.2023.109577.

10. Huang K., Wu J., Sun H., Yang X., Gao Z., Feng X. Timetable synchronization optimization in a subway-bus network // Physica A: Statistical Mechanics and its Applications. 2022. DOI: 10.1016/j.physa.2022.128273.

11. Cheng G., He Y. Enhancing passenger comfort and operator efficiency through multi-objective bus timetable optimization // Electronic Research Archive. 2024. DOI: 10.3934/era.2024028.

12. Bharadwaj R.J., Shinde S., Oswal S. Dynamic Timetable and Route Optimized Public Transport System // 2022 Algorithms, Computing and Mathematics Conference (ACM). 2022. P. 100–107. DOI: 10.1109/ACM57404.2022.00027.

13. Zhang R., Yin S., Ye M., Yang Z., He S. A timetable optimization model for urban rail transit with express/local mode // Journal of Advanced Transportation. 2021. Vol. 2021. P. 1–15. DOI: 10.1155/2021/5589185.

14. Mousavi S.S., Pooya A., Roozkhosh P., Pakdaman M. A new bi-objective simultaneous model for timetabling and scheduling public bus transportation // OPSEARCH. 2024. DOI: 10.1007/s12597-024-00807-8.

15. Corrado A., Barba S., Carozzo I., Nardi S. Smart Passenger Center: Real-Time Optimization of Urban Public Transport // The International FLAIRS Conference Proceedings. 2023. DOI: 10.32473/flairs.36.133300.

#### Енин Дмитрий Владимирович

Российский университет транспорта (ПУТ); Московский автомобильно-дорожный государственный технический университет (МАДИ)

Адрес: 127994, Россия, г. Москва, ул. Образцова, д. 9, стр. 9; 125319, г. Москва, Ленинградский пр-т, д. 64

К.т.н., доцент, Высшая инженерная школа; кафедра «Логистика»

E-mail: enindv-lgts@yandex.ru

#### Овсенов Дмитрий Александрович

Российский университет транспорта

Адрес: 127994, Россия, г. Москва, ул. Образцова, д. 9, стр. 9

Магистрант

E-mail: Ovankadimp@gmail.com

#### Чернышов Сергей Андреевич

Российский университет транспорта

Адрес: 127994, Россия, г. Москва, ул. Образцова, д. 9, стр. 9

Магистрант

E-mail: tchernyshov.serge1@yandex.ru

---

D.V. YENIN, S.A. CHERNYSHOV, D.A. OVSENEV

## COMPARATIVE ANALYSIS OF PUBLIC TRANSPORT SCHEDULING TYPES UNDER UNIFORM PASSENGER FLOW DISTRIBUTION

**Abstract.** *The article examines the impact of different types of schedules for regular route transportation on vehicle occupancy rates and average passenger waiting times. A comparative analysis was conducted between two scheduling systems: fixed and variable intervals. A mathematical model has been developed, considering passenger flow intensity and service intervals, enabling assessment of average vehicle occupancy and waiting times at stops. Calculations based on various operational scenarios have confirmed the advantages of fixed-interval scheduling under conditions of uniform passenger flow. Conclusions emphasize the need for stable service intervals, proposing measures for their implementation, including dedicated lanes and accelerated passenger boarding.*

**Keywords:** *scheduling, public transport, service interval, passenger flow, occupancy model, average waiting time, regular transportation*

## BIBLIOGRAPHY

1. Analiticheskiy tsentr NAFI. Dostupnost` i ekologichnost` obshchestvennogo transporta v gorodakh-millionnikakh [Elektronnyy resurs]. URL: <https://nafi.ru/projects/proekty/dostupnost-i-ekologichnost-obshchestvennogo-transporta/>, svobodnyy.
2. Varelopulo G.A. Organizatsiya dvizheniya i perevozok na gorodskom passazhirskom transporte. M.: Transporta, 1990. 208 s.
3. Taubkin G.V. Trebovaniya k sostavleniyu raspisaniy dvizheniya nazemnogo obshchestvennogo transporta v Rossii // Sotsial'no-ekonomicheskie problemy razvitiya i funktsionirovaniya transportnykh sistem gorodov i zon ikh vliyaniya: Materialy XXIV Mezhdunarodnoy (XXVII Ekaterinburgskoy, II Minskoy) nauchno-prakticheskoy konferentsii/ Minsk: BNTU, 2018. S. 268-279.
4. Metodicheskie rekomendatsii po formirovaniyu raspisaniy dvizheniya avtobusov na gorodskikh marshrutakh. NIIAT. M.: Transport, 1986. 72 s.
5. Ryuger Z. Eksploatatsiya gorodskogo passazhirskogo transporta // Moskva "Transport". 1977. S. 51-81.
6. Gorbachev A.M. Matematicheskaya model` aperiodicheskikh marshrutnykh raspisaniy gorodskogo elektricheskogo transporta // Avtomatika na transporte. 2020. T. 6. №4. S. 499-517. DOI: 10.20295/2412-9186-2020-6-4-499-517.
7. Gorbachev A.M. Obzor modeley i metodov optimizatsii raspisaniy shattlovogo gorodskogo i magistral'nogo transporta // Avtomatika na transporte. 2022. T. 8. №3. S. 287-295. DOI: 10.20295/2412-9186-2022-8-03-287-295.
8. Kravchenya I.N., Azemsha S.A., Basharimov A.E. Otsenka effektivnosti optimizatsii raspisaniya gorodskogo obshchestvennogo transporta na dubliruyushchikh uchastkakh metodami imitatsionnogo modelirovaniya // Belorusskiy gosudarstvennyy universitet transporta. 2023. S. 244-246.
9. Liu T., Ji W., Gkiotsalitis K., Cats O. Optimizing public transport transfers by integrating timetable coordination and vehicle scheduling // Computers & Industrial Engineering. 2023. Vol. 184. P. 109577. DOI: 10.1016/j.cie.2023.109577.
10. Huang K., Wu J., Sun H., Yang X., Gao Z., Feng X. Timetable synchronization optimization in a subway-bus network // Physica A: Statistical Mechanics and its Applications. 2022. DOI: 10.1016/j.physa.2022.128273.
11. Cheng G., He Y. Enhancing passenger comfort and operator efficiency through multi-objective bus timetable optimization // Electronic Research Archive. 2024. DOI: 10.3934/era.2024028.
12. Bharadwaj R.J., Shinde S., Oswal S. Dynamic Timetable and Route Optimized Public Transport System // 2022 Algorithms, Computing and Mathematics Conference (ACM). 2022. P. 100-107. DOI: 10.1109/ACM57404.2022.00027.
13. Zhang R., Yin S., Ye M., Yang Z., He S. A timetable optimization model for urban rail transit with express/local mode // Journal of Advanced Transportation. 2021. Vol. 2021. P. 1-15. DOI: 10.1155/2021/5589185.
14. Mousavi S.S., Pooya A., Roozkhosh P., Pakdaman M. A new bi-objective simultaneous model for timetabling and scheduling public bus transportation // OPSEARCH. 2024. DOI: 10.1007/s12597-024-00807-8.
15. Corrado A., Barba S., Carozzo I., Nardi S. Smart Passenger Center: Real-Time Optimization of Urban Public Transport // The International FLAIRS Conference Proceedings. 2023. DOI: 10.32473/flairs.36.133300.

**Dmitriy Vladimirovich Yenin**

Russian University of Transport; Moscow Automobile and Road Construction State Technical University

Adress: 127994, Russia, Moscow, Obratsova St., 9, b.. 9; 125319, Russia, Moscow, Leningradsky Ave., 64

Candidate of Technical Sciences

E-mail: enindv-lgts@yandex.ru

**Dmitriy Alexandrovich Ovsenev**

Russian University of Transport

Adress: 127994, Russia, Moscow, Obratsova St., 9, b.. 9

Master's student

E-mail: Ovankadimp@gmail.com

**Sergey Andreevich Chernyshov**

Russian University of Transport

Adress: 127994, Russia, Moscow, Obratsova St., 9, b.. 9

Master's student

E-mail: tchernyshov.serge1@yandex.ru

УДК 621.833.65

doi: 10.33979/2073-7432-2025-3-2(90)-59-67

Н.Н. ТРУШИН, А.В. ПЛЯСОВ

**ВАРИАНТЫ СИНТЕЗА КИНЕМАТИЧЕСКИХ СХЕМ ПЛАНЕТАРНЫХ КОРОБОК ПЕРЕДАЧ С ДВУМЯ СТЕПЕНЯМИ СВОБОДЫ И МИНИМИЗАЦИЕЙ ЗАМКНУТЫХ КОНТУРОВ**

**Аннотация.** В статье представлены варианты принципиальных кинематических схем планетарных коробок передач с двумя степенями свободы на базе планетарных механизмов типа 2К-Н. Преимуществом рассматриваемых кинематических схем является минимизация замкнутых контуров и циркулирующих мощностей, поэтому их можно считать условно бесконтурными. Представленные схемотехнические решения могут быть осуществлены в автоматических гидромеханических трансмиссиях автобусов и других типов мобильных машин, имеющих дизельные двигатели и блокируемые комплексные гидротрансформаторы.

**Ключевые слова:** мобильные машины, трансмиссии, планетарная коробка передач, кинематическая схема

**Введение**

Решение практических задач в области автоматизации управления трансмиссиями колесных и гусеничных машин во многих случаях осуществляется на основе планетарных коробок передач (ПКП) [1]. Данное обстоятельство обусловлено положительными кинематическими и динамическими свойствами планетарных механизмов и коробок передач на их основе по сравнению с непланетарными конструкциями [2].

Самые первые ПКП появились в автомобилях Г. Форда, У. Вильсона, А. Адамса в период 1901-1906 гг. Это были коробки передач с двумя степенями свободы [3]. С середины XX века в трансмиссиях мобильных машин стали применяться ПКП с тремя степенями свободы [4]. В начале XXI века в автомобилестроении достаточно широко стали применяться ПКП с четырьмя степенями свободы и числом ступеней переднего хода 8-10 и более [5]. Существуют также прогнозы, что могут получить распространение ПКП с пятью степенями свободы [6].

**Материал и методы**

Одной из центральных задач, решаемых при проектировании ПКП, является синтез ее принципиальной кинематической схемы, поскольку от свойств кинематической схемы зависят технологические и эксплуатационные свойства коробки передач, трансмиссии мобильной машины и машины в целом. Данная процедура является наиболее трудоемкой операцией при синтезе и исследовании кинематических схем ПКП по их заданным свойствам [7].

В процессе эволюции ПКП для мобильных машин сформировались несколько методов синтеза их кинематических схем.

Первый метод синтеза кинематических схем ПКП, рассмотренный ранее в работе [8], предполагает создание коробок передач с двумя и более степенями свободы без замкнутых кинематических и силовых контуров. В работе [9] достаточно подробно рассмотрены и положительные, и отрицательные свойства таких решений. При этом отмечается, что положительные свойства ПКП с двумя степенями свободы могут оказаться решающими с точки зрения экономии затрат на их проектирование и изготовление. На основе данного подхода в работе [9] представлен ряд вариантов кинематических схем ПКП на базе планетарных механизмов типа 2К-Н (по классификации проф. В.Н. Кудрявцева) с двумя степенями свободы. Предложенные схемотехнические решения ориентируются на использование их в трансмиссиях мобильных машин совместно с гидродинамическими трансформаторами.

Второй метод синтеза схем ПКП состоит в том, что в кинематической схеме ПКП возможно существование нескольких замкнутых контуров. У коробок передач с двумя и более степенями свободы, синтезируемых по второму методу, поток мощности разделяется. Неподвижное звено низшей передачи ПКП на промежуточных ступенях получает вращение через составляющие передачи. Такое построение ПКП обеспечивает необходимое уменьшение или увеличение передаточного числа на промежуточных ступенях [10]. Такой подход был использован в ПКП Вильсона, анализ которой приведен, в частности, в [11].

Отметим, что ПКП британского инженера У. Вильсона (Walter Gordon Wilson, 1874-1957) – одно из самых известных изобретений в области планетарных механизмов и трансмиссий мобильных машин. Данная ПКП с двумя степенями свободы была защищена патентами Великобритании (патент № 164042, 1921 г.), Франции (патент № 529347, 1921 г.), Германии (патент № 378413, 1923 г.), США (патент № 1404675, 1922 г.). Характерной кинематической особенностью коробки передач Вильсона является соединение водила второго планетарного механизма (ряда) с коронными шестернями первого и третьего планетарных рядов (порядок следования планетарных механизмов – от входного вала). Высшая передача в коробке Вильсона – прямая [3].

### Теория

На рисунке 1 приведена кинематическая схема одного из вариантов коробки передач Вильсона, которая выполнялась на основе планетарных механизмов типа 2К-Н [12]. Коробки передач Вильсона могли иметь 4 или 5 ступеней переднего хода и одну передачу заднего хода (соответственно схемы 4+1 или 5+1 – четыре передачи или пять передач переднего хода и одна передача заднего хода). На данной схеме и далее на рисунке 2 буквами *d* и *x* обозначены ведущий и ведомый валы коробки передач соответственно, числа зубьев шестерен, тормоза управления  $T_1 - T_5$ , фрикционная блокировочная муфта  $\Phi$ , которая могла быть конусной, как на рис. 1, или многодисковой. Передача заднего хода включается тормозом  $T_5$ .

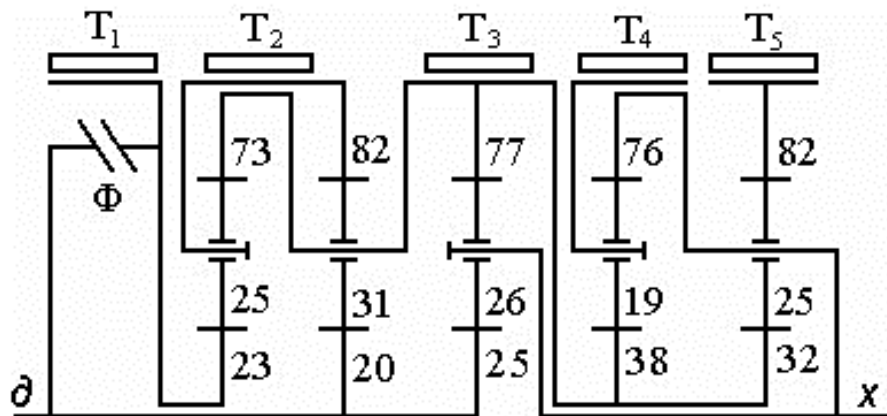


Рисунок 1 – Вариант кинематической схемы 5-ступенчатой ПКП Вильсона

Негативным свойством коробок передач Вильсона было возникновение циркулирующих мощностей, в том числе и прямой передаче, что было показано в [10]. Но, несмотря на этот недостаток, коробки передач Вильсона в течение нескольких десятилетий устанавливались на многие виды мобильных машин гражданского и военного назначения – автобусы, грузовики, тракторы, танки. Коробки передач Вильсона часто комбинировались с гидродинамическими муфтами и гидротрансформаторам, могли иметь механические и гидравлические приводы устройств управления, ручное или автоматизированное переключение ступеней [13].

На рисунке 2 приведена кинематическая схема ПКП с двумя степенями свободы типа 5+1, разработанной компанией Self Changing Gears [12]. Данная конструкция представляет собой модифицированный вариант коробки передач Вильсона. Передача заднего хода вклю-

чается тормозом  $T_5$ . Четвертый планетарный механизм здесь выполнен с двойными сателлитами. Данная коробка передач была предназначена для установки на грузовые автомобили грузоподъемностью до 32 тонн и автобусы [14]. В работе [15] приведен подробный кинематический и силовой анализ данной конструкции.

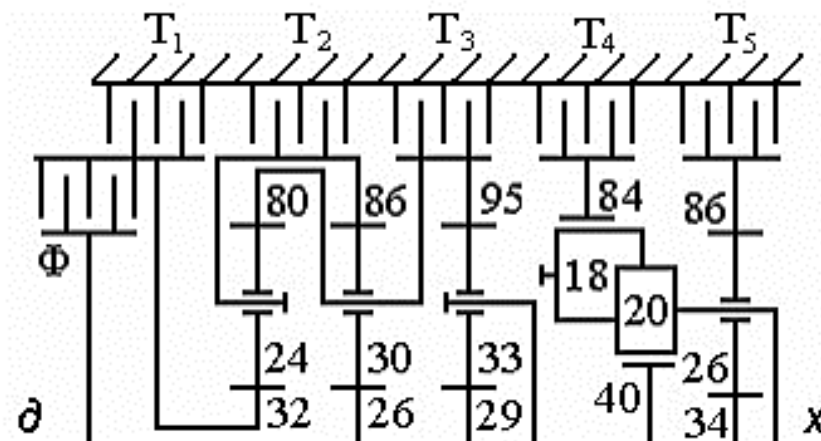


Рисунок 2 – Кинематическая схема ПКП Self Changing Gears muna 5+1

При втором методе синтеза ПКП могут образовываться замкнутые кинематические и силовые контуры, поэтому в зависимости от количества замкнутых контуров такие схемы называются одноконтурными, двухконтурными и т.д. [6] Это означает, что в схемах с одним замкнутым контуром при остановке некоторого тормозного звена совместно работают два планетарных механизма, а в схемах с двумя замкнутыми контурами при остановке тормозного звена работают уже три планетарных механизма и т.д. Такие коробки передач представляют собой многопоточные дифференциальные механизмы, в которых подводимый поток мощности разделяется на параллельные потоки и по-разному трансформируется передаваемый вращающий момент [12].

В многоконтурной ПКП велика вероятность возникновения циркулирующей мощности, дополнительно нагружающей звенья планетарных механизмов и снижающей коэффициент полезного действия (КПД). Как выше было отмечено относительно коробки передач Вильсона, циркулирующая мощность в многоконтурной ПКП возможна и на прямой передаче при отсутствии относительного вращения отдельных звеньев передачи [10]. Кроме этого, в многоконтурных ПКП усложняется расчет передаточных чисел и КПД по отдельным ступеням [16].

Наиболее распространенным на практике стал третий метод синтеза кинематических схем ПКП, являющийся комбинированным: часть передач образуется первым методом, а часть – вторым методом. При этом возможны три варианта кинематических схем ПКП: 1) количество ступеней без замкнутых контуров равно количеству ступеней с замкнутыми контурами; 2) количество ступеней без замкнутых контуров больше количества ступеней с замкнутыми контурами; 3) количество ступеней без замкнутых контуров меньше количества ступеней с замкнутыми контурами. На рисунках 3 и 4 представлены кинематические схемы ПКП с двумя степенями свободы, синтезированные по комбинированному методу [10].

На рисунках 3, 4 и последующих обозначены следующие элементы коробок передач: ВЩ – ведущий (входной) вал; ВМ – ведомый (выходной) вал;  $Z_1, Z_3, Z_5, Z_7, Z_9$  – солнечные (центральные) шестерни и соответствующие им числа зубьев;  $Z_2, Z_4, Z_6, Z_8, Z_{10}$  – эциклические (коронные) шестерни и соответствующие им числа зубьев;  $Z_{c1}, Z_{c2}, Z_{c3}, Z_{c4}, Z_{c5}$  – сателлиты и соответствующие им числа зубьев. Планетарные механизмы (ряды) обозначены буквами К с соответствующими индексами.

Управляющие тормоза ПКП обозначены как  $T_1, T_2, T_3, T_4, T_{zx}$ . Индекс при идентификаторе тормоза обозначает идентификатор включаемой передачи (ступени), причем чем

больше значение индекса, тем ниже передаточное число передачи. ФБ на всех схемах – блокировочная муфта, обеспечивающая прямую передачу.

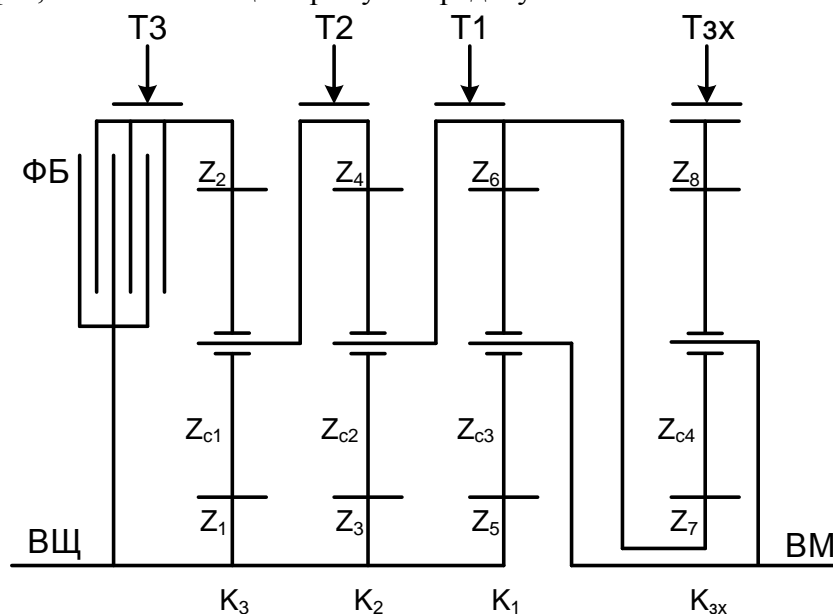


Рисунок 3 – Кинематическая схема ПКП типа 4+1 с вращением звеньев планетарных рядов ведущим валом

В кинематической схеме ПКП, приведенной на рисунке 3, каждая промежуточная передача образуется вращением с различной угловой скоростью эпициклической (коронной) шестерни планетарного ряда первой передачи (ступени) K<sub>1</sub>. При включении тормоза Т<sub>1</sub> включается первая передача (низшая) бесконтурного типа. Планетарные ряды K<sub>2</sub> и K<sub>3</sub> в передаче движения при этом не задействованы. При включении тормоза Т<sub>2</sub> или Т<sub>3</sub> происходит включение второй или третьей промежуточной передачи, которые уже имеют соответственно два или три замкнутых контура. Такое построение ПКП приводит к изменению угловой скорости эпициклической шестерни первого планетарного ряда K<sub>1</sub>. Таким образом, передачи в данной коробке образованы вращением составляющих передач ведущим валом. При необходимости увеличения числа ступеней в коробке передач количество планетарных рядов может быть увеличено с соответствующим увеличением количества замкнутых контуров. Кинематический анализ рассмотренного метода образования коробки передач рассмотрен, в частности, в [16].

Режим заднего хода в коробках передач на рисунках 1, 2, 3 и других осуществляется при помощи реверсивной ступени, выполненной по схеме Вильсона. Реверс-редуктор Вильсона в общем случае содержит два планетарных ряда типа 2К-Н и относится к группе одноконтурных передач, в котором в передаче движения при включении заднего хода одновременно участвуют два планетарных механизма K<sub>1</sub> и K<sub>3x</sub> (рис. 3). При этом на передаче заднего хода возникает циркулирующая мощность, но это свойство реверса Вильсона не считается серьезным недостатком по причине достаточно высокого КПД (0,87-0,92) и непродолжительности такого режима [15]. Поэтому схема реверса Вильсона считается рациональной конструкцией и часто применялась в ПКП с двумя степенями свободы [16].

На рисунке 4 приведена кинематическая схема ПКП с двумя степенями свободы типа 5+1, детальный анализ которой приведен в [8]. Высшая передача здесь тоже прямая.

На рисунке 5 приведена кинематическая схема ПКП с двумя степенями свободы типа 3+1, в которой вращение составляющих передач производится уже ведомым (выходным) валом [10]. Передача заднего хода располагается на входе коробки передач и выполнена по схеме планетарного механизма 2К-Н с неподвижным водилом. Муфта блокировки связывает планетарный ряд K<sub>3</sub> с ведомым валом. На рисунке 5 пунктирными линиями обозначен также альтернативный вариант расположения муфты блокировки, которая связывает планетарный

ряд  $K_1$  с ведущим валом. Высшая передача в этой схеме также прямая.

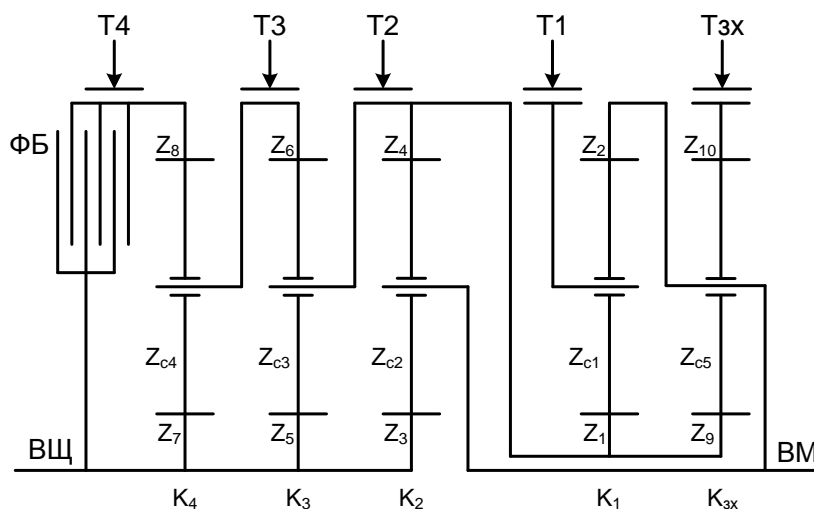


Рисунок 4 – Кинематическая схема ПКП типа 5+1 с вращением звеньев планетарных рядов ведущим валом

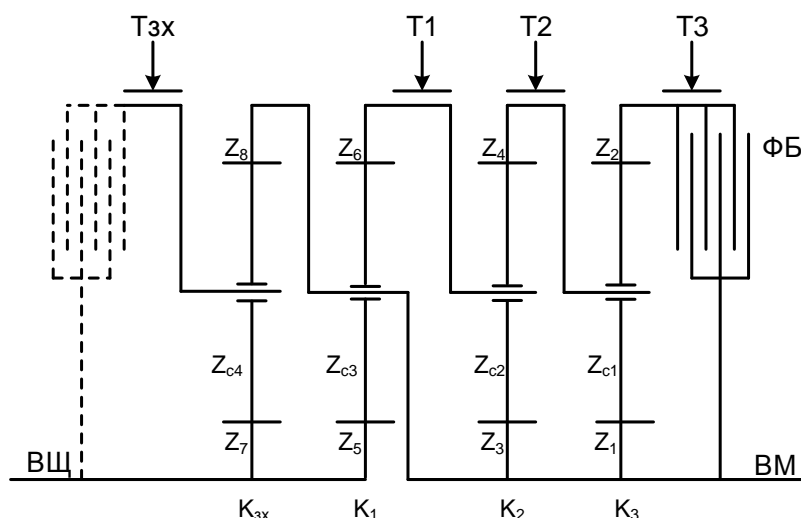


Рисунок 5 – Кинематическая схема ПКП типа 4+1 с кинематической связью звеньев с ведомым валом

### Результаты и обсуждение

Далее представлены кинематические схемы модифицированных ПКП, исходные варианты которых были рассмотрены в [9]. На рисунках 6 и 7 приведены кинематические схемы ПКП с двумя степенями свободы типа 4+1 и реверсом Вильсона. Обе ПКП обеспечивают повышающую высшую передачу при включении тормоза Т4. Путем добавления еще одного планетарного ряда обе ПКП могут быть модифицированы по схемам 5+1 или 4+2. В реверсе Вильсона оба планетарных механизма могут быть унифицированы по числам зубьев шестерен; примеры такой унификации приведены, например, в [11].

На рисунке 8 приведена модифицированная кинематическая схема коробки передач типа 4+2, которая обеспечивает две передачи заднего хода по схеме Вильсона при помощи планетарных рядов  $K_{3x1}$  и  $K_{3x2}$ .

На рисунке 9 приведена кинематическая схема ПКП типа 4+1 и повышающей высшей передач, в которой ступень заднего хода выполнена по другой одноконтурной схеме, рассмотренной в [15]. В этой схеме на передаче заднего хода также возникает циркулирующая мощность. КПД данной ступени реверса оценивается на уровне 0,84-0,9.



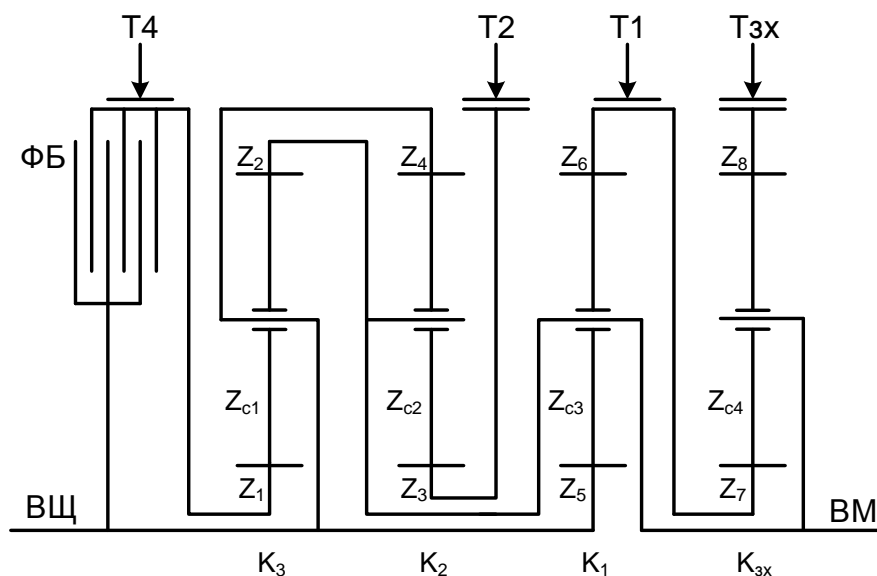


Рисунок 6 – Вариант кинематической схемы ПКП типа 4+1 с реверсом Вильсона

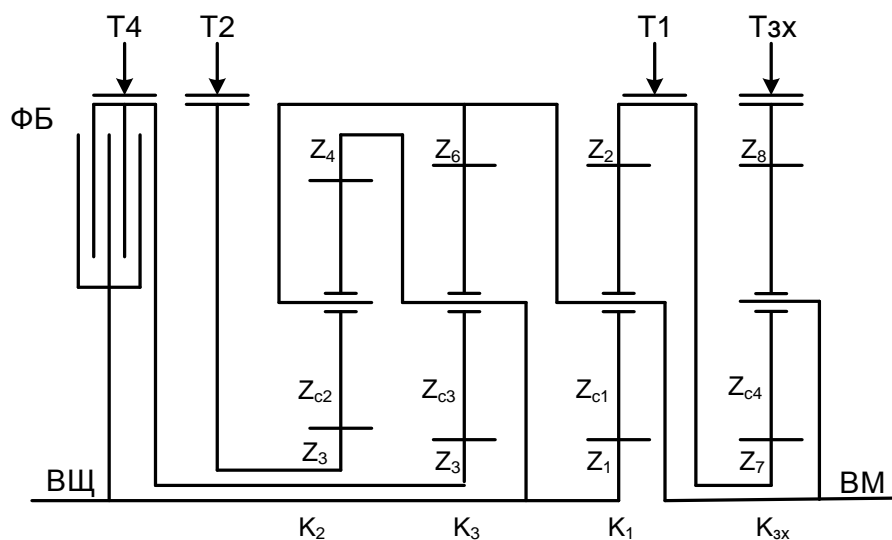


Рисунок 7 – Второй вариант кинематической схемы ПКП типа 4+1 с реверсом Вильсона

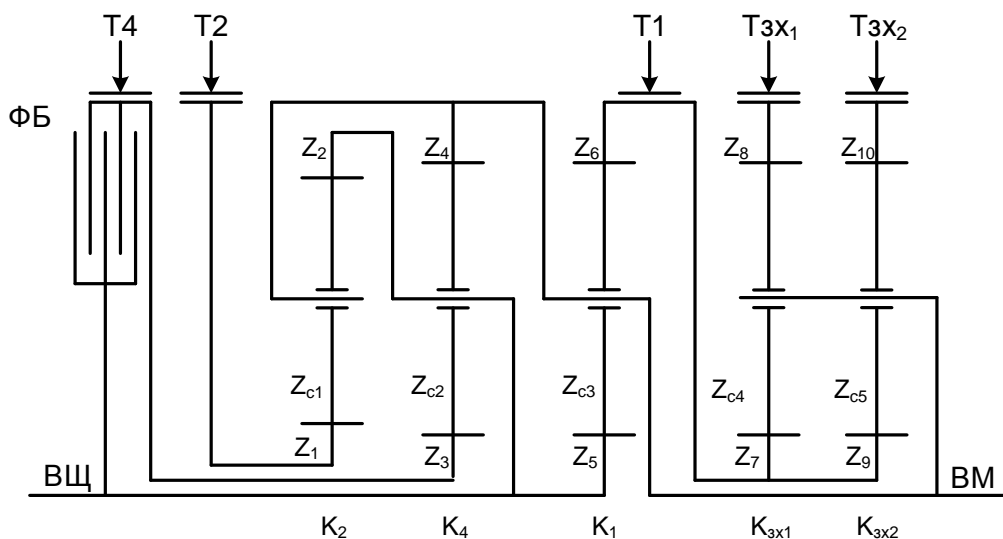


Рисунок 8 – Вариант кинематической схемы планетарной коробки передач типа 4+2 с реверсом Вильсона

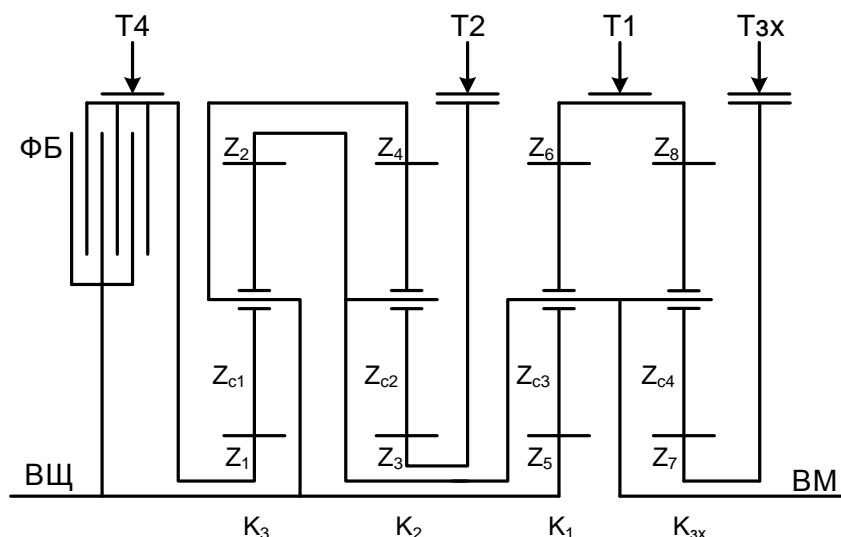


Рисунок 9 – Кинематическая схема ПКП типа 4+1 с модифицированной ступенью заднего хода

Расчет чисел зубьев планетарных механизмов типа 2К-Н может быть произведен по известным методикам, изложенным, например, в [19]. При этом можно также воспользоваться параметрами кинематических схем ПКП, представленных в [11]. Могут быть унифицированы числа зубьев всех эпициклических шестерен на уровне 80-120. В некоторых случаях возможна также полная унификация чисел зубьев всех планетарных механизмов [20].

Отметим, что рассмотренные в [9] кинематические схемы бесконтурных ПКП с двумя степенями свободы, в которых ступени заднего хода выполнены на планетарном механизме с двойными сателлитами, могут быть модифицированы путем использования в них реверса Вильсона для получения передач заднего хода. В этих случаях все планетарные механизмы ПКП будут унифицированы как 2К-Н с одинарными сателлитами. Отметим также, что если в ПКП циркулирующая мощность возникает только на кратковременно включаемых передачах заднего хода, то такие ПКП можно считать условно бесконтурными.

### Выводы

Как ранее отмечалось в [9] планетарные коробки передач с двумя степенями свободы различных типов и конструкций широко апробированы на практике и подробно теоретически исследованы в специальной и учебной литературе [21] и [22]. Так, в частности, в [17] представлены варианты рациональных кинематических схем ПКП с двумя степенями свободы и примеры их расчетов. Аналогичные примеры кинематических схем ПКП с двумя степенями свободы приведены в [20]. Однако, рассмотренные в [17] и [20] кинематические схемы ПКП с двумя степенями свободы типа 4+1 (с прямой высшей передачей) и 5+1 (с повышающей высшей передачей) характеризуются высокой многоконтурностью, когда на некоторых ступенях одновременно работают три-четыре планетарных механизма.

Представленные решения будут иметь дальнейшее применение после проведения геометрического синтеза с определением запасов прочности зацеплений, подшипников, валов с учетом статистики включения каждой передачи ПКП на транспортном средстве, а также определения КПД каждой передачи для оценки суммарных потерь в ПКП. Расчеты размеров деталей и моделирование процессов потерь механической энергии следует произвести по известным зависимостям путем использования современных программных комплексов проектирования механических систем, например, KissSoft, «Универсальный механизм», APM WinMashine и др.

Несмотря на известные недостатки, применение ПКП с двумя степенями свободы в трансмиссиях мобильных машин может быть обосновано необходимостью быстрого освоения локализованного производства данных агрегатов. Относительная простота реализации таких ПКП и приемлемые значения КПД могут оказаться решающими факторами при их практической реализации. Предлагаемые в данной работе схемные варианты ПКП с двумя

степенями свободы, как и ранее предложенные авторами, могут быть осуществлены, в частности, в трансмиссиях мобильных машин, оснащенных дизельными двигателями и блокируемыми комплексными гидротрансформаторами. Это – городские автобусы, грузовые автомобили и гусеничные машины, для которых необходимо упрощение системы управления трансмиссией и сокращение физических и умственных затрат водителя.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Харитонов С.А. Автоматические коробки передач. М.: ООО «Издательство Астрель»; ООО «Издательство АСТ». 2003. 479 с.
2. Косенков А.А. Устройство автоматических коробок передач и трансмиссий. Ростов-на-Дону: Феникс, 2003. 416 с.
3. Руденко Н.Ф. Планетарные передачи. Теория, применение, расчет и проектирование. 3-е изд., испр. и доп. М.: Машгиз, 1947. 756 с.
4. Проектирование трансмиссий автомобилей: Справочник / А.И. Гришкевич, Б.У. Бусел, Г.Ф. Бутусов [и др.]; Под общ. ред. А.И. Гришкевича. М.: Машиностроение, 1984. 268 с.
5. Харитонов С.А., Федоренков А.П., Нагайцев М.М. Анализ кинематических схем автоматических коробок перемены передач ZF, обладающих четырьмя степенями свободы // Журнал автомобильных инженеров. 2015. №5(94). С. 52-59.
6. Шеломов В.Б. Свойства структур планетарных коробок передач. СПб.: Нестор, 2004. 206 с.
7. Кирдяшев Ю.Н., Иванов А.Н. Проектирование сложных зубчатых механизмов. Л.: Машиностроение, Ленингр. отд-ние, 1973. 352 с.
8. Кирдяшев Ю.Н. Многопоточные передачи дифференциального типа / Под ред. Н.И. Колчина. Л.: Машиностроение, Ленингр. отд-ние, 1969. 176 с.
9. Агуреев И.Е., Трушин Н.Н., Плясов А.В. Варианты синтеза бесконтурных кинематических схем планетарных коробок передач с двумя степенями свободы // Мир транспорта и технологических машин: ОГУ им. И.С. Тургенева. 2025. №1-2 (88). С. 43-53. DOI: 10.33979/2073-7432-2025-1-2(88)-43-53.
10. Петров А.В. Планетарные и гидромеханические передачи колесных и гусеничных машин. М.: Машиностроение, 1966. 383 с.
11. Прокофьев В.Н. Гидравлические передачи колесных и гусеничных машин. Москва: Воениздат, 1960. 300 с.
12. Филичкин Н.В. Анализ планетарных коробок передач транспортных и тяговых машин: учебное пособие. Челябинск: ЮУрГУ, 2008. 178 с.
13. Хельдт П.М. Автомобильные сцепления и коробки передач / Пер. с англ. под ред. В.Ф. Родионова, Д.Б. Брейгина. Москва: Машгиз, 1960. 440 с.
14. Развитие конструкций коробок передач автобусов / Научный редактор Г.Г. Казаков. М.: НИИНавтопром, 1968. 123 с.
15. Кирдяшев Ю.Н. Многопоточные передачи дифференциального типа. 2-е изд., перераб. и доп. Л.: Машиностроение, Ленингр. отд-ние, 1981. 223 с.
16. Планетарные передачи. Справочник / Под ред. В.Н. Кудрявцева, Ю.Н. Кирдяшева. Л.: Машиностроение (Ленингр. отд-ние), 1977. 536 с.
17. Красеньков В.И., Вашец А.Д. Проектирование планетарных механизмов транспортных машин. М.: Машиностроение, 1986. 271 с.
18. Филичкин Н.В. Синтез планетарных коробок передач с двумя степенями свободы: учебное пособие. Челябинск: ЮрГУ, 2007. 59 с.
19. Плясов А.В., Трушин Н.Н. Кинематические схемы планетарных коробок передач с двумя степенями свободы без замкнутых контуров // Вестник Вологодского ГУ. Серия: Технические науки. №1(23). 2024. Вологда: ВоГУ. 2024. С. 62-71.
20. Расчет и проектирование гусеничных машин: Учебник / Н.А. Носов, В.Д. Галышев, Ю.П. Волков, А.П. Харченко. Под ред. Н.А. Носова. М.: Машиностроение, 1972. 560 с.
21. Шарипов В.М., Крумбольдт, Маринкин А.А. Планетарные коробки передач колесных и гусеничных машин / Под общ. ред. В.М. Шарипова. М.: МГТУ «МАМИ», 2000. 142 с.
22. Дьяков И.Ф., Кузнецов В.А., Тарханов В.И. Ступенчатые и планетарные коробки передач механических трансмиссий: учебное пособие. Ульяновск, УлГТУ, 2003. 120 с.

### **Трушин Николай Николаевич**

Тульский государственный университет

Адрес: 300012, Россия, г. Тула, пр. Ленина, 92

Д.т.н., профессор кафедры «Промышленная автоматика и робототехника»

E-mail: trunikolaj@yandex.ru

### **Плясов Алексей Валентинович**

Тульский государственный университет

Адрес: 300012, Россия, г. Тула, пр. Ленина, 92

К.т.н., доцент кафедры «Механика и процессы пластического формоизменения»

E-mail: plyasov-a@yandex.ru

N.N. TRUSHIN, A.V. PLYASOV

## VARIANTS OF TWO-DoF PLANETARY GEARBOXES KINEMATICS DIAGRAMS WITH MINIMUM CLOSED CIRCUITS

**Abstract.** *In this study, we developed the kinematics for 2 DoF gearboxes based on 2K-H type planetary systems. These gears minimize closed circuits and circulating power, making them virtually circuit-free. We propose these solutions for automatic hydromechanical transmissions of buses and other diesel vehicles with lockup torque converters.*

**Keywords:** *vehicles, transmissions, planetary gearbox, kinematic arrangement*

### BIBLIOGRAPHY

1. Haritonov S.A. Avtomaticheskie korobki peredach. M.: OOO «Izdatel'stvo Astrel»; OOO «Izda-tel'stvo AST». 2003. 479 s.
2. Kosenkov A.A. Ustroystvo avtomaticheskikh korobok peredach i transmissiy. Rostov-na-Donu: Fe-niks, 2003. 416 s.
3. Rudenko N.F. Planetarnye peredachi. Teoriya, primeneniye, raschet i proektirovaniye. 3-e izd., ispr. i dop. M.: Mashgiz, 1947. 756 s.
4. Proektirovaniye transmissiy avtomobiley: Spravochnik / A.I. Grishkevich, B.U. Busel, G.F. Butusov [i dr.]; Pod obshch. red. A.I. Grishkevicha. M.: Mashinostroeniye, 1984. 268 s.
5. Haritonov S.A., Fedorenkov A.P., Nagaytsev M.M. Analiz kinematicheskikh skhem avtomaticheskikh korobok peremeny peredach ZF, obladayushchikh chetyr'mya stepenyami svobody // ZHurnal avtomobil'nykh inzhener-ov. 2015. №5(94). S. 52-59.
6. Shelomov V.B. Svoystva struktur planetarnykh korobok peredach. SbP.: Nestor, 2004. 206 s.
7. Kirdyashev YU.N., Ivanov A.N. Proektirovaniye slozhnykh zubchatykh mekhanizmov. L.: Mashinostroeniye, Leningr. otd-niye, 1973. 352 s.
8. Kirdyashev YU.N. Mnogopotochnye peredachi differentsial'nogo tipa / Pod red. N.I. Kolchina. L.: Mashinostroeniye, Leningr. otd-niye, 1969. 176 s.
9. Agureev I.E., Trushin N.N., Plyasov A.V. Varianty sinteza beskonturnykh kinematicheskikh skhem plan-etarnykh korobok peredach s dvumya stepenyami svobody // Mir transporta i tekhnologicheskikh mashin: OGU im. I.S. Turgeneva. 2025. №1-2 (88). S. 43-53. DOI: 10.33979/2073-7432-2025-1-2(88)-43-53.
10. Petrov A.V. Planetarnye i gidromekhanicheskie peredachi kolesnykh i gusenichnykh mashin. M.: Ma-shinostroeniye, 1966. 383 s.
11. Prokof'ev V.N. Gidravlicheskie peredachi kolesnykh i gusenichnykh mashin. Moskva: Voenizdat, 1960. 300 s.
12. Filichkin N.V. Analiz planetarnykh korobok peredach transportnykh i tyagovykh mashin: uchebnoye po-sobie. Chelyabinsk: YUUGU, 2008. 178 s.
13. Hel'dt P.M. Avtomobil'nye stsepleniya i korobki peredach / Per. s angl. pod red. V.F. Rodionova, D.B. Breygina. Moskva: Mashgiz, 1960. 440 s.
14. Razvitiye konstruktsey korobok peredach avtobusov / Nauchnyy redaktor G.G. Kazakov. M.: NIINav-toprom, 1968. 123 s.
15. Kirdyashev YU.N. Mnogopotochnye peredachi differentsial'nogo tipa. 2-e izd., pererab. i dop. L.: Mashinostroeniye, Leningr. otd-niye, 1981. 223 s.
16. Planetarnye peredachi. Spravochnik / Pod red. V.N. Kudryavtseva, YU.N. Kirdyasheva. L.: Mashino-stroeniye (Leningr. otd-niye), 1977. 536 s.
17. Krasnen'kov V.I., Vashets A.D. Proektirovaniye planetarnykh mekhanizmov transportnykh mashin. M.: Mashinostroeniye, 1986. 271 s.
18. Filichkin N.V. Sintez planetarnykh korobok peredach s dvumya stepenyami svobody: uchebnoye poso-biye. Chelyabinsk: YUGU, 2007. 59 s.
19. Plyasov A.V., Trushin N.N. Kinematicheskie skhemy planetarnykh korobok peredach s dvumya stepen-yami svobody bez zamknutykh konturov // Vestnik Vologodskogo GU. Seriya: Tekhnicheskie nauki. №1(23). 2024. Volog-da: VoGU. 2024. S. 62-71.
20. Raschet i proektirovaniye gusenichnykh mashin: Uchebnik / N.A. Nosov, V.D. Galyshev, YU.P. Volkov, A.P. Harchenko. Pod red. N.A. Nosova. M.: Mashinostroeniye, 1972. 560 s.
21. Sharipov V.M., Krumbol'dt, Marinkin A.A. Planetarnye korobki peredach kolesnykh i gusenichnykh mashin / Pod obshch. red. V.M. Sharipova. M.: MGTU «MAMI», 2000. 142 s.
22. D'yakov I.F., Kuznetsov V.A., Tarkhanov V.I. Stupenchatye i planetarnye korobki peredach mekhanich-eskikh transmissiy: uchebnoye posobie. Ul'yanovsk, UIGTU, 2003. 120 s.

**Trushin Nikolay Nikolaevich**

Tula State University

Address: 300012, Russia, Tula, Lenin Avenue, 92

Doctor of technical sciences

E-mail: trunikolaj@yandex.ru

**Plyasov Aleksey Valentinovich**

Tula State University

Address: 300012, Russia, Tula, Lenin Avenue, 92

Candidate of technical sciences

E-mail: plyasov-a@yandex.ru

И.Б. АХУНОВА, А.З. УДЖУХУ, Г.А. ГУК

## ЗАВИСИМОСТЬ СПРОСА НА УСЛУГИ ВЫЕЗДНОГО АВТОМОБИЛЬНОГО СЕРВИСА И ИНТЕНСИВНОСТИ ТУРИСТИЧЕСКОГО ТРАНСПОРТНОГО ПОТОКА В УСЛОВИЯХ АДЫГЕИ

**Аннотация.** В данной статье показана зависимость спроса на мобильные услуги в сфере автосервисного бизнеса от интенсивности автомобильного движения и мощности туристического транспортного потока. Проведён анализ автосервисных организаций по диагностике, техническому обслуживанию и ремонту автомобилей. Приводятся факторы, влияющие на формирование спроса на рынке мобильных автосервисных услуг, основным из которых является динамика изменения автомобильного трафика в горной части республики, в зоне горнолыжного курорта. Рассматриваются возможные причины неисправностей автомобилей на дорогах.

**Ключевые слова:** автомобиль, выездной автосервис, спрос, автосервисные услуги, мобильность, неисправность, отказ, диагностика, туристический транспортный поток

### Введение

Автомобильные сервисные услуги являются одними из востребованных услуг для обслуживания автомобилей разных видов и конструкций. Автомобильный сервис возник одновременно с появлением автомобиля и потребностью в его ремонте. Комплекс сервисных услуг увеличивался по мере роста количества различных видов автомобилей, разных марок и моделей. Затем рынок автосервисных услуг постепенно трансформировался с изменением социально-экономических условий. Его развитие определялось тем, что было востребовано. Автосервис, как услуга, приобрёл форму мобильности обслуживания клиентов. Услуга автосервиса «на колёсах» получила своё развитие в постпандемный период и является прибыльным бизнесом в секторе экономической занятости населения. Переход из обычного оффлайн обслуживания автомобилей в онлайн формат получил развитие именно в годы пандемии.

Выездной (мобильный) автосервис пользуется стабильным спросом за рубежом, в России практикуется и успешно развивается, является актуальным не только для крупных предприятий, но и для индивидуальных предпринимателей. Во многих городах в сфере автосервисного бизнеса имеют большой спрос такие услуги, как: выездная автодиагностика, мобильный шиномонтаж, выездная автозаправка. В Адыгее данное направление автосервиса находится в стадии развития.

Выездной автосервис не ограничивается выездом для выполнения технической помощи за пределы населённых пунктов. Выездные автосервисные службы могут диагностировать и выполнять ремонт/обслуживание автомобилей заказчиков в местах их хранения, на стоянках и парковках, в пути. При этом автовладельцы не теряют своего ценного времени на перегон транспортных средств к местам автосервиса, с последующей личной поездкой для получения исправного автомобиля в сервисных центрах.

Оказание услуг по диагностированию, ремонту и обслуживанию автомобилей является важной частью автомобильной индустрии и имеет ряд преимуществ как для владельцев машин, так и для бизнеса. Сегодня владельцы автомобилей ценят своё время и комфорт, поэтому выездные услуги становятся всё более популярными [6].

### Материал и методы

Современная ситуация, характеризующаяся интенсивным ростом автомобилизации в стране, прежде всего за счёт автопарка легковых автомобилей индивидуального пользова-

ния, обуславливает расширения форм обеспечения исправного технического состояния автотранспортных средств. В России, по данным аналитического агентства «АВТОСТАТ» на 1 января 2024 года насчитывалось 47,3 млн. легковых автомобилей [9]. Количество транспорта индивидуального пользования в городе Майкопе и республике Адыгея также ежегодно увеличивается (рис. 1) [2]. Территория городской агломерации расширяется, ведётся строительство новых жилых комплексов, что приводит к увеличению численности населения и повышению числа транспортных средств на ней.

В городе Майкопе развита сфера сервисного обслуживания легковых автомобилей индивидуального пользования. Автосервис выполняется субъектами предпринимательства как самостоятельно, так и посредством использования различных форм ведения бизнеса: авторизованные сервисы, сетевой автосервис, гаражные мастерские, индивидуальные предприниматели в сфере технического обслуживания. Оказание услуг по техническому обслуживанию автомобилей регулируется документом [5] в соответствии с которым приняты Правила оказания услуг (выполнения работ) по техническому обслуживанию и ремонту автотранспортных средств, которыми регулируются отношения, возникающие между потребителем и исполнителем при оказании услуг (выполнении работ) по техническому обслуживанию и ремонту автотранспортных средств и их составных частей, утверждён порядок приёма заказов и оформления договоров, порядок оказания и оплаты оказываемых услуг, а также определена ответственность исполнителя за предоставленные услуги. Данными правилами регулируются все вопросы организации и ведения бизнеса в автомобильной сфере.

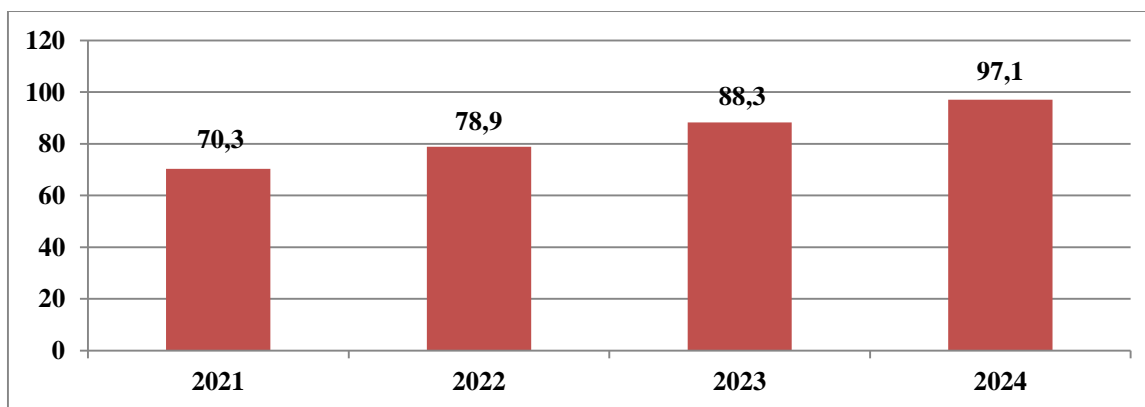


Рисунок 1 – Рост автотранспортных средств в городе Майкопе, тыс.ед.

### Теория / Расчет

Анализ распределения предприятий автосервиса по видам выполняемых работ позволил определить видовую структуру услуг и уровень спроса на них среди автовладельцев. В таблице 1 представлена выборка пяти наиболее распространённых автосервисных услуг в г. Майкопе.

Таблица 1 - Наиболее распространённые услуги автосервиса в г. Майкопе

Наименование услуги	Доля предприятий, оказывающих данную услугу, от их общего числа, %
Замена масла	62,0
Замена ремня генератора	61,7
Замена тормозной жидкости	60,8
Диагностика автомобиля	24,9
Ремонт ходовой части	43,5

Своевременное и регулярное обслуживание состояния автомобильного транспорта крайне важно для обеспечения безопасности во время движения. Бывают ситуации, когда даже при тщательном техническом контроле возникают отказы и неисправности в долгой дороге, во время автомобильного путешествия на дальнее расстояние, особенно в малонаселённые районы. Основные трудности в таком случае связаны с:

- отсутствием (удалённостью) станций технического обслуживания и автозаправочных станций;

- невозможность приобретения запасных деталей и узлов для ремонта;
- трудностью эвакуации транспортного средства до предполагаемого места ремонта;
- проблемами с оказанием технической помощи, например, если водители - женщины.

Среди возможных причин неисправностей и отказов в работе автомобилей на дорогах можно выделить: прокол колеса, проблемы с электронным управлением автомобиля, неисправность в работе генератора, обрыв приводных ремней (рис. 2).

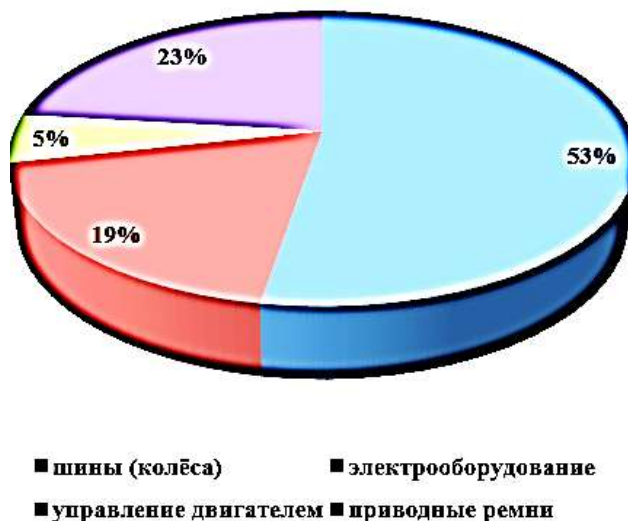


Рисунок 2 – Возможные неисправности и отказы в автомобилях на дорогах

Частота отказов автомобилей на дорогах зависит от многих причин и носит случайно-вероятностный характер. Общее количество отказов в системе легкового автотранспорта в зонах (участках) сервисного обслуживания:

$$N_{\text{отк}} = J_{\text{авт}} \cdot 24 \cdot n_0 \cdot L_{\text{охв}} \cdot k_1 \cdot k_2 \cdot k_3 / 1000,$$

где  $J$  - фактическая интенсивность движения легкового автотранспорта (с учётом туристического транспортного потока) на исследуемом участке автомобильной дороги региона, авт/сут.;

$L_{\text{охв}}$  - планируемое расстояние охвата выездным автосервисом участка автодороги, км;

$n_0$  - количество отказов в системе автомобиля на 1000 км пробега;

$K_1$  - условия движения;

$K_2$  - состояние дорожного полотна;

$K_3$  - средний возраст автомобилей.

Число вызовов выездных мастеров принимается равным количеству отказов.

Горные дорожные условия подразумевают под собой более тяжёлые условия эксплуатации автомобиля, что влечёт за собой повышенный риск его отказа. Чем отдалённее регион, откуда приезжают автотуристы на автомобилях, тем больше вероятность отказа в системе автомобиля.

Единственным способом установить точные причины поломки автомобиля на дороге и определить наиболее разумные пути решения возникшей проблемы является диагностика. Диагностирование в процессе движения автомобиля занимает важную роль в обслуживании, позволяет выявить все неисправности автомобилей [8]. Диагностика окажется полезной не только при возникновении какой-то поломки, рекомендуют проводить ее в качестве профилактических мер. Заказывая диагностику своих автомобилей, клиенты своевременно могут выявить и заменить поврежденные узлы и детали. А от этого зависит безопасность дорожного движения, а, следовательно, безопасность пассажиров и окружающих. Главная особенность диагностики состоит в том, что она рассматривает и изучает техническое состояние

любых машин или механизмов в процессе их эксплуатации. Выездная диагностика автомобилей перед дальней поездкой имеет перспективное направление. Выезжая из зоны отдыха, автопутешественник заказывает на место мастера для проведения диагностики технического состояния автомобиля перед совершением длительной поездки.

На рынке в сфере автосервиса в Майкопе [7] зарегистрировано 5 организаций по техническому обслуживанию и ремонту автомобилей, которые так или иначе связаны с выездной диагностикой (табл. 2). Это небольшие компании без наличия автопарка техники и машин. Состав персонала ограничивается слесарной группой рабочих. Также можно отметить их слабую представленность в интернете, отсутствием рекламы на сайтах объявлений.

Таблица 2 – Фирмы, оказывающие услуги выездной диагностики автомобилей в городе Майкопе

Наименование организации	Сайт	Услуги	Цена на услуги, руб.
СТО Автодом	есть	Базовое сервисное обслуживание; Развал-схождение; Шиномонтаж; Нанесение защитного воска; Чернение резины; Сварочные работы; Выездная диагностика автомобиля; Гарантия; Антикор; Автосервис самообслуживания	1500/нормо-час
Чек-Поинт	есть	Диагностика компьютерная, электрика, чип-тюнинг, плановое обслуживание, ремонт ходовой части, сварочные работы, ремонт гибридов, доработка охлаждения автомобилей	1300/нормо-час
СТО Орион	нет	заправка и ремонт автокондиционера, ремонт ходовой части, компьютерная диагностика автомобиля, ремонт автоэлектрики, промывка инжектора, ремонт форсунок	1200/нормо-час
Top Car Авто-сервис	нет	Регламентное ТО; Компьютерная диагностика; Ремонт автоматических и механических коробок передач; Обслуживание и ремонт двигателей; Ремонт ходовой части; Заправка кондиционеров в авто	1300/нормо-час
Sokol Drive	нет	Кузовной ремонт, Установка фаркопа, Выездной шиномонтаж, Сварочные работы, Выездная диагностика автомобиля, Гарантия, Ремонт гибридных автомобилей, Автосервис самообслуживания, Ремонт коммерческого транспорта, Выездной сервис	1200/нормо-час

У большинства действующих фирм услуги выездной диагностики автомобилей, как правило, являются только «одними из». Стоимость услуги в среднем составляет от 1200 до 2000 рублей за нормо-час работы или в зависимости от вида услуги. Некоторые операции по обслуживанию автомобилей и проведения диагностики не требуют наличия стационарного оборудования и могут быть выполнены на выезде. Технология выездных диагностов по обслуживанию автомобилей основана на идее предоставления диагностических услуг непосредственно у клиента - на его парковочном месте, на дороге, дома или на работе. Это позволяет избежать необходимости тратить время на поездку в автосервис, стояние в очередях и приёмке автомобиля, а также позволяет клиентам присутствовать у машины во время работ, что важно для контроля качества обслуживания.

### **Результаты и обсуждение**

Востребованность Адыгеи как территории для туризма и отдыха год от года растёт. Вместе с этим увеличивается автомобильный трафик в горной части республики, в зоне горнолыжного курорта Лаго-наки. Географическое и туристическое положение, политическая стабильность республики Адыгея положительно влияют на использование дорожной сети транзитным автомобильным транспортом [4]. В связи с этим интенсивность туристического транспортного потока за последние 3 года возросла в несколько раз и продолжит расти в ближайшие годы. Этому будет способствовать создание крупного горнолыжного экоккурорта «Лаго-наки».

Туристическая инфраструктура представлена на всей территории Республики Адыгея. Тем не менее, основная её часть сосредоточена на территории Майкопского района, в горной



её части, в эпицентре развития горнолыжного курорта Лаго-Наки. Это продиктовано географическими, природно-климатическими и другими особенностями развития территории [1]. Город Майкоп и Майкопский район являются туристическими центрами территорий, генерирующими внутрироссийский туристический поток. При этом развитие гастрономического туризма становится дополнительным фактором роста числа посещающих Адыгею туристов. Именно автопутешественники являются категорией туристов, способной значительно увеличить внутреннее туристское потребление и повысить уровень мобильности населения. Участок автомагистрали «Майкоп-Гузерибль-Лаго-Наки» ежегодно проезжает большое количество автотуристов из Ростовской и Московской области, Краснодарского края и других районов РФ. За 2024 год интенсивность транспортного туристического потока составила около 170 тыс. единиц автомобилей.

Использование дорог в туристических целях обусловлено комфортабельностью магистралей и оснащением их объектами дорожного сервиса: необходимым числом промежуточных станций заправки топливом, пунктов технического обслуживания, мотелями, гостиницами, кафе, столовыми, чайными, дорожными магазинами, медпунктами и другими службами, включая телефонную и почтовую связь.

Анализ при планировании выездных автосервисных работ выполнялся на автодорогах, следующих в пригородном сообщении: Автомагистраль «Кавказ», автодорога «Майкоп-Гузерибль-Лаго-Наки», автодорога «Майкоп-Гиагинская-Зеленчукская». Протяжение дороги Подъезд к г. Майкопу (в границах республики) 22,4 км, параметры соответствуют II категории, интенсивность движения в пределах исследуемого района составляет 10,0 тыс. автомобилей в сутки. Региональная дорога «Майкоп – Гиагинская – Псебай – Зеленчукская – Карачаевск», общим протяжением 128,2 км, на протяжении 7,2 км проходит по территории города Майкопа, в границах района тяготения параметры дороги соответствуют нормативам II-III категории. Дорога служит для реализации внутри и межрайонных связей. Интенсивность движения в исследуемом районе в настоящее время колеблется от 5,3 до 7,5 тыс. автомобилей в сутки (в зависимости от перегонов).

Для анализа выбраны объекты выездного сервиса только по линии маршрута. Исследование показало, что на автодорогах вдали от стационарных автосервисов с радиусом обслуживания до 50 км (рациональна с экономических соображений зона охвата) и прилегающих населённых пунктах к ним (рис. 3), конкуренция в сфере выездного автосервиса отсутствует.

В основном на трассе располагаются только шиномонтажные автомастерские. Объём планируемых мобильных автосервисных услуг и спрос на них напрямую зависит от мощности и интенсивности движения автомобильного транспорта. Данные по интенсивности транспортного движения туристических автомобилей и количества автомобильного парка в регионе на исследуемом участке дороги являются большим подспорьем для проектирования услуг мобильного автосервиса. Данная информация даёт возможность получить информацию о количестве проезжающих автомобилей, их доли в общем транспортном потоке для полного удовлетворения потребностей автолюбителей в услугах выездного автомобильного сервиса.

На формирование рынка мобильных автосервисных услуг влияют также факторы [3]: численность автомобилей, интенсивность эксплуатации автомобиля, доходы потребителей и уровень цен на услуги мобильного автосервиса, профессионализм выездных мастеров. Мобильные автосервисные услуги обычно требуют определенного уровня доходов у потребителей для того, чтобы спрос на них возникал [10]. Взаимодействие всех этих факторов оказывает влияние на изменение потребности и структуры рынка услуг автосервиса, предоставляемых в мобильной форме. Все эти факторы влияют на изменение спроса на рынке мобильных автосервисных услуг и на его структуру.

Правильно организованная политика предоставления услуг мобильного автосервиса должна включать:

– грамотный подход к каждому случаю на дороге и клиенту;

- ориентацию на ожидаемое техническое исполнение услуг при оптимальных издержках;
- оперативность и своевременность выполнения заказов;
- вежливость и опрятность выездного специалиста;
- определенную цифровую и юридическую грамотность в технических вопросах.

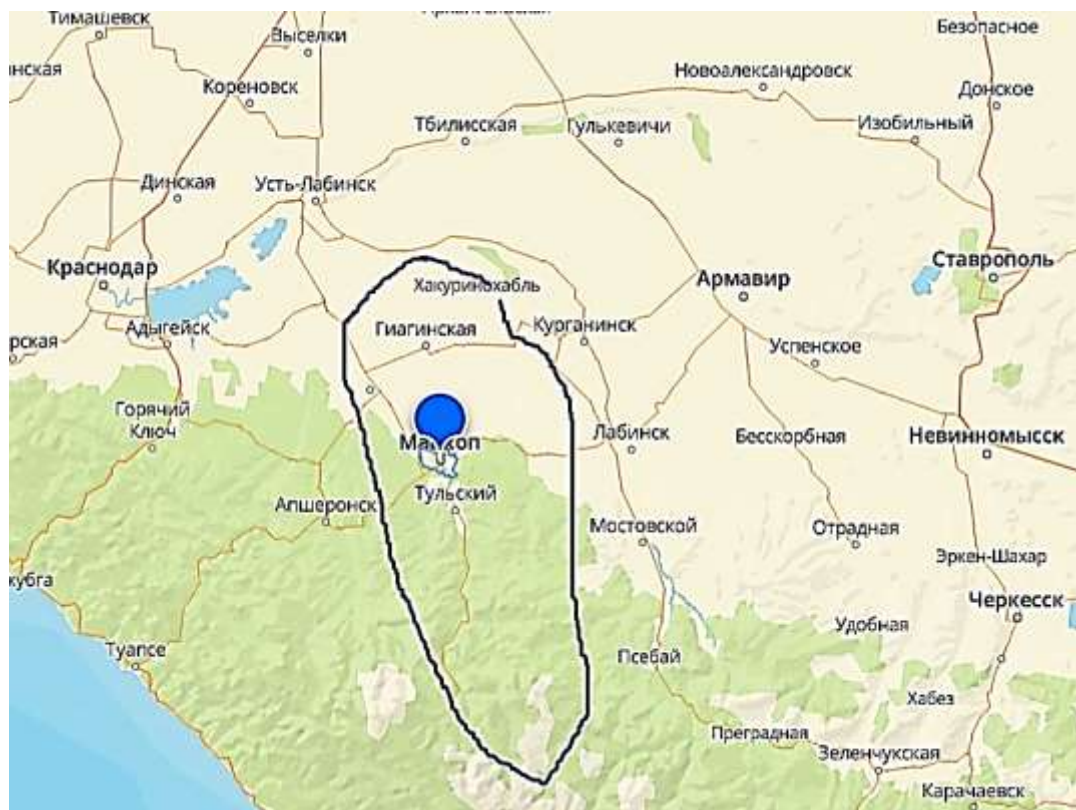


Рисунок 3 – Планируемая зона обслуживания выездным автосервисом

Прогнозирование количественного значения спроса на услуги является одним из сложных вопросов, определяющих дальнейшую траекторию развития объекта предпринимательства, и сводится к следующему:

1. В регионе в исходный момент времени  $t_0$  имеется определенный автомобильный парк (1) (рис. 4), к которому приравнивается количество транспорта приезжающих туристов. Исходя из этого, а также конструкции, возраста, условий эксплуатации и других факторов определяем потребность в услугах выездного автосервиса (2).

2. Эта потребность должна покрываться сетью сервисных предприятий, имеющих возможность оказывать услуги на «выезде» (3). При этом обслуживание части автомобилей может выполняться силами самих владельцев.

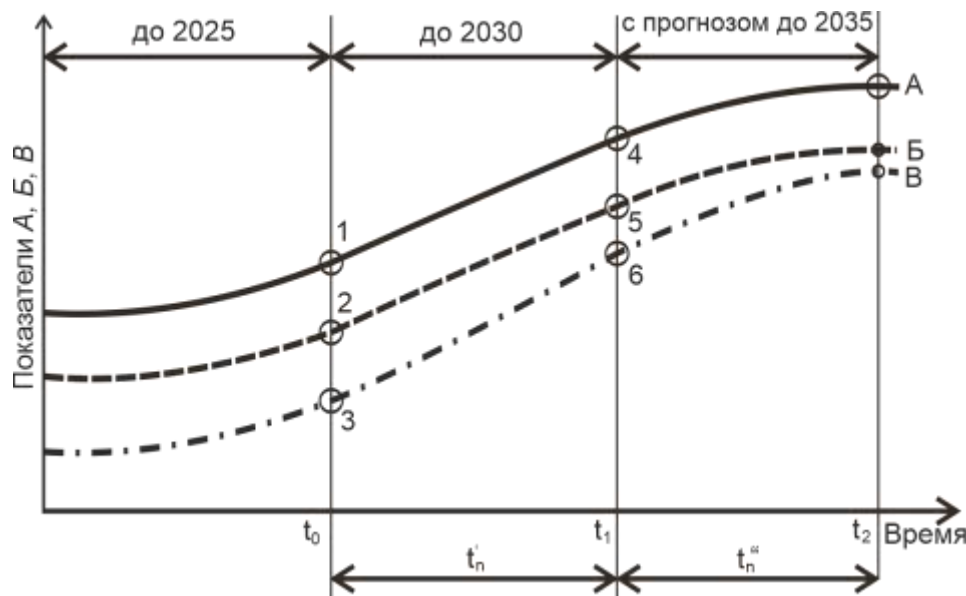
3. Данная ситуация не является стабильной: в перспективе растут парк (А) и необходимый объём мобильных сервисных услуг ( $2 >$ ).

4. Очевидно, что для решения вопроса как будет развиваться выездной мобильный сервис в нашем регионе, следует оценить предполагаемый разрыв А к моменту времени  $t_n$  между необходимым объёмом услуг (5) и тем, который может обеспечить на тот момент развитая сеть (6) выездного сервиса.

Размер потребных услуг (Б) прогнозируется на основании роста размера парка машин, изменений интенсивности движения и мощности транспортного туристического потока, условий эксплуатации транспорта на территории Майкопа и Майкопского района в перспективе до 2030-2035 года. При обосновании потребных услуг необходимо учитывать пропускную способность транспортной инфраструктуры в регионе, перспективу её совершенствования и развития.

Возможный рост количества автомобилей в исследуемой зоне сервисного обслужива-

ния повлечёт за собой спрос на такие виды выездных услуг, как выездная диагностика, мобильный шиномонтаж, выездная заправка топливом, услуга эвакуатора, зарядка электромобилей.



**Рисунок 4 - Прогноз изменения размера автомобильного парка, мощности туристического автопотока и планируемого объема автосервисных услуг в регионе:** А – прогнозируемое значение размера парка автомобилей и туристического автопотока; Б – прогноз изменения необходимого объема сервисных услуг в ремонте; В – прогноз изменения планируемого объема сервисных услуг в регионе;  $t_0$  – настоящее время;  $t_1$  – краткосрочный прогноз;  $t_2$  – среднесрочный прогноз;  $t_n$  – размер лага; 1–6 – точки

Обоснование спроса на услуги в регионе может содержать следующие основные этапы.

Первый этап – определение основных показателей, характеризующих потребность региона в услугах мобильного автосервиса. На основании исходных данных (численности жителей региона, насыщенности населения легковыми автомобилями, динамики их изменения и др., мощность турпотока автомобилей) на текущий момент и перспективу.

Второй этап – прогнозирование динамики изменения спроса на услуги автосервиса в регионе.

Третий этап, самый важный – проведение социологического исследования, направленного на оценку востребованности мобильных услуг сервисного обслуживания автомобилей. Изучение потребностей и ожиданий клиентов позволяет определить наиболее удобные способы обслуживания. В ходе анализа результатов социологического опроса возможно определить заинтересованность населения в идее выездных мастеров.

Для дальнейшего развития услуг выездного автомобильного сервиса необходимо субъектам предпринимательской деятельности выработать ассортимент и технологию предоставления услуг мобильного сервиса на основе социологического опроса владельцев транспортных средств, уровня спроса на услуги, динамики изменения количества автомобилей и мощности транспортного потока туристов в регионе.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Ахунова И.Б. Проблемы в организации движения транзитного транспорта на городской территории. XXXV Неделя науки МГТУ: Материалы научно-практической конференции «Наука – XXI веку». Майкоп: МГТУ. 2017. С. 59-64.
2. Ахунова И.Б., Уджуху А.З. О некоторых дополнительных направлениях к задачам в федеральной целевой программе «Повышение безопасности дорожного движения» // Информационно-научный журнал. Бюллетень транспортной информации. №3(261). 2017. С. 33-35.
3. Гусейнзаде Н.А. Методика оценки мобильной автосервисной инфраструктуры // Человеческий капи-

тал в новой реальности: Материалы пленарной международной научно-практической конференции в рамках VI международного Московского академического экономического форума «Российская экономика 2024+: новые решения в новой реальности». Москва: ФГБОУ ВО «Московский политехнический университет», 2024. С. 42-47.

4. Гучетль З.Ч. Организация услуг мобильных станций технического обслуживания как фактор повышения эффективности работы предприятия // Наука XXI века: проблемы, перспективы и актуальные вопросы развития общества, образования и науки: Материалы XII международной межвузовской научно-практической конференции. Краснодар: ФГБУ «Российское энергетическое агентство». 2023. С. 38-42.

5. О защите прав потребителей // Режим доступа: Закон РФ от 07.02.1992. №2300-1 (ред. от 08.08.2024).

6. Мешавкин П.В., Ногай Е.А., Белоусов И.Д. Разработка технологии предоставления услуг автомобильного сервиса // Новые технологии - нефтегазовому региону: Материалы Международной научно-практической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых. В 2-х томах. Тюмень: Тюменский индустриальный университет. 2024. С. 136-138.

7. Официальные автосервисы в Майкопе: Справочник [Электронный ресурс]. Майкоп. URL: <https://maikop.spravker.ru/vyezdnaia-diagnostika-avtomobilia/>.

8. Рейтинг надежности автомобилей [Электронный ресурс]. URL: [https://auto.ironhorse.ru/tuv-report-2024\\_17377.html](https://auto.ironhorse.ru/tuv-report-2024_17377.html).

9. Рейтинг регионов РФ по среднему возрасту парка легковых автомобилей бизнеса [Электронный ресурс]. URL: <https://www.autostat.ru/press-releases/34475/>.

10. Цыбульский А.И. Реализация выездного автосервиса в деятельности современных предприятий (на примере автоцентра г. Ставрополя) // Инновационные направления развития в образовании, экономике, технике и технологиях: Сборник статей. Ставрополь: Ставролит, 2019. С. 255-259.

11. Проектирование трансмиссий автомобилей: Справочник / А.И. Гришкевич, Б.У. Бусел, Г.Ф. Бутусов [и др.]; Под общ. ред. А.И. Гришкевича. М.: Машиностроение, 1984. 268 с.

12. Харитонов С.А., Федоренков А.П., Нагайцев М.М. Анализ кинематических схем автоматических коробок перемены передач ZF, обладающих четырьмя степенями свободы // Журнал автомобильных инженеров. 2015. №5(94). С. 52-59.

13. Шеломов В.Б. Свойства структур планетарных коробок передач. СПб.: Нестор, 2004. 206 с.

14. Кирдяшев Ю.Н., Иванов А.Н. Проектирование сложных зубчатых механизмов. Л.: Машиностроение, Ленингр. отд-ние, 1973. 352 с.

15. Кирдяшев Ю.Н. Многопоточные передачи дифференциального типа / Под ред. Н.И. Колчина. Л.: Машиностроение, Ленингр. отд-ние, 1969. 176 с.

**Ахунова Инна Бислановна**

Майкопский государственный технологический университет

Адрес: 385000, Россия, г. Майкоп, ул. Первомайская, 191

К.э.н., доцент кафедры автомобильного транспорта

E-mail: inna0116@mail.ru

**Уджуху Аскер Заурбиевич**

Майкопский государственный технологический университет

Адрес: 385000, Россия, г. Майкоп, ул. Первомайская, 191

К.т.н., доцент кафедры автомобильного транспорта

E-mail: udask@mail.ru

**Гук Галина Александровна**

Майкопский государственный технологический университет

Адрес: 385000, Россия, г. Майкоп, ул. Первомайская, 191

К.т.н., доцент кафедры автомобильного транспорта

E-mail: Guck.galina@jandex.ru

---

I.B. AKHUNOVA, A.Z. UDZHUKHU, G.A. GUK

## DEPENDENCE OF DEMAND FOR OUTGOING CAR SERVICES AND INTENSITY OF TOURIST TRANSPORT FLOW IN ADYGEA

**Abstract.** This article shows the dependence of demand for mobile services in the field of car service business on the intensity of automobile traffic and the capacity of tourist transport flow. An analysis of car service organizations for diagnostics, maintenance and repair of cars is conducted. Factors influencing the formation of demand in the market of mobile car service services are given, the main one of which is the dynamics of changes in car traffic in the mountainous part of the republic, in the ski resort area. Possible causes of car malfunctions on the roads are considered.

**Keywords:** car, mobile car service, demand, car service, mobility, malfunction, failure, diagnostics, tourist transport flow

## BIBLIOGRAPHY

1. Akhunova I.B. Problemy v organizatsii dvizheniya tranzitnogo transporta na gorodskoy territorii. XXXV Nedelya nauki MGTU: Materialy nauchno-prakticheskoy konferentsii "Nauka - XXI veku". Maykop: MGTU. 2017. S. 59-64.
2. Akhunova I.B., Udzhukhu A.Z. O nekotorykh dopolnitel'nykh napravleniyakh k zadacham v federal'noy tselevoy programme "Povyshenie bezopasnosti dorozhnogo dvizheniya" // Informatsionno-nauchnyy zhurnal. Byulleten' transportnoy informatsii. №3(261). 2017. S. 33-35.
3. Guseynzade N.A. Metodika otsenki mobil'noy avtoservisnoy infrastruktury // Chelovecheskiy kapital v novoy real'nosti: Materialy plenarnoy mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii v ramkakh VI mezhdunarodnogo Moskovskogo akademicheskogo ekonomicheskogo foruma "Rossiyskaya ekonomika 2024+: novye resheniya v novoy real'nosti". Moskva: FGBOU VO "Moskovskiy politekhnicheskii universitet", 2024. S. 42-47.
4. Guchetl' Z.CH. Organizatsiya uslug mobil'nykh stantsiy tekhnicheskogo obsluzhivaniya kak faktor povysheniya effektivnosti raboty predpriyatiya // Nauka XXI veka: problemy, perspektivy i aktual'nye voprosy razvitiya obshchestva, obrazovaniya i nauki: Materialy III mezhdunarodnoy mezhvuzovskoy nauchno-prakticheskoy konferentsii. Krasnodar: FGBU "Rossiyskoe energeticheskoe agentstvo". 2023. S. 38-42.
5. O zashchite prav potrebiteley" Rezhim dostupa: Zakon RF ot 07.02.1992. №2300-1 (red. ot 08.08.2024).
6. Meshavkin P.V., Nogay E.A., Belousov I.D. Razrabotka tekhnologii predostavleniya uslug avtomobil'nogo servisa // Novye tekhnologii - neftegazovomu regionu: Materialy Mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii studentov, aspirantov i molodykh uchenykh. V 2-kh tomakh. Tyumen': Tyumenskiy industrial'nyy universitet. 2024. S. 136-138.
7. Ofitsial'nye avtoservisy v Maykope: Spravochnik [Elektronnyy resurs]. Maykop. URL: <https://maikop.spravker.ru/vyezdnaya-diagnostika-avtomobilia/>.
8. Reyting nadezhnosti avtomobiley [Elektronnyy resurs]. URL: [https://auto.ironhorse.ru/tuv-report-2024\\_17377.html](https://auto.ironhorse.ru/tuv-report-2024_17377.html).
9. Reyting regionov RF po srednemu vozrastu parka legkovykh avtomobiley biznesa [Elektronnyy resurs]. URL: <https://www.autostat.ru/press-releases/34475/>.
10. Tsibul'skiy A.I. Realizatsiya vyezdnogo avtoservisa v deyatel'nosti sovremennykh predpriyatiy (na primere avtotsentra g. Stavropolya) // Innovatsionnye napravleniya razvitiya v obrazovanii, ekonomike, tekhnike i tekhnologiyakh: Sbornik statey. Stavropol': Stavrolit, 2019. S. 255-259.
11. Proektirovanie transmissiy avtomobiley: Spravochnik / A.I. Grishkevich, B.U. Busel, G.F. Butusov [i dr.]; Pod obshch. red. A.I. Grishkevicha. M.: Mashinostroenie, 1984. 268 s.
12. Haritonov S.A., Fedorenkov A.P., Nagaytsev M.M. Analiz kinematcheskikh skhem avtomaticheskikh korobok peremeny peredach ZF, obladayushchikh chetyr'mya stepenyami svobody // Zhurnal avtomobil'nykh inzhenerov. 2015. №5(94). S. 52-59.
13. Shelomov V.B. Svoystva struktur planetarnykh korobok peredach. SbP.: Nestor, 2004. 206 s.
14. Kirdyashev YU.N., Ivanov A.N. Proektirovanie slozhnykh zubchatykh mekhanizmov. L.: Mashinostroyeniye, Leningr. otd-nie, 1973. 352 s.
15. Kirdyashev YU.N. Mnogopotochnye peredachi differentsial'nogo tipa / Pod red. N.I. Kolchina. L.: Mashinostroyeniye, Leningr. otd-nie, 1969. 176 s.

### **Akhunova Inna Bislanovna**

Maikop State Technological University  
Address: 385000, Russia, Maykop, st. May Day, 191  
Candidate of technical Sciences  
E-mail: inna0116@mail.ru

### **Guk Galina Alexandrovna**

Maikop State Technological University  
Address: 385000, Russia, Maykop, st. May Day, 191  
Candidate of technical Sciences  
E-mail: Guck.galina@jandex.ru

### **Udzhukhu Asker Zaurbievich**

Maikop State Technological University  
Address: 385000, Russia, Maykop, st. May Day, 191  
Candidate of technical Sciences  
E-mail: udask@mail.ru

С.А. СУХАНОВ, А.Н. НОВИКОВ, Х.М. ТАХТАМЫШЕВ

## К ВОПРОСУ ДИАГНОСТИРОВАНИЯ ПРОЦЕССА ПРИРАБОТКИ КАПИТАЛЬНО ОТРЕМОНТИРОВАННЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ ВНУТРЕННЕГО СГОРАНИЯ ГРУЗОВЫХ АВТОМОБИЛЕЙ

**Аннотация.** В статье рассматриваются вопросы, связанные с применением методов диагностирования процесса приработки двигателей внутреннего сгорания грузовых автомобилей. Исследованы и обоснованы диагностические признаки, позволяющие определить реальную продолжительность приработки деталей двигателя магистрального тягача SITRAK C7H, наиболее выраженного процесса после выполнения капитального ремонта. Выявлены неблагоприятные сочетания влияющих факторов, которые могут затруднить приработку из-за серьезных повреждений поверхностей трения. Установлены закономерности изменения диагностических параметров в зависимости от интенсивности процессов приработки трущихся поверхностей. Авторами обосновывается актуальность контроля состояния трущихся поверхностей в процессе приработки, предлагается комплексный метод проведения испытаний при различных режимах работы двигателей и дистанционному контролю диагностических параметров.

**Ключевые слова:** двигатели внутреннего сгорания, приработка, диагностические параметры, режимы, испытания, процесс, капитальный ремонт, эксперимент, корреляция, стенд, динамический, полевой, методика, обороты, пробеги

### Введение

На современном этапе развития автомобилизации в России, характеризующегося увеличением количества магистральных тягачей азиатского производства в составе парков логистических компаний, особое внимание необходимо уделять изучению методов, технологии и способов ремонта автомобилей. Это обстоятельство обусловлено более низким качеством автомобилей азиатского производства по сравнению с аналогами европейского производства, что приводит в свою очередь к уменьшению межремонтного пробега двигателей внутреннего сгорания (ДВС), а также увеличению затрат за период эксплуатации автомобилей. Так, расходы на ремонт, техническое обслуживание (ТО) и хранение в 4.6 раз выше затрат на их производство [1], а межремонтный ресурс составляет 35-40 % от ресурса новых автомобилей до первого капитального ремонта. Процесс приработки ДВС после капитального ремонта является критически важным этапом, определяющим их дальнейший ресурс и надежность. Для магистральных тягачей, таких как SITRAK C7H, оснащенных двигателями MC13, этот процесс усложняется экстремальными эксплуатационными условиями: длительными нагрузками, перепадами температур и необходимостью сохранения топливной эффективности. Современные исследования в области трибологии [2, 8, 9] подчеркивают, что микрорельеф трущихся поверхностей формируется в первые сотни километров пробега, а его стабилизация напрямую влияет на энергопотери и эмиссию вредных веществ. Внедрение цифровых методов диагностики и адаптивных алгоритмов управления движением позволяет сократить период приработки на 25–30 %, что особенно актуально для логистических компаний, стремящихся минимизировать простой техники.

Двигатель MC13, устанавливаемый на тягачи SITRAK C7H, представляет собой модернизированную версию агрегата MAN D20, адаптированную под стандарты Euro V. Его конструкция, включающая чугун CVGI, PVD-покрытия поршневых колец и модульную систему смазки, требует специфического подхода к приработке после капитального ремонта. Актуальность исследования обусловлена отсутствием в настоящее время специальной технологии отслеживания процесса приработки двигателя при высокой стоимости ремонта и необходимостью минимизации простоев в логистике.



### Материал и методы

Исходя из вышеизложенного для контроля процесса приработки были выявлены диагностические признаки, позволяющие определить реальную продолжительность приработки деталей двигателя, наиболее выраженного процесса после выполнения капитального ремонта.

Для установления диагностических параметров, характеризующих техническое состояние цилиндро-поршневой группы двигателей автомобилей марки Sitrak были проведены экспериментальные исследования путем измерения значений диагностических параметров на пяти автомобилях марки Sitrak C7H с двигателем MC 13 после замены цилиндро-поршневой группы (ЦПГ) и капитального ремонта двигателя при пробеге: 0 км, 500км, 1000 км, 2000 км, 3000км, 4000км, для чего использовались несколько видов диагностического оборудования, в их числе: компрессограф, диагностический сканер EOL, эндоскоп электронный, U-образный манометр для измерения количества прорывающихся в картер газов, ключ динамометрический, приспособление для проворачивания коленчатого вала двигателя.

### Теория / Расчет

Испытания производились следующим образом.

На собранном после капитального ремонта ДВС, заправленном моторным маслом и установленными топливными форсунками, с помощью приспособления для проворачивания коленчатого вала и динамометрического ключа проверяли момент сопротивления проворачиванию коленчатого вала двигателя. Величина сопротивления вращению только что собранного двигателя составила 80 Нм. При пробеге 1000км величина сопротивления уменьшилась незначительно: до 72 Нм. Величина сопротивления проворачиванию коленчатого вала двигателя автомобиля с пробегом 2000 км снизилась незначительно и составила 68 Нм, что свидетельствовало о продолжении процесса приработки в цилиндрах. При пробеге автомобиля 3000 км величина сопротивления коленчатого вала ДВС составила 63 Нм, а при пробеге автомобиля 4000 км данная величина осталась неизменной и составила также 63 Нм., что свидетельствовало о стабилизации процесса (рис. 1)

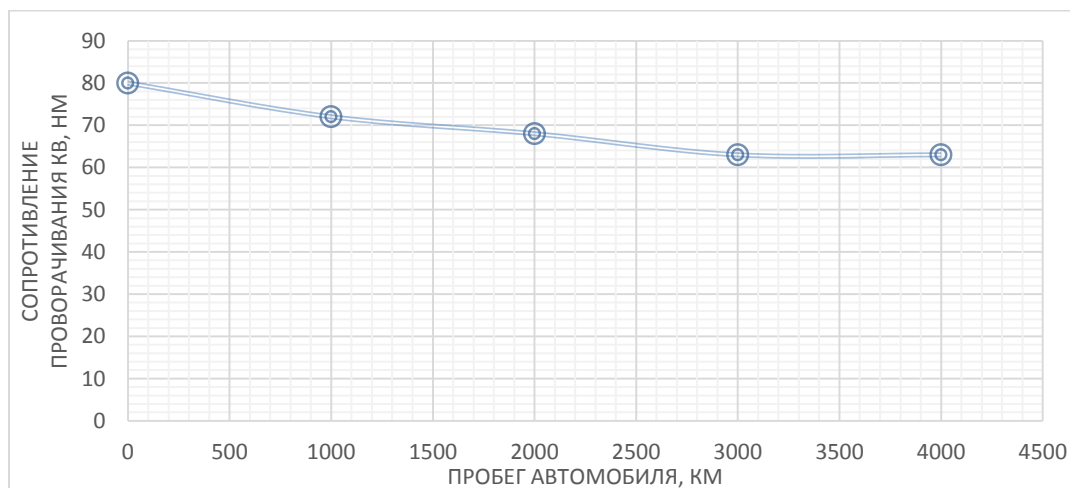
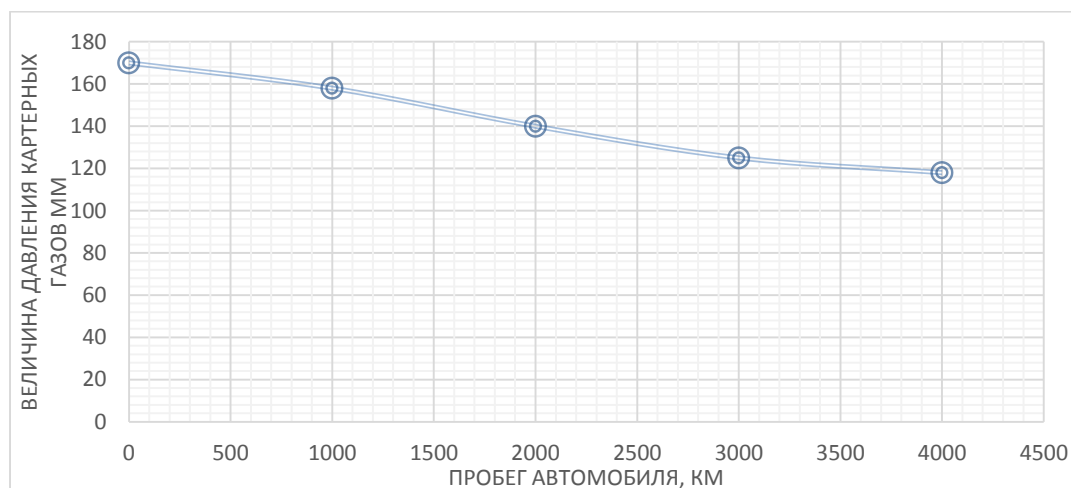


Рисунок 1– Изменение величины сопротивления проворачивания коленчатого вала двигателей автомобилей в зависимости от пробега

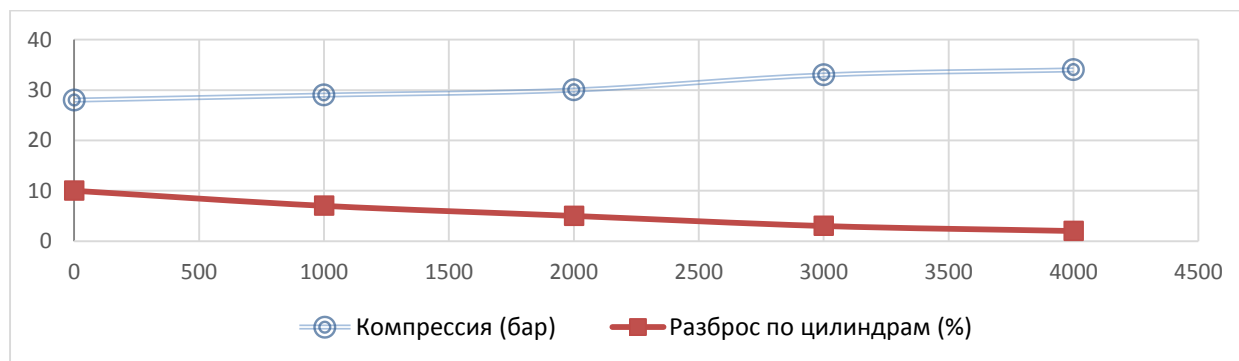
Величину давления картерных газов в картере двигателя измеряли при рабочей температуре охлаждающей жидкости при установленных аппаратным способом оборотах коленчатого вала 1000 об/мин. U-образный манометр подключали к штатному патрубку системы вентиляции картера и производили измерения количества прорывающихся картерных газов на холостом ходу. Согласно данных компании Mercedes Benz давление картерных газов исправного 12 литрового дизельного двигателя не должно превышать 120 мм [3, 6, 7]. Величина давления картерных газов в двигателе с нулевым пробегом составила 170 мм. При пробеге 1000км величина давления картерных газов снизилась незначительно: до 158 мм. Величина

давления картерных газов двигателя автомобиля с пробегом 2000 км составила 140 мм, что свидетельствовало о продолжении процесса приработки в цилиндрах. При пробеге автомобиля 3000 км величина давления картерных газов ДВС составила 125 мм. При пробеге автомобиля 4000 км величина давления картерных газов снизилась незначительно и составила 118 мм. Таким образом определялся износ ЦПГ двигателя (чем больше количество прорывающихся газов, тем ниже приработанность ЦПГ (рис. 2).



**Рисунок 2 – Изменение величины давления картерных газов двигателей автомобилей в зависимости от пробега после капитального ремонта**

Величину давления в надпоршневом пространстве измеряли с помощью компрессографа дизельного IVEKA Motometer, который позволяет получить фиксированные данные измерений в виде графиков на специальной карточке со шкалой при помощи встроенного стержня самописца, что при кратности измерений исключает погрешности. Измерения также проводились при различных пробегах автомобиля: при нулевом пробеге автомобиля величина давления в надпоршневом пространстве составила 28-29 бар (неравномерность по цилиндрам до 10 % характерно для этапа обкатки), что соответствовало нижней границе допустимых значений двигателя. При пробеге 1000 км величина давления в надпоршневом пространстве составила 29-30 бар (неравномерность снизилась до 7 %). При пробеге 2000 км - 30-31 бар (разброс между цилиндрами не превышал 5 %). При пробеге 3000 км давление достигало 32-33 бар (стабильные значения, близкие к паспортным данным двигателя). При пробеге 4000 км величина давления в надпоршневом пространстве составила 34 бара, что свидетельствовало об оптимизации зазоров и уплотнения поршневых колец. Как и в случае с давлением картерных газов, наблюдалась заметная динамика изменения параметра в процессе приработки деталей цилиндропоршневой группы рис (рис. 3).



**Рисунок 3 – Изменение величины давления в надпоршневом пространстве двигателей грузовых автомобилей в зависимости от пробега**

С помощью диагностического сканера EOL предназначенного для комплексной диагностики автомобилей марки Sitrak производили тест относительного давления в надпоршне-



вом пространстве цилиндров двигателя при пробеге автомобиля от 0 км до 4000 км. Этот метод диагностики позволяет оценить состояние цилиндро-поршневой группы без разборным методом за счет фиксации изменения скорости вращения коленчатого вала двигателя при прокрутке стартером. Чем выше компрессия в цилиндре, тем больше сопротивление вращению в такте сжатия, что влияет на скорость проворачивания. Диагностический прибор позволяет анализировать эти изменения, определяя относительную мощность каждого цилиндра. По результатам теста были получены следующие данные (рис. 4).

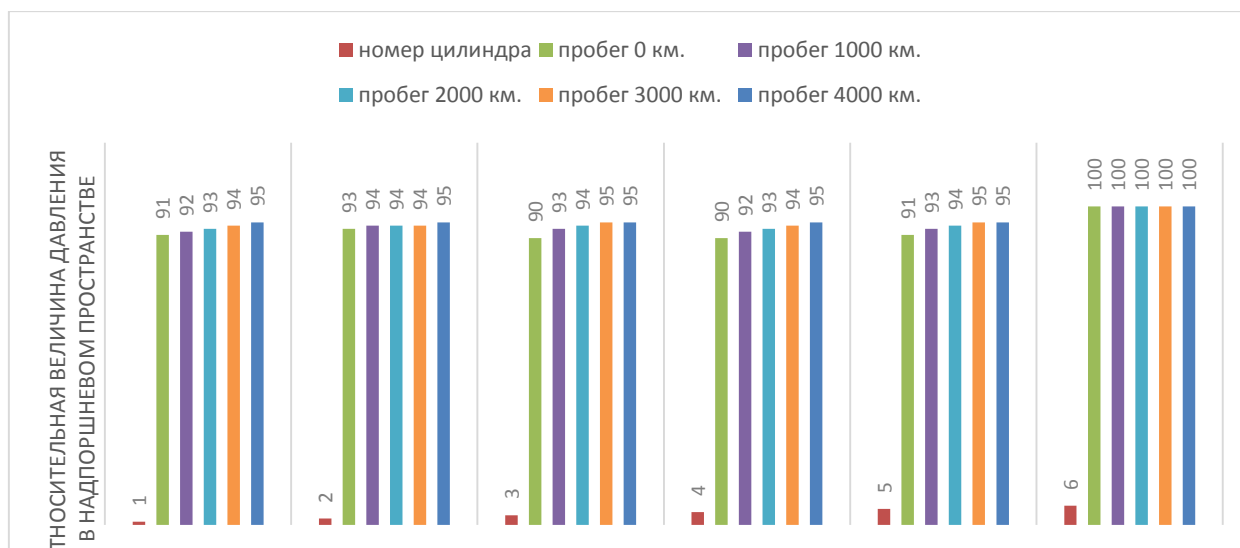


Рисунок 4 – Изменение величины относительного давления в надпоршневом пространстве двигателей грузовых автомобилей в зависимости от пробега

Проведенный анализ динамики величины относительного давления в зависимости от пробега показал следующее.

Цилиндр 1 имеет плавный рост относительной компрессии: от 91 % (0 км) до 95 % (4000 км), прирост составляет 4,4 % с равномерным увеличением на 1 % каждые 1000 км. Такая стабильность может свидетельствовать о постепенной приработке поршневых колец без резких изменений в работе узла.

Цилиндр 2 имеет нелинейную динамику. Начальное значение - 93 %, к 1000 км давление возрастает до 94 % (+1,1 %), после чего стабилизируется на этом уровне до 3000 км. К 4000 км наблюдается повторный рост до 95 % (общий прирост +2,2 %). Подобная картина может указывать на временное замедление процесса изнашивания или влияние внешних факторов.

Цилиндр 3 выделяется максимальным приростом - +5,6 % (90 % → 95 %). На первых 1000 км давление резко увеличивается на 3,3 %, что связано с интенсивной начальной приработкой. Далее рост замедляется: к 2000 км - +4,4 %, к 3000 км - +5,6 %. К 4000 км значение стабилизируется на уровне 95 %, что подтверждает завершение основных процессов адаптации деталей.

Цилиндр 4 показывает равномерное увеличение компрессии: с 90 % до 95 % (+5,6 %) с шагом +1 % на каждые 1000 км. Такая динамика аналогична цилиндру 1 и отражает типичный сценарий постепенного уплотнения зазоров в цилиндропоршневой группе.

Цилиндр 5 характеризуется резким скачком компрессии на первых 1000 км (+2,2 %, 91 % → 93 %), после чего рост замедляется: к 2000 км - +3,3 %, к 3000 км - +4,4 %. К пробегу 4000 км давление достигает 95 % (общий прирост +4,4 %). Начальный скачок может быть связан с быстрой приработкой колец, а последующая стабилизация - с выходом системы на оптимальный режим.

Цилиндр 6 (эталон) сохраняет стабильное давление 100 % на всех этапах пробега, что подтверждает корректность метода измерений и отсутствие систематических погрешностей.

Полученные результаты по всем цилиндрам позволяют установить следующие общие тенденции:

Средний прирост для цилиндров 1-5 составляет +4,2 % за 4000 км.

Максимальное изменение зафиксировано в цилиндре 3 (+5,6 %), минимальное - в цилиндре 2 (+2,2 %).

Первые 1000 км - ключевой этап для большинства цилиндров, при котором прирост варьируется от +1,1 % до +3,3 %, что связано с начальной приработкой.

При пробеге в интервале 2000–3000 км происходит замедление динамики, вероятно, из-за стабилизации зазоров и снижения интенсивности износа.

При пробеге 4000 км имеет место повторное увеличение давления у цилиндров 2 и 5, что требует проверки на предмет накопления отложений или изменения условий эксплуатации.

Интерпретация: Рост относительной компрессии обусловлен процессами приработки поршневой группы (уплотнение колец, уменьшение зазоров). Аномалии в динамике (например, резкие скачки) могут быть связаны с неоднородностью износа, с качеством смазочных материалов или температурными режимами. Стабильность эталонного цилиндра 6 подтверждает надежность метода, однако для углубленного анализа и обоснованных выводов необходимы данные о рабочих параметрах двигателя (температура, нагрузка, тип масла).

### **Результаты**

Проведенные исследования подтвердили выраженный характер процесса приработки деталей цилиндра-поршневой группы двигателей грузовых автомобилей после капитального ремонта. Значения использованных диагностических параметров демонстрировали общую динамику приработки по мере увеличения пробега после капитального ремонта двигателя.

Так сопротивление проворачиванию коленчатого вала постепенно снижалось, достигая стабильных значений к завершающей фазе испытаний, что отражало оптимизацию сил трения в узлах двигателя.

При этом давление картерных газов последовательно уменьшалось, приближаясь к нормативным показателям по мере увеличения пробега, что свидетельствовало об уплотнении зазоров в ЦПГ.

Величина компрессии в цилиндрах возрастала с одновременным сокращением разброса значений между цилиндрами, тем самым подтверждая равномерность приработки поверхностей.

Относительное давление, измеренное сканером EOL, показало синхронный рост по всем цилиндрам с сохранением стабильности эталонного цилиндра, что исключает системные погрешности метода.

Корректность примененных методов диагностирования была подтверждена следующими полученными закономерностями:

- взаимной согласованностью данных - изменения всех параметров имели однонаправленный характер, соответствующий физике процессов приработки (снижение трения, уменьшение утечек, рост плотности контакта);

- комплексным подходом - сочетание механических измерений (момент сопротивления, манометрия) и электронной диагностики (сканер EOL) обеспечило перекрестную верификацию результатов;

- соответствием теоретическим моделям - выявленные закономерности согласуются с трибологическими принципами формирования контактных поверхностей, где начальный этап характеризуется интенсивным износом, а последующий - стабилизацией микрорельефа.

Таким образом, использованные методы диагностики позволили объективно отследить этапы приработки, выделив критические точки контроля и подтвердив завершение процесса к определенному эксплуатационному интервалу.

### **Обсуждение**

Полученные данные имеют принципиальное значение для оптимизации режима эксплуатации двигателей грузовых автомобилей после капитального ремонта. Выявленная стабилизация диагностических параметров к пробегу в интервале 3000–4000 км позволяет пере-

смотреть стандартные регламенты обкатки, сократив ее продолжительность на 20–25% без риска преждевременного износа. Это особенно актуально для логистических компаний, где простой техники напрямую влияет на их экономические показатели.

Ключевая значимость работы заключается в установлении связи между динамикой диагностических параметров и физическими процессами приработки. Например, снижение сопротивления проворачиванию коленчатого вала отражает не просто уменьшение процесса трения, а формирование оптимального микрорельефа контактных поверхностей, что критически важно для энергоэффективности и ресурса двигателя. Аналогично, нормализация давления картерных газов свидетельствует о завершении этапа первичного износа, когда зазоры в ЦПГ достигают проектных значений.

### **Выводы**

Предложенный комплексный подход к диагностике двигателей грузовых автомобилей (сочетание механических измерений и электронного сканирования) демонстрирует высокую надежность и достоверность, что подтверждается взаимной корреляцией всех диагностических параметров. Выявленная закономерность позволяет отказаться от субъективных оценок технического состояния двигателя после капитального ремонта и перейти к управлению процессом приработки на основе объективных данных.

Результаты проведенного исследования также поднимают вопрос о необходимости адаптации режимов обкатки для двигателей с модернизированными материалами (например, PVD-покрытиями), где традиционные методы определения технического состояния могут оказаться неэффективными. Внедрение рекомендованных контрольных точек (1000, 3000, 4000 км) в сервисные протоколы способно снизить затраты на содержание парка магистральных тягачей за счет предупреждения перерасхода топлива из-за неполной приработки и снижения риска граничного трения и аварийных поломок.

Таким образом, на основе вышеприведенного исследования настоящая работа вносит весомый вклад как в практику эксплуатации грузового транспорта, так и в развитие методов неразрушающего контроля, предлагая проверенные алгоритмы и апробированный комплекс диагностических параметров для цифровизации процессов диагностики двигателей грузовых автомобилей после капитального ремонта.

## **СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ**

1. Быстрое В.Н. Эффект безызносности и его применение в технике // Долговечность трущихся деталей машин; под ред. Д.Н. Гаркунова. М.: Машиностроение, 1990. Вып. 5.
2. Гаркунов Д.Н. Триботехника. М.: Машиностроение, 1986. 424 с.
3. Нигаматов М.Х. Ускоренная обкатка двигателя после ремонта. М.: Колос, 1984. 79 с.
4. Добролюбов И.П., Лившиц В.М. Динамический метод диагностики автотракторных двигателей. Ч. 1. Принцип построения диагностических моделей переходных процессов. Новосибирск: Сиб. отд. ВАСХНИЛ, 1981. 86 с.
5. Курлов О.Н. Влияние физико-химических свойств конструкционных и смазочных материалов на процесс избирательного переноса // Долговечность трущихся деталей машин: М.: Машиностроение, 1983. Вып. 2. С. 57-59.
6. Михлин В.М. Прогнозирование технического состояния машин. М.: Колос, 1976. 288 с.
7. Мухин Е.М., Столяров Н.И. Приработка и испытание автомобильных двигателей. М.: Транспорт, 1981. 265 с.
8. Ребиндер П.Я. Поверхностные явления в дисперсных системах. Физико-химическая механика: избр. труды. М.: Наука, 1979. 381 с.
9. Кольцов Л.А. Манжетные уплотнения из композиционного полиуретана, работающие в режиме избирательного переноса // Долговечность трущихся деталей. Вып. 1. 1986.
10. Михлин В.М. Прогнозирование технического состояния машин. М.: Колос, 1976. 288 с.
11. Савченко Н.Э. Теоретические и экспериментальные основы процесса приработки сопряженных деталей двигателей внутреннего сгорания: дис. ... д-ра техн. наук. Киев, 1971. 457 с.
12. Куксенова Л.И. Закономерности структурных изменений и массоперенос в поверхностных слоях и

их влияние на износ трибосопряжений медный сплав-сталь: дис. ... д-ра техн. наук. М., 1990. 475 с.

13. Руководство по техническому диагностированию при техническом обслуживании и ремонте тракторов и сельскохозяйственных машин / А.Э. Северный, Д.С. Буклагин, В.М. Михлин и др. М.: Росинформагротех, 2001. 249 с.

14. Способ определения герметичности надпоршневого пространства в цилиндрах ДВС: А.с. 267199 СССР / А.С. Гребенников, Ю.А. Борисов. Бюл. №40. 1986.

15. Стрельцов В.В. Ускорение приработки деталей во время стендовой обкатки отремонтированных двигателей внутреннего сгорания (на примере ЗМЗ-53 и ЗИЛ-130): дис. ... д-ра техн. наук. М., 1993. 619 с.

16. Цыпцын В.И. Повышение долговечности отремонтированных дизелей совершенствованием технологии приработки и применением упрочняющих покрытий: дис. ... д-ра техн. наук. М., 1991. 485 с.

17. Карпенко М.А. Интенсификация процесса приработки двигателей УМЗ применением присадок в масло с ПАВ и ХАВ: Автореф. дис. ... канд. тех. наук. Пенза, 2002. 18 с.

18. EPC System: Mercedes-Benz Electronic Parts Catalog [Электронный ресурс]. URL: <https://epc-system.ru/info/mercedes/mers-epc.html>.

19. Zhou H., Rosenberg L. Tribological aspects of engine break-in procedures // Journal of Automotive Engineering. 2020. №3. P. 45-58.

20. Ian Hutchings Philip Shipway (Eds). Tribology. Friction and Wear of Engineering Materials. Butterworth-Heinemann, 2017. P. 108.

**Суханов Сергей Алексеевич**

ООО «ГЛТ Сервис»

Адрес: 355008, Россия, г. Ставрополь, ул. Заводская, д. 6а

Руководитель станции технического обслуживания грузовых автомобилей

E-mail: Passatru1@rambler.ru

**Новиков Александр Николаевич**

Орловский государственный университет имени И.С. Тургенева

Адрес: 302026, Россия, г. Орел, ул. Комсомольская, д. 95

Д.т.н., профессор, зав. кафедрой сервиса и ремонта машин

E-mail: novikovan57@gmail.com

**Тахтамышев Хизир Махмудович**

Невинномысский государственный гуманитарно-технический институт

Адрес: 357108, Россия, г. Невинномысск, б-р Мира, 17

Д.т.н., профессор, профессор кафедры строительства, транспорта и машиностроения

E-mail: hizirt43@mail.ru

S.A. SUKHANOV, A.N. NOVIKOV, H.M. TAKHTAMYSHEV

## ON THE QUESTION OF DIAGNOSING THE RUNNING-IN PROCESS OF OVERHAULED INTERNAL COMBUSTION ENGINES OF TRUCKS

**Abstract.** The article discusses issues related to the application of diagnostic methods for the process of running-in of internal combustion engines of trucks. Diagnostic signs have been investigated and substantiated to determine the actual duration of running-in of the engine parts of the SITRAK C7H mainline tractor, the most pronounced process after major repairs. Unfavorable combinations of influencing factors have been identified that may make it difficult to run-in due to serious damage to the friction surfaces. Patterns of changes in diagnostic parameters have been established depending on the intensity of the processes of running-in of rubbing surfaces. The authors substantiate the relevance of monitoring the condition of rubbing surfaces during running-in, and propose a comprehensive test method for various engine operating modes and remote monitoring of diagnostic parameters.

**Keywords:** internal combustion engines, running-in, diagnostic parameters, modes, tests, process, overhaul, experiment, correlation, bench, dynamic, field, methodology, revolutions, mileage

### BIBLIOGRAPHY

1. Bystroe V.N. Effekt bezyznosnosti i ego primeneniye v tekhnike // Dolgovechnost' trushchikhsya detaley mashin; pod red. D.N. Garkunova. M.: Mashinostroeniye, 1990. Vyp. 5.
2. Garkunov D.N. Tribotekhnika. M.: Mashinostroeniye, 1986. 424 s.

3. Nigamatov M.H. Uskorennaya obkatka dvigatelya posle remonta. M.: Kolos, 1984. 79 s.
4. Dobrolyubov I.P., Livshits V.M. Dinamicheskiy metod diagnostiki avtotraktornykh dvigateley. CH. 1. Printsip postroyeniya diagnosticheskikh modeley perekhodnykh protsessov. Novosibirsk: Sib. otd. VASHNIL, 1981. 86 s.
5. Kurlov O.N. Vliyaniye fiziko-khimicheskikh svoystv konstruksionnykh i smazochnykh materialov na protsess izbiratel'nogo perenosa // Dolgovechnost' trushchikhshya detaley mashin: M.: Mashinostroenie, 1983. Vyp. 2. S. 57-59.
6. Mikhlin V.M. Prognozirovaniye tekhnicheskogo sostoyaniya mashin. M.: Kolos, 1976. 288 s.
7. Mukhin E.M., Stolyarov N.I. Prirabotka i ispytaniye avtomobil'nykh dvigateley. M.: Transport, 1981. 265 s.
8. Rebinder P.YA. Poverkhnostnye yavleniya v dispersnykh sistemakh. Fiziko-khimicheskaya mekhanika: izbr. trudy. M.: Nauka, 1979. 381 s.
9. Kol'tsov L.A. Manzhetnye uplotneniya iz kompozitsionnogo poliuretana, rabotayushchie v rezhime izbiratel'nogo perenosa // Dolgovechnost' trushchikhshya detaley. Vyp. 1. 1986.
10. Mikhlin V.M. Prognozirovaniye tekhnicheskogo sostoyaniya mashin. M.: Kolos, 1976. 288 s.
11. Savchenko N.E. Teoreticheskie i eksperimental'nye osnovy protsessa prirabotki sopryazhennykh detaley dvigateley vnutrennego sgoraniya: dis. ... d-ra tekhn. nauk. Kiev, 1971. 457 s.
12. Kuksenova L.I. Zakonomernosti strukturnykh izmeneniy i massoperenos v poverkhnostnykh sloyakh i ikh vliyaniye na iznos tribosopryazheniy mednyy splav-stal': dis. ... d-ra tekhn. nauk. M., 1990. 475 s.
13. Rukovodstvo po tekhnicheskomu diagnostirovaniyu pri tekhnicheskoy obsluzhivaniy i remonte traktorov i sel'skokhozyaystvennykh mashin / A.E. Severnyy, D.S. Buklagin, V.M. Mikhlin i dr. M.: Rosinformagrotekh, 2001. 249 s.
14. Sposob opredeleniya germetichnosti nadporshneвого prostranstva v tsilindrakh DVS: A.s. 267199 SSSR / A.S. Grebennikov, YU.A. Borisov. Byul. №40. 1986.
15. Strel'tsov V.V. Uskoreniye prirabotki detaley vo vremya stendovoy obkatki otremonirovannykh dvigateley vnutrennego sgoraniya (na primere ZMZ-53 i ZIL-130): dis. ... d-ra tekhn. nauk. M., 1993. 619 s.
16. Tsiptsyn V.I. Povysheniye dolgovechnosti otremonirovannykh dizeley sovershenstvovaniem tekhnologii prirabotki i primeneniem uprochnyayushchikh pokrytiy: dis. ... d-ra tekhn. nauk. M., 1991. 485 s.
17. Karpenko M.A. Intensifikatsiya protsessa prirabotki dvigateley UMZ primeneniem prisadok v maslo s PAV i HAV: Avtoref. dis. ... kand. tekhn. nauk. Penza, 2002. 18 s.
18. EPC System: Mercedes-Benz Electronic Parts Catalog [Elektronnyy resurs]. URL: <https://epc-system.ru/info/mercedes-mers-epc.html>.
19. Zhou H., Rosenberg L. Tribological aspects of engine break-in procedures // Journal of Automotive Engineering. 2020. №3. P. 45-58.
20. Ian Hutchings Philip Shipway (Eds). Tribology. Friction and Wear of Engineering Materials. Butterworth-Heinemann, 2017. R. 108.

**Sukhanov Sergey Alekseevich**

GLT Service LLC

Address: 355008, Russia, Stavropol, Zavodskaya str., 6a

Head of the truck maintenance station

E-mail: Passatru1@rambler.ru

**Novikov Alexander Nikolaevich**

I.S. Turgenev Oryol State University

Adress: 302026, Russia, Orel, Komsomolskaya str., 95

Doctor of Technical Sciences

E-mail: novikovan57@gmail.com

**Takhtamyshev Khizir Makhmudovich**

Nevinnomyssk State Humanitarian and Technical Institute

Adress: 357108, Russia, Nevinnomyssk, Mira Street, 17

Doctor of Technical Sciences

E-mail: hizirt43@mail.ru

УДК 656.1

doi: 10.33979/2073-7432-2025-3-2(90)-85-93

В.Е. СЕЛЮН, Л.С. ТРОФИМОВА

## МОДЕЛИРОВАНИЕ РАБОТЫ ПОДВИЖНОГО СОСТАВА ДЛЯ ПЛАНИРОВАНИЯ ПЕРЕВОЗОК ЗАМОРОЖЕННЫХ И ОХЛАЖДЕННЫХ ПРОДУКТОВ ПИТАНИЯ

**Аннотация.** Акцент научных исследований сделан на необходимость учета продолжительности выполнения операций технологического процесса перевозок замороженных и охлажденных продуктов питания готовых к употреблению грузополучателям при сохранении свойства груза, сроков доставки. Разработана транспортно-технологическая схема перевозок груза от центрального распределительного склада до грузополучателей (рестораны быстрого питания). Взаимосвязь плановых показателей представлена в ограничениях математической модели – времени операций технологического процесса перевозок грузов, выработки подвижного состава и количества ездов при перевозке груза.

**Ключевые слова:** технология перевозок, замороженные и охлажденные продукты питания готовые к употреблению, математическое моделирование, свойства груза, плановые показатели

### Введение

Актуальность настоящих исследований связана с учётом взаимосвязи плановых показателей, характеризующих продолжительность технологий выполнения перевозок и свойства грузов при их доставке. Эти условия являются ограничениями для максимизации прибыли от работы подвижного состава.

В ранее выполненных исследованиях на основании результатов изучения практики планирования работы подвижного состава была разработана схема перемещения продуктов питания для обеспечения деятельности в сфере быстрого питания. Приведена систематизация требований групп продуктов питания, предъявляемых к перевозке специализированным подвижным составом, с соблюдением температурного режима [1]. Доказана необходимость использования результатов исследований при математическом моделировании для планирования работы подвижного состава.

В ранее выполненных исследованиях подчеркивается необходимость моделирования на базе статистических данных товарных групп, которая позволяет получить анализ текущего состояния перевозочного процесса продуктов питания, социально-экономических условий и прогнозных значениях [2].

Планирование перевозок замороженных и охлажденных продуктов питания, готовых к употреблению осуществляется с применением современных методов для определения показателей, характеризующих эксплуатацию подвижного состава в заданных технологических условиях.

В практике работы подвижного состава зафиксированы случаи несоответствия плановых и фактических показателей, которые приводят к простоям в промежуточном складе и к невыполнению условий у грузополучателей.

Обзор литературы посвящен исследованию современных подходов к моделированию транспортного процесса перевозок грузов, в качестве ограничений которого присутствуют продолжительность технологического процесса, показатели, характеризующие свойства продуктов питания.

Необходимость учитывать продолжительность выполнения транспортного процесса при перевозке продуктов питания была определена в ранее выполненных исследованиях. В статье [3] авторы предложили методологию формирования графиков перевозок скоропорта-

щихся продуктов питания автомобильным транспортом. Основным критерием являлось время. Авторы использовали временные параметры технологического процесса производства, перевозки, сбыта и заготовки продукции. Авторы [4] рассматривают методику, определяющую продолжительность размораживания груза по времени выполнения транспортного процесса. В работе [5] сделан вывод о том, что при формировании маршрутов необходимо учитывать требования к перевозке замороженных и охлажденных продуктов и соблюдать срок доставки к грузополучателям. Разработана информационная система для оптимизации грузоперевозок, позволяющая сократить время на принятие решения при построении оптимального плана перевозок.

Ранее выполненные исследования посвящены формированию маршрутов для доставки грузов. Автор [6] предложил использовать автоматизацию по созданию маршрутов при помощи навигационных систем. В работе [7] предложена модель среднего расстояния доставки одной тонны груза, которая влияет на время перевозок и риск несвоевременной доставки груза. В работе [8] по результатам формирования оптимального маршрута получены кратчайшие расстояния на примере перевозки скоропортящихся грузов. Выполнено сравнение разных вариантов транспортных средств для перевозки скоропортящихся грузов от двери до двери. Для обеспечения качества при планировании перевозок на дальние расстояния, авторы [9] подчеркивали важность оптимизации сборки продуктов питания для определенных условий транспортировки, чтобы максимально увеличить их качество и срок годности. В статье [10] авторы предлагают имитационную модель определения плановых показателей цепочки поставок продуктов питания в соответствии с меняющимся спросом.

Исследования работ ученых и практических работников позволили сделать вывод, что в качестве критерия оптимизации используются затраты. В работе [11] представлена оптимизационная модель, относящаяся к классу задач линейного программирования, позволяющая определить минимальные суммарные затраты на производство и доставку продовольственной продукции. Авторы [12] разработали математическую модель, критерием которой являются минимум суммарных затрат на производство, перевозку и хранение. В работе автор [13] предлагает модифицированную модель процесса снабжения производственного предприятия скоропортящимся сырьем, учитывающая затраты, связанные с порчей части запаса.

В статье [14] представлена модель оптимизации, направленная на минимизацию стоимости топлива при перевозке лосося.

В работе [15] представлены методики оптимизации перевозочного процесса. Автор [15] делает вывод о том, что оптимизация автомобильных перевозок в модели рассматривается относительно атрибутов (планирование и землепользование, инфраструктура, политика управления, логистика, инновационные технологии) для эффективного использования дорожной сети.

В работе автор [16] рассматривает критерии и показатели, которые влияют на выбор автотранспортных средств.

Ряд ранее выполненных исследований посвящен моделированию транспортного процесса с использованием цифровых двойников. В работе [17] предлагается технология автоматизированного цифрового контроля непрерывной холодильной цепи с помощью специализированных устройств, которые контролируют параметры скоропортящихся грузов. В работе [18] применение цифровых двойников смоделировано для определения местоположения груза.

В работе [19] рассматриваются цифровые двойники, представляющие собой виртуальное представление пищевого продукта, которые позволяют отслеживать путь продукта по цепочке поставок, контролируя температуру и влажность от производства до потребления. В работе [20] приводится описание различных программных средств имитационного моделирования для исследования вопросов планирования. В статье [21] разработана имитационная модель Монте-Карло с несколькими сценариями для достижения экономической рентабельности перевозок грузов при изменении количества заказов.

Ранее выполненные исследования посвящены решению научных задач оперативного планирования, формированию показателей по затратам и стоимости отдельных элементов в структуре затрат, использованию цифровых двойников.

Исследования авторов настоящей статьи выявили необходимость текущего планирования работы технически исправного подвижного состава (ПС) при перевозке замороженных и охлажденных продуктов питания готовых к употреблению с учетом требований к грузу и времени выполнения транспортных операций.

Целью исследования является разработка математической модели для планирования работы подвижного состава при перевозке замороженных и охлажденных продуктов питания готовых к употреблению с учетом взаимосвязи показателей, характеризующих технологии перевозок, транспортные свойства груза, требования грузополучателей.

Задачи настоящего исследования:

- разработка транспортно-технологической схемы выполнения перевозок замороженных и охлажденных продуктов питания готовых к употреблению;
- формирование целевой функции для планирования работы подвижного состава;
- математическое описание плановых показателей, учитываемых в качестве ограничений выполнения транспортно-технологической схемы, свойства груза и требования грузополучателей.

Научная новизна представлена в совокупности уравнений, неравенств и ограничений для достижения максимума целевой функции – прибыли от работы подвижного состава при перевозке замороженных и охлажденных продуктов питания готовых к употреблению по определенной технологии с учетом их свойств, соответствия требований для каждого грузополучателя.

#### ***Материал и методы***

Для разработки транспортно-технологической схемы выполнения перевозок замороженных и охлажденных продуктов питания готовых к употреблению применялись требования Р 50-111-89 «Рекомендации по стандартизации. Единая система технологической документации. Правила оформления документов на процессы перемещения», в котором установлены правила оформления следующих технологических документов: маршрутная карта; карта типового (группового) технологического процесса.

Формирование целевой функции для планирования работы подвижного состава выполнялось с использованием научных основ текущего планирования работы автотранспортного предприятия. Математическое описание плановых показателей, учитываемых в качестве ограничений выполнения транспортно-технологической схемы, свойства груза и требования грузополучателей выполнено с применением методов математического моделирования [22].

#### ***Теория***

Разработанная транспортно-технологическая схема определяет последовательность прохождения грузами элементов системы перевозок от центрального распределительного склада до конечного грузополучателя, учитывает практику движения груза, взаимное расположение пунктов отправления и получения для определения временных показателей на выполнение операций.

Разработанная транспортно-технологическая схема перевозок замороженных и охлажденных продуктов питания готовых к употреблению представлена в таблице 1.

Для формирования математической модели используется последовательность способ определения и продолжительность выполнения операций.

#### ***Результаты и обсуждение***

В разработанной математической модели принято, что планирование выполняется:

- для каждой единицы подвижного состава в кузове, которого обеспечено поддержание требуемой температуры и учитывается по номеру от 1 до  $X$  ( $x = 1, X$ ),  $X = \text{int}(X)$ ;
- для технологии, используемой при перевозке, и учитывается по номеру от 1 до 2 ( $i = 1, 2$ ),  $I = \text{int}(I)$ . Количество рассматриваемых технологий перевозки замороженных и



охлажденных продуктов питания готовых к употреблению, сформированных в паллете (от центрального распределительного склада до промежуточного склада и от промежуточного склада до грузополучателя) соответствует количеству типоразмеров подвижного состава;

- для каждого грузополучателя (ресторана быстрого питания) и учитывается по номеру от 1 до  $M$  ( $m = 1, M$ ),  $M = \text{int}(M)$ .

Таблица 1 – Транспортно-технологическая схема перевозок замороженных и охлажденных продуктов питания готовых к употреблению

Наименование операции	Погрузка	Транспортная	Промежуточная: разгрузка, погрузка	Транспортная	Разгрузка
1	2	3	4	5	6
Место выполнения операции	центральный распределительный склад	перевозка в междугородном сообщении	промежуточный склад	перевозка в городском сообщении	грузополучатели (рестораны быстрого питания)
Способы выполнения операций и применяемое оборудование	механизированный: электропогрузчик, штабелер	механизированный: подвижной состав	механизированный: электропогрузчик	механизированный: подвижной состав	механизированный: штабелер, электропогрузчик
Способ определения продолжительности операции, ч.	по нормам времени механизированной погрузки подвижного состава замороженными и охлажденными продуктами питания, сформированными в паллете	режимы труда и отдыха, способ организации работы водителя	доверительные интервалы, соответствующие установленному закону распределения случайной величины (натурные наблюдения)	доверительные интервалы, соответствующие установленному закону распределения случайной величины (натурные наблюдения)	доверительные интервалы, соответствующие установленному закону распределения случайной величины (натурные наблюдения)
Профессия	водитель электропогрузчика, операторы	водитель	водитель электропогрузчика	водитель	водитель электропогрузчика, оператор
Суммарное время, ч.	время перевозки подвижным составом определенной группы замороженных и охлажденных продуктов питания, сформированных в паллете от центрального распределительного склада до грузополучателей				

В настоящем исследовании авторы предлагают математическую модель, целевой функцией которой является максимум прибыли при ограничениях, установленных в результате разработанных:

- транспортной классификации охлажденных и замороженных продуктов питания, готовых к употреблению, по группам с учетом их свойств и требований к использованию в ресторанах быстрого питания;

- транспортно-технологической схемы перевозки охлажденных и замороженных продуктов питания, готовых к употреблению.

$$\sum_{m=1}^M \Pi_m \rightarrow \max, \quad (1)$$

где  $\Pi_m$  – прибыль от перевозки для  $m$ -го грузополучателя (ресторан быстрого питания), руб.;

Прибыль определяется как разница между доходом и затратами (2)

$$\Pi_m = \sum_{b=1}^{12} (D_{m,b} - Z_{m,b}), m = \overline{1, M}, \quad (2)$$

где  $D_{m,b}$  – доход, полученный от  $m$ -го грузополучателя за  $b$ -м месяц, руб.;

$b$  – номер месяца,  $b = \overline{1, 12}$ ,  $b = \text{int}(b)$ ;

$Z_{m,b}$  – затраты для выполнения перевозок к  $m$ -му грузополучателю в  $b$ -м месяце, руб.

$$D_{m,b} = \sum_{x=1}^X \sum_{i=1}^2 \sum_{k=1}^K (Q_{x,i,k,m} \cdot n_{x,i,k,m}) \cdot \sum_{i=1}^2 D_{i,m,b} \cdot C_{m,b}, m = \overline{1, M}, b = \overline{1, 12}, \quad (3)$$

где  $Q_{x,i,k,m}$  – выработка  $x$ -го ПС при перевозке  $k$ -й группы замороженных и охлажденных продуктов питания, сформированной в паллете по  $i$ -й технологии для  $m$ -го грузополучателя в  $b$ -й период, т;

$n_{x,i,k,m}$  – коэффициент, учитывающий возможность назначения  $x$ -го ПС при перевозке  $k$ -й группы замороженных и охлажденных продуктов питания, сформированных в паллете по  $i$ -й технологии для  $m$ -го грузополучателя,  $n_{x,i,k,m} = \overline{0, 1}$ ,  $n_{x,i,k,m} = \text{int}(n_{x,i,k,m})$ ;

$D_{i,m,b}$  – количество смен работы ПС для выполнения требований  $m$ -го грузополучателя за  $b$ -м месяц;  $D_{i,m,b} = \text{int}(D_{i,m,b})$ ;

$C_{m,b}$  – величина тарифа на перевозку замороженных и охлажденных продуктов питания, для  $m$ -го грузополучателя в  $b$ -м месяце, руб./т.

В отличие от ранее выполненных исследований в математической модели используется формула, в которой величина выработка планируется для междугородных и городских перевозок. Это позволяет учитывать практику перевозок, отраженную в транспортно-технологической схеме и связанную с тем, что масса  $k$ -й группы замороженных и охлажденных продуктов питания, сформированных в паллете, перемещается от центрального распределительного склада до  $m$ -го грузополучателя.

$$Z_{m,b} = \sum_{x=1}^X \sum_{i=1}^2 \sum_{k=1}^K (U_{x,i,k,m,b} + F_{x,i,k,m,b}), m = \overline{1, M}, b = \overline{1, 12}, \quad (4)$$

где  $U_{x,i,k,m,b}$  – затраты по статьям калькуляции (фонд оплаты труда водителя с отчислениями, топливо, выполнение технического обслуживания и текущего ремонта, амортизация, накладные расходы) на работу  $x$ -го ПС при перевозке  $k$ -й группы замороженных и охлажденных продуктов питания, сформированных в паллете по  $i$ -й технологии для  $m$ -го грузополучателя в  $b$ -м месяце, руб.;

$F_{x,i,k,m,b}$  – затраты на работу  $x$ -го ПС, связанные с необходимостью перевозок в связи с признаками порчи  $k$ -й группы замороженных и охлажденных продуктов питания, сформированных в паллете при получении  $m$ -м грузополучателем в  $b$ -м месяце, руб.

$$F_{x,i,k,m,b} = P_{x,i,k,m,b}(A) \cdot A_{x,i,k,m,b} \cdot c_{x,i,k,m,b}, x = \overline{1, X}; i = \overline{1, I}; k = \overline{1, K}; m = \overline{1, M} \quad b = \overline{0, 12}, \quad (5)$$

где  $P_{x,i,k,m,b}(A)$  – вероятность возврата  $m$ -м грузополучателем  $k$ -й группы замороженных и охлажденных продуктов питания, доставленных  $x$ -м ПС по  $i$ -й технологии в  $b$ -м месяце;

$A_{x,i,k,m,b}$  – объём  $k$ -й группы замороженных и охлажденных продуктов питания, подлежащих возврату от  $m$ -го грузополучателя  $x$ -м ПС по  $i$ -й технологии в  $b$ -м месяце, т;

$c_{x,i,k,m,b}$  – стоимость доставки  $x$ -м ПС по  $i$ -й технологии при возврате  $m$ -м грузополучателем  $k$ -й группы замороженных и охлажденных продуктов питания, доставленных в  $b$ -м месяце, руб./т.

Величина дохода зависит от количества доставленного груза, поэтому необходимо запланировать величину выработки, соответствующую потребности в грузе (6)

$$\sum_{x=1}^X \sum_{i=1}^2 \sum_{k=1}^K Q_{x,i,k,m} \geq S_m, \quad (6)$$

где  $S_m$  – спрос для  $m$ -го грузополучателя, т.

Возможное количество ездов определяется по фонду рабочего времени водителей при перевозке по каждой технологии и должно быть больше либо равно потребному количеству ездов (7)

$$Ze_m \leq (Ze_{1m} + Ze_{2m}), \quad (7)$$

где  $Ze_m$  – требуемое количество ездов для  $m$ -го грузополучателя, ед;

$Ze_{1m}$  – количество ездов по первой технологии (междугородное сообщение) для  $m$ -го грузополучателя, ед;

$Ze_{2m}$  – количество ездов по второй технологии (городское сообщение) для  $m$ -го грузополучателя, ед.

Ограничения, установленные в результате разработанной транспортной классификации охлажденных и замороженных продуктов питания, готовых к употреблению учитывают требования к времени в пути, срокам доставки (8)

$$T_{\partial x, k, m} \leq t_{\partial x, k, m}, \quad (8)$$

где  $T_{\partial x, k, m}$  – время перевозки  $x$ -м ПС  $k$ -й группы замороженных и охлажденных продуктов питания, сформированных в паллете из центрального распределительного склада для  $m$ -го грузополучателя, ч;

$t_{\partial x, k, m}$  – допустимое время в пути  $x$ -го ПС, для приёма  $k$ -й группы замороженных и охлажденных продуктов питания, сформированных в паллете для  $m$ -го грузополучателя, ч.

Реализация условий грузополучателей, при перевозке замороженных и охлажденных продуктов питания по первой технологии обеспечивается подбором режимов труда и отдыха водителей.

$$\sum_{k=1}^K \sum_{m=1}^M t_{\text{приб}x, i, k, m} \leq t_{\text{приб}x, i}, \quad (9)$$

где  $t_{\text{приб}x, i, k, m}$  – время прибытия  $x$ -го ПС после выполнения  $i$ -й технологии с учетом режимов труда и отдыха способа организации работы водителя при перевозке  $k$ -й группы замороженных и охлажденных продуктов питания, сформированных в паллете, для  $m$ -го грузополучателя, ч:мин;

$t_{\text{приб}x, i}$  – требуемое время прибытия  $x$ -го ПС после выполнения  $i$ -й технологии с учетом режимов труда и отдыха способа организации работы водителя, ч:мин.

### Выводы

Разработана транспортно-технологическая схема выполнения перевозок замороженных и охлажденных продуктов питания готовых к употреблению, в которой определены затраты времени на выполнение операций. Установлено, что такие показатели как время погрузки и разгрузки в промежуточном складе, время на разгрузку у грузополучателей, время движения с грузом в городском сообщении необходимо планировать по доверительным интервалам соответствующих установленному закону распределения случайной величины. Время движение с грузом в междугородном сообщении определяется по режимам труда и отдыха способа организации водителя.

Выполнено формирование целевой функции по критерию максимальной прибыли от работы подвижного состава.

Математическое описание плановых показателей направлено на учёт ограничений по спросу, требуемому количеству ездов, времени в пути, срокам доставки, времени прибытия с учётом режимов труда и отдыха способа организации работы водителя для каждого грузополучателя.

Взаимосвязь между плановыми показателями, которые характеризуют технологии выполнения перевозок, транспортные свойства груза, требования грузополучателей выражены через сменную выработку ПС и временные показатели выполнения транспортного процесса.

Разработанная математическая модель предназначена для использования в практике

работы ПС при планировании показателей перевозок замороженных и охлажденных продуктов питания готовых к употреблению по месяцам года.

Дальнейшее исследования будут направлены на определение вероятностных показателей модели.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Селюн В.Е. Современное состояние практики перемещения продуктов питания для обеспечения деятельности в сфере услуг быстрого питания с учетом требований к температурному режиму // *Фундаментальные и прикладные исследования молодых учёных: Сборник матер. VIII Международ. науч.-практ. конф. студентов, аспирантов и молодых учёных, приуроченной к празднованию 300-летия Российской академии наук.* Омск: СибАДИ, 2024. С. 275-279. EDN: SUWSXJ.
2. Лебедева О.А., Гозбенко В.Е. Методология моделирования грузовых перевозок на основе статистических данных товарных групп // *Современные технологии. Системный анализ. Моделирование.* 2021. №4(72). С. 152-160. DOI 10.26731/1813-9108.2021.4(72).152-160. EDN TMCSVC.
3. Омонов Б.Ш., Мурадов А.С., Шомирзаев Э.Х. Оптимизация графиков перевозок скоропортящейся продукции автомобильным транспортом // *Экономика и социум.* 2022. №5-1(96). С. 941-948. DOI 10.46566/2225-1545\_2022\_1\_96\_941. EDN KOOETB.
4. Жлобо Р.А., Шамаров М.В., Степанова Е.Г., Орлов Б.Ю. Моделирование процесса размораживания мороженого для оптимизации его перевозки // *Технологии пищевой и перерабатывающей промышленности АПК – продукты здорового питания.* 2023. №1. С. 183-187. DOI 10.24412/2311-6447-2023-1-183-187. EDN CSJMKM.
5. Бабкина А.В., Пучкова О.С. Оптимизация логистических процессов в торговой сети методами тематического моделирования // *Актуальные проблемы технологии продуктов питания, туризма и торговли: Материалы VI Всероссийской (национальной) научно-практической конференции.* Нальчик: ФГБОУ ВО «Кабардино-Балкарский государственный аграрный университет имени В.М. Кокова». 2023. С. 83-86. EDN PNTNUS.
6. Карцев Г.П. Современные проблемы при организации автотранспортных международных перевозок // *Наука без границ.* 2021. №8(60). С. 10-15. EDN EFRRYQ.
7. Герасименко П.В., Ходаковский В.А. Моделирование и оценивание риска достижения планового среднего расстояния перевозки груза автомобильным транспортом России // *Интеллектуальные технологии на транспорте.* 2023. №3(35). С. 22-27. DOI 10.24412/2413-2527-2023-335-22-27. EDN GAOGGX.
8. Гришкова Д.Ю., Тесленко И.О. Логистические схемы доставки скоропортящихся грузов // *Современные технологии. Системный анализ. Моделирование.* 2022. №2(74). С. 121-129. DOI: 10.26731/1813-9108.2022.2(74).121-129. EDN: UWORDB.
9. Kailaku S.I., Arkeman Ya., Purwanto Y.A., Udin F. Appropriate harvest age of mango (*Mangifera indica* cv. Arumanis) for quality assurance in long distance transportation planning in Indonesia // *Journal of Agriculture and Food Research.* 2023. Vol. 14. P. 100763. DOI 10.1016/j.jafr.2023.100763. EDN JFMYYA.
10. Singh S., Tiwari M.K., Kumar R., Panchal R. Impact of COVID-19 on logistics systems and disruptions in food supply chain // *International Journal of Production Research.* 2020. DOI 10.1080/00207543.2020.1792000. EDN COXBUC.
11. Цыркаева Е.А., Аралбаева Г.Г. Обоснование направлений развития регионального продовольственного рынка на основе моделирования // *Вестник Алтайской академии экономики и права.* 2021. №4-2. С. 283-290. DOI 10.17513/vaael.1679. EDN OVWPZE.
12. Крамаров С.О., Кузьминов А. Н., Рутта Н. А., Сахарова Л. В. Математическая модель оптимизации организационных процессов предприятия с дискретным производством // *Вестник Сургутского государственного университета.* 2024. Т. 12, №4. С. 61–76.
13. Ипатьева И.А. Особенности управления запасами скоропортящегося сырья на производственном предприятии // *Российский журнал менеджмента.* 2021. Т. 19. №4. С. 572-591. DOI 10.21638/spbu18.2021.409. EDN HQSWNZ.
14. De A., Gorton M., Hubbard C., Aditjandra P. Optimization model for sustainable food supply chains: An application to Norwegian salmon // *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review.* 2022. Vol. 161. P. 102723. DOI 10.1016/j.tre.2022.102723. EDN PPCFSY.
15. Лебедева О.А., Кузьминых В.В. Структура улично-дорожной сети в системе грузовых перевозок // *Вестник Ангарского государственного технического университета.* 2021. №15. С. 155-159. EDN CZVJYZ.
16. Чарьев М.Т., Ахунова И.Б. Существующие методы и способы выбора грузового подвижного состава для автомобильного транспорта // *Автомобильные перевозки и транспортная логистика: теория и практика: Сборник научных трудов кафедры «Организация перевозок и управление на транспорте» (с международным участием); Под научной редакцией Е.Е. Витвицкого.* Омск: Сибирский государственный автомобильно-дорожный университет (СибАДИ). 2021. С. 95-101. EDN KTMMDI.
17. Журавлева И.В. Контроль холодильной цепи при перевозке скоропортящихся грузов // *Транспорт: наука, образование, производство («Транспорт-2023»): Сборник статей Международной научно-практической конференции.* Воронеж: филиал ФГБОУ ВО «Ростовский государственный университет путей сообщения». 2023. С. 49-53. EDN QYIFNE.
18. Прибыткова, Д. А. Цифровые технологии для достижения эффективности перевозочного процесса / Д. А. Прибыткова // *Цифровая трансформация транспорта: проблемы и перспективы: материалы Национальной научно-практической конференции, посвященной 125-летию РУТ(МИИТ).* Москва: Российский университет транспорта. 2021. С. 181-189. EDN SKXLQQ.

19. Ying Huang, Abhijeet Ghadge, Nicky M Yates. Implementation of Digital Twins in the Food Supply Chain: A Review and Conceptual Framework // International Journal of Production Research. №62(6). 2023. P. 6400–6426. DOI:10.1080/00207543.2024.2305804.

20. Бекжанова С., Орунбеков М., Сүлейменова Г. Имитационное моделирование железнодорожной линии с координатной системой интервального регулирования // Вестник Казахской академии транспорта и коммуникаций им. М. Тынышпаева. 2023. №3(126). С. 146-156. DOI 10.52167/1609-1817-2023-126-3-146-156. EDN NXBUYP.

21. Alvarez-Palau E.J., Calvet-Liñán L., Viu-Roig M. [et al.] Economic profitability of last-mile food delivery services: Lessons from Barcelona // Research in Transportation Business and Management. 2022. Vol. 45. P. 100659. DOI 10.1016/j.rtbm.2021.100659. EDN VYFDMU.

22. Трофимова Л.С. Математическая модель функционирования автотранспортного предприятия при перевозке грузов в городе // Мир транспорта и технологических машин. 2020. №2(69). С. 69-78. DOI 10.33979/2073-7432-2020-69-2-69-78. EDN CTXAWA.

**Селюн Валерия Евгеньевна**

Сибирский государственный автомобильно-дорожный университет (СибАДИ)

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

Аспирант

E-mail: valeri0397@mail.ru

**Трофимова Людмила Семеновна**

Сибирский государственный автомобильно-дорожный университет (СибАДИ)

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

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

E-mail: trofimova\_ls@mail.ru

V.E. SELYUN, L.S. TROFIMOVA

## MODELING OF ROLLING STOCK OPERATION FOR PLANNING OF TRANSPORTATION OF FROZEN AND CHILLED FOOD PRODUCTS

**Annotation.** *The emphasis of scientific research is on the need to take into account the duration of the technological process of transportation of frozen and chilled food products ready for consumption to consignees while maintaining the properties of the cargo, delivery times. A transport and technological scheme for cargo transportation from the central distribution warehouse to consignees (fast food restaurants) has been developed. The relationship of planned indicators is presented in the limitations of the mathematical model - the time of operations of the technological process of cargo transportation, the production of rolling stock and the number of trips during cargo transportation.*

**Keywords:** *transportation technology, frozen and chilled food products ready for consumption, mathematical modeling, cargo properties, planned indicators*

### BIBLIOGRAPHY

1. Selyun V.E. Sovremennoe sostoyanie praktiki peremeshcheniya produktov pitaniya dlya obespecheniya deyatelnosti v sfere uslug bystrogo pitaniya s uchetom trebovaniy k temperaturnomu rezhimu // Fundamentalnye i prikladnye issledovaniya molodykh uchionykh: Sbornik mater. VIII Mezhdunarod. nauch.-prakt. konf. studentov, aspirantov i molodykh uchionykh, priurochennoy k prazdnovaniyu 300-letiya Rossiyskoy akademii nauk. Omsk: SibADI, 2024. S. 275-279. EDN: SUWSXJ.

2. Lebedeva O.A., Gozbenko V.E. Metodologiya modelirovaniya gruzovykh perevozok na osnove statisticheskikh dannykh tovarnykh grupp // Sovremennyye tekhnologii. Sistemnyy analiz. Modelirovanie. 2021. №4(72). S. 152-160. DOI 10.26731/1813-9108.2021.4(72).152-160. EDN TMCSVC.

3. Omonov B.SH., Muradov A.S., Shomirzaev E.H. Optimizatsiya grafikov perevozok skoroportyashcheysya produktsii avtomobil'nym transportom // Ekonomika i sotsium. 2022. №5-1(96). S. 941-948. DOI 10.46566/2225-1545\_2022\_1\_96\_941. EDN KOOETB.

4. Zhlobo R.A., Shamarov M.V., Stepanova E.G., Orlov B.YU. Modelirovanie protsessa razmorazhivaniya morozhenogo dlya optimizatsii ego perevozki // Tekhnologii pishchevoy i pererabatyvayushchey promyshlennosti APK - produkty zdorovogo pitaniya. 2023. №1. S. 183-187. DOI 10.24412/2311-6447-2023-1-183-187. EDN CSJMKM.

5. Babkina A.V., Puchkova O.S. Optimizatsiya logisticheskikh protsessov v trgovoy seti metodami matematicheskogo modelirovaniya // Aktualnye problemy tekhnologii produktov pitaniya, turizma i trgovli: Materialy VI Vserossiyskoy (natsional'noy) nauchno-prakticheskoy konferentsii. Na chik: FGBOU VO "Kabardino-Balkarskiy gosudarstvennyy agrarnyy universitet imeni V.M. Kokova". 2023. S. 83-86. EDN PNTNUC.

6. Kartsev G.P. Sovremennyye problemy pri organizatsii avtotransportnykh mezhdunarodnykh perevozok // Nauka bez granits. 2021. №8(60). S. 10-15. EDN EFRRYQ.

7. Gerasimenko P.V., Hodakovskiy V.A. Modelirovanie i otsenivanie riska dostizheniya planovogo srednego

- rasstoyaniya perevozki gruzav avtomobil'nym transportom Rossii // *Intellektual'nye tekhnologii na transporte*. 2023. №3(35). S. 22-27. DOI 10.24412/2413-2527-2023-335-22-27. EDN GAOGGX.
8. Grishkova D.YU., Teslenko I.O. Logisticheskie skhemy dostavki skoroportyashchikhsya gruzov // *Sovremennye tekhnologii. Sistemy analiz. Modelirovanie*. 2022. №2(74). S. 121-129. DOI: 10.26731/1813-9108.2022.2(74).121-129. EDN: UWORDB.
9. Kailaku S.I., Arkeman Ya., Purwanto Y.A., Udin F. Appropriate harvest age of mango (*Mangifera indica* cv. Arumanis) for quality assurance in long distance transportation planning in Indonesia // *Journal of Agriculture and Food Research*. 2023. Vol. 14. P. 100763. DOI 10.1016/j.jafr.2023.100763. EDN JFMYEA.
10. Singh S., Tiwari M.K., Kumar R., Panchal R. Impact of COVID-19 on logistics systems and disruptions in food supply chain // *International Journal of Production Research*. 2020. DOI 10.1080/00207543.2020.1792000. EDN COXBUC.
11. Tsirkaeva E.A., Aralbaeva G.G. Obosnovanie napravleniy razvitiya regional'nogo prodovol'stvennogo rynka na osnove modelirovaniya // *Vestnik Altayskoy akademii ekonomiki i prava*. 2021. №4-2. S. 283-290. DOI 10.17513/vaael.1679. EDN OVWPZE.
12. Kramarov S.O., Kuz'minov A. N., Rutta N. A., Sakharova L. V. Matematicheskaya model' optimizatsii organizatsionnykh protsessov predpriyatiya s diskretnym proizvodstvom // *Vestnik Surgutskogo gosudarstvennogo universiteta*. 2024. T. 12, №4. S. 61-76.
13. Ipat'eva I.A. Osobennosti upravleniya zapasami skoroportyashchegosya syr'ya na proizvodstvennom predpriyatii // *Rossiyskiy zhurnal menedzhmenta*. 2021. T. 19. №4. S. 572-591. DOI 10.21638/spbu18.2021.409. EDN HQSWNZ.
14. De A., Gorton M., Hubbard C., Aditjandra P. Optimization model for sustainable food supply chains: An application to Norwegian salmon // *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*. 2022. Vol. 161. P. 102723. DOI 10.1016/j.tre.2022.102723. EDN PPCFSY.
15. Lebedeva O.A., Kuz'minykh V.V. Struktura ulichno-dorozhnoy seti v sisteme gruzovykh perevozok // *Vestnik Angarskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta*. 2021. №15. S. 155-159. EDN CZVJYZ.
16. Charyev M.T., Akhunova I.B. Sushchestvuyushchie metody i sposoby vybora gruzovogo podvzhnogo sosta-va dlya avtomobil'nogo transporta // *Avtomobil'nye perevozki i transportnaya logistika: teoriya i praktika: Sbornik nauchnykh trudov kafedry "Organizatsiya perevozok i upravlenie na transporte" (s mezhdunarodnym uchastiem); Pod nauchnoy redaktsiei E.E. Vitvitskogo*. Omsk: Sibirskiy gosudarstvennyy avtomobil'no-dorozhnyy universitet (SibADI). 2021. S. 95-101. EDN KTMMDI.
17. Zhuravleva I.V. Kontrol' kholodil'noy tsepi pri perevozke skoroportyashchikhsya gruzov // *Transport: nauka, obrazovanie, proizvodstvo ("Transport-2023")*: Sbornik statey Mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii. Voronezh: filial FGBOU VO "Rostovskiy gosudarstvennyy universitet putey soobshcheniya". 2023. S. 49-53. EDN QYIFNE.
18. Pribytkova, D. A. Tsifrovye tekhnologii dlya dostizheniya effektivnosti perevozchnogo protsessa / D. A. Pribytkova // *Tsifrovaya transformatsiya transporta: problemy i perspektivy: materialy Natsional'noy nauchno-prakticheskoy konferentsii, posvyashchennoy 125-letiyu RUT(MIIT)*. Moskva: Rossiyskiy universitet transporta. 2021. S. 181-189. EDN SKXLQQ.
19. Ying Huang, Abhijeet Ghadge, Nicky M Yates. Implementation of Digital Twins in the Food Supply Chain: A Review and Conceptual Framework // *International Journal of Production Research*. №62(6). 2023. R. 6400-6426. DOI:10.1080/00207543.2024.2305804.
20. Bekzhanova S., Orunbekov M., Sleymenova G. Imitatsionnoe modelirovanie zheleznodorozhnoy linii s koordinatnoy sistemoy interval'nogo regulirovaniya // *Vestnik Kazakhskoy akademii transporta i kommunikatsiy im. M. Tynyshpaeva*. 2023. №3(126). S. 146-156. DOI 10.52167/1609-1817-2023-126-3-146-156. EDN NXBUYYP.
21. Alvarez-Palau E.J., Calvet-Lin L., Viu-Roig M. [et al.] Economic profitability of lastmile food delivery services: Lessons from Barcelona // *Research in Transportation Business and Management*. 2022. Vol. 45. P. 100659. DOI 10.1016/j.rtbm.2021.100659. EDN VYFDMU.
22. Trofimova L.S. Matematicheskaya model' funktsionirovaniya avtotransportnogo predpriyatiya pri perevozke gruzov v gorode // *Mir transporta i tekhnologicheskikh mashin*. 2020. №2(69). S. 69-78. DOI 10.33979/2073-7432-2020-69-2-69-78. EDN CTXAWA.

**Valeriya Evgenievna Selyun**  
Siberian State Automobile and Highway University  
Adress: 644080, Russia, Omsk, Mira Ave., 5  
Postgraduate  
E-mail: valeri0397@mail.ru

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

УДК 656.13

doi: 10.33979/2073-7432-2025-3-2(90)-94-99

Е.В. ПАРСАЕВ

## ОБЗОР МЕТОДОВ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ШУМА ОТ ТРАНСПОРТНЫХ ПОТОКОВ ДЛЯ ОЦЕНКИ ОРГАНИЗАЦИИ ДВИЖЕНИЯ

**Аннотация.** В статье раскрыты основные шумовые характеристики транспортных потоков. Представлены основные методики расчета эквивалентного уровня шума, создаваемого транспортным потоком. Проведен анализ расчетных методов определения шума от транспортных потоков на предмет применения в оценке мероприятий по организации дорожного движения. Выявлены достоинства и недостатки действующих методов.

**Ключевые слова:** городская магистраль, организация дорожного движения, транспортный поток, эквивалентный уровень шума

### Введение

Автомобильный транспорт наряду со своими положительными свойствами в процессе эксплуатации оказывает негативное воздействие на окружающую среду, которое проявляется в виде: потребления природных ресурсов (атмосферный воздух, вода, нефтепродукты, природный газ); загрязнения атмосферы, водных объектов, почвы загрязняющими веществами отработавших газов, продуктами износа шин, тормозных механизмов; выделения тепла; шумового загрязнения и вибраций; электромагнитного излучения.

В городской среде наиболее вредное воздействие от автотранспорта на человека проявляется в виде загрязнения атмосферного воздуха и шумового загрязнения [1, 2]. Доля транспорта в шумовом воздействии на население составляет 85-95% в зависимости от типа территории. Около 35 млн. городского населения России проживает в условиях акустического дискомфорта, обусловленного шумовым воздействием транспорта [1].

Проблема шумового загрязнения окружающей среды транспортными потоками приобретает все большую актуальность, так как сохраняется тенденция ежегодного прироста автомобильного транспорта на дорогах нашей страны и в городах в частности. По данным Федеральной службы государственной статистики за последние четверть века в Российской Федерации количество механических транспортных средств (без учета мототранспорта) увеличилось более чем в два раза, и к концу 2023 года составляло примерно 60 млн. единиц (рис. 1) [3].

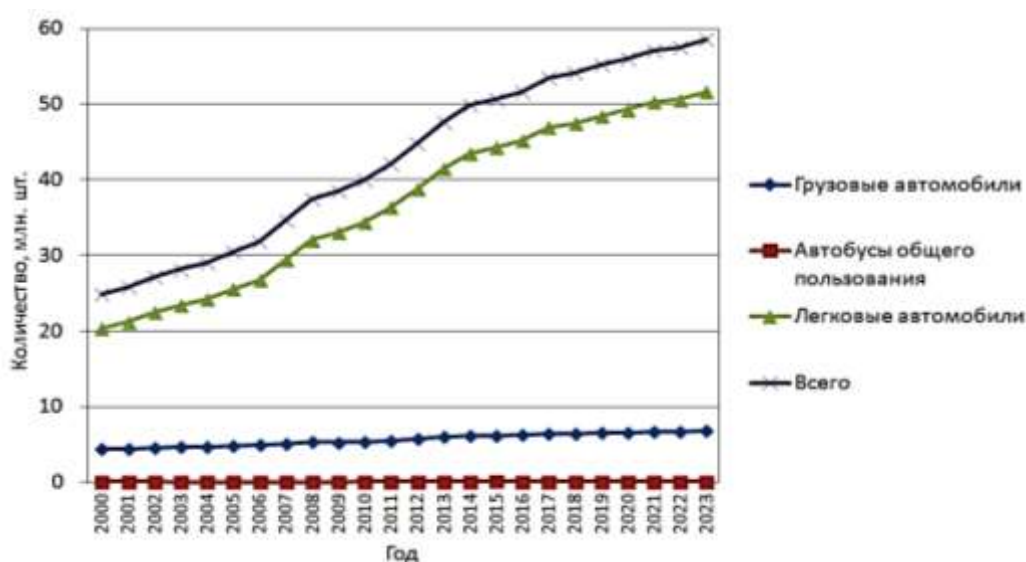


Рисунок 1 – Количество транспортных средств в Российской Федерации



Поэтому исследование процесса возникновения и распространения транспортного шума на городских магистралях является актуальным для территорий городских агломераций и населенных пунктов с интенсивными транспортными потоками и плотной жилой застройкой. Отдельная роль отводится влиянию средств и методов организации дорожного движения на уровень шумового загрязнения городских магистралей. В процессе исследования влияния организации дорожного движения (ОДД) на уровень транспортного шума должны решаться задачи, направленные на:

- проведение объективной оценки состояния шумового загрязнения городских магистралей;
- выявления проблемных территорий, где население подвержено повышенному шумовому воздействию от транспортных потоков;
- определение роли и степени влияния организации дорожного движения на уровень транспортного шума;
- формирование предложений и рекомендаций по снижению уровня транспортного шума на городских магистралях, в первую очередь на территориях где население подвержено повышенному шумовому воздействию.

### Материал и методы

Исследованиями проблемы шумового загрязнения транспортными потоками занимались ученые и специалисты в таких областях науки и сферах деятельности, как: медицина, физика, архитектурно-строительная экология, эксплуатация автомобильного транспорта, теории транспортных потоков, организации дорожного движения.

На практике шум транспортного потока определяют разными методами, наиболее известные из них представлены в таблице 1.

Таблица 1 – Методы определения шума от транспортных потоков

Автор (источник)	Метод (определяемые показатели)	Исходные данные для расчета (параметры транспортного потока и др.)
<b>Расчетные методы</b>		
Научно-исследовательский и проектный институт по разработке генеральных планов и проектов застройки городов ЛенНИИПградо-строительства [4]	Номограмма для определения шумовой характеристики транспортного потока (эквивалентный уровень шума, $L_{\text{экв}}$ , дБА)	Интенсивность движения в двух направлениях, авт./ч; средневзвешенная скорость потока, км/ч; процент грузового и общественного транспорта в потоке, %
	Статистическая модель расчета эквивалентного уровня шума, $L_{\text{экв}}$ , дБА	Интенсивность, авт./ч; средняя скорость потока, км/ч; процент грузового и общественного транспорта в потоке, %
Московский автомобильно-дорожный государственный технический университет (МАДИ). П.И. Поспелов, В.И. Пуркин, Б.А. Щит (ОДМ 218.2.013-2011) [5]	Расчетное значение эквивалентного уровня звука при движении транспортного потока (шумовая характеристика транспортного потока), $L_{\text{шхтп}}$ , дБА	Расчетная интенсивность движения, авт./ч; доля грузовых автомобилей и автобусов в составе потока, %; средняя скорость движения, км/ч; продольный уклон дороги, %; тип дорожного покрытия; ширина центральной разделительной полосы, м; тип застройки; наличие регулируемого пересечения
Московский автомобильно-дорожный государственный технический университет (МАДИ). В.Н. Луканин, Ю.В. Трофименко [6]	Расчетное значение эквивалентного уровня звука от транспортного потока $L_{\text{экв,р}}$ , дБА	Интенсивность, авт./ч; средняя скорость потока, км/ч; доля грузовых автомобилей и автобусов в потоке, %
Орнатский Н.П. [7]	Эмпирическая зависимость, описывающая шум транспортного потока при интенсивности движения от 10 до 3000 авт./ч (доля грузовых 60%), дБА	Интенсивность, авт./ч; процент грузового и общественного транспорта в потоке, %



Продолжение таблицы 1

Карагодина И.Л. [8]	Таблица с заданными эквивалентными уровнями звука в зависимости от интенсивности движения с поправками	Интенсивность движения, авт./ч; состав транспортного потока; средневзвешенная скорость движения транспортных средств; продольный уклон улицы или дороги; наличие разделительной полосы; типы пересечений улиц и дорог; тип покрытия проезжей части; характер застройки улиц
А.В. Васильев, Д.П. Шевченко Тольяттинский государственный университет [9]	Ориентировочная оценка шума транспортного потока (дБА) в зависимости от интенсивности движения (авт./ч) для больших интенсивностей 1000-5000 авт./ч	Интенсивность движения, авт./ч
Куприянов В.Н. Казанский государственный архитектурно-строительный университет [10]	Эквивалентный уровень звука в расчетной точке $L_{Аэкв}$ , дБА	Интенсивность движения, авт./ч; соотношение числа грузовых автомобилей и автобусов к общему количеству транспортных единиц в потоке, %; средняя скорость транспортного потока; продольный уклон проезжей части; тип покрытия проезжей части; количество полос движения
НИИСФ РААСН (И.Л. Шубин, В.А. Аистов и др.), МАДИ (П.И. Поспелов, Б.А. Щит), БГТУ «ВОЕНМЕХ» (А.Е. Шашурин, Д.А. Куклин и др.), ТГАСУ (С.Н. Овсянников) (СП 276.1325800.2016) [11]	Шумовая характеристика автомобильного транспортного потока $L_{Аэкв}^{шт}$ , дБ, определяемая на этапе разработки генплана города и документов территориального планирования	Категория дорог и улиц; число полос движения
	Шумовая характеристика автомобильного транспортного потока $L_{Аэкв}^{шт}$ , дБ, в условиях определенных параметров движения и неизвестных характеристиках дороги	Прогнозируемая интенсивность движения, авт./ч; прогнозируемая средняя скорость движения транспортного потока, км/ч; прогнозируемая доля грузовых автомобилей и общественного транспорта в потоке, %
	Шумовая характеристика автомобильного транспортного потока $L_{Аэкв}^{шт}$ , дБ, на стадии проекта детальной планировки района (микрорайона)	Расчетная интенсивность движения в час пик, авт./ч; доля грузовых автомобилей и автобусов в потоке, %; средняя скорость движения в потоке, км/ч; продольный уклон дороги; тип дорожного покрытия; ширина центральной разделительной полосы; наличие пересечения улиц со светофорным регулированием
	Расчетное значение шумовой характеристики транспортного потока в виде максимального уровня звука $L_{Аэкв}^{шт}$ , дБ	Состав потока; скорость движения, км/ч
Экспериментальный метод		
ГОСТ 20444-2014 Шум. Транспортные потоки. Методы определения шумовой характеристики [12]	Измерение эквивалентного $L_{Аэкв}$ и максимального уровня звука $L_{Амакс}$ с одновременным определением интенсивности, состава и скорости движения	-

### Теория

Обзор расчетных методов определения уровня шума от транспортных потоков пока-

зал, что наибольший интерес, с точки зрения влияния организации движения, заслуживают методики [4, 5, 11]. Данные методики кроме основных параметров транспортного потока (интенсивность движения, средняя скорость, состав потока) в расчетах учитывают: уклон дороги, тип покрытия проезжей части, ширину центральной разделительной полосы, наличие пересечения со светофорным регулированием. Чтобы произвести оценку влияния организации дорожного движения на уровень шумового загрязнения городских магистралей необходимо учитывать все возможные условия эксплуатации подвижного состава: природно-климатические по периодам года, дорожные условия в сочетании с организацией дорожного движения, транспортные условия. Для проведения такой оценки предложены участки магистральных улиц общегородского значения 2-го, 3-го класса и магистральных улиц районного значения на улично-дорожной сети (УДС) города Омска как с односторонним движением, так и с двусторонним. Блок-схема условий эксплуатации подвижного состава при определении уровня транспортного шума на городских магистралях представлена на рисунке 2.

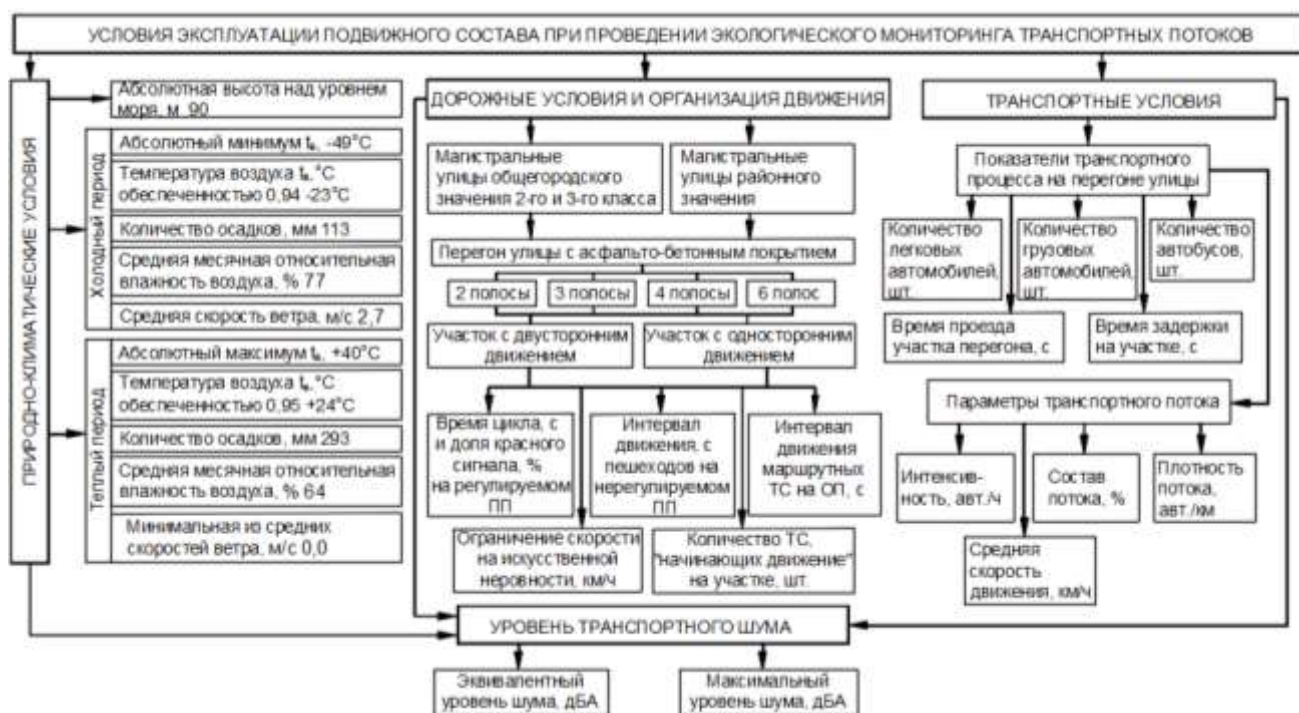


Рисунок 2 – Условия эксплуатации подвижного состава

## Результаты

Проведен анализ методов определения шума от транспортных потоков. Наиболее подходящими методиками для оценки влияния организации дорожного движения на шумовое загрязнение можно считать [4, 5, 11]. Однако более ранние методики, очевидно, рассчитаны главным образом на подвижной состав, преобладающий в тот период времени. В настоящее время автомобильный транспорт: легковой, грузовой и автобусы становятся менее шумными. Этот фактор подтверждается в том числе изменениями (от 29 января 2024 г.) в значениях шумовых характеристик автомобильного транспортного потока, определяемых на этапе разработки генерального плана города и документов территориального планирования [11]. Кроме того, в реальных условиях на городских магистралях присутствуют участки, где транспортный поток осуществляет движение неравномерно (торможение, остановка, разгон), что влечет за собой увеличение уровня шума от автотранспорта. При этом данная неравномерность движения во многом обусловлена существующей ОДД на отдельных элементах УДС [13].

### Обсуждение

С учетом выше сказанного наиболее приемлемым методом для оценки влияния организации движения на уровень шумового загрязнения можно назвать методику СП 276.1325800.2016 [11].

Однако анализ действующих расчетных методик выявил следующее:

- в расчетах эквивалентного и максимального уровней шума не учтена сезонность года, особенно для регионов с преобладающим снежным покровом в зимний период, что обуславливает применение зимних, как правило, ошипованных шин;
- в данных укрупненных расчетов [11] приведены только для классификации улиц крупнейших, крупных и больших городов, отсутствуют значения для средних городов (население от 50 до 100 тыс. чел.) и малых городов (население до 50 тыс. чел. включительно);
- не указано как производить расчеты, если параметры транспортных потоков (интенсивность и скорость) прямого и обратного направлений значительно отличаются между собой (особенно на многополосных дорогах);
- при расчете эквивалентного уровня шума не учитывается коррекция, связанная с многополосными дорогами (не учитывается число полос движения);
- в методике ограничено влияние средств и методов организации движения в расчетах эквивалентного уровня шума (не учтено влияние наличия пешеходных переходов, искусственных неровностей, остановок общественного транспорта);
- при расчете эквивалентного уровня шума не учитывается коррекция, учитывающая влияние светофорного цикла, поэтому формула справедлива лишь для «простых» подходов к перекрестку (без дополнительных секций) и не учитывает специализацию полос по направлениям движения в разные фазы светофорного регулирования, что характерно для многополосных дорог с высокоинтенсивным движением крупных городов [14].

### Выводы

Таким образом, для оценки влияния мероприятий по организации дорожного движения на уровень шумового загрязнения городских магистралей; проведению расчетов прогнозных значений негативного воздействия транспортных средств на окружающую среду и здоровье населения при разработке проектов организации дорожного движения [15] необходима методика позволяющая учитывать максимальный набор средств и методов связанных с организацией дорожного движения.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Павлова Е.И., Новиков В.К. Экология транспорта: учебник и практикум для вузов. 7-е изд., перераб. и доп. Москва: Юрайт, 2024. 416 с.
2. Луканин В.Н., Трофименко Ю.В. Промышленно-транспортная экология: Учеб. для вузов / под ред. В.Н. Луканина. М.: Высш. шк., 2001. 273 с.
3. Транспортные средства и происшествия с подвижным составом [Электронный ресурс]. URL: <http://www.rosstat.gov.ru>.
4. Методические рекомендации по учету шумового загрязнения в составе территориальных комплексных схем охраны среды городов. Ленинград, 1989.
5. ОДМ 218.2.013-2011. Методические рекомендации по защите от транспортного шума территорий, прилегающих к автомобильным дорогам. 2011.
6. Луканин В.Н., Трофименко Ю.В. Снижение экологических нагрузок на окружающую среду при работе автомобильного транспорта // Итоги науки и техники. ВИНТИ, Автомобильный транспорт. 1996. Т.19.
7. Орнатский Н.П. Автомобильные дороги и охрана природы. М.: Транспорт, 1982. 176 с.
8. Карагодина И.Л. Борьба с шумом и вибрацией в городах. М.: Медицина, 1979. 158 с.
9. Васильев А.В., Шевченко Д.И. Моделирование, расчет и мониторинг шума транспортных потоков // Механика и машиностроение, 2004.
10. Куприянов В.Н. Проектирование защиты от шума: Учебное пособие. Казань: КГАСУ, 2010. 112 с.
11. СП 276.1325800.2016. Здания и территории. Правила проектирования защиты от шума транспортных потоков.
12. ГОСТ 20444-2014. Шум. Транспортные потоки. Методы определения шумовой характеристики.

13. Парсаев Е.В., Малюгин П.Н., Тетерина И.А. Методика расчета выбросов загрязняющих веществ для нестационарных транспортных потоков // Вестник Сибирского государственного автомобильно-дорожного университета. 2018. Т. 15. №5(63) С. 686-697.

14. Петров В.В., Парсаев Е.В. Технические средства организации дорожного движения. Омск: СибАДИ, 2021. 220 с.

15. Об установлении требований к составу и содержанию документации по организации дорожного движения: Приказ Министерства транспорта РФ от 18 февраля 2025 г. №49.

**Парсаев Евгений Вячеславович**

Сибирский государственный автомобильно-дорожный университет (СибАДИ)

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

Научный сотрудник

E-mail: ogenru@yandex.ru

---

E.V. PARSAEV

## **AN OVERVIEW OF METHODS FOR DETERMINING NOISE FROM TRAFFIC FLOWS TO ASSESS TRAFFIC MANAGEMENT**

***Abstract.** The article reveals the main noise characteristics of traffic flows. The main methods for calculating the equivalent noise level generated by traffic flow are presented. The analysis of computational methods for determining noise from traffic flows for use in assessing traffic management measures has been carried out. The advantages and disadvantages of the current methods are revealed.*

***Keywords:** urban highway, traffic management, traffic flow, equivalent noise level*

## **BIBLIOGRAPHY**

1. Pavlova E.I., Novikov V.K. Ekologiya transporta: uchebnik i praktikum dlya vuzov. 7-e izd., pererab. i dop. Moskva: YUrayt, 2024. 416 s.

2. Lukanin V.N., Trofimenko YU.V. Promyshlenno-transportnaya ekologiya: Ucheb. dlya vuzov / pod red. V.N. Lukanina. M.: Vyssh. shk., 2001. 273 s.

3. Transportnye sredstva i proisshestviya s podvizhnym sostavom [Elektronnyy resurs]. URL: <http://www.rosstat.gov.ru>.

4. Metodicheskie rekomendatsii po uchetu shumovogo zagryazneniya v sostave territorial'nykh kompleksnykh skhem okhrany sredy gorodov. Leningrad, 1989.

5. ODM 218.2.013-2011. Metodicheskie rekomendatsii po zashchite ot transportnogo shuma territoriy, prilegayushchikh k avtomobil'nyim dorogam. 2011.

6. Lukanin V.N., Trofimenko YU.V. Snizhenie ekologicheskikh nagruzok na okruzhayushchuyu sredu pri rabote avtomobil'nogo transporta // Itogi nauki i tekhniki. VINITI, Avtomobil'nyy transport. 1996. T.19.

7. Ornatskiy N.P. Avtomobil'nye dorogi i okhrana prirody. M.: Transport, 1982. 176 s.

8. Karagodina I.L. Bor'ba s shumom i vibratsiyey v gorodakh. M.: Meditsina, 1979. 158 s.

9. Vasil'ev A.V., Shevchenko D.I. Modelirovanie, raschet i monitoring shuma transportnykh potokov // Mekhanika i mashinostroenie, 2004.

10. Kupriyanov V.N. Proektirovanie zashchity ot shuma: Uchebnoe posobie. Kazan': KGASU, 2010. 112 s.

11. SP 276.1325800.2016. Zdaniya i territorii. Pravila proektirovaniya zashchity ot shuma transportnykh potokov.

12. GOST 20444-2014. Shum. Transportnye potoki. Metody opredeleniya shumovoy kharakteristiki.

13. Parsaev E.V., Malyugin P.N., Teterina I.A. Metodika rascheta vybrosov zagryaznyayushchikh veshchestv dlya nestatsionarnykh transportnykh potokov // Vestnik Sibirskogo gosudarstvennogo avtomobil'no-dorozhnogo universiteta. 2018. T. 15. №5(63) S. 686-697.

14. Petrov V.V., Parsaev E.V. Tekhnicheskie sredstva organizatsii dorozhnogo dvizheniya. Омск: SibADI, 2021. 220 с.

15. Об установлении требований к составу и содержанию документации по организации дорожного движения: Приказ Министерства транспорта РФ от 18 февраля 2025 г. №49.

**Parsaev Evgeniy Vyacheslavovich**

Siberian State Automobile and Highway University (SibADI)

Address: 644080, Russia, Омск, Mira str., 5

Researcher

E-mail: ogenru@yandex.ru

---

И.А. НОВИКОВ, Д.А. ЛАЗАРЕВ, Д.П. СТРЕКАЛОВ

## ПРИМЕНЕНИЕ ЦИФРОВЫХ ТЕХНОЛОГИЙ ПРИ РАССЛЕДОВАНИИ ДОРОЖНО-ТРАНСПОРТНЫХ ПРОИСШЕСТВИЙ

**Аннотация.** Расследование и экспертиза дорожно-транспортных происшествий (ДТП) сложный, трудоемкий и наукоемкий процесс, требующий значительных познаний в теоретической механике, физике, теории автомобиля и трасологии (науке о следах). Процесс некоторых расчетов очень сложен и трудоемок настолько, что существует большая вероятность ошибки или погрешности при поэтапном их выполнении без специальных инструментов. Кроме того, зачастую следовая информация на месте ДТП сохраняется недолго и ее воспроизведение возможно только с использованием качественных фотоснимков и прикладных инструментов. Очень часто у экспертов отсутствует возможность упрощения расчетов и воспроизведения следовой обстановки на месте ДТП с помощью машинных возможностей вследствие отсутствия достаточно надежных цифровых инструментов. В данной статье приводится ряд прикладных инструментов и программного обеспечения как адаптированного под задачи расследования дорожно-транспортных происшествий, так и разработанных специально под конкретные прикладные задачи.

**Ключевые слова:** Дорожно-транспортное происшествие, транспортное средство, расследование, экспертиза, программное обеспечение, цифровой двойник, компьютерные технологии

### Введение

Дорожно-транспортное происшествие – это явление, которое согласно Правилам дорожного движения РФ, имеет ряд условий идентификации, таких как условие возникновения данного явления на дороге и условие причинения ущерба его участникам, как материального, так и физического. Однако, следует отметить, что в общепринятом определении отсутствует еще и тот факт, что данное явление, как и любое другое, сопровождается определенными физическими процессами, которые в свою очередь оставляют свой след [1]. Именно данное обстоятельство позволяет следственным органам и экспертным организациям определять причинность возникновения ДТП, как явления. Но нужно заметить, что достаточно часто, как и в любом физическом явлении, определение его характеристик требует от исследователя дополнительных умственных усилий и навыков, а иногда и помощи специального инструмента или оборудования [2]. В современных реалиях проведения дорожно-транспортных экспертиз на настоящий момент сложилась, однако, парадоксальная ситуация. С ростом технических, научных и цифровых возможностей экспертное оснащение и используемый научно-технический аппаратный массив практически не изменился с течением времени. Особенно остро вопрос стоит в нынешних условиях, когда ряд разработчиков профильного экспертного программного обеспечения покинули наш рынок, а достаточно качественных альтернатив им как у нас, так и в дружественных странах-импортерах не наблюдается. В этой связи очень остро стоит вопрос разработки своих аналоговых инструментов и адаптации отечественных прикладных продуктов для задач дорожно-транспортных экспертиз [3].

### Материал и методы

Как было указано выше, адаптация качественных отечественных продуктов под нужды экспертов дорожно-транспортной отрасли сейчас является одним из инструментов решения стоящих перед ними задач. Так, например, российская разработка программный продукт Agisoft Metashape, созданный для построения ортофотопланов и геодезических карт в 3D-формате имеет очень простой (в использовании) алгоритм, позволяющий создавать объемные и достаточно точные цифровые копии объектов с использованием правильно заготов-



ленного массива фотоснимков. Такой инструмент будет полезен при первичном осмотре места происшествия для построения гомеостазисной модели участка местности, на котором совершено ДТП с отображением следовой информации в конфигурации и пропорциях, очень близких к оригинальным. Также данная программа позволяет создавать цифровые 3D-модели транспортных средств (ТС), фиксируя все повреждения также с высокой степенью точности [4]. Пример работы программы показан на рисунке 1, где представлен ортофото-план кампуса Белгородского государственного технологического университета им. В.Г. Шухова, созданный с использованием беспилотного летательного аппарата (БПЛА). Там же представлен интерфейс программы.

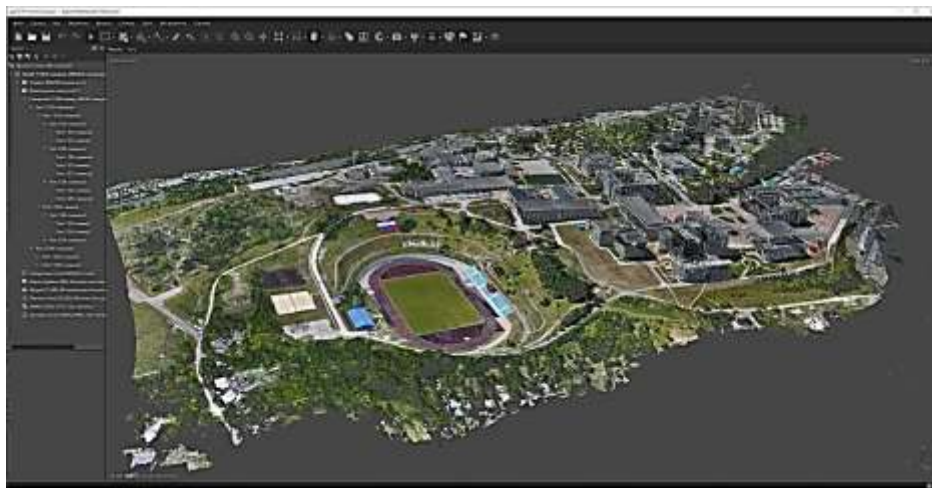


Рисунок 1 – Пример использования программы Agisoft Metashape

Пример адаптации данного программного продукта для исследования дорожно-транспортного происшествия приведем далее в разделе «Результаты и обсуждения».

Для разработки программ по определению фотограмметрических характеристик следовой информации (определения расстояний привязок следов к устойчивым объектам, их размерных параметров, а также локализованных расположений) был использован комплекс программных продуктов, основанных на обработке изображений инструментарием алгоритма Ultralytics YOLO и библиотеки OpenCV интегрированных с веб-инструментом LabelMe [5-11].

Для создания расчетных алгоритмов базовых задач, используемых в методических рекомендациях по экспертизе ДТП, была использована специализированная среда разработки RAD Studio 11, предназначенной для создания многоплатформенных высокопроизводительных нативных приложений на языках Delphi и современных вариантах C++ [12-13].

### Теория

Классические расчетные формулы, применяемые в дорожно-транспортных экспертизах и рекомендованные методическими рекомендациями, зачастую имеют громоздкий вид и считаются путем сложных математических вычислений в несколько этапов. Так, например, вычисление скорости движения транспортного средства перед началом эффективного торможения, в случае наличия оттормаживания или прерывания в следах, при определенном условии может решаться через кубическое уравнение, где в качестве неизвестной переменной выступает степень растормаживания: [14]

$$\lambda^3 (2 \cdot t_s^2 + 3 \cdot t_s \cdot t_3 + t_3^2) - 3 \cdot \lambda^2 \cdot (t_s + t_3)^2 - 6 \cdot \lambda \cdot (t_s + t_3) \cdot \sqrt{\frac{2 \cdot S_{\text{м}2}}{j_a} + \frac{6 \cdot S_p}{j_a}} = 0, \quad (1)$$

где  $t_s$  – время оттормаживания, сек;

$t_3$  – время нарастания замедления, сек;

$\lambda$  – степень растормаживания;

$S_{\text{м}2}$  – длина следов торможения колес ТС на втором участке, м;

$S_p$  – величина разрыва в следах торможения, м;

$j_a$  – установившееся замедление ТС, м/сек<sup>2</sup>.

В общем виде кубическое уравнение выглядит следующим образом:

$$ax^3 + bx^2 + cx + d = 0,$$

где  $a \neq 0$ .

А его решение заключается в следующих неравенствах:

$$x = y - \frac{b}{3 \cdot a} \quad y^3 + p \cdot y + q = 0$$

где

$$p = -\frac{b^2}{3a^2} + \frac{c}{a} \quad q = \frac{2 \cdot b^3}{27 \cdot a^3} - \frac{b \cdot c}{3 \cdot a^2} + \frac{d}{a}$$

Корень кубического уравнения, удовлетворяющий условию  $0 < \lambda \leq 1$ , подставляют в формулу расчета скорости движения ТС перед торможением:

$$V_a = 1,8 \cdot j_a \cdot t_3 + \sqrt{26 \cdot j_a \cdot S_{ю1} + \left[ \sqrt{26 \cdot S_{ю2} \cdot j_a} + 3,6 \cdot \lambda \cdot (t_5 + t_3) \cdot j \cdot (1 - 0,5 \cdot \lambda) \right]^2}, \quad (2)$$

где  $S_{ю1}$  – длина следов торможения колес ТС на первом участке, м.

Очевидно, что многоэтапный расчет через сложные системы уравнений и многочленные формулы способствует к высокой вероятности ошибки вычислений.

Другим примером сложного расчета может быть определение скорости перемещения транспортного средства до момента начала его торможения с последовательным (по фазам) преодолением участков, имеющих различные коэффициенты сцепления шин с опорной поверхностью. В данном случае, имеет четыре различных условия и соответствующие им сложные формулы расчета (табл. 1).

Таблица 1 - Пример расчета в классической методике.

**Пример сложного расчета скорости перемещения транспортного средства до ДТП**

Если А:  $\operatorname{tg} \lambda > \frac{B}{L}$

$$V_a = 1,8 \cdot j_1 \cdot t_3 + \sqrt{26 \cdot \left( S_{\text{нр1}} \cdot j_1 + \frac{B}{\operatorname{tg} \lambda} \cdot \frac{2 \cdot a \cdot \varphi_1 + b \cdot (\varphi_1 + \varphi_2)}{2 \cdot L + h_{\text{нр}} \cdot (\varphi_1 - \varphi_2)} \cdot g + \left( L - \frac{B}{\operatorname{tg} \lambda} \right) \cdot \frac{a \cdot \varphi_1 + b \cdot \varphi_2}{L + h_{\text{нр}} \cdot (\varphi_1 - \varphi_2)} \cdot g + \frac{B}{\operatorname{tg} \lambda} \cdot \frac{2 \cdot b \cdot \varphi_2 + a \cdot (\varphi_1 + \varphi_2)}{2 \cdot L + h_{\text{нр}} \cdot (\varphi_1 - \varphi_2)} \cdot g + S_{\text{нр2}} \cdot j_2 \right)}$$

Если Б:  $\operatorname{tg} \lambda = \frac{B}{L}$

$$V_a = 1,8 \cdot j_1 \cdot t_3 + \sqrt{26 \cdot \left( S_{\text{нр1}} \cdot j_1 + L \cdot \frac{2 \cdot a \cdot \varphi_1 + b \cdot (\varphi_1 + \varphi_2)}{2 \cdot L + h_{\text{нр}} \cdot (\varphi_1 - \varphi_2)} \cdot g + L \cdot \frac{2 \cdot b \cdot \varphi_2 + a \cdot (\varphi_1 + \varphi_2)}{2 \cdot L + h_{\text{нр}} \cdot (\varphi_1 - \varphi_2)} \cdot g + S_{\text{нр2}} \cdot j_2 \right)}$$

Если В:  $\operatorname{tg} \lambda < \frac{B}{L}$

$$V_a = 1,8 \cdot j_1 \cdot t_3 + \sqrt{26 \cdot \left( S_{\text{нр1}} \cdot j_1 + L \cdot \frac{2 \cdot a \cdot \varphi_1 + b \cdot (\varphi_1 + \varphi_2)}{2 \cdot L + h_{\text{нр}} \cdot (\varphi_1 - \varphi_2)} \cdot g + \left( \frac{B}{\operatorname{tg} \lambda} - L \right) \cdot \frac{\varphi_1 + \varphi_2}{2} \cdot g + L \cdot \frac{2 \cdot b \cdot \varphi_2 + a \cdot (\varphi_1 + \varphi_2)}{2 \cdot L + h_{\text{нр}} \cdot (\varphi_1 - \varphi_2)} \cdot g + S_{\text{нр2}} \cdot j_2 \right)}$$

Если Г:  $\lambda = 90^\circ$

$$V_a = 1,8 \cdot j_1 \cdot t_3 + \sqrt{26 \cdot \left( S_{\text{нр1}} \cdot j_1 + L \cdot \frac{a \cdot \varphi_1 + b \cdot \varphi_2}{L + h_{\text{нр}} \cdot (\varphi_1 - \varphi_2)} \cdot g + S_{\text{нр2}} \cdot j_2 \right)}$$

Однако, данные примеры, хоть и не являются самыми простыми, однако, есть расчеты более сложные, объединяющие системы уравнений. Так ранее в своих статьях мы предлагали также более сложный порядок вычисления для определения более сложного неконтролируемого перемещения. Данный тип вычислений предполагает определение не только поступательных перемещений, но и одновременный расчет с вращательным перемещением, а иногда и решение прямой и обратной задачи. Пример решения прямой и обратной задачи:

$$\begin{cases} x_{1c_1} = \left( -k_1 f \frac{g l_2 \cos \beta}{l_1 \cos \alpha + l_2 \cos \beta} \cos(\theta) - k_1 f \frac{g l_1 \cos \alpha}{l_1 \cos \alpha + l_2 \cos \beta} \sin(\theta) \right) \frac{t^2}{2} + v_1 \cos \theta \cdot t \\ y_{1c_1} = \left( -k_1 f \frac{g l_2 \cos \beta}{l_1 \cos \alpha + l_2 \cos \beta} \sin(\theta) - k_1 f \frac{g l_1 \cos \alpha}{l_1 \cos \alpha + l_2 \cos \beta} \cos(\theta) \right) \frac{t^2}{2} + v_1 \sin \theta \cdot t \\ \phi_1 = \left( -k_2 f \frac{m_1 g l_2 \cos \beta}{J_c (l_1 \cos \alpha + l_2 \cos \beta)} l_1 - k_2 f \frac{m_1 g l_1 \cos \alpha}{J_c (l_1 \cos \alpha + l_2 \cos \beta)} l_2 \right) \frac{t^2}{2} + \Omega_{01} t \end{cases} \quad (3)$$

Как видно из данного примера, данный предложенный способ также трудоемок в расчетах и требует использования цифровых алгоритмов.

### Результаты и обсуждение

Для примера использования программы Agisoft Metashape используем реальное дорожно-транспортное происшествие с участием автомобиля Мазда 6. Для сохранения следовой информации о повреждениях автомобиля была проведена фотосъемка и подготовлен массив фотоснимков по правилам фотографирования при построении 3D-моделей в программе Agisoft. Был сделан массив из 150 фотоснимков, после чего в программе Agisoft они поэтапно обрабатывались – вначале создавалось облако точек, потом каркасная сетка, далее сплошная модель, а затем накладывалась текстура (рис. 2).

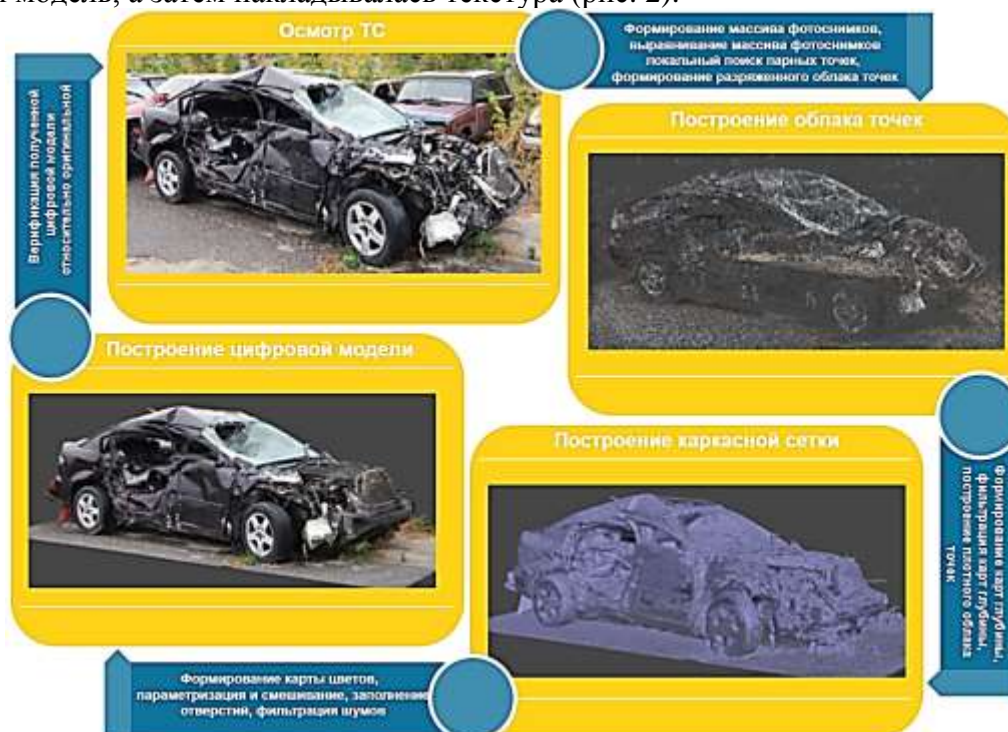


Рисунок 2 – Пример построения 3D-модели поврежденного транспортного средства с использованием программы Agisoft Metashape

На последнем этапе для полного цикла построенной модели (в некотором роде данную модель можно считать цифровым двойником) необходима верификация закладываемых принципиальных характеристик модели – в нашем случае соотносимость повреждений на модели и на реальном прототипе. Так на исходном автомобиле с помощью электронного дальномера проводились горизонтальные измерения глубины повреждений на различных высотах и с определенным шагом по горизонтальным линиям, после чего строился объемный график по-



вреждений, отображающий глубины повреждений (рис. 3). Одновременно на 3D-модели была выделена структурная сетка зоны повреждений и преобразована в граф (рис. 4).

Сравнение графов глубин повреждений на модели и прототипе показало достаточно большую сходимость с погрешностью не более 4 %.

Также для восстановления следовой информации на месте происшествия был подготовлен массив фотоснимков участка дороги, на котором ДТП произошло. Пример данных фотоснимков с мерным объектом показана на рисунке 5.

Диаграмма глубины повреждений ТС

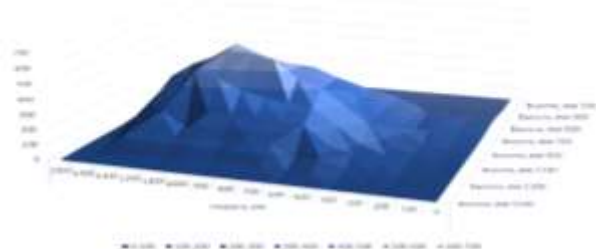


Рисунок 3 – Граф глубин поверхности повреждений исходного транспортного средства

Диаграмма глубины повреждений на модели

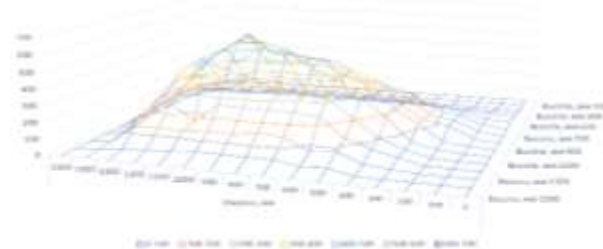


Рисунок 4 – Граф глубин поверхности повреждений 3D-модели транспортного средства



Рисунок 5 – Пример фотоснимков с места происшествия со следовой информацией

Далее с помощью программы Agisoft Metashape была построена 3D-модель дороги. Алгоритм построения такой же, как и на примере построения цифровой модели транспортного средства. Построенная модель с разных ракурсов представлена на рисунке 6. Для определения соотносимости построенной модели была проведена верификация с использованием способа сравнения реальных известных размеров и размеров на цифровой модели (рис. 7). Результаты сравнения представлены в таблице 2.



Рисунок 6 – Пример построения 3D-модели участка дороги со следовой информацией с использованием программы Agisoft Metashape

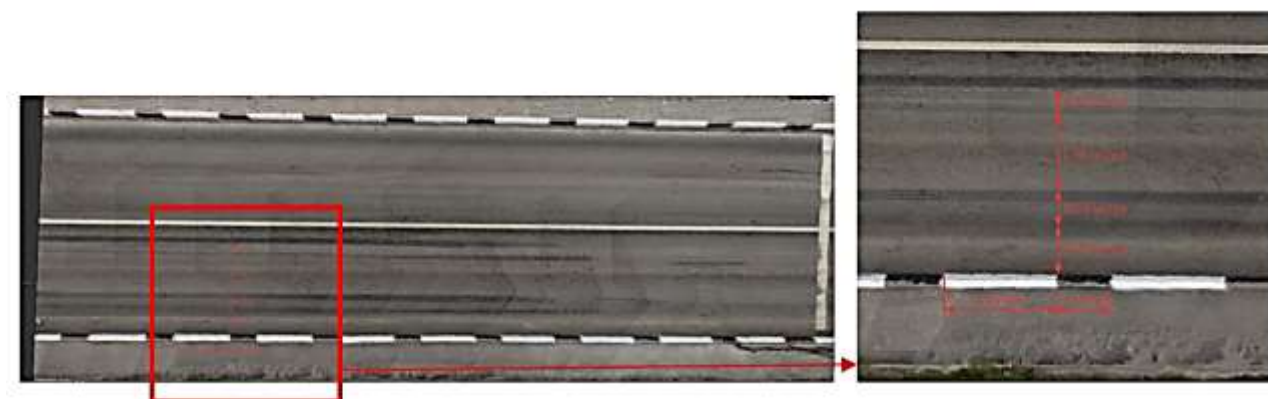


Рисунок 7 – Верификация построения 3D-модели участка дороги с измеренными

Таблица 2 - Результаты верификационного сравнения предлагаемого способа и фактических измерений

№ п/п	Предмет измерения	Фактический размер	Размер на модели	Погрешность
1	Секция белого цвета бордюрного ограждения	2 метра	2 метра	0,0 %
2	Расстояние от края проезжей части до правого крайнего следа	1 метр	0,96 метра	4 %
3	Расстояние между правыми следами	0,6 метра	0,64 метра	6 %
4	Расстояние между правыми и левыми следами	1,4 метра	1,38 метра	1,4 %
5	Расстояние между левыми следами	0,42 метра	0,44 метра	4,6 %

Примеры использования разработанных программ для сложных расчетов представлены на рисунках 8 и 9, где показаны расчеты из приведенных примеров. Результаты были сравнены с расчетами вручную и показали свою адекватность.



Рисунок 8 – Пример классического расчета



Рисунок 9 – Пример расчета сложного перемещения

Для верификация разработанного программного продукта, позволяющего работать с фотоснимками и определять фотограмметрические параметры расстояний различных объектов также был выбран объект с известными геометрическими размерами – парковочное ме-

сто на стоянки. После применения программы инструментально были измерены искомые расстояния, которые показали значительную сходимость с реальными измерениями (рис. 10).



Рисунок 10 – Верификация разработанной фотограмметрической программы

### Выводы

Были предложены практико-прикладные решения для расследования и экспертизы обстоятельств дорожно-транспортных происшествий как интегрированными программными продуктами (Agisoft Metashape) с целью создания цифровых моделей и двойников объектов дорожно-транспортных исследований, так и разработаны новые прикладные способы и программы, которые позволяют оптимизировать процесс трудоемких расчетов и повысить качество проводимых экспертиз.

На примере реальных дорожно-транспортных происшествий способы показали свою состоятельность, что позволит продолжить исследования в этом направлении с дополнением модулей и возможностей расчета.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Евтюков С.А., Пучкин В.А. Судебная автотехническая экспертиза дорожно-транспортных происшествий // ИД «Петрополис». Санкт-Петербург, 2017. 416 с.
2. Домке Э.Р. Расследование и экспертиза дорожно-транспортных происшествий. М.: Издательский центр «Академия», 2009. 288 с.
3. Дорохин С.В., Лазарев Д.А., Гринякин Р.В., Стрекалов Д.П. Использование информационных технологий при экспертизе дорожно-транспортных происшествий // Перспективы развития, инновации и информационные технологии на транспорте: Материалы Международной молодежной научно-практической конференции. Воронеж. 2024. С. 69-73.
4. Новиков И.А., Лазарев Д.А., Зиборова Е.И., Жихарев А.Г. Совершенствование дорожно-транспортной экспертизы в сфере безопасности дорожного движения путем внедрения методологии комплексного определения составляющих механизма дорожно-транспортных происшествий // Мир транспорта и технологических машин. 2024. №1-3 (84). С. 71-81.
5. Новиков И.А., Лазарев Д.А., Жихарев А.Г., Черных В.С. Разработка интеллектуальной системы обработки изображений при расследовании дорожно-транспортных происшествий // Мир транспорта и технологических машин. 2025. №1-4 (88). С. 98-107.
6. Xueqiu Wang. BL-YOLOv8: An Improved Road Defect Detection Model Based on YOLOv8 // Sensors 2023. 23. 8361.
7. Wu T. YOLO-SE: Improved YOLOv8 for Remote Sensing Object Detection and Recognition // Appl. Sci. 2023. 13. 12977.
8. Bradski G. Learning OpenCV // O'Reilly Media, Inc., 1005 Gravenstein Highway North, Sebastopol, CA 95472.
9. Szeliski R. Computer Vision: Algorithms and Applications // Springer, 2010.
10. Jiao L. A Survey of Deep Learning-based Object Detection // IEEE Access. Vol. 7. 2019.
11. Интеллектуальная система обработки изображений с места ДТП: св-во о государственной регистрации программы для ЭВМ №2025614664: дата гос. рег. 25.02.2025 / Черных В.С., Жихарев А.Г., Мартон Н.А., Лазарев Д.А.

12. Лазарев Д.А. Применение цифровых алгоритмов при оптимизации процесса расследования дорожно-транспортных происшествий // Воронежский научно-технический вестник. №4(46). 2023. DOI: 10.34220/2311-8873-2023-107-119.
13. Новиков И.А., Лазарев Д.А. Применение цифровых алгоритмов для оптимизации процесса исследования неконтролируемого перемещения транспортных средств при дорожно-транспортных происшествиях // Современные автомобильные материалы и технологии (САМИТ - 2024): Сборник научных статей 16-й Международной научно-технической конференции. Курск. 2024. С. 79-84.
14. Лазарев Д.А. Повышение эффективности проведения автотехнической экспертизы на основе теоретического подхода при изучении процесса торможения // Мир транспорта и технологических машин. 2017. №4(55). С. 82-90.
14. Евтюков С.А. Реконструкция дорожно-транспортных происшествий. СПб.: Издательский дом «Петрополис», 2017. 204 с.
15. Novikov I.A., Lazarev D.A., Dmitry V. Kudinov The estimation of friction coefficient of vehicle's blocked wheel given with contact patch of the tread with the road surface International // Journal of Applied Engineering Research. Vol. 21. 2015. P. 42721-42724.
16. Novikov I., Degtyar A., Lazarev D., Makhonin V. Analysis of vehicles complex displacement in the process of investigation of vehicle crash // MATEC Web of Conferences 341, 00070. 2021.
17. Интеллектуальная система оценки уровня безопасности дорожного движения на участке улично-дорожной сети: св-во о государственной регистрации программы для ЭВМ №2025660188: дата гос. рег. 22.04.2025 / Ивашук О.Д., Бекетов Я.М., Новиков И.А., Лазарев Д.А.
18. Novikov I.A. Experimental Installation for Calculation of Road Adhesion Coefficient of Locked Car Wheel // Transportation Research Procedia. 2017. V. 20. P. 463-467.

**Новиков Иван Алексеевич**

Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова

Адрес: 308012, Россия, г. Белгород, улица Костюкова, 46

Д.т.н., профессор, директор транспортно-технологического института, профессор кафедры «Эксплуатации и организации движения автотранспорта»

E-mail: ooows@mail.ru

**Лазарев Дмитрий Александрович**

Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова

Адрес: 308012, Россия, г. Белгород, улица Костюкова, 46

К.т.н., доцент кафедры «Эксплуатации и организации движения автотранспорта»

E-mail: avtotech31@mail.ru

**Стрекалов Дмитрий Павлович**

Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова

Адрес: 308012, Россия, г. Белгород, улица Костюкова, 46

Аспирант

E-mail: Strekalovdp@yandex.ru

---

I.A. NOVIKOV, D.A. LAZAREV, D.P. STREKALOV

## THE APPLICATION OF DIGITAL TECHNOLOGIES IN INVESTIGATING ROAD TRAFFIC ACCIDENTS

**Abstract.** The investigation of road traffic accidents is a complex, time-consuming, and knowledge-intensive process that requires significant knowledge in theoretical mechanics, physics, vehicle dynamics, and tracology (the study of traces). Some calculations are so intricate and time-consuming that there is a high probability of errors or inaccuracies when performing them step-by-step without specialized tools. Besides, trace information at the scene of road traffic accident is often lost after a short period of time, and its reproduction is only possible using high-quality photos and application tools. Very often, experts do not have the opportunity to simplify calculations and reproduce the trace situation at the scene of a traffic accident using computational methods due to the lack of sufficiently reliable digital tools. This article presents a range of specialized tools and software, both adapted for road traffic accident investigation tasks and developed specifically for particular applied challenges.

**Keywords:** road traffic accident, vehicle, investigation, examination, software, digital twin, computer technologies

## BIBLIOGRAPHY

1. Evtyukov S.A., Puchkin V.A. Sudebnaya avtotekhnicheskaya ekspertiza dorozhno-transportnykh proisshestviy // ID "Petropolis". Sankt-Peterburg, 2017. 416 s.
2. Domke E.R. Rassledovanie i ekspertiza dorozhno-transportnykh proisshestviy. M.: Izdatel'skiy tsentr "Akademiya", 2009. 288 s.
3. Dorokhin S.V., Lazarev D.A., Grinyakin R.V., Strekalov D.P. Ispol'zovanie informatsionnykh tekhnologiy pri ekspertize dorozhno-transportnykh proisshestviy // Perspektivy razvitiya, innovatsii i informatsionnye tekhnologii na transporte: Materialy Mezhdunarodnoy molodezhnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii. Voronezh. 2024. S. 69-73.
4. Novikov I.A., Lazarev D.A., Ziborova E.I., Zhikharev A.G. Sovershenstvovanie dorozhno-transportnoy ekspertizy v sfere bezopasnosti dorozhnogo dvizheniya putem vnedreniya metodologii kompleksnogo opredeleniya sostavlyayushchikh mekhanizma dorozhno-transportnykh proisshestviy // Mir transporta i tekhnologicheskikh mashin. 2024. №1-3 (84). S. 71-81.
5. Novikov I.A., Lazarev D.A., Zhikharev A.G., Chernykh V.S. Razrabotka intellektual'noy sistemy obrabotki izobrazheniy pri rassledovanii dorozhno-transportnykh proisshestviy // Mir transporta i tekhnologicheskikh mashin. 2025. №1-4 (88). S. 98-107.
6. Xueqiu Wang. BL-YOLOv8: An Improved Road Defect Detection Model Based on YOLOv8 // Sensors 2023. 23. 8361.
7. Wu T. YOLO-SE: Improved YOLOv8 for Remote Sensing Object Detection and Recognition // Appl. Sci. 2023. 13. 12977.
8. Bradski G. Learning OpenCV // O'Reilly Media, Inc., 1005 Gravenstein Highway North, Sebastopol, CA 95472.
9. Szeliski R. Computer Vision: Algorithms and Applications // Springer, 2010.
10. Jiao L. A Survey of Deep Learning-based Object Detection // IEEE Access. Vol. 7. 2019.
11. Intellektual'naya sistema obrabotki izobrazheniy s mesta DTP: sv-vo o gosudarstvennoy registratsii programmy dlya EVM №2025614664: data gos. reg. 25.02.2025 / Chernykh V.S., Zhikharev A.G., Marton N.A., Lazarev D.A.
12. Lazarev D.A. Primenenie tsifrovyykh algoritmov pri optimizatsii protsessa rassledovaniya dorozhno-transportnykh proisshestviy // Voronezhskiy nauchno-tekhnicheskiiy vestnik. №4(46). 2023. DOI: 10.34220/2311-8873-2023-107-119.
13. Novikov I.A., Lazarev D.A. Primenenie tsifrovyykh algoritmov dlya optimizatsii protsessa issledovaniya nekontroliruemogo peremeshcheniya transportnykh sredstv pri dorozhno-transportnykh proisshestviyakh // Sovremennye avtomobil'nye materialy i tekhnologii (SAMIT - 2024): Sbornik nauchnykh statey 16-y Mezhdunarodnoy nauchno-tekhnicheskoy konferentsii. Kursk. 2024. S. 79-84.
14. Lazarev D.A. Povyshenie effektivnosti provedeniya avtotekhnicheskoy ekspertizy na osnove teoreticheskogo podkhoda pri izuchenii protsessa tormozheniya // Mir transporta i tekhnologicheskikh mashin. 2017. №4(55). S. 82-90.
14. Evtyukov S.A. Rekonstruktsiya dorozhno-transportnykh proisshestviy. SPb.: Izdatel'skiy dom "Petropolis, 2017. 204 s.
15. Novikov I.A., Lazarev D.A., Dmitry V. Kudinov The estimation of friction coefficient of vehicle's blocked wheel given with contact patch of the tread with the road surface International // Journal of Applied Engineering Research. Vol. 21. 2015. R. 42721-42724.
16. Novikov I., Degtyar A., Lazarev D., Makhonin V. Analysis of vehicles complex displacement in the process of investigation of vehicle crash // MATEC Web of Conferences 341, 00070. 2021.
17. Intellektual'naya sistema otsenki urovnya bezopasnosti dorozhnogo dvizheniya na uchastke ulichno-dorozhnoy seti: sv-vo o gosudarstvennoy registratsii programmy dlya EVM №2025660188: data gos. reg. 22.04.2025 / Ivashchuk O.D., Beketov YA.M., Novikov I.A., Lazarev D.A.
18. Novikov I.A. Experimental Installation for Calculation of Road Adhesion Coefficient of Locked Car Wheel // Transportation Research Procedia. 2017. V. 20. R. 463-467.

### **Novikov Ivan Alekseevich**

Belgorod state technological university  
Address: 308012, Russia, Belgorod, Kostyukova str., 46  
Doctor of Technical Sciences  
E-mail: ooows@mail.ru

### **Strekalov Dmitry Pavlovich**

Belgorod state technological university  
Address: 308012, Russia, Belgorod, Kostyukova str., 46  
Graduate student  
E-mail: Strekalovdp@yandex.ru

### **Lazarev Dmitry Alexandrovich**

Belgorod state technological university  
Address: 308012, Russia, Belgorod, Kostyukova str., 46  
Candidate of Technical Sciences  
E-mail: avtotech31@mail.ru



УДК 656.13

doi:10.33979/2073-7432-2025-3-2(90)-109-115

Е.И. ИГНАТЕНКО, А.Н. НОВИКОВ, В.Э. КЛЯВИН, А.С. СЫСОЕВ

## ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНАЯ ТРАНСПОРТНАЯ СИСТЕМА НА ОСНОВЕ СВЕТОФОРНЫХ ОБЪЕКТОВ С АДАПТИВНЫМ УПРАВЛЕНИЕМ

**Аннотация.** Рассмотрены тенденции развития управления дорожным движением в городских агломерациях, основанные на внедрении современных технологий, таких как адаптивное управление светофорными объектами и интеллектуальные транспортные системы. Предложен концептуальный подход к созданию интеллектуальной транспортной системы, построенной на использовании современных возможностей видеомониторинга транспортных потоков. Определены этапы создания и развития такой системы, а также примерная внутренняя структура серверного домена «управление дорожным движением».

**Ключевые слова:** интеллектуальная транспортная система, интенсивность движения, состав потока, светофорный объект, управление дорожным движением, видеомониторинг

### Введение

Транспортный комплекс в нашей стране является одним из важнейших элементов развития экономики, повышение эффективности функционирования которого сдерживают проблемы автомобилизации, последствия которой в первую очередь характеризуются высокой интенсивностью движения транспортных потоков по улично-дорожной сети городов. Одним из ключевых направлений решения этой проблемы, согласно Национальному проекту «Безопасные и качественные автомобильные дороги», является широкое распространение интеллектуальных транспортных систем (ИТС) в городских агломерациях, к основным целям внедрения которых можно отнести развитие «системы мониторинга и управления транспортной системой в режиме реального времени для повышения качества транспортных услуг, улучшения экологии и безопасности» [1].

Очевидно, что ИТС в своём развитии давно ушла от автоматизированной системы управления дорожным движением и решает широкий спектр задач, используя в том числе самые современные возможности получения, переработки и распространения различных видов информации, связанных с транспортным процессом [2]. Так, в частности, «... региональная ИТС Белгородской городской агломерации генерирует более 100 000 000 фактов фиксации транспортных средств в месяц» [3]. Важным преимуществом ИТС является существенное повышение уровня взаимодействия участников дорожного движения [4]. С этим связано бурное развитие архитектуры современной ИТС [5], при этом в любой представленной в настоящее время ИТС обязательно присутствие серверного домена «управление дорожным движением» (ГОСТ Р ИСО 14813-1-2011), понимаемое как «упорядочивание движения транспортных средств и пешеходов на дорогах» (ГОСТ Р 56829-2015).

Однако надо признать, что темпы создания и развития ИТС в нашей стране пока невысокие, а одной из основных причин являются «несовершенные механизмы создания и эксплуатации ИТС» [6].

### Материал и методы

Можно отметить две ярко выраженные тенденции развития управления дорожным движением: с одной стороны – повышение эффективности ИТС, с другой – развитие адаптивного управления светофорными объектами. Решением проблем развития и повышения эффективности ИТС занимаются многие отечественные и зарубежные ученые: С.В. Жанказиев [7], И. Н. Пугачев [8], Д. В. Капский [9], В. В. Зырянов [10], В. М. Власов [11], И. Е. Агуреев [12] и др. Вопросами совершенствования алгоритмов адаптивного управления зани-

маются учёные В.Д. Шепелев, З.В. Альметова, А.Д. Моор, В.И. Берстенева [13], П.В. Остапенко, К.А. Султантемирова, О.Н. Сапрыкин [14], Д. В. Овчинников, Е. А. Шевченко, П. А. Уфилин [15], Д.А. Архипов [16] и др.

Между этими тенденциями есть противоречия [17]. ИТС по своей сути как правило функционирует на основе сценариев управления и обслуживает сеть пересечений используя планы координации, построенные и корректируемые на основе статистических данных [18]. Адаптивное же управление характерно для отдельного или в редких случаях для небольшой группы перекрёстков, подчинённых общему сценарию [19]. При этом использование адаптивных алгоритмов работы одиночного светофорного объекта «ухудшает характеристики движения и эффективности работы других перекрёстков» [17].

### **Теория**

Современный видеомониторинг движения обладает следующими возможностями [20]:

- подсчет количества транспортных средств (ТС) по полосам/по направлениям;
- классификация ТС на 6/8/14 типов;
- расчет средней скорости движения транспортных средств;
- расчет средней задержки ТС;
- определение показателя перегруженности;
- определение длины очереди ТС;
- подсчет интенсивности пешеходного движения;
- определение количества пешеходов в зоне;
- отслеживание треков ТС в пределах кадра;
- определение мгновенной скорости в режиме реального времени и др.

То есть, появляется возможность точно отслеживать не только сколько и каких видов транспортных средств проходит через пересечение, но и откуда они прибыли и куда направились. Важно и умение определять количество пешеходов в зоне пересечения: при их отсутствии появляется возможность пропустить пешеходную фазу.



**Рисунок 1 – концепция поэтапного создания ИТС на основе современного мониторинга**

Развитие ИТС на основе такого видеомониторинга позволяет использовать эти возможности на всех этапах развития. На рисунке 1 представлена концепция поэтапного подхода к созданию ИТС.

На первом этапе (уровень 1 «Автономия» на рисунке 1) предполагается применение адаптивного управления светофорным регулированием («умных светофоров» [16]), начиная внедрение с ключевых перекрёстков с постепенным вовлечением менее значимых, но с предполагаемым участием в создаваемой ИТС. Одной из основных задач первого этапа является разработка схемы видеомониторинга, обеспечивающей максимальный охват точек, где предполагается вероятность изменения интенсивности движения транспортных потоков, и, соответственно, её реализация. Такой подход позволит уже на первом этапе проанализировать качество видеомониторинга по получению информации, необходимой для реализации управления дорожным движением на следующих этапах.

На втором этапе (уровень 2 «Сообщество» на рисунке 1) организуется обмен данными

между всеми смежными перекрёстками с адаптивным управлением светофорным регулированием. «Знакомство» начинается с оценки пропускной способности смежных подходов, длины перегона, наличия на перегоне мест притяжения, таких как торгово-развлекательные центры, крупные парковки и т.п., которые могли бы влиять на интенсивность движения. В местах, где располагается въезд-выезд таких центров притяжения необходимо также проводить видеомониторинг с целью определения изменения количества автомобилей, направляющихся к подходам смежных перекрёстков. На рисунке 2 показан пример такой схемы видеомониторинга (стрелки указывают места подсчёта количества транспортных средств).

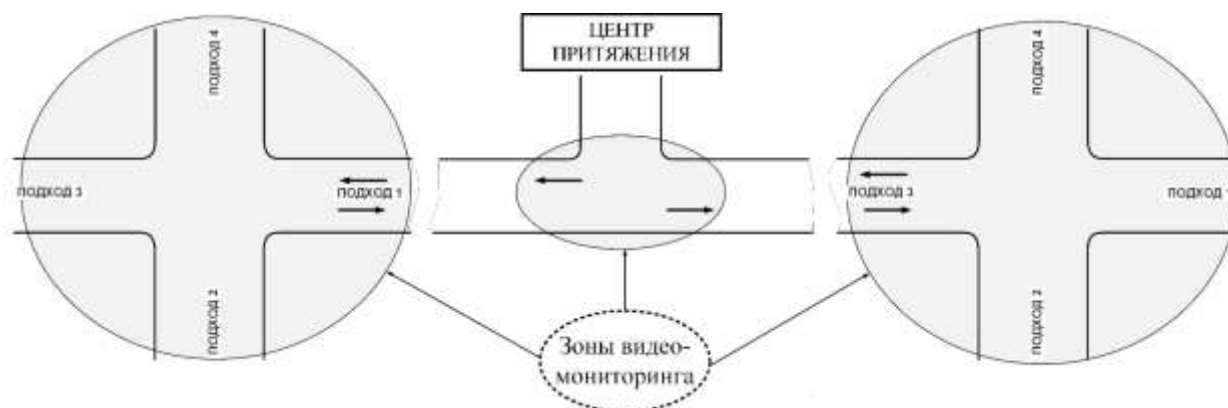


Рисунок 2 – Схема видеомониторинга двух смежных подходов с центром притяжения на перегоне

В это же время идёт период обучения и согласования, в течение которого определяются возможности совместной «работы» смежных пересечений на основе данных о количестве и виде транспортных средств, направленных в сторону смежного перекрёстка для формирования режима управления, что является непростой задачей. С одной стороны, зачастую пересечения имеют различную пропускную способность, что сложно исправить из-за плотности современного градостроительства. С другой стороны, организация дорожного движения на смежных пересечениях городских агломерациях иногда существенно отличается, что может стать большой проблемой для их совместной «работы» и потребовать пересмотра.

По мере формирования второго этапа начинается третий этап (уровень 3 «Тактика» на рисунке 1), предполагающий введение координированного движения или, в нашем случае совместной «работы» нескольких смежных пересечений, на основных магистралях городской агломерации подобно представленному в работе [19], но, учитывая возможную быстроту изменения транспортной ситуации, построенной скорее на правилах, чем на сценариях, предполагающих более медленную реакцию на изменение обстановки. Сложности решения этой задачи с одной стороны также связаны с неодинаковой пропускной способностью перекрёстков, а с другой стороны с различием между пересечениями магистральной улицы с вспомогательными и двух магистральных улиц. В первом случае в управлении магистральная улица имеет приоритет, во втором случае необходимо обеспечить баланс между магистральными улицами.

После полного завершения второго этапа происходит переход к четвёртому этапу (уровень 4 «Стратегия» на рисунке 1). На этом этапе заканчивается создание серверного домена «управление дорожным движением» и начинается формирование архитектуры ИТС, необходимой для решения задач конкретной городской агломерации по обеспечению эффективности транспортных процессов, таких, например, как перевозка пассажиров общественным транспортом и грузоперевозки. По мере накопления информации и её анализе, могут решаться задачи, направленные на снижение заторовых явлений, как посредством изменения схем организации дорожного движения, так и перераспределением транспортных потоков как в пространстве, так и во времени.

Учитывая, что даже отдельный перекрёсток с внедрением адаптивного управления светофорного регулирования уже локально снижает задержки движения транспорта, можно



сказать, что с самого начала создания ИТС и до полной её реализации эффективность транспортных процессов будет только возрастать. При этом основным источником информации по состоянию транспортных потоков будут видеокамеры, установка которых, как правило, не требует проведения дорожных работ, приводящих к остановкам или перенаправлению движения ТС.

Необходимо также отметить, что уже на уровне «Сообщество» перекрёстки с адаптивным управлением светофорного регулирования получают возможность использовать информацию от такого же типа смежных перекрёстков, что позволит более быстро и точно реагировать на любые изменения интенсивности движения. Например, при перегрузке одного из перекрёстков смежные с ним могут начать сдерживать транспортные потоки для нормализации обстановки, контролируя при этом длину очереди.

Современные технологии видеомониторинга без дополнительных устройств помогут обеспечивать и безопасность дорожного движения. Так определение мгновенной скорости в режиме реального времени и расчет средней скорости движения ТС позволяют контролировать скоростной режим. Средняя скорость движения ТС, которая несмотря на критику является общепризнанным показателем, может замеряться на перегонах между смежными перекрёстками. Отслеживание треков ТС в пределах кадра даёт возможность контролировать выезд на встречную полосу движения через сплошную линию разметки. Видеомониторинг перекрёстков позволяет выявлять нарушителей, осуществляющих проезд стоп-линии на запрещающий сигнал светофора. Кроме этого, видеомониторинг облегчает поиск автомобиля по его идентификационному номеру.

### ***Результаты и обсуждение***

Предлагаемая концепция создания ИТС имеет принципиальное отличие от действующих в настоящее время. Действие такой ИТС осуществляется в режиме реального времени без построения сценариев, используя непрерывный и актуальный поток информации, формирующий оптимальные управляющие воздействия на каждом пересечении транспортных потоков, учитывая возможности смежных перекрёстков. Учитывая изменчивость состава транспортного потока, неодинаковые тягово-скоростные свойства транспортных средств и различное время реакции водителей, зависящее от ряда факторов [21], предполагается использование количественного подхода к формированию фазы управления, то есть пропуск не в заданный период, а заданного количества транспортных средств.

Основным преимуществом предлагаемой концепции ИТС является использование адаптивного управления светофорным регулированием, что позволяет более гибко реагировать на любые колебания интенсивности движения, обеспечивая максимальную эффективность транспортных процессов. Также важным является упрощённое и поэтапное расширение ИТС на новые сегменты улично-дорожной сети.

Реализация такого варианта серверного домена «управление дорожным движением» требует непрерывного решения оптимизационных задач, что возможно только с использованием нейронных сетей и на сегодняшний день не является неразрешимой задачей.

### ***Выводы***

Использование новых технологий видеомониторинга, продолжающих своё развитие, в совокупности с расширяющимися возможностями искусственного интеллекта, позволяют по-новому взглянуть на создание и развитие интеллектуальных транспортных сетей, основу которых составляют светофорные объекты с адаптивным управлением. Каждый этап формирования серверного домена «управление дорожным движением» таких ИТС, начиная с внедрения адаптивного управления светофорного регулирования, оказывает положительное влияние на транспортные процессы.

## **СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ**

1. Зейналова Г.А., Жаков В.В. Развитие интеллектуальных транспортных систем с целью управления конкурентоспособностью услуг в городских условиях // Modern Science. 2020. №7-2. С. 48-51.

2. Терентьев В.В. Внедрение интеллектуальных систем на автомобильном транспорте // Надежность и качество сложных систем. 2018. №1(21). С. 117-122. DOI 10.21685/2307-4205-2018-1-15.
3. Новиков А.Н., Мирошников Е.В. Практическая реализация принципов интеллектуального управления транспортными потоками в городе Белгороде // Мир транспорта и технологических машин. 2023. №1-3(84). С. 111-118. DOI 10.33979/2073-7432-2024-1-3(84)-111-118.
4. Костюченко В.В. Интеллектуальные системы управления автомобильным транспортом // Актуальные направления научных исследований XXI века: теория и практика. 2016. Т. 4. №5-3(25-3). С. 256-261.
5. Ван Ж. Особенности методов разработки архитектуры интеллектуальных транспортных систем в Китайской Народной Республике. Мир транспорта и технологических машин. 2024. №1-3(84). С.103-110. DOI 10.33979/2073-7432-2024-1-3(84)-103-110.
6. Солодкий А.И. Развитие интеллектуальных транспортных систем в России: проблемы и пути их решения. Новый этап // Интеллект. Инновации. Инвестиции. 2020. №6. С. 10-19. DOI: 10.25198/2077-7175-2020-6-10.
7. Жанказиев С.В. Научные основы и методология формирования интеллектуальных транспортных систем в автомобильно-дорожных комплексах городов и регионов: Дис. ... д-ра техн. наук. Москва, 2012. 451 с.
8. Пугачев И.Н., Капский Д.В. Разработка планов устойчивой городской мобильности и цифровая трансформация в области организации дорожного движения, путь к дальнейшему развитию городов и страны в целом // Мир транспорта и технологических машин. 2023. №3-2(82). С. 92-99. DOI 10.33979/2073-7432-2023-3-2(82)-92-99.
9. Капский Д.В. САПР оценки решений по организации дорожного движения и развитию транспортных систем // Мир транспорта и технологических машин. 2022. №3-3(78). С. 83-91. DOI 10.33979/2073-7432-2022-3(78)-3-83-91.
10. Ли С., Зырянов В.В. Реализация интеллектуальной системы управления BRT в Г. Цзинань (КНР) // Мир транспорта и технологических машин. 2023. №3-3(82). С. 137-143. DOI 10.33979/2073-7432-2023-3-3(82)-137-143.
11. Власов В.М., Богумил В.Н., Жанказиев С.В., Смирнов А.Б. Применение интеллектуальных телематических систем для оперативной оценки технического состояния автотранспортных средств // Автотранспортное предприятие. 2007. №9. С. 50-53.
12. Федюкин Ю.В., Минаков Е.И., Агуреев И.Е. [и др.] Построение и применение модели эффективности интеллектуальной транспортной системы // Надежность и качество сложных систем. 2023. №4(44). С. 77-87. DOI 10.21685/2307-4205-2023-4-7.
13. Шепелев В.Д., Альметова З.В., Моор А.Д., Берстенева В.И. Оптимизация работы адаптивных светофоров на основе использования машинного зрения // Вестник ЮУрГУ. Серия «Экономика и менеджмент». 2020. Т. 14. №1. С. 189-196. DOI: 10.14529/em200119.
14. Остапенко П.В., Султантемирова К.А., Сапрыкин О.Н. Адаптивное управление светофорным объектом на основе машинного обучения // Информационные технологии и нанотехнологии (ИТНТ-2020): Сборник трудов по материалам VI Международной конференции и молодежной школы. В 4 т. Самара: Самар. ун-т. 2020. Т. 4. Науки о данных. 2020. С. 691-698.
15. Овчинников Д.В., Шевченко Е.А., Уфилин П.А. Применение нейронных сетей в системах умных светофоров: выбор оптимальной архитектуры для анализа дорожного трафика // Интерэкспо ГЕО-Сибирь. XX Международный научный конгресс: Сборник материалов в 8 т. Т. 7. Новосибирск: СГУГиТ. 2024. №2. С. 26-31. DOI 10.33764/2618-981X-2024-7-2.
16. Архипов Д.А. Умный светофор или использование искусственного интеллекта для управления транспортными потоками // Международный научный журнал «Вестник науки». №6(75). Т. 1. 2024. С. 1389-1392.
17. Митрохин М.А., Аляев А.О., Лобанов Р.И., Семёнкин М.В. Влияние адаптивного управления светофорными объектами на характеристики дорожного движения смежных перекрестков // Автоматика на транспорте. №3. Том 10. 2024. С. 282-295. DOI: 10.20295/2412-9186-2024-10-03-282-295.
18. Метелкин П.В., Чепурнова А.В. Управление светофором: стратегия, тактика, решение [Электронный ресурс] / Интеллектуальные транспортные системы России. URL: <https://www.itsjournal.ru/articles/special-report/upravlenie-svetoфорom-strategiya-taktika-reshenie/>.
19. Сетевое адаптивное управление светофорами: успешный кейс Пензы [Электронный ресурс] / Интеллектуальные транспортные системы России. URL: <https://www.itsjournal.ru/articles/digital-region/setevoe-adaptivnoe-upravlenie-svetoфорami-uspeshnyy-keys-penzy/>.
20. TrafficData: Модуль мониторинга дорожного движения [Электронный ресурс]. URL: <https://traffic-data.tilda.ws/traffic-monitoring-module>.
21. Петренко Н.В. Психофизиология труда и профессиональный отбор водителей // Вестник аграрной науки Дона. №2(38). 2017. С. 91-98.

**Игнатенко Елизавета Игоревна**

ООО «Граффик Дэйта»

Адрес: 614065, Россия, г. Пермь, Шоссе Космонавтов, 111

Руководитель проектов

E-mail: [garchevaliza@mail.ru](mailto:garchevaliza@mail.ru)

**Новиков Александр Николаевич**

Орловский государственный университет имени И.С. Тургенева

Адрес: 302030, Россия, г. Орел, ул. Московская, 77  
Д.т.н., профессор, зав. кафедрой сервиса и ремонта машин  
E-mail: srmostu@mail.ru

**Клявин Владимир Эрнстович**  
Липецкий государственный технический университет  
Адрес: 398040, Россия, г. Липецк, ул. Московская, 30  
Д.т.н., доцент, ГНС НИИ  
E-mail: vllk@list.ru

**Сысоев Антон Сергеевич**  
Липецкий государственный технический университет  
Адрес: 398040, Россия, г. Липецк, ул. Московская, 30  
К.т.н., доцент, заведующий кафедрой  
E-mail: anton\_syssoyev@mail.ru

---

E.I. IGNATENKO, A.N. NOVIKOV, V.E. KLYAVIN, A.S. SYSOEV

## INTELLIGENT TRANSPORT SYSTEM BASED ON TRAFFIC LIGHTS WITH ADAPTIVE CONTROL

**Abstract.** *The article considers the trends in the development of traffic management in urban agglomerations based on the introduction of modern technologies, such as adaptive traffic light control and intelligent transport systems. A conceptual approach to the creation of an intelligent transport system based on the use of modern capabilities for video monitoring of transport flows is proposed. The stages of creation and development of such a system are defined, as well as an approximate internal structure of the server domain «traffic management».*

**Keywords:** *intelligent transport system, traffic intensity, flow composition, traffic light object, traffic management, video monitoring*

### BIBLIOGRAPHY

1. Zeynalova G.A., ZHakov V.V. Razvitie intellektual'nykh transportnykh sistem s tsel'yu upravleniya konkurentosposobnost'yu uslug v gorodskikh usloviyakh // Modern Science. 2020. №7-2. S. 48-51.
2. Terent'ev V.V. Vnedrenie intellektual'nykh sistem na avtomobil'nom transporte // Nadezhnost' i kachestvo slozhnykh sistem. 2018. №1(21). S. 117-122. DOI 10.21685/2307-4205-2018-1-15.
3. Novikov A.N., Miroshnikov E.V. Prakticheskaya realizatsiya printsipov intellektual'nogo upravleniya transportnymi potokami v gorode Belgorode // Mir transporta i tekhnologicheskikh mashin. 2023. №1-3(84). S. 111-118. DOI 10.33979/2073-7432-2024-1-3(84)-111-118.
4. Kostyuchenko V.V. Intellektual'nye sistemy upravleniya avtomobil'nym transportom // Aktual'nye napravleniya nauchnykh issledovaniy XXI veka: teoriya i praktika. 2016. T. 4. №5-3(25-3). S. 256-261.
5. Van ZH. Osobennosti metodov razrabotki arkhitektury intellektual'nykh transportnykh sistem v Kitayskoy Narodnoy Respublike. Mir transporta i tekhnologicheskikh mashin. 2024. №1-3(84). S.103-110. DOI 10.33979/2073-7432-2024-1-3(84)-103-110.
6. Solodkiy A.I. Razvitie intellektual'nykh transportnykh sistem v Rossii: problemy i puti ikh resheniya. Novyy etap // Intellekt. Innovatsii. Investitsii. 2020. №6. S. 10-19. DOI: 10.25198/2077-7175-2020-6-10.
7. 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. Moskva, 2012. 451 s.
8. Pugachev I.N., Kapskiy D.V. Razrabotka planov ustoychivoy gorodskoy mobil'nosti i tsifrovaya transformatsiya v oblasti organizatsii dorozhnogo dvizheniya, put' k dal'neyshemu razvitiyu gorodov i strany v tselom // Mir transporta i tekhnologicheskikh mashin. 2023. №3-2(82). S. 92-99. DOI 10.33979/2073-7432-2023-3-2(82)-92-99.
9. Kapskiy D.V. SAPR otsenki resheniy po organizatsii dorozhnogo dvizheniya i razvitiyu transportnykh sistem // Mir transporta i tekhnologicheskikh mashin. 2022. №3-3(78). S. 83-91. DOI 10.33979/2073-7432-2022-3(78)-3-83-91.
10. Li S., Zyryanov V.V. Realizatsiya intellektual'noy sistemy upravleniya BRT v G. TSzinan` (KNR) // Mir transporta i tekhnologicheskikh mashin. 2023. №3-3(82). S. 137-143. DOI 10.33979/2073-7432-2023-3-3(82)-137-143.
11. Vlasov V.M., Bogumil V.N., ZHankaziev S.V., Smirnov A.B. Primenenie intellektual'nykh telematicheskikh sistem dlya operativnoy otsenki tekhnicheskogo sostoyaniya avtotransportnykh sredstv // Avtotransportnoe

predpriyatie. 2007. №9. S. 50-53.

12. Feduykin YU.V., Minakov E.I., Agureev I.E. [i dr.] Postroenie i primeneniye modeli effektivnosti intellektual'noy transportnoy sistemy // Nadezhnost' i kachestvo slozhnykh sistem. 2023. №4(44). S. 77-87. DOI 10.21685/2307-4205-2023-4-7.

13. Shepelev V.D., Al'metova Z.V., Moor A.D., Bersteneva V.I. Optimizatsiya raboty adaptivnykh svetoforov na osnove ispol'zovaniya mashinnogo zreniya // Vestnik YUUrGU. Seriya "Ekonomika i menedzhment". 2020. T. 14. №1. S. 189-196. DOI: 10.14529/em200119.

14. Ostapenko P.V., Sultantemirova K.A., Saprykin O.N. Adaptivnoe upravleniye svetofornym ob"ek-tom na osnove mashinnogo obucheniya // Informatsionnye tekhnologii i nanotekhnologii (ITNT-2020): Sbornik trudov po materialam VI Mezhdunarodnoy konferentsii i molodezhnoy shkoly. V 4 t. Samara: Samar. un-t. 2020. T. 4. Nauki o dannyykh. 2020. S. 691-698.

15. Ovchinnikov D.V., Shevchenko E.A., Ufilin P.A. Primeneniye neyronnykh setey v sistemakh umnykh svetoforov: vybor optimal'noy arkhitektury dlya analiza dorozhnogo trafika // Interekspo GEO-Sibir`. XX Mezhdunarodnyy nauchnyy kongress: Sbornik materialov v 8 t. T. 7. Novosibirsk: SGUGiT. 2024. №2. S. 26-31. DOI 10.33764/2618-981X-2024-7-2.

16. Arkhipov D.A. Umnyy svetofor ili ispol'zovanie iskusstvennogo intellekta dlya upravleniya transportnymi potokami // Mezhdunarodnyy nauchnyy zhurnal "Vestnik nauki". №6(75). T. 1. 2024. S. 1389-1392.

17. Mitrokhin M.A., Alyaev A.O., Lobanov R.I., Semionkin M.V. Vliyanie adaptivnogo upravleniya svetofornymi ob"ektami na kharakteristiki dorozhnogo dvizheniya smezhnykh perekrestkov // Avtomatika na transporte. №3. Tom 10. 2024. S. 282-295. DOI: 10.20295/2412-9186-2024-10-03-282-295.

18. Metelkin P.V., Chepurnova A.V. Upravleniye svetoforom: strategiya, taktika, resheniye [Elektronnyy resurs] / Intellektual'nye transportnye sistemy Rossii. URL: <https://www.itsjournal.ru/articles/special-report/upravlenie-svetoforom-strategiya-taktika-reshenie/>.

19. Setevoye adaptivnoe upravleniye svetoforami: uspeshnyy keys Penzy [Elektronnyy resurs] / Intellektual'nye transportnye sistemy Rossii. URL: <https://www.itsjournal.ru/articles/digital-region/setevoye-adaptivnoe-upravlenie-svetoforami-uspeshnyy-keys-penzy/>.

20. TrafficData: Modul' monitoringa dorozhnogo dvizheniya [Elektronnyy resurs]. URL: <https://traffic-data.tilda.ws/traffic-monitoring-module>.

21. Petrenko N.V. Psikhofiziologiya truda i professional'nyy otbor voditeley // Vestnik agrarnoy nauki Dona. №2(38). 2017. S. 91-98.

**Ignatenko Elizaveta Igorevna**

ООО «Traffic Data»

Address: 614065, Russia, Perm, Kosmonavtov Highway, 111

Project Manager

E-mail: [ceo@trafficdata.ru](mailto:ceo@trafficdata.ru)

**Klyavin Vladimir Ernstovich**

Lipetsk State Technical University

Address: 398040, Russia, Lipetsk, st. Moskovskaya, 30

Doctor of Technical Sciences

E-mail: [vllk@list.ru](mailto:vllk@list.ru)

**Novikov Alexander Nikolayevich**

Oryol State University

Address: 302030, Russia, Orel, Moskovskaya St., 77

Doctor of Technical Sciences

E-mail: [srmostu@mail.ru](mailto:srmostu@mail.ru)

**Syssoev Anton Sergeevich**

Lipetsk State Technical University

Address: 398040, Russia, Lipetsk, st. Moskovskaya, 30

Candidate of Technical Sciences

E-mail: [anton\\_syssoev@mail.ru](mailto:anton_syssoev@mail.ru)

Д.С. КОРЧАГИН, Д.В. ПОМОРЦЕВ, С.С. ЕВТЮКОВ

## ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫЙ АНАЛИЗ ДАННЫХ О МАРШРУТНОЙ СЕТИ ГОРОДСКОГО ОБЩЕСТВЕННОГО ПАССАЖИРСКОГО ТРАНСПОРТА

**Аннотация.** На сегодняшний день, качественное улучшение уровня обслуживания пассажиров городским общественным транспортом представляется затруднительным без внедрения современных интеллектуальных технологий анализа транспортного процесса. В частности, для целей повышения эффективности организации перевозок пассажиров наземным общественным транспортом между районами формирования спроса на поездки, помимо прочего, требуется анализировать данные о маршрутной сети городского пассажирского транспорта. Настоящая статья посвящена современным информационным технологиям, позволяющим решать проблему сбора и интеллектуального анализа данных о маршрутной сети наземного общественного транспорта. Предложен набор инструментов и доступных технологических решений, на базе которых можно реализовывать различные сценарии анализа топологии сети общественного транспорта, проводить оценку уровня доступности различных городских территорий и районов с точки зрения пассажиров наземного общественного транспорта.

**Ключевые слова:** общественный транспорт, информационные технологии, транспортная аналитика, кластерный анализ

### Введение

Внедрение и использование современных цифровых и информационных технологий в транспортном комплексе способствует, в том числе, накоплению данных о процессе перевозок пассажиров городским общественным транспортом. Интеллектуальный анализ накапливаемых данных позволяет выявлять скрытые закономерности и находить пути решения проблемы повышения качества транспортного обслуживания населения [1]. Важным источником информации о том, насколько оптимально организован процесс перевозки пассажиров, в том числе, являются данные о маршрутной сети общественного транспорта. При этом, маршрутные сети современных крупных городов представляют собой сложные, масштабные и запутанные объекты, что затрудняет подготовку и принятие эффективных решений в части их реорганизации и улучшения. К счастью, современные интеллектуальные инструменты анализа данных позволяют получить неявные знания об объектах управления, скрытые в их внутренней логике связей, их топологии и структуре [2]. Важно, что данные о маршрутной сети общественного пассажирского транспорта могут быть получены с общедоступных сайтов, таких как информационные ресурсы комитетов и департаментов транспорта, а также из открытых источников данных об улично-дорожных сетях городов и сетях общественного транспорта. Естественным образом полученные таким образом данные, как правило, являются зашумленными и избыточными, однако системное использование методов интеллектуального анализа данных и машинного обучения может существенно облегчить их обработку и обеспечить извлечение исключительно релевантной информации [3].

Анализ маршрутной сети общественного транспорта подразумевает выявление логических или математических паттернов и закономерностей внутри набора геопространственных данных. Как правило, такой анализ включает в себя реализацию следующих обязательных задач: сбор данных, проверка данных, визуализация, определение структуры и получение скрытых знаний. Извлеченные таким образом новые знания об объекте управления могут быть использованы на одном из этапов планирования и организации процесса перевозки пассажиров общественным транспортом [4]. В настоящей работе мы, в первую очередь, концентрируемся на применении современных информационных технологий, позволяющим решать проблему сбора и интеллектуального анализа данных о маршрутной сети наземного обще-

ственного транспорта, к задаче оценки уровня доступности различных городских территорий и районов для пассажиров наземного общественного транспорта. Приведенный технологический стек может представлять интерес и быть использован для управления и развития инфраструктуры общественного транспорта, а также для процессов городского и регионального планирования вообще. Действительно, подобные решения в области информационных технологий позволяют улучшать транспортное планирование, управление водными ресурсами, повышать энергоэффективность, эффективность управление отходами и прочими хозяйственными процессами города. Более того, внедрение специализированных ИТ-решений в транспортном комплексе позволяет ставить и решать с высокой степенью точности задачи планирования и управления транспортным процессом на всех уровнях менеджмента [5].

### **Материал и методы**

Рассмотрим маршрутную сеть наземного общественного пассажирского транспорта города Санкт-Петербурга. На рисунке 1 представлен фрагмент маршрутной сети наземного общественного транспорта Санкт-Петербурга, взятый с ресурса <https://transportmap.ru/>. Всего в городе имеется 3200 остановки наземного пассажирского транспорта, соединенных порядка 600 различными маршрутами. Ясно, что без инструментов интеллектуального анализа данных довольно сложно комплексно оценить структуру такой масштабной системы.



*Рисунок 1 – Фрагмент маршрутной сети наземного общественного транспорта Санкт-Петербурга*

Первым шагом на пути подготовки данных к анализу явилась представление маршрутной сети города в виде графа. Граф, в математическом понимании, представляет собой структуру, состоящую из набора объектов (вершин или узлов), определенные пары которых соединены ребрами (или дугами). Формально граф  $G$  определяется как упорядоченная пара  $(V, E)$ , где:  $V$  – это множество вершин (узлов),  $E$  – это множество ребер, каждое из которых задается парой вершин. Классификация графов может осуществляться по различным критериям, основные из них: возможность существования петель (ребер, соединяющих вершину с самой собой), наличие кратных ребер между одной парой вершин. Особым классом графов являются пространственные сети, в которых узлы связаны определенной пространственной метрикой, ассоциированной с ребрами сети. Метрика может быть представлена как евклидовым расстоянием (что характерно для дорожных сетей), так и более сложными метрическими функциями, например, вероятностью установления социальных связей в социальных сетях. Транспортные сети являются частным случаем пространственной сети. В зависимости от



конкретного типа транспортной сети, вершины и ребра графа могут характеризовать различные сущности. Различные реализации могут включать дополнительные метаданные о представляемых объектах, такие как протяженность дорожного участка, временные характеристики маршрута, типология зданий, географические координаты и т.д. Важно отметить, что одна и та же сеть может иметь альтернативные варианты представления. Наиболее интуитивно понятным представлением сети городских дорог является граф, в котором вершины соответствуют перекресткам, а ребра - дорожным участкам. Пространственной метрикой в таком представлении выступает протяженность дороги между перекрестками, которая не всегда совпадает с прямолинейным расстоянием между ними. Альтернативное (двойственное) представление может рассматривать дороги в качестве вершин, а их пересечения - в качестве ребер. Такая модель предоставляет информацию о минимальном количестве смен дорог, необходимых для перемещения между двумя точками, что может быть актуально для определенных типов анализа.

Сеть городского наземного общественного транспорта может быть представлена псевдо-мета графом, допускающим как петли, так и кратные ребра между парами вершин. В такой модели вершины соответствуют остановочным пунктам, а ребра – переездам между остановками в рамках конкретных маршрутов. Узлы будут содержать информацию о маршрутах, использующих остановку, её географическом положении. Пространственной метрикой выступает протяжённость переезда с одной остановки на другую, что не совсем может коррелировать с географическим расстоянием между узлами. Вариативность представления такой сети может зависеть, например, от учета пересадок между маршрутами. Дополненная сеть городских дорог и зданий представляется гетерогенным графом, узлы которого могут являться либо зданием, либо пересечением дорог, а рёбра дорогами или связью здания с пересечением дорог. Такая структура позволяет поддерживать две разные сущности в рамках одной сети и проводить их комплексный анализ. Узлы могут содержать различную информацию о зданиях: адрес, географическое положение, принадлежность зданий к какому-либо классу зданий, наличие заведений в нем, контактную информацию. Пространственная метрика соответствует протяженности дорог между перекрестками. Однако, построение дополненной сети представляет значительную сложность по сравнению с другими типами. Ключевым вопросом является определение принципа установления связей между зданиями и элементами дорожной сети. Эффективным подходом является установление связей между зданием и определенным числом географически ближайших транспортных узлов. Учитывая потенциально колоссальное количество зданий в городской среде (например, более 100 000 в Санкт-Петербурге), построение такого графа требует особого внимания к вопросам производительности.

Один из вариантов оптимизации построения подобного графа является использование технологии Quadtree для ускорения поиска ближайших дорожных пересечений [6]. Quadtree представляет собой древовидную структуру данных, используемую для разбиения двумерного пространства на области. Оно особенно эффективно для индексирования пространственных данных, таких как точки, прямоугольники или полигоны, и ускоряет поиск и обработку данных в пространственно-зависимых задачах. Принцип работы Quadtree основан на рекурсивном делении пространства на четыре равных квадранта. Корень дерева соответствует всему исходному пространству, а последующее разбиение производится в случае превышения определенного порога данных в конкретном квадранте. Процесс разбиения продолжается до достижения заданного баланса между количеством данных в квадрантах и глубиной дерева. Терминальные узлы (листья) дерева содержат данные, а промежуточные узлы дерева представляют собой – информацию о соответствующих квадратах. Поиск данных в Quadtree осуществляется путем последовательного определения квадранта, содержащего искомую точку, что позволяет эффективно исключать значительные области пространства с нерелевантными данными. Использование такой структуры данных обеспечивает логарифмическую вычислительную сложность поиска ближайших объектов ( $O(\log n)$ ), что критически важно для оптимизации процесса построения дополненной сети городских дорог.

**Теория / Расчет**

Подготовленные данные о маршрутной сети наземного общественного транспорта могут быть использованы для интеллектуального анализа. В рамках настоящего исследования мы применили методы графовой кластеризации для оценки внутренней структуры топологии маршрутной сети, её связности. В самом деле, графовая кластеризация, по сути, позволяет разбивать связанное множество объектов на подмножества (кластеры), при условии максимизации топологической близости объектов внутри одного кластера и удаленности в разных кластерах. Применительно к анализу маршрутной сети городского общественного транспорта кластеризация направлена на сегментацию сетевых объектов на основе метрики топологического расстояния между ними: выявляются кластеры с минимальным внутрикластерным и максимальным межкластерным топологическим расстоянием. В итоге, получается декомпозированная сеть на подмножества, обеспечивающие минимальные затраты на перемещение внутри кластера при существенно больших затратах на перемещение между кластерами. Безусловно, задача кластеризации является одной из фундаментальных проблем в области анализа данных. Существует широкий спектр алгоритмов, решающих эту задачу, а выбор конкретного алгоритма зависит от множества факторов: структуры данных, оптимизируемой метрики, требований к производительности. В контексте настоящего исследования данные представлены в виде графов значительного размера, что и накладывает дополнительные требования, которые необходимо учитывать при выборе алгоритмов. Учитывая структурные особенности городских транспортных сетей наиболее подходящими алгоритмами для вычисления кластеров является алгоритм Лувена и его усовершенствованная версия, алгоритм Лейдена [7]. Они работают с графами и позволяют за небольшое время произвести качественную кластеризацию на основании веса рёбер. Оба алгоритма основываются на оптимизации метрики модулярности графа. Модулярность – количественная мера, характеризующую относительную плотность рёбер внутри сообществ по отношению к ребрам между сообществами:

$$Q = \frac{1}{2m} \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N \left[ A_{ij} - \frac{k_i k_j}{2m} \right] \delta(i, j),$$

где  $N$  – количество вершин в графе;

$k_i$  – сумма всех рёбер инцидентных с вершиной  $i$ ;

$m$  – сумма всех весов рёбер;

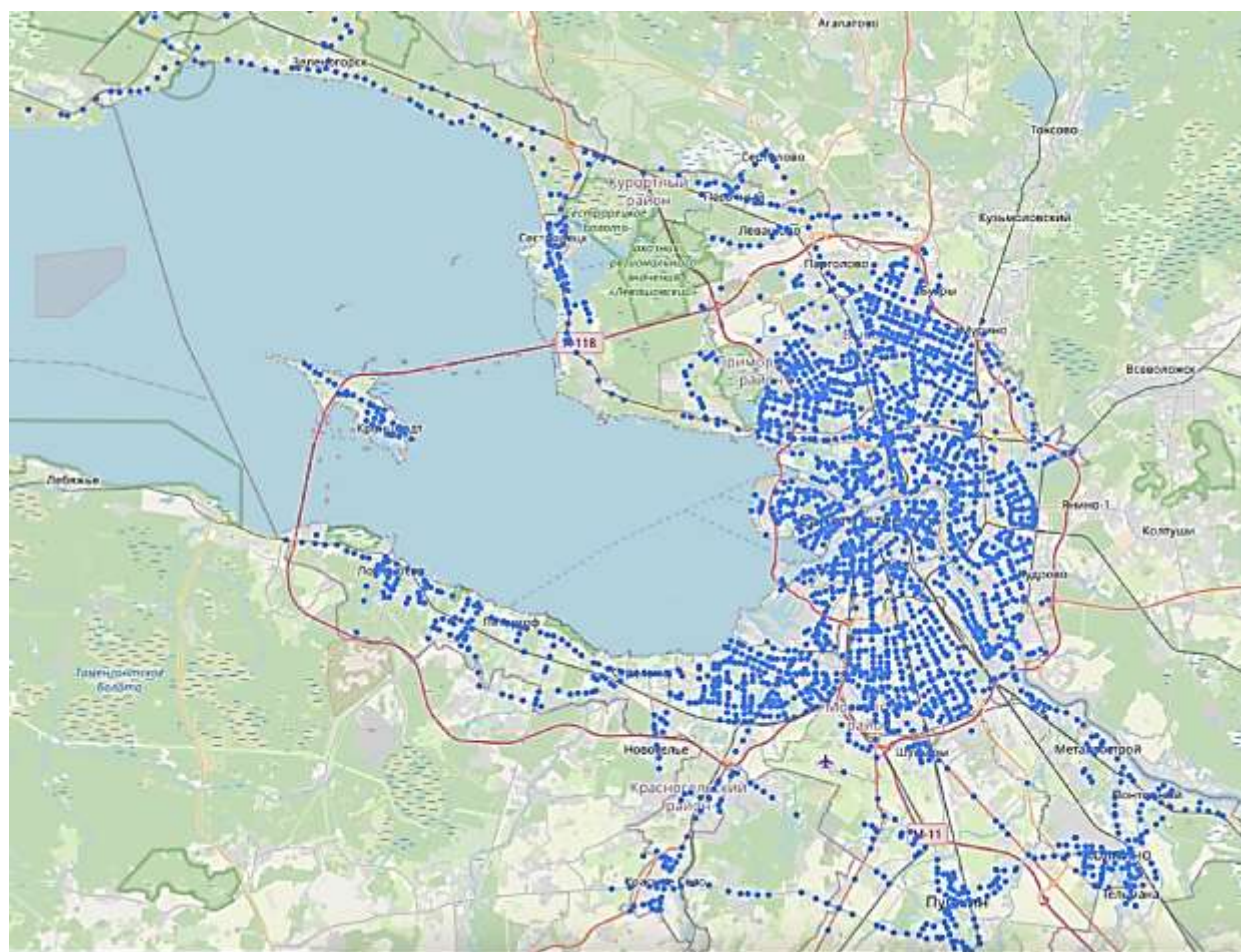
$\delta(i, j)$  – функция принадлежности  $i, j$  одному кластеру;

$A_{ij}$  – вес ребра между узлами  $i, j$ . Значение этой величины находится в диапазоне от  $[-0,5, 1]$ . При этом, значение «-0,5» соответствует отсутствию выраженной кластерной структуры и равномерному распределению узлов, в то время как значение «1» – наличию четко выраженных изолированных сообществ.

Необходимо отметить, что масштаб некоторых сетей может достигать значительных размеров, что обуславливает необходимость использования оптимизированных алгоритмов создания сетевых структур. В качестве инструмента для реализации задачи был выбран язык программирования Python, для хранения и управления сетевыми данными использовалась графовая база данных neo4j, визуализация результатов осуществлялась посредством neo4j Bloom и библиотеки plotly. Данные о сетях наземного общественного транспорта формировались с использованием OpenStreetMap и Python библиотеки osmnx. В дополнение к базовой топологической структуре, в процессе исследования были собраны разнообразные данные об объектах, включающие: географические координаты, протяженность участков, количество пересечений для дорожных элементов, а также адресные характеристики, функциональное назначение, режимы работы и контактную информацию для объектов в дополненных сетях. При конструировании дополненных сетей особое внимание уделялось оптимизации процессов пространственного анализа – для определения ближайшего дорожного узла к зданию была задействована высокопроизводительная библиотека quads. Таким образом формировалась



сеть, при этом каждый последующий маршрут добавляется в существующую сеть, что позволило сформировать псевдо-метаграф с информацией о временных характеристиках маршрутов, проходящих через конкретные транспортные узлы. В целях вычисления сетевых метрик использовались инструменты neo4j. Реализация задач кластеризации сетевых структур осуществлялась за счёт применения специализированных процедур gds.louvain и gds.leiden, которые обеспечивают высокую скорость и качество кластерного анализа с последующим обогащением сети информацией о результатах кластеризации. Тестирование развёрнутого инструментария происходило на примере г. Санкт-Петербурга. На рисунке 2 представлена визуализация всех 3200 остановочных пунктов наземного общественного транспорта города, данные о которых были собраны описанным выше образом. Приведенные на рисунке остановки соединены порядка 600 маршрутами городского пассажирского транспорта. Мы не приводим соответствующие ребра сети, чтобы не зашумлять визуальное отображение кластеризуемых данных.



*Рисунок 2 – Остановки наземного общественного транспорта Санкт-Петербурга*

Визуализация расчёта кластеров методами графовой кластеризации происходила с использованием инструмента neo4j bloom. Оба примененных алгоритма продемонстрировали высокую производительность: алгоритм Лувена – 1.192 секунды, алгоритм Лейдена – 0.16 секунд. Более того, алгоритмы показали высокое качество кластеризации: модулярность составила 0.91 для обоих алгоритмов. В результате работы алгоритмов Лувейна (рис. 3) и Лейдена (рис. 4) множество узлов было разбито на 35 кластеров.



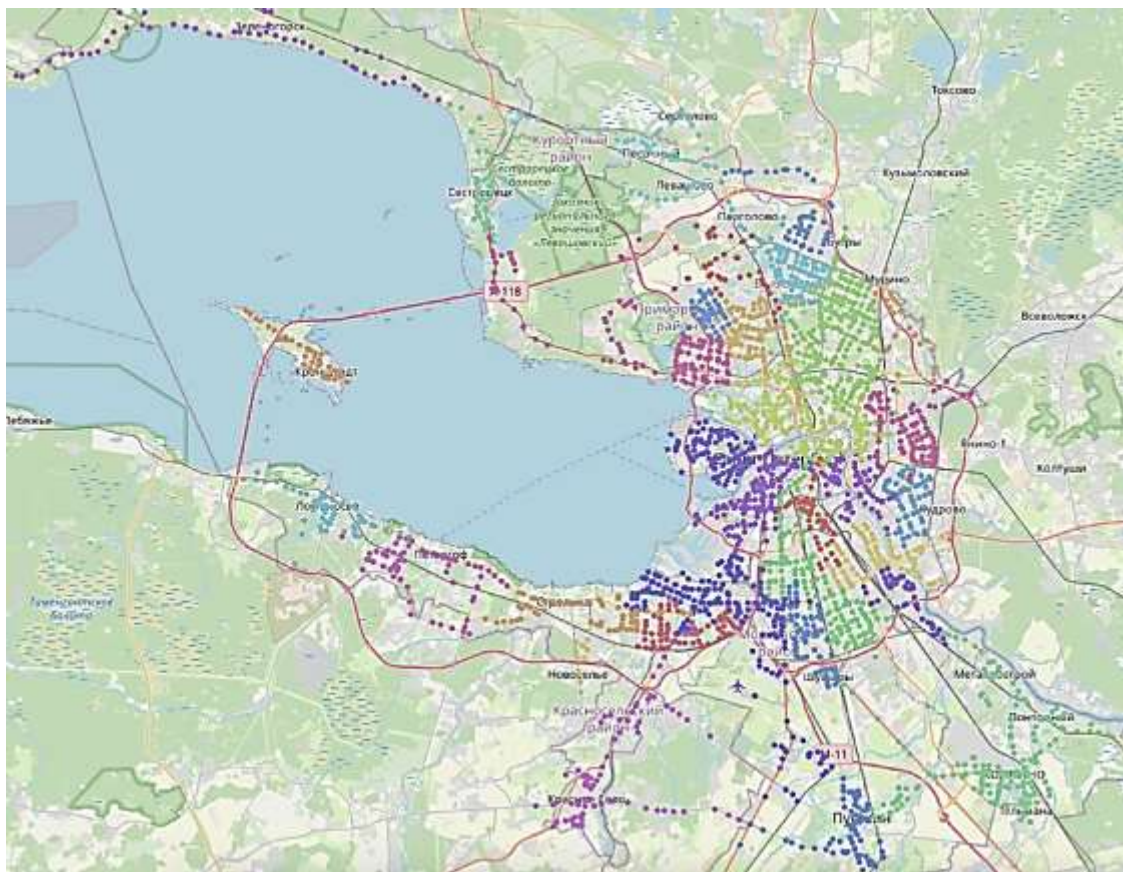


Рисунок 3 – Кластеры остановок наземного общественного транспорта Санкт-Петербурга

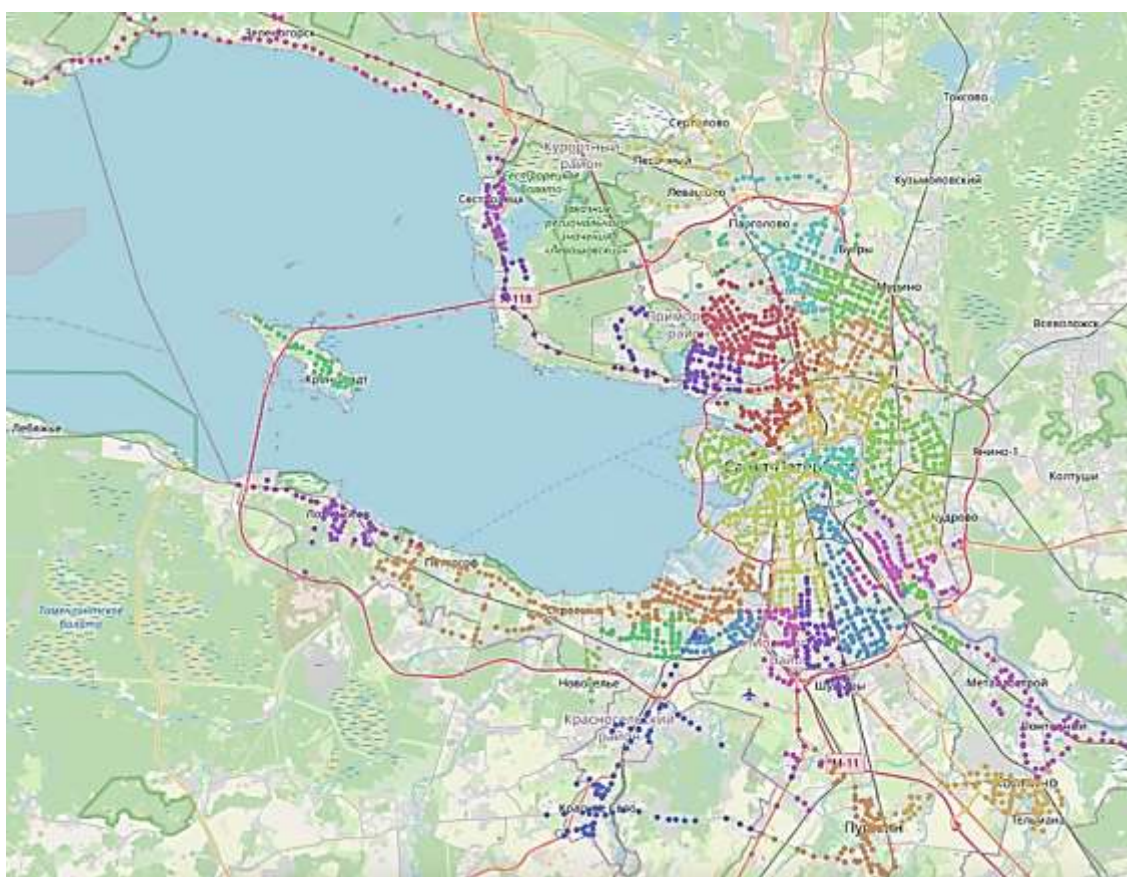
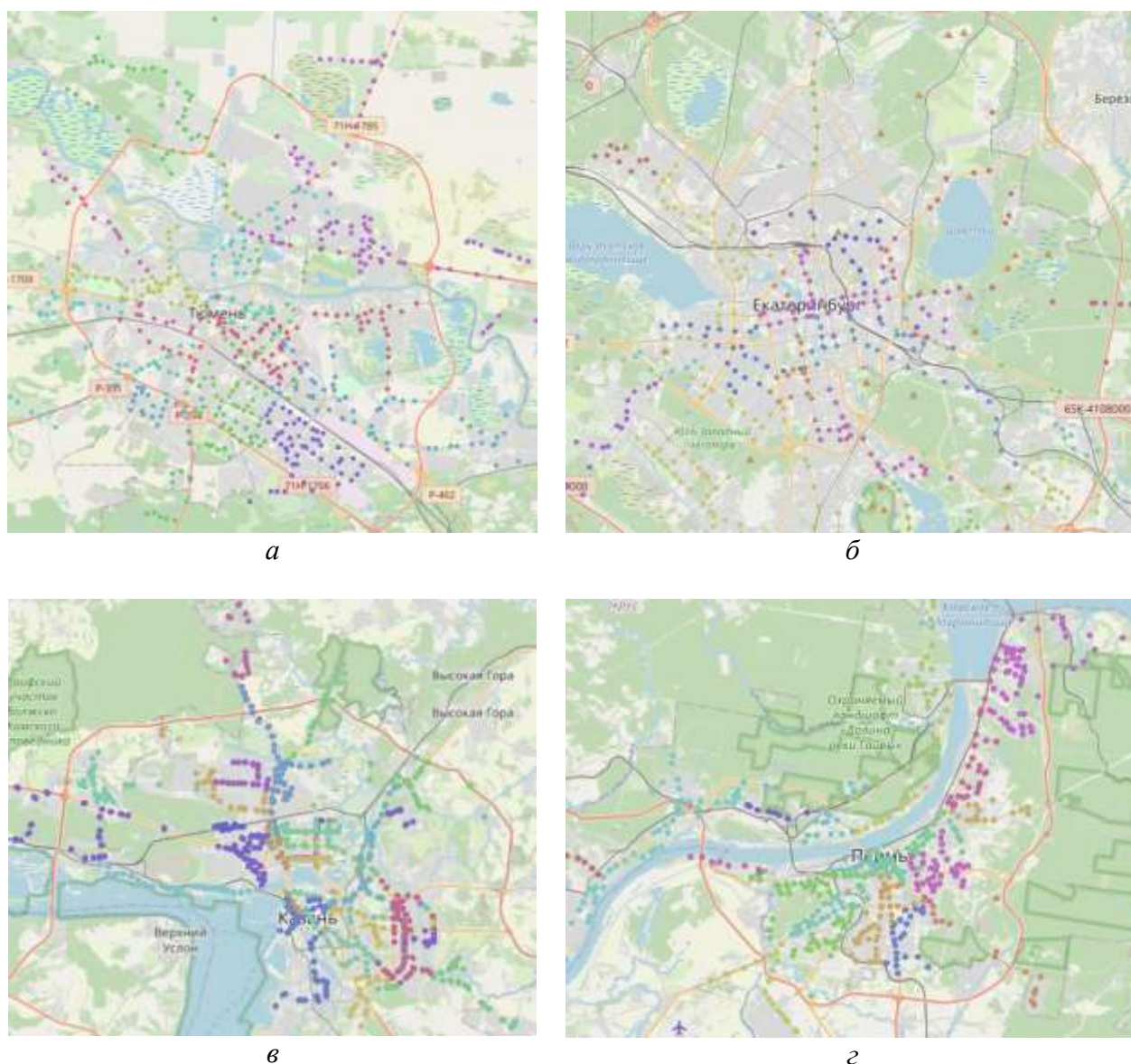


Рисунок 4 – Кластеры остановок наземного общественного транспорта Санкт-Петербурга



### **Результаты**

Разработанный инструментарий сбора и интеллектуального анализа данных о маршрутной сети наземного общественного транспорта продемонстрировал свою работоспособность на примере одного из крупных городов. При этом, именно возникновение возможности анализировать маршрутную сеть любого крупного города в этом смысле представляет наибольший интерес. На рис. 5 представлены результаты кластеризации сетей наземного общественного транспорта Тюмени, Екатеринбурга, Казани и Перми.



**Рисунок 5 – Кластеры остановок наземного общественного транспорта городов:**  
*а - Тюмень, б - Екатеринбург, в - Казань, г - Пермь*

В таблице 1 приведены значения модулярности и время расчёта для каждого города.

**Таблица 1 – Характеристики работы инструмента на примере ряда городов**

	Тюмень	Екатеринбург	Казань	Пермь
Модулярность	0,88	0,85	0,87	0,85
Время, секунды	0,21	0,17	0,18	0,17

Таким образом, разработанный инструментарий демонстрирует высокую производительностью и хорошее качество кластеризации. Его использование позволяет установить, внутри каких территорий города пассажирам удобно передвигаться наземным общественным транспортом, а между каким районами перемещение наземным общественным транспортом

будет сопряжено с определенными затратами (дополнительное ожидание в связи с необходимостью пересадок при использовании нескольких маршрутов движения и т.п.).

### **Обсуждение**

Комплексный анализ городских транспортных сетей представляет собой нетривиальную задачу, требующую применения широкого спектра аналитических метрик [8]. При этом, естественно, что существуют принципиально разные подходы к анализу и оптимизации таких сетей [9]. Значительная сложность заключается в том, что транспортные сети зачастую характеризуются колоссальными объемами данных, что предъявляет повышенные требования к эффективности применяемых алгоритмов [10]. Все эти проблемы требуют проработки и превращают анализ городских транспортных сетей в сложный многоэтапный процесс [11]. При этом, анализ маршрутных сетей общественного транспорта важен для развития городов и повышения качества обслуживания населения [12]. В частности, такой анализ позволяет идентифицировать проблемные участки транспортной инфраструктуры, прогнозировать пассажиропотоки, оптимизировать маршрутизацию и проводить комплексную оценку эффективности различных стратегий планирования городской транспортной системы [13]. В будущем, мы планируем расширить разработанный нами инструментарий за счёт добавления дополнительных разнообразных метрик, которые смогут усилить комплексные аналитические выводы о структурно-функциональных характеристиках сети наземного общественного транспорта [14]. Методы кластеризации, в этом смысле, обеспечивают возможность оценки однородности и выявления связных структур.

### **Выводы**

В рамках работы были разработаны инструменты для сбора, обработки и анализа данных о маршрутных сетях городского наземного общественного транспорта с использованием современных информационных технологий. В процессе исследования, помимо прочего, было установлено, что при использовании интеллектуальных инструментов анализа данных о маршрутных сетях городского наземного общественного транспорта существенное значение имеет оптимизация алгоритмических решений по формированию графовых моделей, учитывая, что некоторые из них характеризуются значительным количеством узлов, что может существенно увеличивать временные затраты на обработку данных. Стоит отметить, что насыщение данных о сети пространственно-временными многомерными данными, включая данные и пассажиропотоке в течение дня [15], может усилить результаты работы разработанного инструментария.

## **СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ**

1. Oh D., Lee S., Park J., Park J., Roh C.-G. Applying modified-data mining techniques to assess public transportation vulnerable urban and suburban city areas // *Heliyon*. 2023. Vol. 9. №11. P. 21213.
2. Kousis A, Tjortjis C. Data mining algorithms for smart cities: A bibliometric analysis // *Algorithms*. 2021. Vol. 14. №8. P. 242.
3. Iqbal R., Doctor F., More B., Mahmud S., Yousuf U. Big data analytics: Computational intelligence techniques and application areas // *Technol. Forecast. Soc. Chang*. 2020. Vol. 153. P. 119253.
4. Schiewe P., Schöbel A. Integrated optimization of sequential processes: General analysis and application to public transport // *EURO Journal on Transportation and Logistics*. 2022. Vol. 11. P. 100073.
5. Ibarra-Rojas O.J., Delgado F., Giesen R., Muñoz J.C. Planning, operation, and control of bus transport systems: A literature review // *Transportation Research Part B: Methodological*. 2015. Vol. 77. P. 38-75.
6. Kala R., Roadmap and cell decomposition-based motion planning // *Emerging Methodologies and Applications in Modelling*. 2024. P. 309-356.
7. Tesfaye B., Augsten N., Pawlik M., Böhlen M.H., Jensen C.S. Speeding up reachability queries in public transport networks using graph partitioning // *Inf Syst Front*. 2022. Vol. 24. P. 11-29.
8. Polimeni A., Vitetta A. Network design and vehicle routing problems in road transport systems: Integrating models and algorithms // *Transportation Engineering*. 2024. Vol. 16. P. 100247.
9. Gong M., Hu Y., Chen Z., Li X., Transfer-based customized modular bus system design with passenger-route assignment optimization // *Transportation Research Part E*. 2021. Vol. 153. P. 102422.
10. Zhou X. A Dynamic diagnose on bus routes optimization using AHP based on multi-source bus data // *10th International Conference on Traffic and Logistic Engineering (ICTLE)*, Macau, China, 2022, pp. 22-27.

11. Bayrak M., Guler S.I., Schonfeld P. Implementation sequence optimization for dedicated bus lane projects // Transportation Research Record. 2021. Vol. 2675. №10. P. 1184-1195.
12. Андреев К.П. Совершенствование транспортного обслуживания населения // Транспортное Дело России. 2017. №3. С. 7-9.
13. Yang Y., Cheng J., Liu Y. An overview of solutions to the bus bunching problem in urban bus systems // Front. Eng. Manag. 2024. Vol. 11. P. 661-675.
14. Zhao J., Sun S., Cats O. Joint optimisation of regular and demand-responsive transit services // Transportmetrica A. 2021. Vol. 19. №2.
15. Петрова Д.В. Современные подходы к организации мониторинга пассажиропотоков общественного транспорта городских агломераций // Int. J. Open Inf. Technol. 2020. Т. 8. №1. С. 47-57.

**Корчагин Денис Сергеевич**

Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет  
Адрес: 190005, Россия, г. Санкт-Петербург, 2-я Красноармейская ул., 4  
Аспирант  
E-mail: dsk@transportsoft.ru

**Поморцев Данил Владимирович**

Санкт-Петербургский государственный университет  
Адрес: 199034, Россия, г. Санкт-Петербург, Университетская наб., 7-9  
Студент  
E-mail: danul78969@gmail.com

**Евтюков Станислав Сергеевич**

Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет  
Адрес: 190005, Россия, г. Санкт-Петербург, 2-я Красноармейская ул., 4  
Д.т.н., зав. кафедрой транспортных систем и дорожно-мостового строительства  
E-mail: sevtjukov@lan.spbgasu.ru

---

D.S. KORCHAGIN, D.V. POMORTSEV, S.S. EVTIUKOV

## INTELLIGENT ANALYSIS OF DATA ON THE ROUTE NETWORK OF URBAN PUBLIC PASSENGER TRANSPORT

**Abstract.** Today, it is difficult to qualitatively improve the level of passenger service by urban public transport without the introduction of modern intelligent technologies for analyzing the transport process. In particular, in order to improve the efficiency of organizing passenger transportation by land road transport between areas where demand for travel is generated, among other things, it is necessary to analyze data on the route network of urban passenger transport. This article is devoted to modern information technologies that make it possible to solve the problem of collecting and intelligently analyzing data on the route network of land public transport. A set of tools and available technological solutions is proposed, on the basis of which it is possible to implement various scenarios for analyzing the topology of the public transport network, to assess the level of accessibility of various urban areas and areas from the point of view of passengers of land road transport.

**Keywords:** public transport, information technology, transport analytics, cluster analysis

### BIBLIOGRAPHY

1. Oh D., Lee S., Park J., Park J., Roh C.-G. Applying modified-data mining techniques to assess public transportation vulnerable urban and suburban city areas // Heliyon. 2023. Vol. 9. №11. P. 21213.
2. Kousis A, Tjortjis C. Data mining algorithms for smart cities: A bibliometric analysis // Algorithms. 2021. Vol. 14. №8. P. 242.
3. Iqbal R., Doctor F., More B., Mahmud S., Yousuf U. Big data analytics: Computational intelligence techniques and application areas // Technol. Forecast. Soc. Chang. 2020. Vol. 153. P. 119253.
4. Schiewe P., Sch?bel A. Integrated optimization of sequential processes: General analysis and application to public transport // EURO Journal on Transportation and Logistics. 2022. Vol. 11. P. 100073.
5. Ibarra-Rojas O.J., Delgado F., Giesen R., Muoz J.C. Planning, operation, and control of bus transport systems: A literature review // Transportation Research Part B: Methodological. 2015. Vol. 77. P. 38-75.

6. Kala R., Roadmap and cell decomposition-based motion planning // Emerging Methodologies and Applications in Modelling. 2024. P. 309-356.
7. Tesfaye B., Augsten N., Pawlik M., Bhlen M.H., Jensen C.S. Speeding up reachability queries in public transport networks using graph partitioning // Inf Syst Front. 2022. Vol. 24. P. 11-29.
8. Polimeni A., Vitetta A. Network design and vehicle routing problems in road transport systems: Integrating models and algorithms // Transportation Engineering. 2024. Vol. 16. P. 100247.
9. Gong M., Hu Y., Chen Z., Li X., Transfer-based customized modular bus system design with passenger-route assignment optimization // Transportation Research Part E. 2021. Vol. 153. P. 102422.
10. Zhou X. A Dynamic diagnose on bus routes optimization using AHP based on multi-source bus data // 10th International Conference on Traffic and Logistic Engineering (ICTLE), Macau, China, 2022, pp. 22-27.
11. Bayrak M., Guler S.I., Schonfeld P. Implementation sequence optimization for dedicated bus lane projects // Transportation Research Record. 2021. Vol. 2675. №10. P. 1184-1195.
12. Andreev K.P. Sovershenstvovanie transportnogo obsluzhivaniya naseleniya // Transportnoe Delo Rossii. 2017. №3. S. 7-9.
13. Yang Y., Cheng J., Liu Y. An overview of solutions to the bus bunching problem in urban bus systems // Front. Eng. Manag. 2024. Vol. 11. P. 661-675.
14. Zhao J., Sun S., Cats O. Joint optimisation of regular and demand-responsive transit services // Transportmetrica A. 2021. Vol. 19. №2.
15. Petrova D.V. Sovremennye podkhody k organizatsii monitoringa passazhiropotokov obshchestvennogo transporta gorodskikh aglomeratsiy // Int. J. Open Inf. Technol. 2020. T. 8. №1. S. 47-57.

**Korchagin Denis Sergeevich**

Saint Petersburg State University of Architecture and Civil Engineering  
Address: 190005, Russia, Saint Petersburg, 2nd Krasnoarmeiskaya str., 4  
Graduate student  
E-mail: dsk@transportsoft.ru

**Pomortsev Danil Vladimirovich**

Saint Petersburg State University  
Address: 199034, Russia, Saint Petersburg, Universitetskaya emb., 7-9  
Student  
E-mail: danul78969@gmail.com

**Evtiukov Stanislav Sergeevich**

Saint Petersburg State University of Architecture and Civil Engineering  
Address: 190005, Russia, Saint Petersburg, 2nd Krasnoarmeiskaya str., 4  
Doctor of Technical Sciences  
E-mail: sevtyukov@lan.spbgasu.ru

Д.В. КАПСКИЙ, С.В. БОГДАНОВИЧ

## РОЛЬ ИСКУССТВЕННОГО ИНТЕЛЛЕКТА В ПРЕОДОЛЕНИИ ФРАГМЕНТАРНОСТИ ТРАНСПОРТНЫХ СИСТЕМ

**Аннотация.** В статье исследуется роль искусственного интеллекта (ИИ) в преодолении фрагментарности транспортных систем. Анализируются методы интеграции данных, прогнозирования рисков и адаптивного управления, позволяющие объединить разрозненные элементы в единую экосистему. Практические примеры из Сингапура и скандинавских стран демонстрируют снижение аварийности на 20-30% и оптимизацию транспортных потоков. Эффективность ИИ-решений зависит от технологической готовности инфраструктуры, что требует поэтапного внедрения и развития гибридных моделей. Рассматриваются также этические и нормативные аспекты применения ИИ в транспортной сфере.

**Ключевые слова:** искусственный интеллект, фрагментарность, транспортные системы, интеграция данных, адаптивное управление

### **Введение**

Современные транспортные системы сталкиваются с растущей сложностью, обусловленной увеличением числа участников движения, внедрением автономных технологий и необходимостью адаптации к климатическим изменениям. Эти факторы усугубляют проблему фрагментарности – разрозненности данных, методов управления и инфраструктурных элементов, что снижает эффективность обеспечения безопасности и оптимизации транспортных потоков. Традиционные подходы, основанные на статических моделях и реактивном управлении, демонстрируют ограниченную применимость в условиях динамично изменяющейся среды.

Целью данной работы является исследование потенциала искусственного интеллекта (ИИ) в преодолении фрагментарности транспортных процессов и систем. Акцент сделан на анализе методов интеграции данных, прогнозирования рисков и адаптивного управления, которые позволяют трансформировать разрозненные элементы в единую экосистему. Накопленный опыт, включая внедрение ИИ в управление трафиком в Сингапуре и использование предиктивной аналитики в скандинавских странах, подтверждает возможность снижения аварийности на 20–30% за счет применения интеллектуальных алгоритмов [1, 2].

Работа не претендует на исчерпывающий обзор существующих исследований, но фокусируется на систематизации практических решений и их адаптации к текущим требованиям по применению соответствующих технологий. Особое внимание уделяется разработке рекомендаций для транспортных и дорожных администраций, направленных на внедрение гибридных моделей, сочетающих традиционные и инновационные методы.

### **Материал и методы**

В основу исследования легли материалы, включающие научные публикации, обзорные статьи и аналитические отчеты, посвященные интеграции ИИ в транспортные системы. Источники отбирались из рецензируемых журналов (например, Transportation Research Part C, IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems), а также отчетов международных организаций и консорциумов, таких как Всемирная организация здравоохранения (ВОЗ) и Международный транспортный форум (ITF) [3, 4]. Особое внимание уделялось работам, опубликованным за последние пять лет, чтобы обеспечить актуальность анализа.

Методология исследования включала несколько этапов. Первый этап предполагал систематический анализ литературы для идентификации основных подходов к преодолению фрагментарности, таких как использование платформ больших данных и алгоритмов машинного обучения. На втором этапе изучались современные тенденции, включая внедрение IoT-

устройств, развитие V2X-коммуникаций и применение предиктивной аналитики в городской инфраструктуре. Третий этап был направлен на оценку эффектов от внедрения ИИ: количественные показатели (снижение аварийности, оптимизация трафика и пр.) сопоставлялись с рисками (высокие затраты, угрозы кибербезопасности и др.). На заключительном этапе формулировались рекомендации для транспортных и дорожных администраций, основанные на синтезе теоретических выводов и практических примеров, таких как проекты, реализованные в Сингапуре и Скандинавии [5].

Ограничением метода является зависимость от доступности данных по внедрению ИИ в развивающихся странах, где подобные проекты носят фрагментарный характер. Для минимизации погрешностей применялся принцип триангуляции – сопоставление данных из разных источников, включая академические исследования и отчеты (в том числе научно-технические) государственных органов [6].

### **Теория**

Фрагментарность транспортных систем представляет собой комплексное явление, характеризующееся разобщенностью компонентов транспортной инфраструктуры, отсутствием или недостаточностью связей между ними, а также несогласованностью их функционирования. Основными факторами, способствующими фрагментарности, выступают исторически сложившаяся архитектура транспортных сетей, отсутствие унифицированных стандартов интеграции и распределение ответственности между различными организационными структурами [7, 8]. Данный феномен можно рассматривать в нескольких измерениях: пространственном, функциональном, технологическом, информационном и институциональном.

В пространственном измерении фрагментарность проявляется в территориальной разобщенности транспортных сетей, отсутствии или недостаточности маршрутов между отдельными районами, неравномерном развитии транспортной инфраструктуры в различных частях города или региона. Это приводит к возникновению территорий с ограниченной транспортной доступностью, что усугубляет социальное неравенство и ограничивает экономические возможности жителей этих районов [9].

Функциональная фрагментарность отражает отсутствие интеграции между различными видами транспорта и транспортными услугами. В современных городах нередко наблюдается ситуация, когда различные виды транспорта (автобусы и троллейбусы, метро, трамваи, велосипеды и т.д.) функционируют как самостоятельные системы с минимальной координацией. Это затрудняет формирование мультимодальных транспортных цепочек и снижает эффективность всей транспортной системы.

Технологическая фрагментарность связана с использованием несовместимых технических решений, стандартов и протоколов в различных компонентах транспортной системы. Это может проявляться в несовместимости систем оплаты проезда, информационных систем для пассажиров, систем управления движением и других технологических элементов.

Информационная фрагментарность характеризуется отсутствием единой информационной среды, объединяющей данные о различных аспектах функционирования транспортной системы. В результате участники дорожного движения не имеют доступа к полной и актуальной информации, необходимой для принятия оптимальных решений о передвижении, а операторы транспортных систем не могут эффективно координировать свои действия.

Институциональная фрагментарность проявляется в разделении ответственности между различными государственными и частными организациями, отвечающими за разные аспекты транспортной системы, а также в отсутствии координации между ними. Примером может служить ситуация, когда городские, региональные и национальные транспортные системы функционируют изолированно, создавая значительные препятствия для оперативного реагирования на изменения дорожно-транспортной обстановки и снижая эффективность управления транспортными потоками в целом [10].

Для формализации понятия фрагментарности транспортной системы можно использовать коэффициент фрагментарности ( $K_f$ ), который предлагается рассчитывать по следующей формуле:



$$K_f = 1 - \frac{N_c}{N_t \cdot (N_t - 1)/2},$$

где  $N_c$  – количество фактически существующих связей между элементами транспортной системы;

$N_t$  – общее количество элементов в системе (например, станций, узлов или участков).

Значение коэффициента варьируется от 0 (полная интеграция) до 1 (полная фрагментация).

Искусственный интеллект (ИИ) формирует теоретическую и практическую основу для преодоления проблемы фрагментарности через три фундаментальных механизма: многоуровневую интеграцию данных, высокоточное прогнозирование рисков и адаптивное управление транспортными потоками. Процесс интеграции гетерогенных данных может быть представлен математически как задача объединения множеств:

$$D_{\text{инт}} = \bigcup_{i=1}^n D_i,$$

где  $D_{\text{инт}}$  – интегрированный массив данных;

$D_i$  – отдельные источники информации (автономные датчики, камеры видеонаблюдения, GPS-трекеры и иные источники телеметрии).

Современные алгоритмы машинного обучения, такие как градиентный бустинг, случайные леса и многослойные нейронные сети, демонстрируют значительный потенциал в выявлении неочевидных зависимостей между разнородными данными. Эти алгоритмы позволяют формировать многомерные предиктивные модели для комплексной оценки аварийности и оптимизации транспортных потоков. Глубокие нейронные сети способны обеспечивать высокую точность прогнозирования дорожно-транспортных происшествий в урбанизированных зонах при наличии достаточного объема исторических (ретроспективных) данных [11].

Теоретическая значимость применения ИИ в контексте преодоления фрагментарности транспортных систем может быть рассмотрена через призму системного подхода. Транспортная инфраструктура представляется как сложная динамическая система взаимодействующих элементов, где искусственный интеллект выполняет роль интегратора и координатора, обеспечивающего:

1. Синхронизацию данных – аккумуляирование и обработку информации от множества IoT-устройств, подключенных автомобилей с технологией V2X (Vehicle-to-Everything) и мобильных приложений пользователей.

2. Динамическую оптимизацию – непрерывную адаптацию алгоритмов управления (светофорные циклы, системы маршрутизации, информационные табло) к актуальным дорожным условиям.

3. Проактивность – фундаментальный переход от реактивного устранения последствий аварий к системному предотвращению рисков на основе предиктивной аналитики.

Наглядным примером реализации данной концепции служит модель «умных дорог» (Smart Roads), где интегрированные системы ИИ осуществляют многофакторный анализ данных о трафике, метеорологических условиях и состоянии дорожного покрытия, адаптируя работу инфраструктуры в режиме реального времени [12]. Теоретическая модель подобной системы представлена на рисунке 1.

Эта диаграмма иллюстрирует многоуровневую модель интеграции транспортных систем с использованием искусственного интеллекта. Она включает:

1. Уровень источников данных: различные источники информации (IoT-устройства, камеры, V2X-коммуникации, мобильные приложения, метеорологические данные), которые передают разрозненные данные в систему.

2. Слой ИИ-обработки: включает компоненты машинного обучения, предиктивной аналитики и адаптивных алгоритмов, которые обрабатывают интегрированные данные.

3. Транспортная экосистема: представляет конечный результат – функционирующие

элементы единой транспортной системы (адаптивные светофоры, динамическая маршрутизация, проактивное обслуживание и управление инцидентами).

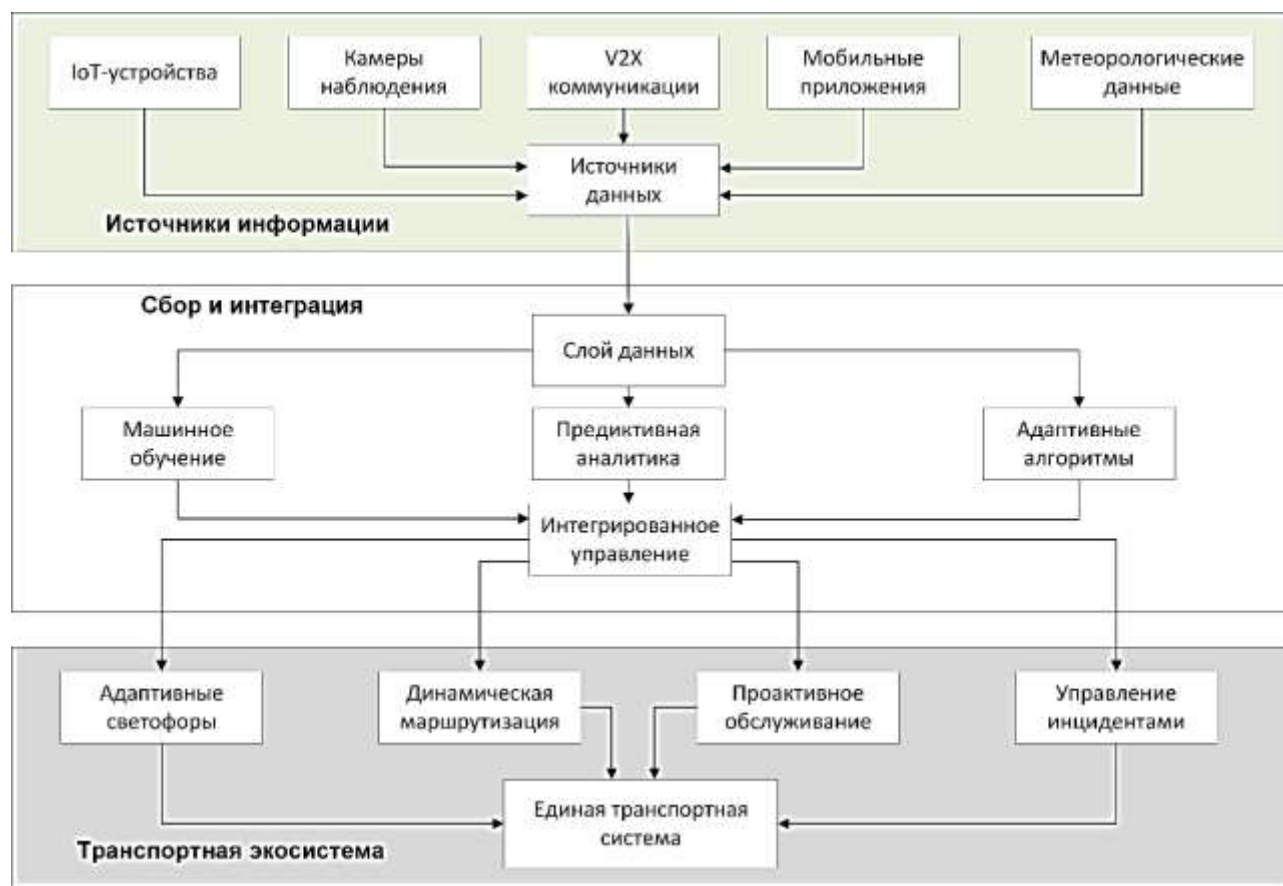


Рисунок 1 - Модель снижения фрагментарности в транспортных системах с использованием ИИ

Диаграмма наглядно демонстрирует, как ИИ выступает связующим звеном между разрозненными источниками данных и компонентами транспортной инфраструктуры, преодолевая фрагментарность и формируя единую интегрированную систему.

Необходимо отметить, что внедрение систем искусственного интеллекта в транспортную инфраструктуру сопряжено с рядом ограничений. Среди них наиболее существенными являются вопросы обеспечения кибербезопасности интегрированных систем и этические аспекты автоматизации принятия решений, особенно в ситуациях с неизбежными потенциальными рисками [13]. Эти проблемы требуют разработки комплексных нормативных рамок, обеспечивающих как технологическую прозрачность алгоритмов принятия решений, так и надежную защиту персональных данных участников дорожного движения.

Дополнительным теоретическим аспектом является проблема масштабирования ИИ-решений. Согласно исследованиям, эффективность алгоритмов машинного обучения снижается экспоненциально при увеличении разнородности данных и расширении географического охвата, что создает дополнительные трудности при интеграции городских и региональных транспортных систем. Данное ограничение стимулирует развитие распределенных архитектур ИИ, где локальные модели обучаются независимо, но координируют решения через метаалгоритмы, что позволяет сохранить вычислительную эффективность при расширении масштабов [14, 15].

Таким образом, теоретическая основа применения ИИ для преодоления фрагментарности транспортных систем демонстрирует значительный потенциал, но требует комплексного подхода, учитывающего не только технологические возможности, но и нормативные, этические и масштабные аспекты внедрения.

**Результаты и обсуждение**

Анализ практического применения ИИ в транспортных системах позволил выявить существенное снижение фрагментарности за счет интеграции данных из разнородных источников. Наиболее показательные результаты были получены в высокоурбанизированных регионах с развитой телекоммуникационной инфраструктурой. Например, внедрение комплексных ИИ-платформ в транспортную систему Сингапура привело к значимым изменениям характеристик дорожного движения: в часы пиковой нагрузки время поездок сократилось на 20 %, а средняя скорость транспортного потока увеличилась с 18 до 21 км/ч [16]. Важно отметить, что данные улучшения были достигнуты без существенного изменения физической инфраструктуры, что свидетельствует о высоком потенциале оптимизации существующих транспортных связей посредством интеллектуальных систем управления.

В скандинавских странах, где климатические условия создают дополнительные сложности для управления транспортными потоками, применение алгоритмов машинного обучения позволило существенно повысить эффективность зимнего содержания дорог [17].

Экономические эффекты от внедрения адаптивных систем продемонстрированы в проекте, реализованном в США. Интеграция ИИ в управление светофорами снизила общее время задержки на 17,9 % при регулярных условиях трафика и на 23,5 % при нерегулярных условиях. Кроме того, общее количество остановок при определенных условиях уменьшилось на 7,8 % и 11,6 % соответственно. [18].

В ходе демонстрационного эксперимента в Шанхае применение адаптивных светофоров увеличило среднюю скорость движения с 22,68 км/ч до 26,55 км/ч. Время, проведенное в режимах торможения и холостого хода, уменьшилось, а время движения на крейсерской скорости увеличилось. В результате выбросы CO<sub>2</sub> снизились с 4,85 кг до 4,05 кг за поездку, что составляет сокращение на 16 % [19].

В результате сравнительного анализа традиционных и ИИ-ориентированных подходов было установлено, что интегрированные системы на основе искусственного интеллекта демонстрируют более высокую адаптивность к изменениям дорожно-транспортной обстановки, что особенно значимо в контексте экстремальных ситуаций, таких как массовые мероприятия, стихийные бедствия или масштабные транспортные аварии [20].

Внедрение искусственного интеллекта способствует устранению дисбаланса между статическими и динамическими параметрами. Например, гибридная система, сочетающая исторические данные и предиктивную аналитику, повышает точность выявления опасных участков. Однако в регионах с ограниченной IoT-инфраструктурой эффективность таких решений снижается, что подчеркивает важность технологической готовности [21].

**Выводы**

Полученные результаты демонстрируют, что интеграция искусственного интеллекта в транспортные системы способна существенно снизить фрагментарность за счет объединения и систематизации данных и оптимизации управления. Успешные проекты, такие как сингапурская платформа прогнозирования заторов или скандинавские алгоритмы зимнего обслуживания, подтверждают, что ИИ не только повышает точность анализа, но и обеспечивает проактивное управление рисками. Однако эффективность таких решений напрямую зависит от технологической готовности инфраструктуры, что объясняет снижение результативности в регионах с ограниченным доступом к IoT-устройствам [15].

Важным аспектом является соотношение между точностью прогнозирования и снижением аварийности, описанное логарифмической моделью. Даже умеренное повышение точности данных приводит к непропорционально большему снижению аварийности в условиях высокой плотности трафика [22]. Это подчеркивает ценность ИИ в урбанизированных зонах, где динамические факторы, такие как заторы или погодные изменения, играют решающую роль.

Экономические преимущества, например, снижение затрат на содержание светофоров в США, указывают на долгосрочную окупаемость инвестиций в ИИ [18]. Однако внедрение

таких систем требует не только финансовых ресурсов, но и пересмотра нормативных рамок. Этические вопросы, такие как защита персональных данных и прозрачность алгоритмов, также остаются важными барьерами. Проблемой также является то, что отсутствие доверия к ИИ-решениям может замедлить их внедрение, даже при наличии технологических возможностей [23].

Сравнение с предыдущими исследованиями выявляет некоторые противоречия. Например, более ранние работы [24] акцентируют роль стандартизации данных в преодолении фрагментарности, тогда как текущие результаты подчеркивают необходимость адаптивности алгоритмов [12]. Это указывает на эволюцию подходов: от унификации форматов к динамической интеграции разнородных источников.

Наблюдается также определенное расхождение в оценке временных горизонтов полномасштабного внедрения ИИ в транспортные системы. Прогнозы начала 2020-х годов предполагали более быстрое распространение автономных транспортных средств и интеллектуальных систем управления дорожным движением. Однако практика показала, что технологические и нормативные барьеры оказались более значительными, чем предполагалось изначально, что привело к пересмотру сроков внедрения в сторону их увеличения.

Для транспортных и дорожных администраций основной рекомендацией остается развитие гибридных моделей, сочетающих исторические данные с предиктивной аналитикой. Такие системы могут компенсировать недостатки статических методов без полного отказа от них [21]. Кроме того, важно учитывать региональную специфику: в зонах с низкой технологической оснащенностью, что характерно для многих регионов развивающихся стран, целесообразно поэтапное внедрение, начиная с пилотных проектов.

Важно отметить, что эффективность ИИ-решений напрямую зависит от технологической готовности инфраструктуры, что объясняет неравномерность результатов в различных регионах. В частности, снижение результативности наблюдается в зонах с ограниченным доступом к IoT-устройствам и системам телеметрии. Данное наблюдение согласуется с теоретической моделью цифровой зрелости транспортных систем, в которой выделяют пять стадий развития: от базового мониторинга до полностью автономного управления [25]. Большинство современных транспортных систем находятся на второй или третьей стадии, что ограничивает возможности полномасштабного внедрения ИИ и требует поэтапного подхода.

Ограничением исследования является фокус на развитых странах, где внедрение ИИ уже имеет заметную динамику. Для полноты картины требуются дальнейшие работы, изучающие культурные и институциональные факторы, влияющие на готовность к технологическим инновациям в развивающихся регионах.

В целом, обсуждение результатов подтверждает гипотезу о том, что искусственный интеллект представляет собой эффективный инструмент для преодоления фрагментарности транспортных систем, однако его успешное внедрение требует комплексного подхода, учитывающего технологические, нормативные, экономические и социальные аспекты. Задача интеграции разрозненных элементов в единую экосистему остается многомерной и требует междисциплинарного сотрудничества специалистов в области транспорта, информационных технологий, права и социальных наук.

Проведенное аналитическое исследование подтвердило, что искусственный интеллект обладает значительным потенциалом для преодоления фрагментарности транспортных систем. Интеграция данных из разрозненных источников, таких как IoT-устройства, камеры и подключенные автомобили, позволяет формировать единую информационную экосистему, что повышает точность прогнозирования аварийности и оптимизирует управление трафиком. Практические примеры, включая внедрение ИИ-платформ в Сингапуре и адаптивных систем зимнего обслуживания в Скандинавии, демонстрируют снижение аварийности и сокращение экономических затрат за счет минимизации простоев и энергопотребления [16, 17].

Эффективность ИИ-решений напрямую зависит от технологической готовности инфраструктуры. В регионах с развитой IoT-сетью достигается максимальная точность прогнозов, тогда как в зонах с ограниченным доступом к данным результаты снижаются. Это под-

черкивает необходимость поэтапного внедрения, начиная с пилотных проектов, и развития гибридных моделей, сочетающих исторические данные с динамической аналитикой.

Этические и нормативные аспекты, такие как защита персональных данных и прозрачность алгоритмов, до сих пор остаются значимыми барьерами. Для их преодоления требуется разработка унифицированных стандартов и законодательных положений, обеспечивающих доверие к ИИ-системам.

Перспективным направлением является дальнейшая интеграция ИИ с автономным транспортом и умными городами, что позволит создать адаптивные транспортные сети, способные оперативно реагировать на урбанизацию, климатические изменения и рост автомобилизации. Однако для полноценной реализации этих сценариев необходимы междисциплинарные исследования, учитывающие культурные и институциональные особенности различных регионов.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Ng V., Kim H. M. Autonomous vehicles and smart cities: A case study of Singapore/ Smart Cities for Technological and Social Innovation [Электронный ресурс] / Сетевой журнал. 2021. URL: <https://doi.org/10.1016/b978-0-12-818886-6.00014-9>.
2. Hatamzad M., Polanco G.C., Casselgren J. Intelligent cost-effective winter road maintenance by predicting road surface temperature using machine learning techniques [Электронный ресурс] / Knowledge-Based Systems: сетевой журнал. 2022. URL: <https://doi.org/10.1016/j.knosys.2022.108682>.
3. Global status report on road safety 2023. [Electronic resource] / World Health Organization. 2023. URL: <https://iris.who.int/bitstream/handle/10665/375016/9789240086517-eng.pdf>.
4. ITF Transport Outlook 2021 [Электронный ресурс] / International Transport Forum. 2021. URL: <https://www.itf-oecd.org/itf-transport-outlook-2021>.
5. Abdelati M.H. Smart Traffic Management for Sustainable Development in Cities: Enhancing Safety and Efficiency [Электронный ресурс] / International Journal of Advanced Engineering and Business Sciences. 2024. URL: <https://doi.org/10.21608/ijaeb.2024.242361.1088>.
6. Research Design: Qualitative, Quantitative, and Mixed Methods Approaches [Электронный ресурс] / SAGE Publications. 2018. URL: [https://www.ucg.ac.me/skladiste/blog\\_609332/objava\\_105202/fajlovi/Creswell.pdf](https://www.ucg.ac.me/skladiste/blog_609332/objava_105202/fajlovi/Creswell.pdf).
7. Бирюков В.К., Власов А.В., Демченко К.Н. Проблемы транспортных систем городов и возможные пути их решения [Электронный ресурс] / МНИЖ. 2015. №2-1(33). URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/problemy-transportnyh-sistem-gorodov-i-vozmozhnye-puti-ih-resheniya>.
8. O'Sullivan P., Patel T. Fragmentation in transport operations and the case for system integrity [Электронный ресурс] / Transport Policy: сетевой журнал. 2004. URL: <https://doi.org/10.1016/j.tranpol.2003.11.001>.
9. Богданович С.В., Николаева Р.В. Преодоление предвзятости в алгоритмах управления дорожным движением для обеспечения справедливости для всех участников [Электронный ресурс] / Автомобильные дороги и транспортная инфраструктура. 2024. №3(7). С. 93–103. EDN: LSLNMY.
10. The Geography of Transport Systems Sixth edition Jean-Paul Rodrigue. 2024. New York: Routledge. 402p.
11. Капский Д.В. Прогнозирование аварийности в дорожном движении: монография. Минск: Белорусский национальный технический университет, 2008. 243 с. EDN VRTZHK.
12. The Internet of Things for Smart Roads: A Road Map From Present to Future Road Infrastructure [Электронный ресурс] / IEEE Intelligent Transportation Systems Magazine: сетевой журнал. 2022. URL: <https://doi.org/10.1109/ITS.2021.3115126>.
13. Капский Д.В., Богданович С.В., Куренков П.В., Филиппова Н.А. Вопросы совершенствования транспортной отрасли в условиях развития подключённых транспортных средств [Электронный ресурс] / Интеллект. Инновации. Инвестиции. 2024. №3. С. 64–73. URL: <https://doi.org/10.25198/2077-7175-2024-3-64>.
14. Li Q., Zhou W., Zheng X. Distributed Learning in Intelligent Transportation Systems: A Survey [Электронный ресурс] / Information: сетевой журнал. 2024. URL: <https://doi.org/10.3390/info15090550>.
15. Wenyan Z. [at al.]. Predicting Urban Traffic Flow Based on Deep Meta-learning [Электронный ресурс] / Proceedings of the 2024 4th International Conference on Artificial Intelligence, Big Data and Algorithms. 2024. URL: <https://doi.org/10.1145/3690407.3690601>.
16. Srishti Dikshit S. [at al.] The Use of Artificial Intelligence to Optimize the Routing of Vehicles and Reduce Traffic Congestion in Urban Areas [Электронный ресурс] / EAI Endorsed Transactions on Energy Web: сетевой журнал. 2023. URL: <https://doi.org/10.4108/ew.4613>.
17. Hatamzad M., Polanco G.C., Casselgren J. Using Deep Learning to Predict the Amount of Chemicals Applied on the Wheel Track for Winter Road Maintenance [Электронный ресурс] / Applied Sciences: сетевой журнал. 2022. URL: <https://doi.org/10.3390/app12073508>.

18. Stevanovic A., Dakic I., Zlatkovic M. Comparison of adaptive traffic control benefits for recurring and non-recurring traffic conditions [Электронный ресурс] / IET Intelligent Transport Systems: сетевой журнал. 2016. URL: <https://doi.org/10.1049/iet-its.2016.0032>.
19. Wu K. [at al.]. Big-data empowered traffic signal control could reduce urban carbon emission [Электронный ресурс] / Nature Communications: сетевой журнал. 2025. URL: <https://doi.org/10.1038/s41467-025-56701-4>.
20. Abid S.K. [at al.]. Toward an Integrated Disaster Management Approach: How Artificial Intelligence Can Boost Disaster Management [Электронный ресурс] / Sustainability: сетевой журнал. 2021. URL: <https://doi.org/10.3390/su132212560>.
21. Xie J., Choi Y-K. Hybrid traffic prediction scheme for intelligent transportation systems based on historical and real-time data [Электронный ресурс] / International Journal of Distributed Sensor Networks: сетевой журнал. 2017. URL: <https://doi.org/10.1177/1550147717745009>.
22. Najafi M.G. [at al.]. Data-Driven Urban Traffic Accident Analysis and Prediction Using Logit and Machine Learning-Based Pattern Recognition Models [Электронный ресурс] / Mathematical Problems in Engineering: сетевой журнал. 2021. URL: <https://doi.org/10.1155/2021/9974219>.
23. AI Perspectives in Smart Cities and Communities to Enable Road Vehicle Automation and Smart Traffic Control [Электронный ресурс] / Smart Cities: сетевой журнал. 2021. URL: <https://doi.org/10.3390/smartcities4020040>.
24. J. Data-Driven Intelligent Transportation Systems: A Survey [Электронный ресурс] / IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems: сетевой журнал. 2011. URL: <https://doi.org/10.1109/TITS.2011.2158001>.
25. Капский Д.В., Ларин О.Н., Богданович С.В. Мегаполисы будущего или роль урбанистики в эпоху беспилотных автомобилей // Автомобильная промышленность. 2024. №11. С. 1-10. EDN CYSNYA.

**Капский Денис Васильевич**

Высшая аттестационная комиссия Республики Беларусь  
Адрес: 220072, Беларусь, г. Минск, пр-т Независимости, 66  
Д.т.н., профессор, заместитель Председателя ВАК  
E-mail: d.kapsky@bntu.by

**Богданович Сергей Валерьевич**

Белорусский национальный технический университет  
Адрес: 220013, Беларусь, г. Минск, пр-т Независимости, 65  
К.т.н., доцент, доцент кафедры «Транспортные системы и технологии»  
E-mail: oapdd\_atf@bntu.by

---

D.V. KAPSKI, S.V. BOGDANOVICH

## THE ROLE OF ARTIFICIAL INTELLIGENCE IN OVERCOMING THE FRAGMENTATION OF TRANSPORT SYSTEMS

**Abstract.** *The article examines the role of artificial intelligence (AI) in overcoming the fragmentation of transport systems. The methods of data integration, risk prediction, and adaptive management that allow combining disparate elements into a single ecosystem are analyzed. Practical examples from Singapore and Scandinavian countries demonstrate a 20-30% reduction in accident rates and optimization of traffic flows. The effectiveness of AI solutions depends on the technological readiness of the infrastructure, which requires phased implementation and development of hybrid models. Ethical and regulatory aspects of AI application in the transport sector are also considered.*

**Keywords:** *artificial intelligence, fragmentation, transport systems, data integration, adaptive management*

### BIBLIOGRAPHY

1. Ng V., Kim H. M. Autonomous vehicles and smart cities: A case study of Singapore/ Smart Cities for Technological and Social Innovation [Elektronnyy resurs] / Setevoy zhurnal. 2021. URL: <https://doi.org/10.1016/b978-0-12-818886-6.00014-9>.
2. Hatamzad M., Polanco G.C., Casselgren J. Intelligent cost-effective winter road maintenance by predicting road surface temperature using machine learning techniques [Elektronnyy resurs] / Knowledge-Based Systems: setevoy zhurnal. 2022. URL: <https://doi.org/10.1016/j.knosys.2022.108682>.
3. Global status report on road safety 2023. [Electronic resource] / World Health Organization. 2023. URL: <https://iris.who.int/bitstream/handle/10665/375016/9789240086517-eng.pdf>.
4. ITF Transport Outlook 2021 [Elektronnyy resurs] / International Transport Forum. 2021. URL: <https://www.itf-oecd.org/itf-transport-outlook-2021>.

5. Abdelati M.H. Smart Traffic Management for Sustainable Development in Cities: Enhancing Safety and Efficiency [Elektronnyy resurs] / International Journal of Advanced Engineering and Business Sciences. 2024. URL: <https://doi.org/10.21608/ijaebs.2024.242361.1088>.
6. Research Design: Qualitative, Quantitative, and Mixed Methods Approaches [Elektronnyy resurs] / SAGE Publications. 2018. URL: [https://www.ucg.ac.me/skladiste/blog\\_609332/objava\\_105202/fajlovi/Creswell.pdf](https://www.ucg.ac.me/skladiste/blog_609332/objava_105202/fajlovi/Creswell.pdf).
7. Biryukov V.K., Vlasov A.V., Demchenko K.N. Problemy transportnykh sistem gorodov i vozmozhnye puti ikh resheniya [Elektronnyy resurs] / MNIZH. 2015. №2-1(33). URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/problemy-transportnyh-sistem-gorodov-i-vozmozhnye-puti-ih-resheniya>.
8. O'Sullivan P., Patel T. Fragmentation in transport operations and the case for system integrity [Elektronnyy resurs] / Transport Policy: setevoy zhurnal. 2004. URL: <https://doi.org/10.1016/j.tranpol.2003.11.001>.
9. Bogdanovich S.V., Nikolaeva R.V. Preodolenie predvzyatosti v algoritmakh upravleniya dorozhnym dvizheniem dlya obespecheniya spravedlivosti dlya vseh uchastnikov [Elektronnyy resurs] / Avtomobil'nye dorogi i transportnaya infrastruktura. 2024. №3(7). S. 93-103. EDN: LSLNMY.
10. The Geography of Transport Systems Sixth edition Jean-Paul Rodrigue. 2024. New York: Routledge. 402p.
11. Kapskiy D.V. Prognozirovanie avariynosti v dorozhnom dvizhenii: monografiya. Minsk: Belorusskiy natsional'nyy tekhnicheskii universitet, 2008. 243 s. EDN VRTZHK.
12. The Internet of Things for Smart Roads: A Road Map From Present to Future Road Infrastructure [Elektronnyy resurs] / IEEE Intelligent Transportation Systems Magazine: setevoy zhurnal. 2022. URL: <https://doi.org/10.1109/ITS.2021.3115126>.
13. Kapskiy D.V., Bogdanovich S.V., Kurenkov P.V., Filippova N.A. Voprosy sovershenstvovaniya transportnoy otrasli v usloviyakh razvitiya podklyuchionnykh transportnykh sredstv [Elektronnyy resurs] / Intellect. Innovatsii. Investitsii. 2024. №3. S. 64-73. URL: <https://doi.org/10.25198/2077-7175-2024-3-64>.
14. Li Q., Zhou W., Zheng X. Distributed Learning in Intelligent Transportation Systems: A Survey [Elektronnyy resurs] / Information: setevoy zhurnal. 2024. URL: <https://doi.org/10.3390/info15090550>.
15. Wenyan Z. [at al.]. Predicting Urban Traffic Flow Based on Deep Meta-learning [Elektronnyy resurs] / Proceedings of the 2024 4th International Conference on Artificial Intelligence, Big Data and Algorithms. 2024. URL: <https://doi.org/10.1145/3690407.3690601>.
16. Srishti Dikshit S. [at al.]. The Use of Artificial Intelligence to Optimize the Routing of Vehicles and Reduce Traffic Congestion in Urban Areas [Elektronnyy resurs] / EAI Endorsed Transactions on Energy Web: setevoy zhurnal. 2023. URL: <https://doi.org/10.4108/ew.4613>.
17. Hatamzad M., Polanco G.C., Casselgren J. Using Deep Learning to Predict the Amount of Chemicals Applied on the Wheel Track for Winter Road Maintenance [Elektronnyy resurs] / Applied Sciences: setevoy zhurnal. 2022. URL: <https://doi.org/10.3390/app12073508>.
18. Stevanovic A., Dakic I., Zlatkovic M. Comparison of adaptive traffic control benefits for recurring and non-recurring traffic conditions [Elektronnyy resurs] / IET Intelligent Transport Systems: setevoy zhurnal. 2016. URL: <https://doi.org/10.1049/iet-its.2016.0032>.
19. Wu K. [at al.]. Big-data empowered traffic signal control could reduce urban carbon emission [Elektronnyy resurs] / Nature Communications: setevoy zhurnal. 2025. URL: <https://doi.org/10.1038/s41467-025-56701-4>.
20. Abid S.K. [at al.]. Toward an Integrated Disaster Management Approach: How Artificial Intelligence Can Boost Disaster Management [Elektronnyy resurs] / Sustainability: setevoy zhurnal. 2021. URL: <https://doi.org/10.3390/su132212560>.
21. Xie J., Choi Y-K. Hybrid traffic prediction scheme for intelligent transportation systems based on historical and real-time data [Elektronnyy resurs] / International Journal of Distributed Sensor Networks: setevoy zhurnal. 2017. URL: <https://doi.org/10.1177/1550147717745009>.
22. Najafi M.G. [at al.]. Data-Driven Urban Traffic Accident Analysis and Prediction Using Logit and Machine Learning-Based Pattern Recognition Models [Elektronnyy resurs] / Mathematical Problems in Engineering: setevoy zhurnal. 2021. URL: <https://doi.org/10.1155/2021/9974219>.
23. AI Perspectives in Smart Cities and Communities to Enable Road Vehicle Automation and Smart Traffic Control [Elektronnyy resurs] / Smart Cities: setevoy zhurnal. 2021. URL: <https://doi.org/10.3390/smartcities4020040>.
24. J. Data-Driven Intelligent Transportation Systems: A Survey [Elektronnyy resurs] / IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems: setevoy zhurnal. 2011. URL: <https://doi.org/10.1109/TITS.2011.2158001>.
25. Kapskiy D.V., Larin O.N., Bogdanovich S.V. Megapolis budushchego ili rol' urbanistiki v epokhu bespilotnykh avtomobiley // Avtomobil'naya promyshlennost'. 2024. №11. S. 1-10. EDN CYSNYA.

**Kapskiy Denis Vasilievich**

Higher Attestation Commission of the Republic of Belarus  
Address: 220072, Belarus, Minsk, Nezavisimosti Ave., 66  
Doctor of technical sciences  
E-mail: d.kapsky@bntu.by

**Bogdanovich Sergei Valerievich**

Belarusian National Technical University  
Address: 220013, Belarus, Minsk, Nezavisimosti Ave., 65  
Candidate of technical sciences  
E-mail: oapdd\_atf@bntu.by



УДК 629.083

doi: 10.33979/2073-7432-2025-3-2(90)-135-143

А.С. ГРИШИН, В.И. САРБАЕВ, С. ДЖОВАНИС

## ИМИТАЦИОННАЯ МОДЕЛЬ ПРОИЗВОДСТВЕННОГО ПРОЦЕССА ДИЛЕРСКОГО АВТОТЕХЦЕНТРА

**Аннотация.** В статье рассмотрены ключевые этапы создания имитационной модели производственного процесса автосервиса, представлена имитационная модель, разработанная на базе дилерского автотехцентра, построенная с помощью программы AnyLogic с использованием статистических данных, законов распределения случайных величин. Представлен план экспериментов и выполнена оценка эффективности принятых управленческих решений.

**Ключевые слова:** автотехцентр, имитационная модель, концептуальная модель, производственный процесс, план экспериментов, производственные участки

### Введение

Современный автомобильный рынок в период 2022-2025 г.г. существенно изменился. Автомобильные дилеры западных брендов продолжают обслуживать свою клиентскую базу, несмотря на фактический уход с рынка большинства автопроизводителей. Рынок активно приспосабливается к продаже и обслуживанию автомобилей китайских брендов. Эффективность бизнес-процессов обслуживания многих дилеров снизилась, ввиду отсутствия обновлений технической информации от производителей, обеспечения запасными частями, специализированным инструментом и программным обеспечением. Важным инструментом повышения эффективности производственных процессов дилерского автосервиса являются научно обоснованные модели производственных процессов предприятий автосервиса, что обусловило актуальность настоящего исследования.

### Материал и методы

Разработкой имитационных моделей автосервиса занимались многие исследователи: в работе [1] построена модель автосервиса по обслуживанию грузовых автомобилей, однако в ней не раскрыт сам производственный процесс обслуживания. В работе [2] построена модель, для выбора оптимального размещения автосервиса. В работе [3] рекомендуется использовать систему AnyLogic для разработки дискретно-событийных моделей, наиболее подходящих для систем массового обслуживания (СМО). В обзоре инструментальных средств для моделирования [4] авторы также выделяют AnyLogic, как одну из наиболее часто используемых систем для моделирования СМО.

Отдельное место в моделировании процессов автосервиса можно отвести моделям, использующим искусственный интеллект. Так в работе [5] построены алгоритмы оптимизации имитационных моделей на основе нейронных сетей, а в исследовании [6] нейронные сети предлагается использовать в качестве агентов. В работе [7] описываются различные варианты использования нейросетей в моделировании, в работе [8] описаны недостатки систем моделирования с использованием нейронных сетей, одним из которых является непредсказуемость результата. В исследовании [9] описаны результаты применения AnyLogic для создания системы цифрового мониторинга автосервиса с использованием нейросетей. В работе [10] описано применение искусственного интеллекта для повышения эффективности диагностирования автомобилей. Однако в исследовании [11] автор сравнил результаты использования модели, основанной на нейронных сетях, и модели, использующей традиционный математический аппарат и приемы, расхождение полученных результатов было признано незначительным.

В работе [12] имитационная модель автосервиса была разработана с использованием программного продукта Arena Rockwell, в результате проведенного эксперимента в крупном независимом автосервисе в течение дня были выявлены узкие места автосервиса: перегру-

женность сотрудников, занимающихся записью автомобилей и оформлением документов. В работе [13] на основе внедрения разработанной имитационной модели, выполненной средствами программы GPSS, были описаны решения по оптимизации структуры (увеличение количества ручных моек) автосервиса, тем же автором была построена модель участка уборочно-моечных работ [14]. В работе [15] в имитационной модели автосервиса были выделены производственные участки: ремонт, мойка и шиномонтаж, что делает ее применимой в основном для мелких дорожных автосервисов. В работе [16], несмотря на невысокую степень детализации модели, широко представлены графические средства программы AnyLogic для визуализации производственного процесса автосервиса.

В работе [17] имитационное моделирование успешно применено для совершенствования системы управления запасами дилерского предприятия. В работе [18] выделены предположения использования имитационного моделирования при кооперации работ между АТП и автосервисом. В исследовании [19] на основе применения имитационных моделей также предложены мероприятия для повышения экономической эффективности предприятия автосервиса. В работе [20] широко представлены возможности AnyLogic для моделирования различных производственных процессов и описана методика моделирования. В работе [21] показана важность математического моделирования потребности в запасных частях.

В вышеперечисленных исследованиях авторы зачастую не учитывали стратегические приоритеты предприятий, особенности работы автодилеров, а также мало уделено внимания средствам автоматизации.

Также будем учитывать, что современное предприятие может обслуживать любые марки автомобилей, однако приоритетами остаются марки, на которых предприятие фокусируется в своей стратегии.

### ***Теория и расчёт***

Основными этапами разработки имитационной модели являются: формулировка проблемы, сбор исходных данных и определение границ моделирования, разработка концептуальной модели, разработка компьютерной модели, создание плана экспериментов и его реализация, оценка результатов и принятие управленческих решений. В целом проработка каждого из этапов должна происходить последовательно и циклично.

При смене обслуживаемого бренда необходимо, с одной стороны, сохранять клиентскую базу текущего бренда, с другой стороны, удерживать и привлекать растущие парки продаваемых брендов, а также корпоративные парки (каршеринг, лизинг), численность которых стремительно увеличивается, в том числе, за счет изменения модели потребления (сокращения количества индивидуальных пользователей автомобилей). Для решения данных задач необходимо четко представлять загрузку производственных участков автосервиса, минимизируя количество очередей и простоев автомобилей, не допуская дефицита загрузки.

Объектом исследования выбрана дилерская станция по обслуживанию автомобилей Тойота, на которой, для поддержания загрузки производственных мощностей, были выделены площади для обслуживания автомобилей китайского бренда Geely. Предприятие приняло решение также обслуживать крупные корпоративные парки (каршеринговые и лизинговые компании), с которыми были заключены соответствующие договора и автомобили частных клиентов всех марок. Отличительными особенностями станции являются наличие автоматической (роботизированной) мойки и терминала самообслуживания для сдачи автомобиля в ремонт, наряду с постами ручной мойки и классической приемкой.

На рисунке 1 пунктиром выделены границы моделирования в типовом семиэтапном процессе обслуживания клиента (который используется на дилерских станциях Тойота и некоторых других). Начальной границей является заезд автомобиля в автотехцентр, конечной границей - выдача автомобиля после проведения обслуживания.



Рисунок 1 - Определение границ моделирования

Необходимо также задать временные интервалы записи автомобилей на обслуживание. Рассматривать будем автомобили, приезжающие на ТО и ТР, диагностику и шиномонтаж.

Поскольку за 1 рабочий день данные будут незначительны, для сопоставления результатов моделирования будем брать совокупные данные периодом в 1 месяц. Модельное время будет выражаться в часах.

Концептуальная модель предоставления услуг предприятия автосервиса представлена на рисунке 2.

Поток заявок автомобилей частных лиц, мелких и средних корпоративных клиентов, поступающий в единый центр записи на обслуживание, распределяется по обслуживаемым брендам, отдельным каналом приема является киоск, в котором клиент самостоятельно сдает свой автомобиль на обслуживание без помощи сервисного консультанта. Автомобили каршеринга поступают на выделенный канал приема автомобилей (на данный канал поступают все марки и модели автомобилей, принадлежащие каршеринговым компаниям).

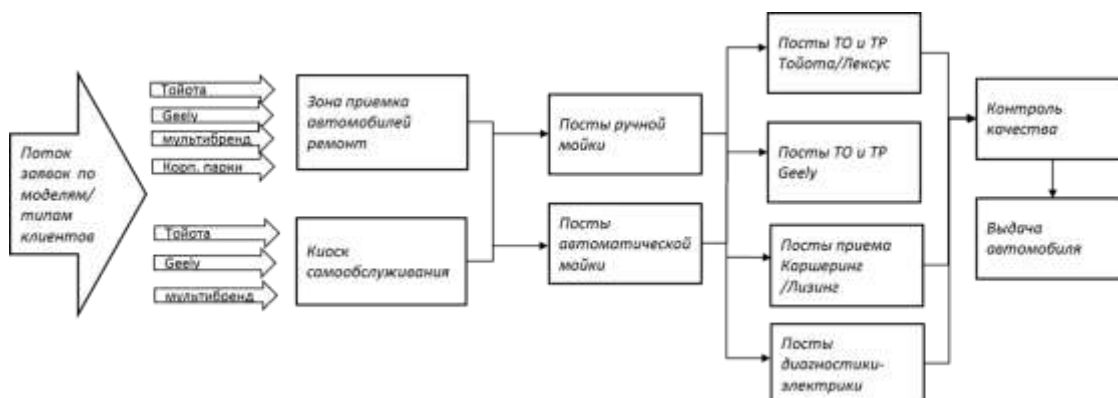


Рисунок 2 - Структурная схема концептуальной модели предоставления услуг предприятием автосервиса

Далее автомобили поступают на посты мойки. На постах автоматической мойки производится техническая мойка автомобилей (бесплатная для клиентов), на постах ручной мойки производится платная мойка автомобилей, однако в пиковые часы загрузки, при наличии существенной очереди на автоматическую мойку, работы по технической мойке могут выполняться и на ручной мойке, для сокращения очереди на мойку автомобилей.

Далее автомобили поступают на посты ТО и ТР, диагностики или шиномонтажа. При этом, автомобили каршеринга обслуживаются на специально выделенных постах специально выделенными механиками. В исключительных случаях, при наличии существенной очереди, автомобили каршеринга могут обслуживаться на других постах ТО и ТР (при их простое в ожидании автомобилей). Услуга шиномонтажа занимает пост ТО и ТР для снятия и установ-

ки колес. Таким образом, пост шиномонтажа может быть занят только совместно с постом ТО и ТР.

Далее, все автомобили проходят контроль качества выполненных работ, и поступают на посты уборки автомобилей, а затем выдаются клиентам в зоне выдачи.

Автомобили поступают на предприятия с вероятностями  $p_1, p_2, \dots, p_n$ , интервалы времени между заездами автомобилей одной и той же марки случайны. Каждая модель автомобиля может требовать одного из видов ремонта  $a_1, a_2, \dots, a_k$ .

Поскольку дилерский автосервис не является узкоспециализированным предприятием и вынужден оказывать широкий спектр услуг, что является одним из его преимуществ перед серыми дилерами, в штате слесарного цеха предприятия обязательно должны находиться высококвалифицированные специалисты, способные выполнять ремонт ДВС (мотористы), автомеханики по ремонту автомобилей крупных корпоративных парков (каршеринг), автомеханики ТО и ТР частных клиентов, электрики-диагносты.

Однако, поскольку поток автомобилей с ремонтом ДВС не является постоянным явлением для дилерских станций, предприятие не может держать большой штат мотористов, в связи с чем в свободное от ремонта ДВС время такие высококвалифицированные специалисты могут иметь проблемы с загрузкой.

Механики каршеринга обслуживают автомобили каршеринга. Если они заняты, заявки переходят к обычным механикам.

Обычные механики делают ТО и ТР частных клиентов.

Диагност-электрик обслуживают только автомобили с типом работ диагностика.

Для построения компьютерной имитационной модели, выделим основные параметры и закономерности, выявленные по результатам анализа статистических данных прошлых периодов:

–экспоненциальному закону подчинены: интервалы между поступлениями автомобилей (Тр), время выполнения ремонтных работ механиками (Тп1..Тпn);

–нормальному закону: время приемки автомобилей ручной (Т1 и То1) и киоска самообслуживания (Тк1 и То2), время автоматической (ТмА, ТмАо) и ручной мойки (ТмР, ТмРо);

– $p_1 \dots p_4$  – вероятности заезда автомобилей (Марка1 - Toyota, Марка2 - Geely, Мультибренд, Корпоративные парки);

– $p_{1n} \dots p_{np} \dots p_{nn}$  – вероятности поступления по типам автомобиля и видам ремонта;

–Автомеханики специализируются по маркам авто (Марка 1 – Тойота и Лексус, Марка 2 - Geely, Корпоративные парки);

–количество механиков: колМехаников1..3, соответственно. Приоритет в загрузке механиков отдается механикам Тойота. Все диагностические работы выполняются на универсальных постах диагностики (колМехаников4).

Компьютерная имитационная модель производственного процесса автосервиса представлена на рисунке 3.

Для планирования экспериментов используем встроенный в AnyLogic эксперимент Монте-Карло.

Проведем серию экспериментов Монте-Карло, для определения необходимых мер по достижению оптимальной загрузки производственных участков.

Рассчитаем оптимальное количество прогонов модели по формуле (1).

$$N = t_{\alpha}^2 \frac{p(1-p)}{\varepsilon^2}. \quad (1)$$

Для получения результатов с точностью  $\varepsilon=0,01$  и доверительной вероятностью  $\alpha=0.95$  необходимо сделать 9604 прогонов модели.

Исследуем работу предприятия в течение 1 месяца работы. Минимально допустимым порогом загрузки участков будем считать 0.5, максимально допустимым 0.9. При текущем количестве автомобиле-заездов целевых значений (0.70-0.80) по загрузке не достигают: уча-

сток приемки, киоск самообслуживания, участок ручной мойки, участок автоматической мойки, загрузка механиков (2, 3 и 4 участков: Geely, Мультибренд, Диагностика).

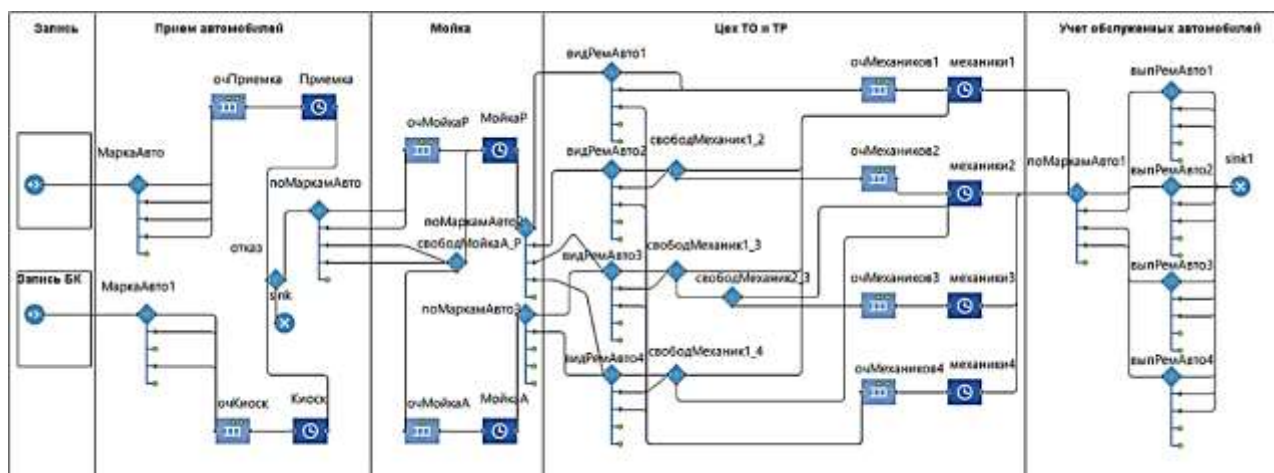


Рисунок 3 - Компьютерная имитационная модель дилерского автотехцентра в программе AnyLogic

В ходе дальнейших исследований была проведена серия экспериментов.

Эксперимент №1 заключается в сокращении количества постов приёма (на 1 пост) и увеличении стандарта времени на работу с клиентом (на 5 минут). Результаты прогонов модели до и после корректировки постов приемки представлены на рисунке 4.

КоэфИспПриемки					КоэфИспПриемки				
до изменений					после изменений				
Кол-во	9,604				Кол-во	9,604			
Среднее	0,435				Среднее	0,615			
Мин	0,081				Мин	0,132			
Макс	0,928				Макс	0,994			
Среднеквадр. отклонение	0,113				Среднеквадр. отклонение	0,148			
Доверит. интервал для среднего	0,002				Доверит. интервал для среднего	0,005			
Сумма	4,175,315				Сумма	3,902,791			
От	До	Плотность вероятности	функция распределения		От	До	Плотность вероятности	функция распределения	
0	0,1	1	1		0,1	0,2	6	6	
0,1	0,2	104	105		0,2	0,3	114	120	
0,2	0,3	993	1,098		0,3	0,4	587	707	
0,3	0,4	2,697	3,795		0,4	0,5	1,527	2,234	
0,4	0,5	3,196	6,991		0,5	0,6	2,242	4,476	
0,5	0,6	1,847	8,838		0,6	0,7	2,503	6,779	
0,6	0,7	627	9,465		0,7	0,8	1,714	8,495	
0,7	0,8	126	9,591		0,8	0,9	863	9,356	
0,8	0,9	11	9,602		0,9	1	248	9,604	
0,9	1	2	9,604						

Рисунок 4 - Результаты эксперимента №1: сокращение постов приемки

Эксперимент №2 заключается в сокращении постов ручной мойки на 2 поста. Результаты изменений представлены на рисунке 5.

КоэфИспМойкаР					КоэфИспМойкаР				
до изменений					после изменений				
Кол-во	9,604				Кол-во	9,604			
Среднее	0,445				Среднее	0,782			
Мин	0,137				Мин	0,278			
Макс	0,825				Макс	0,996			
Среднеквадр. отклонение	0,09				Среднеквадр. отклонение	0,111			
Доверит. интервал для среднего	0,002				Доверит. интервал для среднего	0,003			
Сумма	4,269,689				Сумма	7,508,946			
От	До	Плотность вероятности	функция распределения		От	До	Плотность вероятности	функция распределения	
0,1	0,2	4	4		0,2	0,3	1	1	
0,2	0,3	401	405		0,3	0,4	4	5	
0,3	0,4	2,753	3,158		0,4	0,5	103	108	
0,4	0,5	3,968	7,126		0,5	0,6	543	651	
0,5	0,6	1,999	9,125		0,6	0,7	1,564	2,215	
0,6	0,7	424	9,549		0,7	0,8	2,832	5,047	
0,7	0,8	53	9,602		0,8	0,9	3,085	8,132	
0,8	0,9	2	9,604		0,9	1	1,472	9,604	

Рисунок 5 - Результаты эксперимента №2: сокращение постов ручной мойки

Эксперимент №3 заключается в перераспределении автомехаников по видам работ.

По одному механику из бригады Geely и Корпоративные парки переведены в бригаду механиков группы Toyota, т.к. текущая загрузка в пиковые периоды может привести к увеличению времени ожидания ремонта. Результаты эксперимента представлены на рисунке 6.



<b>Коэффициент Mex1</b> Кол-во 9,604 Среднее 0,794 Мин 0,458 Макс 0,94 Среднеквадр. отклонение 0,063 Доверит. интервал для среднего 0,001 Сумма 7,627,385					<b>Коэффициент Mex1</b> Кол-во 9,604 Среднее 0,741 Мин 0,366 Макс 0,938 Среднеквадр. отклонение 0,074 Доверит. интервал для среднего 0,001 Сумма 7,118,634				
до изменений					после изменений				
От	До	Плотность вероятности	Функция распр		От	До	Плотность вероятности	Функция распр	
0,4	0,5	4			0,3	0,4	2		
0,5	0,6	72	76		0,4	0,5	39	41	
0,6	0,7	664	740		0,5	0,6	398	439	
0,7	0,8	3,969	4,709		0,6	0,7	2,075	2,514	
0,8	0,9	4,729	9,438		0,7	0,8	4,931	7,445	
0,9	1	166	9,604		0,8	0,9	2,140	9,585	
					0,9	1	19	9,604	

<b>Коэффициент Mex2</b> Кол-во 9,604 Среднее 0,518 Мин 0 Макс 0,902 Среднеквадр. отклонение 0,151 Доверит. интервал для среднего 0,003 Сумма 1,979,059					<b>Коэффициент Mex2</b> Кол-во 9,604 Среднее 0,477 Мин 0,029 Макс 0,905 Среднеквадр. отклонение 0,145 Доверит. интервал для среднего 0,003 Сумма 1,585,597				
до изменений					после изменений				
От	До	Плотность вероятности	Функция распр		От	До	Плотность вероятности	Функция распр	
0	0,1	23	23		0	0,1	25	25	
0,1	0,2	158	181		0,1	0,2	229	254	
0,2	0,3	628	905		0,2	0,3	988	1,209	
0,3	0,4	1,398	2,203		0,3	0,4	1,775	2,975	
0,4	0,5	2,044	4,247		0,4	0,5	2,247	5,222	
0,5	0,6	2,237	6,484		0,5	0,6	2,313	7,535	
0,6	0,7	1,951	8,435		0,6	0,7	1,496	9,031	
0,7	0,8	1,003	9,438		0,7	0,8	531	9,562	
0,8	0,9	164	9,602		0,8	0,9	41	9,603	
0,9	1	2	9,604		0,9	1	1	9,604	

<b>Коэффициент Mex3</b> Кол-во 9,604 Среднее 0,494 Мин 0 Макс 0,999 Среднеквадр. отклонение 0,316 Доверит. интервал для среднего 0,004 Сумма 4,762,097					<b>Коэффициент Mex3</b> Кол-во 9,604 Среднее 0,277 Мин 0 Макс 0,835 Среднеквадр. отклонение 0,129 Доверит. интервал для среднего 0,003 Сумма 2,655,953				
до изменений					после изменений				
От	До	Плотность вероятности	Функция распр		От	До	Плотность вероятности	Функция распр	
-2,776E-17	0,1	418	418		0,1	0,2	747	747	
0,1	0,2	952	952		0,2	0,3	2,042	2,789	
0,2	0,3	954	1,886		0,3	0,4	2,884	4,678	
0,3	0,4	1,324	3,210		0,4	0,5	2,246	6,924	
0,4	0,5	1,807	4,717		0,5	0,6	1,104	8,128	
0,5	0,6	1,674	6,391		0,6	0,7	346	9,476	
0,6	0,7	1,434	7,825		0,7	0,8	102	9,578	
0,7	0,8	1,038	8,863		0,8	0,9	25	9,603	
0,8	0,9	575	9,438		0,9	1	1	9,604	
0,9	1	166	9,604						

Рисунок 6 - Результаты эксперимента №3: перераспределение механиков по видам работ

### Результаты и обсуждение

– Коэффициент загрузки приемки увеличился до целевого значения с 0.43 до 0.61 и, хотя загрузка не достигла целевого значения, дальнейшее сокращение количества постов может привести к снижению пропускной способности в пиковых нагрузках.

– Коэффициент загрузки ручной мойки увеличился до целевого значения с 0.44 до 0.78.

– В пиковые нагрузки для мойки автомобилей частных клиентов Toyota и Geely может быть использована автоматическая мойка.

– Коэффициент загрузки механиков Toyota снизился от 0.79 до 0.74, коэффициенты загрузки механиков 2 и 3 групп увеличились до 0.52 и 0.49 (дальнейшее снижение количества механиков невозможно из-за ограничений дистрибьютора и стандартов обслуживания клиентов корпоративных парков).

### Выводы

– результаты моделирования использованы для практической оптимизации производственных участков дилерского автотехцентра и повышения производительности труда сотрудников. Расчётный эффект составил более 400 тысяч рублей в месяц (сокращение ФОТ и затрат на субподрядные работы по мойке автомобилей);

– модель может быть использована на любых мультибрендовых предприятиях автосервиса либо на монобрендовых предприятиях, находящихся в переходном периоде (от одной марки к другой);

– модель не учитывает задержки автомобилей на станции при отсутствии необходимых запасных частей (что планируется доработать в будущем);

– необходима доработка модели для автоматизации расчёта экономической эффективности от вносимых корректировок, в том числе изменения прибыли в зависимости от долей распределения обслуживаемых марок и клиентов, а также вероятности выбора клиентами определённых категорий запасных частей (оригинальных, OEM, неоригинальных).

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Тимченко В.С. Структура имитационной модели автосервиса // Современные проблемы транспортного комплекса России. 2016. Т. 6. №2. С. 46-50.
2. Хабибуллин Р.Г., Макарова И.В. Имитационное моделирование автосервиса // Мир транспорта. 2008. Т. 6. №3(23). С. 110-115.
3. Вьюненко Л.Ф., Михайлов М.В., Первозванская Т.Н. Имитационное моделирование: учебник и практикум для вузов. Москва: Юрайт, 2024. 283 с.
4. Груданов Н.А., Груданова А.А. Обзор инструментальных средств для имитационного моделирования // StudNet. 2021. Т. 4. №7. С. 185. EDN EXRTCK.
5. Афонин П.В., Ламскова О.Ю. Алгоритмы оптимизации имитационных моделей сложных систем на основе нейронных сетей // Известия ЮФУ. Технические науки. 2009. №12(101). С. 226-232. EDN LAUDXH.
6. Замятина Е.Б., Каримов Д.Ф., Митраков А.А. Архитектура агентно-ориентированной системы имитации с агентами, основанными на нейронных сетях // Информатизация и связь. 2014. №2. С. 89-97. EDN SKSSAF.
7. Сергеев А.П., Тарасов Д.А. Введение в нейросетевое моделирование: учеб. пособие. Екатеринбург: Урал. ун-та, 2017. 128 с.
8. Гладышев А.И., Жуков А.О. Достоинства и недостатки имитационного моделирования с использованием нейронных сетей // Вестник Российского нового университета. Серия: Сложные системы: модели, анализ и управление. 2013. №4. С. 53-55. EDN RLYGVF.
9. Егельский В.В., Николаев Н.Н., Егельская Е.В., Панфилова Э.А. Система цифрового мониторинга безопасности для авторемонтного предприятия // Безопасность техногенных и природных систем. 2025. Т. 9. №1. С. 55-64. DOI 10.23947/2541-9129-2025-9-1-55-64. EDN HDWZAF.
10. Зиманов Л.Л., Карагодин В.И., Кондратьев И.В. [и др.] Повышение достоверности диагностирования автомобилей и транспортно-технологических машин с применением искусственного интеллекта // Транспортное дело России. 2024. №2. С. 189-191. EDN VYXXUJ.
11. Лабинский А.Ю. Моделирование системы массового обслуживания с использованием нейронной сети // Вестник Санкт-Петербургского университета Государственной противопожарной службы МЧС России. 2019. №2. С. 52-57. EDN NLKXAS.
12. Запекин С.О., Ревина И.В. Имитационное моделирование процесса обслуживания клиентов в автосервисе // ИТ. Наука. креатив: Материалы I Международного форума: в 5-ти томах. Москва: ООО «Издательско-книготорговый центр «Колос-с», 2024. С. 475-482. EDN EGYBXU.
13. Монтик С.В., Санюкевич Ф.М., Головач А.П. Оптимизация структуры подразделений организаций автосервиса с использованием имитационного моделирования // Вестник Брестского государственного технического университета. Серия: Машиностроение. 2019. №4(117). С. 69-72. EDN GLXZPA.
14. Монтик С.В. Имитационное моделирование зоны уборочно-моечных работ автосервиса // Автомобилестроение: проектирование, конструирование, расчет и технологии ремонта и производства: Материалы VII Всероссийской научно-практической конференции. Ижевск: Ижевский государственный технический университет имени М.Т. Калашникова. 2023. С. 374-378. EDN NFHYDR.
15. Мартынов Е.А., Минаева Н.В. Имитационное моделирование автосервиса // Инновационное развитие техники и технологий в промышленности (ИНТЕКС-2022): Сборник материалов Всероссийской научной конференции молодых исследователей с международным участием. Ч. 3. Москва: ФГБОУ ВО «Российский государственный университет имени А.Н. Косыгина (Технологии. Дизайн. Искусство)». 2022. С. 152-156. EDN YLJAZO.
16. Дулина Я.Р. Имитационное моделирование работы системы автосервиса средствами программы AnyLogic // XVIII Всероссийская научно-практическая конференция молодых ученых, аспирантов и студентов в г. Нерюнгри, с международным участием, посвященной 25-летию со дня образования Технического института (филиала) СВФУ: Материалы конференции. Нерюнгри: Технический институт (филиал) ФГБОУ ВО «Северо-Восточный федеральный университет имени М.К. Аммосова». 2017. С. 276-280. EDN ZNWMVB.
17. Бугримов В.А., Кондратьев А.В., Сарбаев В.И. Совершенствование методов обеспечения запасными частями станций технического обслуживания // Информационные технологии и инновации на транспорте: Материалы 4-ой Международной научно-практической конференции. Орел: ОГУ имени И.С. Тургенева. 2019. С. 255-263. EDN LYMGNA.
18. Сарбаев В.И., Болдин А.П., Чусова А.С. Методические предпосылки имитационного моделирования процессов кооперации работ по то и ремонту автомобилей между АТП и сто // Мир транспорта и технологических машин. 2024. №2-1(85). С. 66-73. DOI 10.33979/2073-7432-2024-2-1(85)-66-73. EDN RJPFHO.
19. Гринченко А.В., Погодина Е.К. Имитационное моделирование обслуживания автомобилей в автосервисе // Вестник Липецкого государственного технического университета. 2021. №3(46). С. 60-73. DOI 10.53015/23049235\_2021\_3\_60. EDN JRAADV.
20. Боев В.Д. Моделирование в среде AnyLogic: учебное пособие для вузов. Москва: Юрайт, 2024. 298 с.



21. Гулый В.В., Солнцев А.А., Асоян А.Р., Ершов В.С. Разработка математической модели прогнозирования потребности в запасных частях при управлении дилерской сети СТО // Мир транспорта и технологических машин. 2022. №2(77). С. 125-134. DOI 10.33979/2073-7432-2022-77-2-125-134. EDN WCHNPZ.

**Гришин Александр Сергеевич**

Московский политехнический университет  
Адрес: 107023, Россия, Москва, ул. Б. Семеновская, 38  
К.т.н., докторант  
E-mail: agrishin@toyotabc.ru

**Сарбаев Владимир Иванович**

Московский политехнический университет  
Адрес: 107023, Россия, Москва, ул. Б. Семеновская, 38  
Д.т.н., профессор  
E-mail: visarbaev@gmail.com

**Джованис Симос**

Московский политехнический университет  
Адрес: 107023, Россия, Москва, ул. Б. Семеновская, 38  
Аспирант  
E-mail: singmanos@yahoo.com

---

A.S. GRISHIN, V.I. SARBAYEV, S. TZJOVANISS

## **SIMULATION MODEL OF THE PRODUCTION PROCESS OF A CAR DEALERSHIP**

**Abstract.** *The article discusses the key stages of creating a simulation model of the car service's production process, presents a simulation model developed on the basis of an auto dealer center, built using the AnyLogic program using statistical data and random variable distribution laws. An experiment plan is presented and an assessment of the effectiveness of the management decisions made is carried out.*

**Keywords:** *automotive technology center, simulation model, conceptual model, production process, experimental plan, production sites*

## **BIBLIOGRAPHY**

1. Timchenko V.S. Struktura imitatsionnoy modeli avtoservisa // Sovremennye problemy transport-nogo kompleksa Rossii. 2016. T. 6. №2. S. 46-50.
2. Habibullin R.G., Makarova I.V. Imitatsionnoe modelirovanie avtoservisa // Mir transporta. 2008. T. 6. №3(23). S. 110-115.
3. V'yunenko L.F., Mikhaylov M.V., Pervozvanskaya T.N. Imitatsionnoe modelirovanie: uchebnik i praktikum dlya vuzov. Moskva: YUrayt, 2024. 283 s.
4. Grudanov N.A., Grudanova A.A. Obzor instrumental'nykh sredstv dlya imitatsionnogo modelirovaniya // StudNet. 2021. T. 4. №7. S. 185. EDN EXRTCK.
5. Afonin P.V., Lamskova O.YU. Algoritmy optimizatsii imitatsionnykh modeley slozhnykh sistem na osnove neyronnykh setey // Izvestiya YUFU. Tekhnicheskie nauki. 2009. №12(101). S. 226-232. EDN LAUDXH.
6. Zamyatina E.B., Karimov D.F., Mitrakov A.A. Arkhitektura agentno-orientirovannoy sistemy imitatsii s agentami, osnovannymi na neyronnykh setyakh // Informatizatsiya i svyaz'. 2014. №2. S. 89-97. EDN SKSSAF.
7. Sergeev A.P., Tarasov D.A. Vvedenie v neyrosetevoe modelirovanie: ucheb. posobie. Ekaterinburg: Ural. un-ta, 2017. 128 s.
8. Gladyshev A.I., Zhukov A.O. Dostoinstva i nedostatki imitatsionnogo modelirovaniya s ispol'zovaniem neyronnykh setey // Vestnik Rossiyskogo novogo universiteta. Seriya: Slozhnye sistemy: modeli, analiza i upravlenie. 2013. №4. S. 53-55. EDN RLYGVF.
9. Egel'skiy V.V., Nikolaev N.N., Egel'skaya E.V., Panfilova E.A. Sistema tsifrovogo monitoringa bezopasnosti dlya avtoremontnogo predpriyatiya // Bezopasnost' tekhnogennykh i prirodnykh sistem. 2025. T. 9. №1. S. 55-64. DOI 10.23947/2541-9129-2025-9-1-55-64. EDN HDWZAF.
10. Zimanov L.L., Karagodin V.I., Kondrat'ev I.V. [i dr.] Povyshenie dostovernosti diagnostirovaniya avto-

mobiley i transportno-tekhnologicheskikh mashin s primeneniem iskusstvennogo intellekta // Trans-portnoe delo Rossii. 2024. №2. S. 189-191. EDN VYXXUJ.

11. Labinskiy A.YU. Modelirovanie sistemy massovogo obsluzhivaniya s ispol'zovaniem neyronnoy seti // Vestnik Sankt-Peterburgskogo universiteta Gosudarstvennoy protivopozharnoy sluzhby MCHS Rossii. 2019. №2. S. 52-57. EDN NLKXAS.

12. Zapekin S.O., Revina I.V. Imitatsionnoe modelirovanie protsessa obsluzhivaniya klientov v avto-servise // IT. Nauka. kreativ: Materialy I Mezhdunarodnogo foruma: v 5-ti tomakh. Moskva: OOO "Izdatel'-sko-knigotorgovyy tsentr "Kolos-s", 2024. S. 475-482. EDN EGYBXY.

13. Montik S.V., Sanyukevich F.M., Golovach A.P. Optimizatsiya struktury podrazdeleniy organizatsiy avtoservisa s ispol'zovaniem imitatsionnogo modelirovaniya // Vestnik Brestskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. Seriya: Mashinostroenie. 2019. №4(117). S. 69-72. EDN GLXZPA.

14. Montik S.V. Imitatsionnoe modelirovanie zony uborochno-moechnykh работ avtoservisa // Avtomobilestroenie: proektirovanie, konstruirovaniye, raschet i tekhnologii remonta i proizvodstva: Materialy VII Vserossiyskoy nauchno-prakticheskoy konferentsii. Izhevsk: Izhevskiy gosudarstvennyy tekhnicheskoy uni-versitet imeni M.T. Kalashnikova. 2023. S. 374-378. EDN NFHYDR.

15. Martynov E.A., Minaeva N.V. Imitatsionnoe modelirovanie avtoservisa // Innovatsionnoe razvi-tie tekhniki i tekhnologii v promyshlennosti (INTEKS-2022): Sbornik materialov Vserossiyskoy nauchnoy konferentsii molodykh issledovateley s mezhdunarodnym uchastiem. CH. 3. Moskva: FGBOU VO "Rossiyskiy gos-udarstvennyy uni-versitet imeni A.N. Kosygina (Tekhnologii. Dizayn. Iskustvo)". 2022. S. 152-156. EDN YLJAZO.

16. Dulina YA.R. Imitatsionnoe modelirovanie raboty sistemy avtoservisa sredstvami programmy AnyLogic // XVIII Vserossiyskaya nauchno-prakticheskaya konferentsiya molodykh uchenykh, aspirantov i studentov v g. Neryungri, s mezhdunarodnym uchastiem, posvyashchennoy 25-letiyu so dnya obrazovaniya Tekhnicheskogo institu-ta (filiala) SVFU: Materialy konferentsii. Neryungri: Tekhnicheskoy institut (filial) FGBOU VO "Seve-ro-Vostochnyy federal'nyy universitet imeni M.K. Ammosova". 2017. S. 276-280. EDN ZNWMBB.

17. Bugrimov V.A., Kondrat'ev A.V., Sarbaev V.I. Sovershenstvovanie metodov obespecheniya zapasny-mi chastyami stantsiy tekhnicheskogo obsluzhivaniya // Informatsionnye tekhnologii i innovatsii na transporte: Materialy 4-oy Mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii. Orel: OGU imeni I.S. Turgeneva. 2019. S. 255-263. EDN LYMGNA.

18. Sarbaev V.I., Boldin A.P., Chusova A.S. Metodicheskie predposylki imitatsionnogo modelirovaniya protsessov kooperatsii rabot po to i remontu avtomobiley mezhdru ATP i sto // Mir transporta i tekhnologicheskikh mashin. 2024. №2-1(85). S. 66-73. DOI 10.33979/2073-7432-2024-2-1(85)-66-73. EDN RJPFHO.

19. Grinchenko A.V., Pogodina E.K. Imitatsionnoe modelirovanie obsluzhivaniya avtomobiley v avto-servise // Vestnik Lipetskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. 2021. №3(46). S. 60-73. DOI 10.53015/23049235\_2021\_3\_60. EDN JRAADV.

20. Boev V.D. Modelirovanie v srede AnyLogic: uchebnoe posobie dlya vuzov. Moskva: YUrayt, 2024. 298 s.

21. Guly V.V., Solntsev A.A., Asoyan A.R., Ershov V.S. Razrabotka matematicheskoy modeli prognozirovaniya potrebnosti v zapasnykh chastyakh pri upravlenii dilerskoy seti STO // Mir transporta i tekhnologicheskikh mashin. 2022. №2(77). S. 125-134. DOI 10.33979/2073-7432-2022-77-2-125-134. EDN WCHHPZ.

**Grishin Aleksandr Sergeevich**

Moscow Polytechnic University

Address: 107023, Russia, Moscow, B. Semenovskaya str., 38

Candidate of Technical Sciences

E-mail: agrishin@toyotabc.ru

**Sarbaev Vladimir Ivanovich**

Moscow Polytechnic University

Address: 107023, Russia, Moscow, B. Semenovskaya str., 38

Doctor of Technical Sciences

E-mail: visarbaev@gmail.com

**Tzjovanniss Simos**

Moscow Polytechnic University

Address: 107023, Russia, Moscow, B. Semenovskaya str., 38

Postgraduate student

E-mail: singmanos@yahoo.com

**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 прислать 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.

**Выводы**

Основные выводы исследования могут быть представлены в кратком разделе «Выводы», 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 сверху - 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 расположенное 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 строки, 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 расположенное 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**

$$q_1 = (\alpha - 1)^2 (1 + \frac{1}{2\alpha}) / d, \quad (1)$$

где  $\alpha = 1 + 2a/b$  - 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.  
E-mail: 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.  
E-mail: srmotu@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 12.09.2025 г.  
Дата выхода в свет 25.09.2025 г.  
Формат 70x108/16. Усл. печ. л. 9,2  
Цена свободная. Тираж 500 экз.  
Заказ № 204

Отпечатано с готового оригинал-макета  
на полиграфической базе ФГБОУ ВО «ОГУ имени И.С. Тургенева»  
302026, г. Орёл, ул. Комсомольская, 95