

# ВНТВ

Воронежский научно-технический вестник  
4 (50) декабрь 2024



Научно-технический  
журнал (2-й)  
Издается с 2012 года  
Выходит четыре раза в год

Учредитель - федеральное государственное бюджетное образовательное  
учреждение высшего образования  
«Воронежский государственный лесотехнический университет  
имени Г.Ф. Морозова»

Главный редактор:  
Кадырметов А.М. д.т.н., доцент

Заместителя главного редактора:  
Дорохин С.В. д.т.н., доцент

Отв. секретарь:  
Попов Д.А. к.т.н., доцент

Редколлегия:  
Смоленцев Е.В. д.т.н., профессор  
(г. Воронеж, Российская Федерация)  
Козлов А.М. д.т.н., профессор  
(г. Липецк, Российская Федерация)  
Лебедев В.А. к.т.н., профессор  
(г. Ростов-на-Дону, Российская  
Федерация)  
Кузовкин А.В. д.т.н., профессор  
(г. Воронеж, Российская Федерация)  
Болдырев А.И. д.т.н. профессор  
(г. Воронеж, Российская Федерация)  
Сухочев Г.А. д.т.н., профессор  
(г. Воронеж, Российская Федерация)  
Кириллов О.Н. д.т.н., профессор  
(г. Воронеж, Российская Федерация)  
Куц В.В. д.т.н., доцент  
(г. Курск, Российская Федерация)  
Герентьев А.В. д.т.н., доцент  
(г. Санкт-Петербург, Российская  
Федерация)  
Клявин В.Э. д.т.н., доцент  
(г. Липецк, Российская Федерация)  
Рассоха В.И. д.т.н., доцент  
(г. Оренбург, Российская Федерация)  
Новиков И.А. д.т.н., доцент  
(г. Белгород, Российская Федерация)  
Евтюков С.С. д.т.н., доцент  
(г. Санкт-Петербург, Российская  
Федерация)  
Агеев Е.В. д.т.н., профессор  
(г. Курск, Российская Федерация)  
Новиков А.Н. д.т.н., профессор  
(г. Орел, Российская Федерация)  
Шевцова А.Г. д.т.н., доцент.  
(г. Белгород, Российская Федерация)  
Никонов В.О. к.т.н., доцент  
(г. Воронеж, Российская Федерация)  
Лихачев Д.В. к.т.н., доцент  
(г. Воронеж, Российская Федерация)

Адрес редакции:  
394087, г. Воронеж, ул. Тимирязева,  
8, корпус, 4  
E-mail: [vestnikvglta@mail.ru](mailto:vestnikvglta@mail.ru)  
Телефон: (473) 253-73-11  
Сайт: <http://vestnikvglta.ru/>

Зарегистрировано в Федеральной  
службе по надзору в сфере связи,  
информационных технологий  
и массовых коммуникаций  
(Роскомнадзор).  
Свидетельство:  
ЭЛ № ФС 77 - 66383 от 14.07.2016

© ФГБОУ ВО ВГЛТУ им. Г.Ф. Морозова

## СОДЕРЖАНИЕ

### ТЕХНОЛОГИЯ И ОБОРУДОВАНИЕ МЕХАНИЧЕСКОЙ И ФИЗИКО-ТЕХНИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ

**Сухоруков В.Н., Куц В.В., Милинчук К.А., Смоленцев Е.В.** Проектирование техно-  
логии повышения качества поверхностного слоя при термическом воздействии  
на заготовку..... 3

### ТЕХНОЛОГИЯ МАШИНОСТРОЕНИЯ

**Рязанцева Е.А., Кириллов О.Н., Кадырметов А.М.** Методы получения  
отверстий малого диаметра при изготовлении фильтрующих элементов  
ракетных двигателей..... 12

**Смоленцев В.П., Извеков А.А., Стародубцев И.Г.** Состояние и пути развития  
комбинированных методов обработки наукоемких изделий..... 20

### ЭКСПЛУАТАЦИЯ АВТОМОБИЛЬНОГО ТРАНСПОРТА

**Волков В.С., Лебедев Е.Г., Митрохин Е.А.** Влияние характеристик межосе-  
вого дифференциала на распределение крутящих моментов между ведущи-  
ми осями полноприводного автомобиля..... 31

**Цариков А.А., Неволин Д.Г., Сорогин И.Г.** Исследование показателей тяжести  
последствий от дорожно-транспортных происшествий на примере Свердлов-  
ской области..... 41

**Барнови Н.В., Шаверина В.С.** Влияние современных тормозных систем  
на параметры торможения АТС при реконструкции ДТП..... 53

**Макарова И.В., Бойко А.Д., Мавляутинова Г.Р.** Интеллектуальные методы  
совершенствования системы доставки в сфере электронной коммерции..... 64

**Куликов А.В., Миротин Л.Б., Вальковская А.А., Куликов А.А.** Разработка  
модели мультимодальной транспортной сети городского пассажирского  
транспорта городов-миллионников на примере г. Волгограда..... 79

**Семкин А.Н., Бодров А.С., Бодров М.А.** Автоматизация определения пассажи-  
ропотоков на остановочных пунктах городских агломераций..... 94

DOI: 10.34220/2311-8873-2024-6-6



УДК 621.8

UDC 621.8

2.5.5 – технология и оборудование механической и физико-технической обработки

**ПРОЕКТИРОВАНИЕ ТЕХНОЛОГИИ ПОВЫШЕНИЯ КАЧЕСТВА ПОВЕРХНОСТНОГО СЛОЯ ПРИ ТЕРМИЧЕСКОМ ВОЗДЕЙСТВИИ НА ЗАГОТОВКУ**

**DESIGN OF TECHNOLOGY FOR IMPROVING THE QUALITY OF THE SURFACE LAYER UNDER THERMAL INFLUENCE ON THE WORKPIECE**

**Сухоруков Владимир Николаевич**, к.т.н., доцент кафедры технологии машиностроения, Воронежский государственный технический университет, г. Воронеж, e-mail: [smolentsev.rabota@gmail.com](mailto:smolentsev.rabota@gmail.com)

**Sukhorukov Vladimir Nikolaevich**, candidate of technical sciences, associate professor of the department of mechanical engineering technology, Voronezh state technical university, Voronezh, e-mail: [smolentsev.rabota@gmail.com](mailto:smolentsev.rabota@gmail.com)

**Куц Вадим Васильевич**, д.т.н., профессор, профессор кафедры машиностроительных технологий и оборудования, Юго-Западный государственный университет, г. Курск, e-mail: [kuc-vadim@yandex.ru](mailto:kuc-vadim@yandex.ru)

**Kuts Vadim Vasilyevich**, doctor of technical sciences, professor, professor of the department of mechanical engineering technologies and equipment, South-West state university, Kursk, e-mail: [kuc-vadim@yandex.ru](mailto:kuc-vadim@yandex.ru)

**Милинчук Кирилл Александрович**, магистр кафедры «Технология машиностроения», Воронежский государственный технический университет, ведущий инженер-конструктор ГК «WESTEROS-SUGAR», г. Воронеж, e-mail: [lil-ovs@yandex.ru](mailto:lil-ovs@yandex.ru)

**Milinchuk Kirill Aleksandrovich**, master of the department of mechanical engineering technology, Voronezh state technical university, leading design engineer of the WESTEROS-SUGAR Group of Companies, Voronezh, e-mail: [lil-ovs@yandex.ru](mailto:lil-ovs@yandex.ru)

✉<sup>1</sup> **Смоленцев Евгений Владиславович**, д.т.н., профессор, профессор кафедры технологии машиностроения, Воронежский государственный технический университет, г. Воронеж, e-mail: [smolentsev.rabota@gmail.com](mailto:smolentsev.rabota@gmail.com)

✉<sup>1</sup> **Smolentsev Evgeniy Vladislavovich**, doctor of technical sciences, professor, professor of the department of mechanical engineering technology, Voronezh state technical university, Voronezh, e-mail: [smolentsev.rabota@gmail.com](mailto:smolentsev.rabota@gmail.com)

**Аннотация.** В статье представлено проектирование технологии повышения качества поверхностного слоя при термическом воздействии на заготовку. Рассмотрен метод, который позволяет достичь высокого уровня упрочнения без нанесения на поверхность слоя покрытия. Приведены результаты исследований по упрочнению поверхности без нанесения слоя материала.

**Annotation.** The article presents the design of a technology for improving the quality of the surface layer under thermal action on the workpiece. A method is considered that allows achieving a high level of hardening without applying a coating layer to the surface. The results of studies on surface hardening without applying a layer of material are presented.

**Ключевые слова:** ТЕХНОЛОГИЯ, ФОРМО- ОБРАЗОВАНИЕ, КАЧЕСТВО ПОВЕРХНОСТИ, ИНСТРУМЕНТ, УПРОЧНЕНИЕ, СТРУКТУРА. **Keywords:** TECHNOLOGY, FORMING, SURFACE QUALITY, TOOL, HARDENING, STRUCTURE.

<sup>1</sup> Автор для ведения переписки

## 1 Состояние вопроса исследования и актуальность работы

Уже достаточно давно известна технология криогенной обработки сталей, применение которой способствует увеличению их твёрдости, износостойкости и прочности, в связи с чем, исследования влияния низких температур на свойства металлов представляют важное значение в контексте современных технологий и инженерных применений [1]. Одним из ключевых аспектов, требующих углублённого рассмотрения, является сдвиг ниже нуля точки окончания мартенситного превращения у легированных и высокоуглеродистых сталей после возвращения к нормальным эксплуатационным условиям. Следует отметить, что повышенное содержание углерода может быть обусловлено как процессом цементации, так и легированием сталей. Процентное содержание углерода и легирующих элементов напрямую влияет на температурные параметры закалки: увеличение содержания углерода выше 1 % и легирующих элементов может привести к снижению температуры около 25-45 °С на каждый процент содержания добавок [1, 2]. Следовательно, определение оптимального баланса между углеродом и легирующими элементами имеет существенное значение для процессов термической обработки металлов. Некоторые виды сталей могут обладать способностью претерпевать полное превращение аустенита в мартенсит при экстремально низких температурах, что также требует дополнительного изучения и понимания механизмов происходящих процессов.

Исследования по воздействию низких температур на металлы имеют значимость не только на практическом уровне, но и в рамках теоретических исследований [2-4]. Глубокое понимание изменений в структуре и свойствах металлов при экстремальных температурах позволяет разрабатывать новые технологии обработки материалов, уникальные сплавы с улучшенными механическими и физическими характеристиками. Дополнительно, анализ воздействия низких температур на металлы актуален в контексте разработки материалов для применения в космической и авиационной промышленности, где металлы подвергаются экстремальным условиям окружающей среды [5-7]. Поэтому системное изучение поведения металлов при низких температурах имеет стратегическое значение для создания высокопрочных и надёжных материалов для различных отраслей промышленности.

Таким образом, исследование фазового состава металлов в криогенном диапазоне температур становится актуальной задачей.

## 2 Материалы и методы

Применение метода криогенно-эрозионного упрочнения и легирования представляет собой эффективный метод повышения прочности, который не требует нанесения дополнительных защитных покрытий [8-10]. Этот процесс имеет особое значение при обработке медицинских инструментов, где крайне нежелательно наличие мельчайших частиц упрочняющего металла, способных отделиться и попасть в раны пациентов. Кроме того, помимо повышения прочности, данный метод позволяет устранить микродефекты на поверхности, где могут развиваться патогенные микроорганизмы, что особенно важно в медицинской сфере. Исследования показывают, что химические соединения, образующиеся в результате вышеуказанного процесса, образуют прочные связи с материалом детали [11-13], «залечивая» трещины и микродефекты, что позволяет достичь вышеуказанной цели.

В процессе криогенно-эрозионного упрочнения важными этапами являются создание жидкой плёнки на поверхности, включение тока, а также регулирование подачи жидкого газа в

начальный момент возникновения импульса тока. Однако следует отметить некоторые недостатки данного метода, такие как затруднения в наблюдении за областью упрочнения и контроле качества поверхностного слоя из-за образования газожидкостной смеси и выведения твёрдых частиц материала с упроченной поверхности, а также значительный расход сжиженного газа [2, 3].

Процесс упрочнения медицинских инструментов с использованием электроэрозионного метода представляет собой сложную и тщательно отлаженную процедуру, требующую точной настройки оборудования и строгого контроля параметров. Настроив установку для электроэрозионного упрочнения с помощью программирования и расположив медицинский инструмент на рабочей поверхности, осуществляется процесс подачи жидкого азота, что позволяет снизить температуру электрода и инструмента до уровня, необходимого для стабильной обработки.

Строго регулируя параметры процесса, такие как сила тока и подача жидкого азота, специалисты обеспечивают безопасность, эффективность и стабильность процесса упрочнения, минимизируя риск повреждения кромки инструмента разрядами. Для предотвращения возможного повреждения кромки инструмента разрядами осуществляют смещение оси электрода-инструмента (ЭИ) в процессе упрочнения, что позволяет равномерно распределять воздействие и минимизировать риск деформации или повреждения режущей кромки [14-16].

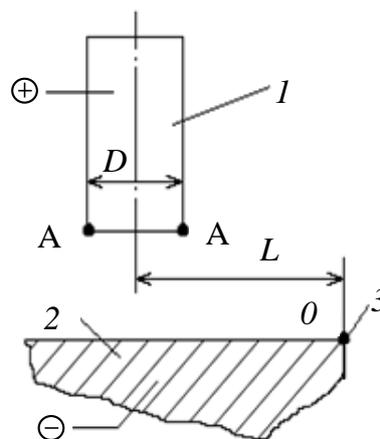
Таким образом, тщательное планирование, контроль параметров и проведение соответствующих мероприятий позволяют обеспечить успешное и качественное упрочнение медицинских инструментов с использованием электроэрозионного метода без нежелательных последствий для их функциональности и долговечности.

### 3 Результаты исследований

Граничным условием для того, чтобы произошло упрочнение обрабатываемой детали без её разрушения является температура обработки ( $T$ ), которая должна быть больше 1000 К (начало формирования нитрида титана ( $T_0$ )), но меньше температуры плавления ( $T_{пл}$ ) материала заготовки [1], которая для стали составляет приблизительно 1700 К, т. е.

$$T_0 < T < T_{пл}.$$

Для упрочнения инструмента при использовании метода электроэрозии возникает опасность повреждения режущей кромки разрядами. Чтобы избежать этого, требуется сдвигать ось ЭИ на определённое расстояние  $L$  (рис. 1).



1 – электрод-инструмент; 2 – упрочняемая деталь; 3 – режущая кромка

Рисунок 1 – Схема смещения оси электрода относительно режущей кромки инструмента

По [1, 17, 18] смещение точки обработки  $O$  должно быть равным сумме радиуса ЭИ ( $R$ ) и среднего арифметического радиусов изотерм, ограничивающих формирование нитрида титана и плавление заготовки ( $R_o$  и  $R_T$  соответственно):

$$L = R + \left( \frac{R_o + R_T}{2} \right). \quad (1)$$

Известно [1, 19, 20], что при соблюдении условий, когда температура окружающей среды совпадает с температурой жидкого азота, достигается результат, показанный в формулах:

$$R_o = K_3 \sqrt[3]{\frac{Q \cdot \eta_u \cdot A_u}{C_3 \cdot \rho_3 (T_o - T)}}, \quad (2)$$

$$R_T = K_3 \sqrt[3]{\frac{Q \cdot \eta_u \cdot A_u}{C_3 \cdot \rho_3 (T_{nl} - T)}}, \quad (3)$$

где  $K$  – коэффициент, учитывающий перераспределение энергии между электродом и заготовкой, для случая с жидким азотом  $K = 0,28 \dots 0,33$ ;  $C_3$  – теплоёмкость материала, Дж/(кг·К);  $Q$  – безразмерный коэффициент, учитывающий свойства материала электрода и длительность импульса:

$$Q = e^{-\frac{1}{32\pi\sqrt{\pi F_0}}}, \quad (4)$$

где  $F_0$  - критерий Фурье, определяемый по выражению:

$$F_0 = \frac{\bar{\alpha} \cdot \tau_u}{R^2}, \quad (5)$$

где  $\tau_u$  – время протекания электрического разряда, с;

$R$  – текущий радиус, мм, который равен радиусам изотерм (2) и (3) для выражений (4) и (5);  $\bar{\alpha}$  - теплопроводность материала электрода, Дж/(с·мм);

$\eta_u$  – КПД импульса, определяется по выражению:

$$\eta_u = (1 - K_1) \cdot (1 - K_2) \cdot (1 - K_3) \cdot (1 - K_4), \quad (6)$$

где  $K_1, K_2, K_3, K_4$  – коэффициенты потерь энергии.

Расчёты показывают, что  $\eta_u = 0,28 \dots 0,3$ , что в 1,5 раза ниже, чем при электроэрозионной обработке (ЭЭО) в среде керосина;

Энергия импульса  $A_u$  для генераторов, работающих по RC-схеме, Дж:

$$A_u = \frac{C \cdot U^2}{2}, \quad (7)$$

где  $C$  – ёмкость конденсаторов, мкФ;  $U$  – напряжение пробоя между ЭИ и обрабатываемой поверхностью, В.

Таким образом, становится возможным определить расстояние, определяющее положение ЭИ относительно зоны обработки, что позволяет обеспечить необходимое качество процесса.

Для обработки криогенно-эрозионным способом применяют ЭИ в виде иглы или проволоки со скруглением рабочей части  $D$ . Пример конструкции такого инструмента приведён на рис. 2.

Известно [21], что величину износа ЭИ можно оценить, как отношение уменьшения его массы или объёма к времени обработки. Объём, в свою очередь, по [22] можно оценить зависимостью:

$$\bar{V} = \frac{1}{12} \pi \cdot D^2 \cdot H, \quad (8)$$

где  $H$  – высота профильной части ЭИ (см. рис. 2), мм.

Объём нанесённого покрытия можно оценить как произведение ширины слоя  $b$  на толщину  $h$  и его длину  $l$ :

$$\bar{V} = b \cdot h \cdot l, \quad (9)$$

при этом

$$l = f(\tau). \quad (10)$$

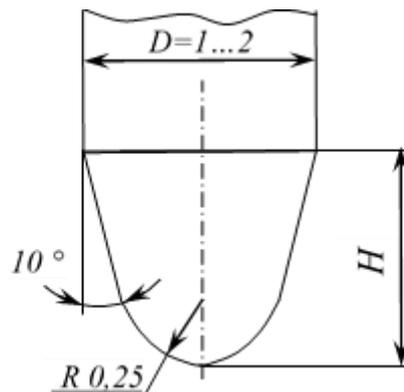


Рисунок 2 – Форма электрода-инструмента

Для постоянной скорости обработки  $V$  её время  $\tau$  вычисляется по формуле, с:

$$\tau = \frac{1}{V}, \quad (11)$$

Чтобы определить диаметр проволоки для обработки в воздушной среде, необходимо из формулы (8) выразить  $D$  и подставить туда значения из формул (10) и (11):

$$D = \sqrt{\frac{12 \cdot b \cdot h \cdot V \cdot \tau}{\pi \cdot H}}. \quad (12)$$

Опытным путём было установлено, что износ ЭИ в среде жидкого азота снижается в 4 раза по сравнению с обработкой в воздушной среде. Тогда формулу (12) можно скорректировать для криогенно-эрозионной обработки:

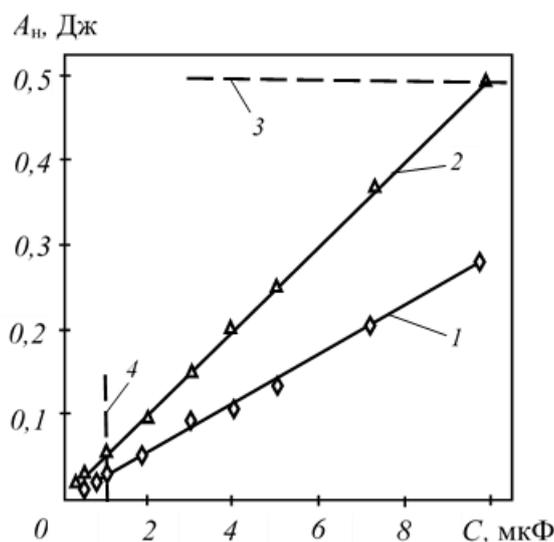
$$D = \sqrt{\frac{3 \cdot b \cdot h \cdot V \cdot \tau}{4 \cdot \pi \cdot H}}. \quad (13)$$

Значения  $b$  и  $h$  определяются путём эксперимента,  $V$  и  $\tau$  рассчитываются. В результате оптимальные параметры рабочей части ЭИ определяются соотношениями:

$$D = (0,1 \dots 0,12) H \quad \text{или} \quad H = (10 \dots 12) D. \quad (14)$$

Формула (14) применяется при первичной обработке режущей кромки, где поддержание оптимальной геометрии ЭИ является необходимым для предотвращения повреждений кромки.

По экспериментальным данным была построена номограмма, которая позволяет управлять процессом криогенно-эрозионного упрочнения (рис. 3).



1, 2 – энергия импульса  $A_{и}$  при  $U = 80$  и  $100$  В;  
 3 – граница формирования нитрида титана; 4 – граница устойчивого процесса

Рисунок 3 – Режимы криогенно-эрозионной обработки стали Р9 с использованием многоконтурного генератора

Таким образом, подбирая требуемое значение энергии импульса, можно достигнуть оптимального соотношения производительности и качества обрабатываемой поверхности.

#### 4 Обсуждение и заключение

Упрочнение кромки режущих инструментов в медицинской технике привело к значительному прогрессу в развитии этой технологии, продемонстрировав положительные результаты. Чтобы провести эксперимент отобрали четыре скальпеля из партии, каждый из которых пронумеровали от 1 до 4. Два из них подвергли процессу упрочнения с использованием титанового сплава ОТ4-1 в сфере жидкого азота. Режим обработки включал в себя: ток примерно 0,2 А, подачу до 30 мм/с и расход жидкого азота примерно 0,2 л/мин.

Результаты исследований показали существенное увеличение долговечности режущих кромок между заточками благодаря процедуре упрочнения.

Скальпель передали в медицинское учреждение для фактического использования в ходе операций. В процессе циклов многократной стерилизации, которые сопровождались изучением состояния инструментов, были выявлены существенные различия между упрочнёнными и неупрочнёнными образцами.

Результат люминесцентного контроля показал, что после проведения 10 циклов стерилизации количество и распространение микротрещин на неупрочнённом скальпеле значительно возросли с образованием дефектов на его режущей части. В то же время упрочнённый скальпель не демонстрировал наличие микротрещин или признаков затупления, а также не претерпевал изменений во внешнем виде или характеристиках режущей части в процессе стерилизации.

Долгосрочные испытания подтвердили более чем десятикратное увеличение эффективности после процедуры упрочнения. Полученные результаты исследования подтвердили не только эффективность, но и экономическую обоснованность использования данного метода в медицинской практике.

### Список литературы

- 1 Справочник технолога (справочное издание) / под. ред. Сулова А.Г. // М.: Инновационное машиностроение – 2019. – 800 с.
- 2 Смоленцев, Е. В. Проектирование электрических и комбинированных методов обработки. М. Машиностроение. – 2005. – 511 с.
- 3 Электрофизические и электрохимические методы обработки материалов. В 2 т. / Под ред. В. П. Смоленцева. М.: Высшая школа, 1983. – 249 с
- 4 Комбинированные методы обработки / В.П. Смоленцев, А.И. Болдырев, А.В. Кузовкин, Г.П. Смоленцев, А.И. Часовских. Воронеж: ВГТУ. – 1996. – 168 с.
- 5 Смоленцев, В. П. Влияние электрохимической размерной обработки на физико-механические характеристики металлов // Электрохимическая обработка металлов. Сб. науч. тр. Кишинев: "Штиинца", 1972. – С. 24-32
- 6 Сулима, А.М. Качество поверхностного слоя и усталостная прочность деталей из жаропрочных и титановых сплавов / А.М. Сулима, М.И. Евстигнеев. М.: Машиностроение, 1974. – с. 256
- 7 Состояние и перспективы развития комбинированных методов обработки / Смоленцев В. П., Смоленцев Е.В. //Вестник Рыбинской государственной авиационной технологической академии им. П.А. Соловьева. – 2017. – № 2 (41). – С. 5-9.
- 8 Абляз, Т. Р. Изучение изменения свойств электродов в зависимости от режимов проволочно-вырезной электроэрозионной обработки // Вестник ПГТУ. Машиностроение, материаловедение. – 2011. – Т. 13. – № 1. – С. 87-93.
- 9 Абляз Т.Р., Шлыков Е.С., Кремлев С.С. Применение электродов-инструментов с покрытием для электроэрозионной обработки стали 38Х2Н2МА // СТИН. – 2017. – № 5. – С. 20 -21
- 10 Эмпирическое моделирование межэлектродного при электроэрозионной обработке стали 38Х2Н2МА / Т.Н. Абляз, Е.С. Шлыков, Д.А. Борисов, А.А. Шумков, И.Ю. Летагин// Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Машиностроение, материаловедение. – 2017. – Т. 19. – № 2. – С. 67-79.
- 11 Куц, В. В. Исследование процесса получения отверстий полым электродом на модернизированном электроэрозионном станке ЧПУ / В.В. Куц, М.С. Разумов, Д.А. Зубков, А.С. Бышкин, А. А. Неструев // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. – 2020. – № 3. – С. 395-402.
- 12 Science-based technologies creation based on combined processing methods for fabrication aerospace filters / A.Yu. Ryazantsev, A.A. Shirokozkhova, V.G. Gritsyuk// Materials Today: Proceedings, 19 (2019), 2065-2067 DOI: [10.1016/j.matpr.2019.07.075](https://doi.org/10.1016/j.matpr.2019.07.075)
- 13 Innovative Methods For Obtainig Artificial Roughness On The Surfaces Of Heat-Loaded Parts Of The Liquid Rocket Engines Combustion Chamber / A.Yu. Ryazantsev, A.A. Shirokozkhova, Yukhnevich S.S. // AIP Conference Proceedings 2318, 030004 (2021); <https://doi.org/10.1063/5.0035987>
- 14 Micro electrical discharge machining single discharge temperature field simulation / Z.L. Peng, Y.N. Li, D. Fang, Y.Y. Zhang. - USA: JCPRC5, 2013. - P. 859-864.
- 15 Jiajing Tang, Xiaodong Yang. A Thermo-hydraulic Modeling for the Formation Process of the Discharge Crater in EDM // 18th CIRP Conference ISEM XVIII. - 2016. - № 42. - P. 685-690.

- 16 Obara H. Detection of Discharging Position on WEDM // Proceedings of 10th ISEM, 1992 - p. 404-409.
- 17 Umang Maradia. Meso-Micro EDM: diss. Dr. sc. ETH Zurich No. 22024. - Zurich, 2014. - 246 p.
- 18 Matthias Hackert-Oschatzchen. Single Discharge Simulations of Needle Pulses for Electrothermal Ablation. - Rotterdam: COMSOL Conference, 2013. - P. 1-5.
- 19 Weingartner E., Kuster F., Wegener K. Modeling and simulation of electrical discharge machining // 1st CIRP Global Web Conference. - 2012. - № 2. - P. 74-78.
- 20 Chander Parkash Khatter Analysis of surface integrity in electrical discharge machining (EDM) process for tungsten carbide material: dis. Ph. D. - Patiala, India, 2010.
- 21 Kirillov, O. The technology of combined processing of extruded materials / O. Kirillov, V. Smolentsev, S. Yukhnevich // MATEC Web of Conferences : 2018 International Conference on Modern Trends in Manufacturing Technologies and Equipment, ICMTMTE 2018, Sevastopol, 10–14 сентября 2018 года. – Sevastopol: EDP Sciences, 2018. – P. 01004. – DOI 10.1051/mateconf/201822401004. – EDN BYTCJA.
- 22 Yukhnevich, S. Provision of performance parameters of the product made from extruded materials by means of technological methods of combined processing / S. Yukhnevich, O. Kirillov, E. Kotukov // Materials Today: Proceedings : International Conference on Modern Trends in Manufacturing Technologies and Equipment, ICMTMTE 2019, Sevastopol, 09–13 сентября 2019 года. Vol. 19. – Sevastopol: Elsevier Ltd, 2019. – P. 2382-2384. – DOI 10.1016/j.matpr.2019.08.039. – EDN JPJXTU.

### References

- 1 Technologist's Handbook (reference edition) / ed. Suslova A.G. // M.: Innovative mechanical engineering, 2019. 800 p.
- 2 Smolentsev E.V. Design of electrical and combined processing methods M.: Mechanical engineering, 2005 - 511 p.
- 3 Electrophysical and electrochemical methods of materials processing: In 2 volumes/ Edited by V.P. Smolentsev. M.: Higher School, 1983.
- 4 Combined processing methods / V.P. Smolentsev, A.I. Boldyrev, A.V. Kuzovkin, G.P. Smolentsev, A.I. Chasovskikh. Voronezh: VSTU, 1996. 168 p.
- 5 Smolentsev V.P. The influence of electrochemical dimensional processing on the physical and mechanical characteristics of metals // Electrochemical processing of metals. Collection of scientific articles Chisinau: "Stiinza", 1972.
- 6 Sulima A.M. Surface layer quality and fatigue strength of parts made of heat-resistant and titanium alloys / A.M. Sulima, M.I. Evstigneev. M.: Mashinostroenie, 1974.
- 7 State and prospects of development of combined processing methods / Smolentsev V.P., Smolentsev E.V. // Bulletin of the Rybinsk State Aviation Technological Academy named after P.A. Solovyov. 2017. No. 2 (41). pp. 5-9.
- 8 Ablyaz T.R. Study of changes in the properties of electrodes depending on the modes of wire-cut electroerosion treatment // Bulletin of PSTU. Mechanical engineering, materials science. - 2011. - Vol. 13. - No. 1. - pp. 87-93.
- 9 Ablyaz T.P., Shlykov E.C., Kremlev S.S. Application of coated tool electrodes for electroerosion treatment of 38X2N2MA steel // STIN. - 2017. - No. 5. - pp. 20 -21
- 10 Empirical modeling of interelectrode flow during electroerosion treatment of 38X2N2MA steel / T.N., Balyas, E.S. Shlykov, D.A. Borisov, A.A. Shumkov, I.Yu. // Bulletin of Perm National Research Polytechnic University. Mechanical engineering, materials science. - 2017. - Vol. 19, No. 2. - pp. 67-79.
- 11 Kutz V.V. Investigation of the process of obtaining holes with a hollow electrode on a modernized electroerosion CNC machine / V.V. Kutz, M.S. Razumov, D.A. Zubkov, A.S. Byshkin, A.A. Nestruev // Izvestiya Tula State University. Technical sciences. 2020. No. 3. pp. 395-402.
- 12 Science-based technologies creation based on combined processing methods for fabrication aerospace filters / A.Yu. Ryazantsev, A.A. Shirokzhukhova, V.G. Gritsyuk // Materials Today: Proceedings, 19 (2019), 2065-2067 DOI: 10.1016/j.matpr.2019.07.075
- 13 Innovative Methods For Obtainig Artificial Roughness On The Surfaces Of Heat-Loaded Parts Of The Liquid Rocket Engines Combustion Chamber / A.Yu. Ryazantsev, A.A. Shirokzhukhova, Yukhnevich S.S. // AIP Conference Proceedings 2318, 030004 (2021); <https://doi.org/10.1063/5.0035987>
- 14 Micro electrical discharge machining single discharge temperature field simulation / Z.L. Peng, Y.N. Li, D. Fang, Y.Y. Zhang. - USA: JCPRC5, 2013. - P. 859-864.

- 15 Jiajing Tang, Xiaodong Yang. A Thermo-hydraulic Modeling for the Formation Process of the Discharge Crater in EDM // 18th CIRP Conference ISEM XVIII. - 2016. - № 42. - P. 685-690.
- 16 Obara H. Detection of Discharging Position on WEDM // Proceedings of 10th ISEM, 1992 - p. 404-409.
- 17 Umang Maradia. Meso-Micro EDM: diss. Dr. sc. ETH Zurich No. 22024. - Zurich, 2014. - 246 p.
- 18 Matthias Hackert-Oschatzchen. Single Discharge Simulations of Needle Pulses for Electrothermal Ablation. - Rotterdam: COMSOL Conference, 2013. - P. 1-5.
- 19 Weingartner E., Kuster F., Wegener K. Modeling and simulation of electrical discharge machining // 1st CIRP Global Web Conference. - 2012. - № 2. - P. 74-78.
- 20 Chander Parkash Khatter Analysis of surface integrity in electrical discharge machining (EDM) process for tungsten carbide material: dis. Ph. D. - Patiala, India, 2010.
- 21 Kirillov, O. The technology of combined processing of extruded materials / O. Kirillov, V. Smolentsev, S. Yukhnevich // MATEC Web of Conferences : 2018 International Conference on Modern Trends in Manufacturing Technologies and Equipment, ICMTMTE 2018, Sevastopol, 10–14 сентября 2018 года. – Sevastopol: EDP Sciences, 2018. – P. 01004. – DOI 10.1051/mateconf/201822401004. – EDN BYTCJA.
- 22 Yukhnevich, S. Provision of performance parameters of the product made from extruded materials by means of technological methods of combined processing / S. Yukhnevich, O. Kirillov, E. Kotukov // Materials Today: Proceedings : International Conference on Modern Trends in Manufacturing Technologies and Equipment, ICMTMTE 2019, Sevastopol, 09–13 сентября 2019 года. Vol. 19. – Sevastopol: Elsevier Ltd, 2019. – P. 2382-2384. – DOI 10.1016/j.matpr.2019.08.039. – EDN JPJXTU.

© Сухоруков В. Н., Куц В. В., Милинчук К. А., Смоленцев Е. В., 2024



2.5.6 – технология машиностроения

**МЕТОДЫ ПОЛУЧЕНИЯ  
ОТВЕРСТИЙ МАЛОГО ДИАМЕТРА  
ПРИ ИЗГОТОВЛЕНИИ ФИЛЬТРУЮЩИХ  
ЭЛЕМЕНТОВ РАКЕТНЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ**

**METHODS OF OBTAINING SMALL  
DIAMETER HOLES IN THE  
MANUFACTURING OF ROCKET  
ENGINE FILTER ELEMENTS**

**Рязанцева Елена Александровна,**  
магистрант кафедры технологии машино-  
строения, Воронежский государственный  
технический университет, г. Воронеж,  
e-mail: [alenkasea@ro.ru](mailto:alenkasea@ro.ru)

**Ryazantseva Elena Aleksandrovna,**  
master's student of the department of mechanical  
engineering technology, Voronezh state technical  
university, Voronezh, e-mail: [alenkasea@ro.ru](mailto:alenkasea@ro.ru)

✉<sup>1</sup> **Кириллов Олег Николаевич,**  
д.т.н., профессор, профессор кафедры  
технологии машиностроения, Воронежский  
государственный технический университет,  
г. Воронеж, e-mail: [kirillov.oli@yandex.ru](mailto:kirillov.oli@yandex.ru)

✉<sup>1</sup> **Kirillov Oleg Nikolaevich,**  
doctor of engineering sciences, professor, professor  
of the department of mechanical engineering technol-  
ogy, Voronezh state technical university, Voronezh,  
e-mail: [kirillov.oli@yandex.ru](mailto:kirillov.oli@yandex.ru)

**Кадырметов Анвар Минирович,**  
д.т.н., доцент, заведующий кафедрой машино-  
строительных технологий, Воронежский гос-  
ударственный лесотехнический университет  
имени Г.Ф. Морозова, г. Воронеж,  
e-mail: [kadyrmetov.a@mail.ru](mailto:kadyrmetov.a@mail.ru)

**Kadyrmetov Anvar Minirovich,**  
doctor of technical sciences, sciences, associate  
professor, head of the department of mechanical  
engineering technologies, Voronezh state forestry  
university named after G.F. Morozov, Voronezh,  
e-mail: [kadyrmetov.a@mail.ru](mailto:kadyrmetov.a@mail.ru)

**Аннотация.** Рассмотрены методы получения отверстий в металлических фильтрах различных типоразмеров. Раскрыта специфика применения электроэрозионного и электронно-лучевого методов обработки при прошивке отверстий. Представлены пути обеспечения качества поверхностного слоя деталей в процессе изготовления фильтрующих элементов жидкостных ракетных двигателей. В соответствии с рассматриваемыми в работе методами обработки выполнены исследования параметров шероховатости изготовленных отверстий на образце-имитаторе и гидравлических характеристик фильтрующего элемента при постоянном расходе рабочей среды.

**Annotation.** The methods for producing holes in metal filters of various sizes are considered. The specifics of using electrical discharge and electron beam processing methods for punching holes are disclosed. The ways of ensuring the quality of the surface layer of parts in the process of manufacturing filter elements of liquid rocket engines are presented. In accordance with the processing methods considered in the work, the roughness parameters of the holes made on a sample simulator and the hydraulic characteristics of the filter element at a constant flow rate of the working medium are studied.

**Ключевые слова:** ЭЛЕКТРОЭРОЗИОННАЯ ОБРАБОТКА, ФИЛЬТРУЮЩИЙ ЭЛЕМЕНТ, ОТВЕРСТИЯ МАЛОГО ДИАМЕТРА, ДВИГАТЕЛЬ, ШЕРОХОВАТОСТЬ.

**Keywords:** ELECTRICAL DISCHARGE MACHINING, FILTER ELEMENT, SMALL DIAMETER HOLES, ENGINE, ROUGHNESS.

<sup>1</sup> Автор для ведения переписки

## 1 Состояние вопроса исследования и актуальность работы

Современная авиационно-космическая техника отличается использованием сложных конструкторских решений, увеличением требований к точности и качеству изготовления деталей и сборочных единиц, входящих в состав изделия [1], повышению долговечности их работы, сокращению себестоимости. Создание современных изделий авиационно-космической техники повышает требования к точности и качеству их изготовления. Большая часть аппаратов космической техники работают при постоянном воздействии знакопеременных нагрузок, высоких и низких температур, газа и жидкого водорода. Условия эксплуатации составных элементов изделия усложняются, увеличивается величина удельной нагрузки на структуру материалов и самого изделия.

Требования к окончательной обработке изготавливаемых поверхностей наукоемких изделий, включающие повышенную точность, качество и достижение заданных технологических параметров, относятся к числу наиболее важных при внедрении современной технологии изготовления [2]. Исследование новых способов производства современной авиационно-космической техники считается первостепенной задачей для совершенствования технологий в машиностроительной отрасли. Изделия, являющиеся составной частью ракетных двигателей, используются при многоцикловых, знакопеременных нагрузках, в условиях возникновения кавитации и пульсации повышенных рабочих давлений, при высоком воздействии агрессивных сред. Одним из важных элементов таких изделий являются различные фильтры.

## 2 Материалы и методы

Качество изготовления фильтров в значительной степени оказывает воздействие на технические характеристики изделий, так как им приходится эксплуатироваться в чрезвычайно сложных условиях в составе жидкостных ракетных двигателей (ЖРД). Местные повреждения поверхностного слоя фильтрующего элемента возникают вследствие высокой стационарной разницы температуры и наличия жидкого водорода или газообразной среды при эксплуатации. Использование усовершенствованных процессов при изготовлении фильтрующих элементов должно предотвращать появление таких повреждений на их поверхностях при эксплуатации. Принимая во внимание химические характеристики составляющих компонентов топлива (горючего и его окислителя), широкое распространение получили фильтрующие элементы из листового металла с большим числом отверстий маленького диаметра. На рис. 1 представлены примеры фильтрующих элементов.

Важнейшим параметром фильтра является его производительность при постоянном гидравлическом сопротивлении магистралей, которая, в свою очередь, зависит от качества изготовления поверхностей отверстий фильтра, полученных при его обработке.

Прочность фильтрующего элемента должна превосходить значения возникающих при разнообразных нагрузках напряжений, иметь возможность выдерживать возникающие ударные и вибрационные нагрузки. При изготовлении элементов фильтров обязательным требованием является обеспечение заданной чистоты наружной поверхности и внутренних полостей, соответствия отверстий требованиям чертежа, на кромках отверстий должны отсутствовать заусенцы, сами отверстия необходимо изготавливать правильной формы. Проверка соответствия фильтрующих элементов заданным параметрам производительности осуществляется при проведении прочностных испытаний. Испытания проводятся при стандартных условиях: рабочей средой является вода, назначается промежуток времени, в течение которого задаётся её расход и противодействие. В результате на входе и на выходе фильтра возникает необходимая разница давления. По завершении проведённых испытаний целостность фильтрующего элемента должна быть сохранена. Результаты проливки заносятся в протокол. Получение заданного качественного поверхностного слоя отверстий и элементов фильтров обеспечит стабилизацию процесса работы готового изделия и увеличит технологические параметры системы.



Рисунок 1 – Примеры конструкций применяемых фильтров

Отверстия малых диаметров получают различными способами: механической обработкой, электрофизическими и электрохимическими методами. Наиболее распространёнными методами обработки отверстий малого диаметра в фильтрующих элементах для ЖРД являются электрофизические и электрохимические методы. При этом электрохимическая обработка имеет недостаток, заключающийся в возможности качественной обработки на небольшую глубину изготавливаемого отверстия, не более 1 мм, [3]. Поскольку значительная часть фильтрующих элементов имеют толщину обрабатываемого листа 1 мм и больше, то при их изготовлении применяют современные электроэрозионные и электроэрозионно-химические технологии получения отверстий, в том числе, с помощью многоэлектродных электродов-инструментов. К ним относят прошивку с наложением электрического поля и электроэрозионный способ, с помощью которых возможно изготавливать отверстия диаметром менее 0,2 мм. Традиционная обработка большого количества таких отверстий при изготовлении металлических фильтров лезвийным инструментом механическим способом делает этот процесс значительно более трудоёмким по времени, причём значительно возрастает количество бракованных изделий. Использование способа электроэрозионной прошивки для изготовления отверстий заданного малого диаметра на токопроводящих (металлических) заготовках из проката позволяет при заданной точности обработки повысить производительность операции за счёт возможности одновременной обработки большого числа отверстий и большой площади обрабатываемой заготовки в течение небольшого временного интервала. Износ инструмента при этом методе обработки меньше, что помогает снизить стоимость изготовления отверстий малого диаметра примерно на 20-70 % по сравнению с механическими методами.

Помимо плюсов электроэрозионный метод прошивки отверстий имеет и минусы. Большое количество отверстий в фильтрах является особенностью конструкции, что затрудняет эвакуацию продуктов разрушения и снижает скорость процесса. Появляется необходимость применения вибрации электродов-инструментов и принудительной перекачки или всасывания рабочей жидкости.

Известным прогрессивным методом прошивки отверстий малого диаметра является электронно-лучевой метод, который выполняется в автоматическом режиме на высокоскоростном электронно-лучевом перфораторе, например, фирмы Steigerwald (рис. 2), что обеспечивает получение заданных параметров технологической системы, облегчает труд оператора, повышает его производительность и улучшает качество выполнения операции. Обработка

осуществляется при помощи электронной пушки и основана на направленном удалении материала путём нагрева, плавления и испарением с использованием кинетической энергии быстро движущихся электронов. Электронно-лучевая обработка (ЭЛО) является высокопроизводительным процессом, обеспечивающим скорость обработки отверстия до 1 мм/с. Применение ЭЛО позволяет обрабатывать отверстия диаметром от 0,1 мм и менее с глубиной до 5 мм [4]. Производительность ЭЛО зависит от мощности электронного луча, геометрических размеров обрабатываемого участка заготовки, физико-механических характеристиках её материала, глубины обрабатываемых отверстий, точности по шагу между отверстиями. ЭЛО позволяет достигать минимальной перемычки между обрабатываемыми отверстиями [5]. При этом ЭЛО присущи следующие недостатками: переменный радиус скругления, невозможность получения отверстий с разной геометрической формой (лишь круглого сечения), образование грата, оплавление кромки отверстий, вследствие этого необходима доработка комбинированными методами с применением механической или электрохимической обработки. Применение ЭЛО экономически затратный процесс, так как выполняется в вакууме, при работе которого, происходят большие энергетические потери на работу насосов, создающих вакуум.

Вышеперечисленные недостатки вызывают необходимость применения комбинированных методов обработки (КМО), что обусловлено, в том числе, наличием оставшихся на поверхности отверстий частиц оплавленного материала, которые могут повлиять на гидравлические характеристики фильтров. Для их устранения используют КМО, основанные на соединении воздействия нескольких процессов в одном методе обработки [6]. Наиболее перспективны для использования в промышленности КМО, созданные на сочетании следующих воздействий: электроэрозионного, электрохимического и механического (обработка непрофилированным электродом-щеткой) [7]; электроэрозионного и электрохимического (электроэрозионная прошивка) [8]; электрохимического и механического (анодно-абразивная обработка) [8]; ультразвукового и механического (повышение производительности обработки лезвийным инструментом) [6]; электрохимического и ультразвукового (электромеханическое упрочнение; интенсификация процесса обработки) [8]. КМО позволяют получить заданные конструктивные требования к детали, традиционными способами обработки недостижимыми. При этом необходимым требованием к методу обработки является сохранение химического состава обрабатываемых материалов.



Рисунок 2 – Установка фирмы Steigerwald с многокоординатным ЧПУ для перфорирования плоских металлических заготовок электронным лучом

Для обработки отверстий фильтров представляет интерес применение метода эрозионно-химической прошивки. Данный метод обработки высоко производителен, время изготовления фильтров с толщиной стенки 1,5-2 мм уменьшается в несколько раз достигаемая точность и чистота обрабатываемой поверхности соответствуют предъявляемым требованиям.

### 3 Результаты исследований

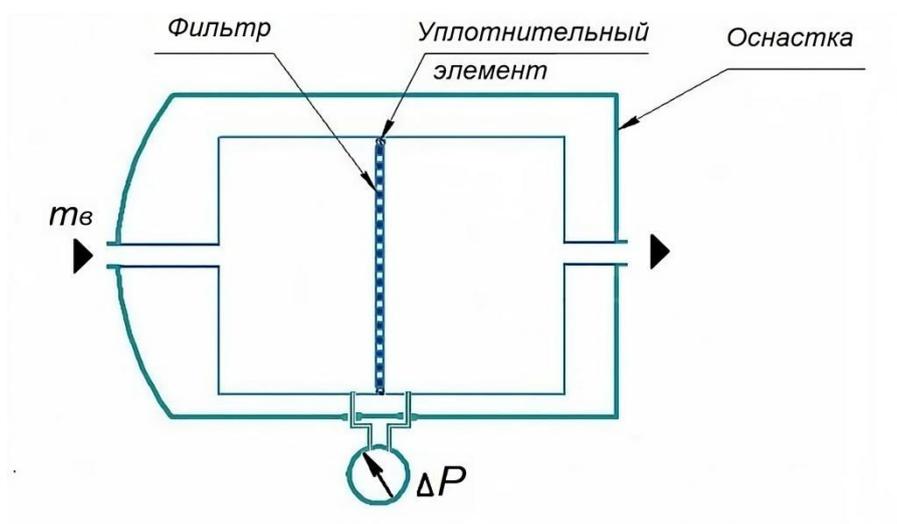
Испытания деталей, сборочных единиц ракетно-космической техники характеризуются повышенными требованиями по чистоте и защите внутренних полостей, разъемов и мест сопряжения от попадания посторонних веществ и объектов [9]. Пропускная способность фильтров и практическое состояние микроструктуры контактных поверхностей является основной характеристикой фильтрующих элементов при гидравлических испытаниях. С этой целью необходимо исследовать влияние шероховатости поверхностного слоя на характеристики фильтра. Для контроля соответствия характеристик фильтра предъявляемым требованиям, при проведении гидравлических испытаний, были использованы изготовленные опытные образцы, имеющие аналогичные исследуемому фильтру прочностные показатели.

Для изготовления образцов-имитаторов была выбрана заготовка из нержавеющей стали 12Х18Н10Т (ГОСТ 5632-72) с длиной 30 мм и диаметром 25 мм. В ней были обработаны 1827 отверстий  $\varnothing 0,4$  мм.

С целью оценки влияния способа изготовления отверстий на гидравлические характеристики фильтрующих элементов на выбранных образцах-имитаторах отверстия выполнялись на одном образце электронно-лучевым способом, на втором электроэрозионным способом [10].

При использовании электроннолучевой обработки для изготовления отверстий вокруг них образуется нагар, который удаляется химическим способом. Для обеспечения необходимых свойств проливочных характеристик была проведена электрополировка внутренних и наружных поверхностей образца-иммитатора.

Испытания проводились на проливочном стенде с применением специальной технологической оснастки, выполненной в виде корпуса. Фильтрующий образец-имитатор размещали внутри корпуса. Образец-имитатор проливали при атмосферном противодавлении согласно заданной схеме, приведённой на рис. 3. Рабочей средой была выбрана и использована техническая вода.



$m_v$  – расход вод;  $\Delta P$  – перепад давления на фильтре

Рисунок 3 – Схема проливки фильтра

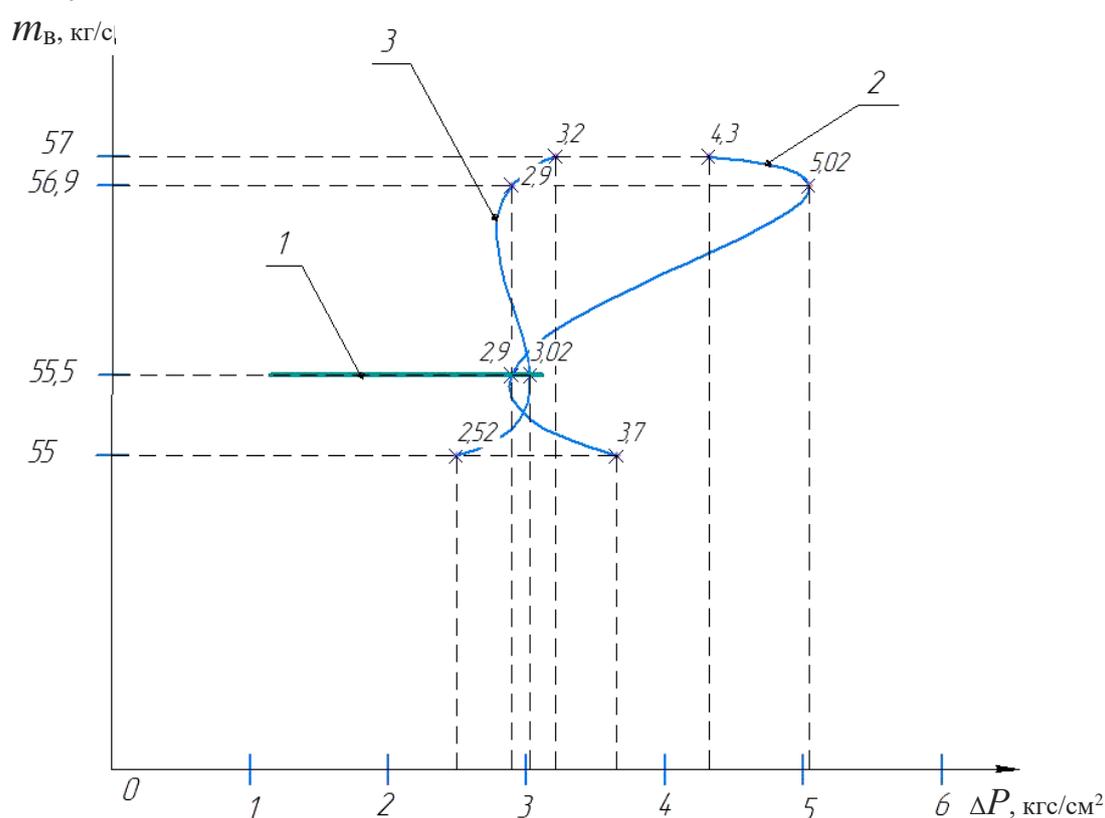
В соответствии с определенными расчетным путем характеристиками и на основании требований нормативной документации при гидравлическом испытании фильтра с определенным постоянным расходом воды  $55,5 \pm 1,7$  кг/с, значение показателей гидравлического сопротивления фильтра ( $\Delta P$ ) должно укладываться в диапазоне 1,1 ... 3,1 кгс/см<sup>2</sup>.

Результаты фактических параметров расхода воды при гидравлическом сопротивлении образцов-иммитаторов фильтра приведены в табл. 1.

Таблица 1 – Фактические параметры замера расхода воды для двух методов прошивки отверстий

| Номинальный расход воды, кг/с | Расчётная величина гидравлического сопротивления фильтра ( $\Delta P$ ), кгс/см <sup>2</sup> | Фактическая величина гидравлического сопротивления фильтра ( $\Delta P$ ), кгс/см <sup>2</sup> |  |
|-------------------------------|--|--|--|
|                               |  | Электронно-лучевая перфорация  | Электроэрозионный способ получения отверстий |
| 55                            | 1,1-3,1  | 3,7  | 2,52   |
| 55,5                          |  | 2,9  | 3,02   |
| 56,9                          |  | 5,02   | 2,9  |
| 57                            |  | 4,3  | 3,2  |

Замеры величины гидравлического сопротивления образцов-иммитаторов фильтра изготовленными методами электронно-лучевой перфорации и электроэрозионным способом производился по четыре раза. По результатам замеров построен график пролива (рис. 4).



- 1 – расчётное значение;
- 2 – для фильтра, изготовленного с применением электронно-лучевого способа;
- 3 – для фильтра, изготовленного с применением электроэрозионного способа

Рисунок 4 – Расходные характеристики пролива образцов-иммитаторов фильтра

#### 4 Обсуждение и заключение

Представленные исследования обработки металлических фильтров комбинированными методами дают возможность сделать вывод о том, что использованный для прошивки отверстий метод электронно-лучевой обработки характеризуется высокой производительностью, однако достижение заданных параметров качества обрабатываемого поверхностного слоя заготовки не обеспечивается, и для его достижения необходимо использование специальной операции полирования.

В результате проведённых проливочных испытаний образцов-иммитаторов фильтра, представленных в табл. 1 и на рис. 6, можно сделать вывод о том, что образец-иммитатор фильтрующего элемента с отверстиями, для получения которых использовался способ электроэрозионной обработки, был изготовлен с более качественными проливочными характеристиками, приближенными к расчетным параметрам фильтра. Электроэрозионный способ получения отверстий в элементах фильтров изделий РКТ предпочтительнее электронно-лучевого способа.

#### Список литературы

- 1 O. N. Kirillov, A. Yu. Ryazantsev, Mechanism of finish machining by brush electrode, Voronezh State Technical University Bulletin, v.11 (5), pp. 8-13 (2015).
- 2 Справочник металлиста. В 5 т. / под ред. С. А. Чернавского, В. Ф. Рещикова. М.: Машиностроение, 1976. – Т.1. – 768 с.
- 3 Рязанцев А. Ю., Смоленцев Е. В., Грицюк В. Г., Широкожухова А. А., Обеспечение качества поверхностного слоя деталей при изготовлении отверстий в фильтрах ракетных двигателей // Вестник Воронежского государственного технического университета. – 2019. – Т.15. – №5. – С. 111-115.
- 4 Fomin A. A., Gusev V. G., Sattarova Z. G. Geometrical errors of surfaces milled with convex and concave profile tools. In: Solid State Phenomena. – 2018. – vol. – 284. – pp. 281-288. DOI: 10.4028/www.scientific.net/SSP.284.281.
- 5 Смоленцев, Е. В. Проектирование электрических и комбинированных методов обработки, М.: Машиностроение. – Москва, 2005. – 511 с.
- 6 Смоленцев, В. П. Комбинированные методы обработки / В. П. Смоленцев, Е. В. Смоленцев, О. Н. Кириллов, А. В. Норман // Учебное пособие. – Воронеж: Издательско-полиграфический центр «Научная книга», 2024. – 120 с.
- 7 Кириллов, О. Н. Технология комбинированной обработки непрофилированным электродом: монография / О. Н. Кириллов. Воронеж: ГОУВПО «Воронежский государственный технический университет», 2010. – 254 с.
- 8 Электрофизические и электрохимические методы обработки материалов. Учеб. Пособие (в 2-х томах). Т. II. Под ред. В.П. Смоленцева. М.: Высшая школа, 1983. – 208 с.
- 9 Баженова, Т. Е. Разработка и внедрение оборудования и технологии для проведения криогенных испытаний специзделий / Т. Е. Баженова, С. С. Юхневич, А. Ю. Рязанцев // Ученые записки Крымского инженерно-педагогического университета. – 2022. – № 3(77). – С. 133-138. – DOI 10.34771/UZCEPU.2022.77.3.026. – EDN EWHXNE.
- 10 A. A. Shirokzhukhova, Y. V. Sharov, I. G. Starodubtsev, Non-traditional technologies for the production of metal filters used in engine aerospace industry, Modern Technology Bulletin. 2018. – № 1(9). – pp. 53-57. (in Russian).

#### References

- 1 O. N. Kirillov, A. Yu. Ryazantsev, Mechanism of finish machining by brush electrode, Voronezh State Technical University Bulletin, v.11 (5), pp. 8-13 (2015).
- 2 Metalworker's Handbook. In 5 volumes / edited by S. A. Chernavsky, V. F. Reshchikov. Moscow: Mashinostroenie, 1976. – Vol.1. – 768 p.
- 3 Ryazantsev A. Yu., Smolentsev E. V., Gritsyuk V. G., Shirokzhukhova A. A., Ensuring the quality of the surface layer of parts in the manufacture of holes in rocket engine filters // Bulletin of the Voronezh State Technical University. – 2019. – Vol.15. – No.5. – P. 111-115.

4 Fomin A. A., Gusev V. G., Sattarova Z. G. Geometrical errors of surfaces milled with convex and concave profile tools. In: Solid State Phenomena. – 2018. – vol. – 284. – pp. 281-288. DOI: 10.4028/www.scientific.net/SSP.284.281.

5 Smolentsev E. V. Design of electrical and combined processing methods, Moscow: Mechanical Engineering. – Moscow, 2005. – 511 p.

6 Smolentsev V. P. Combined processing methods / V. P. Smolentsev, E. V. Smolentsev, O. N. Kirillov, A. V. Norman // Study guide. – Voronezh: Publishing and Printing Center "Scientific Book", 2024. – 120 p.

7 Kirillov O. N. Technology of combined processing with a non-profiled electrode: monograph / O. N. Kirillov. Voronezh: State Educational Institution of Higher Professional Education "Voronezh State Technical University", 2010. – 254 p.

8 Electrophysical and electrochemical methods of materials processing. Textbook. Manual (in 2 volumes). T. II. Ed. V. P. Smolentsev. Moscow: Higher School, 1983. – 208 p.

9 Bazhenova, T. E. Development and implementation of equipment and technology for cryogenic testing of special products / T. E. Bazhenova, S. S. Yukhnevich, A. Yu. Ryazantsev // Scientific notes of the Crimean Engineering and Pedagogical University. - 2022. - No. 3 (77). - P. 133-138. - DOI 10.34771 / UZ-CEPU.2022.77.3.026. - EDN EWHXNE.

10 A. A. Shirokzhukhova, Y. V. Sharov, I. G. Starodubtsev, Non-traditional technologies for the production of metal filters used in engine aerospace industry, Modern Technology Bulletin. 2018. – No. 1(9). – pp. 53-57. (in Russian).

© Рязанцева Е. А., Кириллов О. Н., Кадырметов А. М., 2024



2.5.6 – технология машиностроения

## **СОСТОЯНИЕ И ПУТИ РАЗВИТИЯ КОМБИНИРОВАННЫХ МЕТОДОВ ОБРАБОТКИ НАУКОЕМКИХ ИЗДЕЛИЙ**

✉<sup>1</sup> **Смоленцев Владислав Павлович**, профессор кафедры технологии машиностроения, доктор технических наук, профессор, лауреат премии Правительства РФ, Воронежский государственный технический университет, г. Воронеж, e-mail: [ysmolen@inbox.ru](mailto:ysmolen@inbox.ru)

**Извеков Александр Андреевич**, ведущий специалист Воронежского центра жидкостных ракетных двигателей, аспирант Воронежского государственного технического университета, г. Воронеж, e-mail: [vmzizvekov@gmail.ru](mailto:vmzizvekov@gmail.ru)

**Стародубцев Игорь Геннадьевич**, заместитель директора Воронежского конструкторского бюро химавтоматики, научный консультант базовой кафедры Воронежского государственного технического университета, кандидат технических наук, г. Воронеж, e-mail: [vmz056@yandex.ru](mailto:vmz056@yandex.ru)

**Аннотация.** Рассмотрено состояние научных технологических исследований и перспективные пути их применения в машиностроении страны. Приведены результаты изысканий отечественных учёных за последние годы и намечены направления работы на последующий период. Отмечено укрепление научных связей учёных и производителей с Российской академией наук в области развития и применения комбинированных методов обработки. Определено место искусственного интеллекта (ИИ) и цифровых технологий при их применении в процессе разработки и выпуска отечественного технологического оборудования. Показаны приоритетные направления использования комбинированных методов обработки в специальном станкостроении. Обос-

## **ANALYSIS OF FACTORS REFLECTING DRIVERS' BEHAVIOR IN DIFFICULT ROAD CONDITIONS**

✉<sup>1</sup> **Smolentsev Vladislav Pavlovich**, professor of the department of mechanical engineering technology, doctor of tech. sc., professor, laureate of the Russian Federation Government prize, Voronezh state technical university, Voronezh, e-mail: [ysmolen@inbox.ru](mailto:ysmolen@inbox.ru)

**Izvekov Alexander Andreevich**, leading specialist of the Voronezh center for liquid rocket engines, postgraduate student of the Voronezh state technical university, Voronezh, e-mail: [vmzizvekov@gmail.ru](mailto:vmzizvekov@gmail.ru)

**Starodubtsev Igor Gennadievich**, deputy director of the Voronezh chemical automation design bureau, scientific consultant of the basic department of the Voronezh state technical university, candidate of technical sciences, Voronezh, e-mail: [vmz056@yandex.ru](mailto:vmz056@yandex.ru)

**Annotation.** The article considers the state of scientific technological research and promising ways of its application in the mechanical engineering of the country. The results of research by domestic scientists in recent years are presented and areas of work for the subsequent period are outlined. Strengthening of scientific ties between scientists and manufacturers with the Russian Academy of Sciences in the field of development and application of combined processing methods is noted. The place of artificial intelligence (AI) and digital technologies in their application in the process of development and production of domestic technological equipment is determined. Priority areas of using combined processing methods in special machine tool building are shown. Areas of successful development of mechanical engineering in the country are substantiated taking into account

нованы области успешного развития машиностроения в стране с учётом достижений авиакосмической отрасли. Приведены рекомендации по проектированию технологических режимов комбинированной обработки типовых деталей. Обоснована возможность повышения качества изделий за счёт нанесения покрытий с обоснованием использования новых рабочих сред и реализация результатов исследований с применением критериев теории производственной технологичности.

**Ключевые слова:** СОСТОЯНИЕ, РАЗВИТИЕ, КАЧЕСТВО, КОМБИНИРОВАННЫЕ МЕТОДЫ ОБРАБОТКИ, ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ КОМПЛЕКСЫ, ПОКРЫТИЯ.

the achievements of the aerospace industry. Recommendations for the design of technological modes of combined processing of typical parts are given. The possibility of improving the quality of products by applying coatings with justification for the use of new working environments and the implementation of research results using the criteria of the theory of industrial manufacturability is substantiated.

**Keywords:** CONDITION, DEVELOPMENT, QUALITY, COMBINED PROCESSING METHODS, TECHNOLOGICAL COMPLEXES, COATINGS.

<sup>1</sup> Автор для ведения переписки

## 1 Состояние вопроса исследования и актуальность работы

Темпы развития отечественной технологической науки во многом определяются состоянием и реализацией исследований в авиакосмической отрасли машиностроения, а также обоснованным распределением сил и средств при перспективном планировании дальнейших мероприятий. Эти действия выполняются вузами, отраслевыми институтами и организациями системы Российской академии наук через участие в использовании материальных, финансовых средств, выделяемых на такие цели из бюджета страны. В современных условиях для эффективного применения имеющихся весьма ограниченных ресурсов в качестве экспертов привлекаются учёные отраслевых академий и технических учебных заведений. Здесь значительную роль играет Ассоциация технологов машиностроителей России, ежегодно организующая мероприятия по подведению итогов предшествующего этапа и обосновывающая совместно с научным советом Российской академии наук наиболее востребованные направления государственного финансирования приоритетных направлений отечественного машиностроения. В качестве инструмента для оценки эффективности выполненных работ используются количественные показатели системы технологичности, способные убедительно доказывать результативность проводимых научных исследований.

### 1.1 Актуальные научные направления в наукоемком машиностроении

Анализ состояния отечественного машиностроения показывает, что в последний период в России сформировались актуальные научные направления, одним из которых является система управления качеством продукции в условиях импортозамещения, когда научные достижения и средства их реализации стали труднодоступными из-за ограничений, введённых рядом технически развитых держав.

Это сдерживает реализацию возможностей создаваемых комбинированных методов обработки в машиностроении и темпы развития наукоемких производств с использованием современного оборудования и средств технологического оснащения. Анализ состояния научных исследований в ведущих отраслях машиностроения страны показывает, что для преодоления сложившихся трудностей требуется:

1. В текущий период наряду с имеющимися государственными программами в области машиностроения создать, детализировать и конкретизировать систему развития отечественного станкостроения, в том числе ускорить производство специального оборудования и

средств технологического оснащения, включающего как серийно выпускаемые, так и специальные станки с использованием комбинированных методов обработки [1, 2], содержащих комплекс воздействий на объект изготовления в форме единой обрабатывающей системы. Для восстановления и развития отечественного станкостроения требуется не только целевое финансирование, но и научно обоснованная перспективная плановая подготовка специалистов и учёных через технические учебные заведения с использованием для этих целей средств из госбюджета.

2. Расширить исследования в области технологии аддитивного машиностроения, которое требуется развивать не только в направлении послойного наращивания материала, но и для управления качеством объектов производства, например путём перераспределения внутренних напряжений в материале и покрытиях. Эта проблема рассмотрена в работе [3] для баллонов с давлением до 45-50 МПа, используемых в перспективных ракетных двигателях многогоразового применения.

3. Создание и расширение области применения комбинированных методов обработки [1, 2] с комплексным использованием различных воздействий, включая электрические методы обработки, где научно обоснованное управление процессом позволяет технологам реализовать изготовление перспективных качественных объектов многих отраслей техники и сформировать научную базу для отработки технологичности [4] создаваемых, модернизированных и восстанавливаемых изделий.

4. В направлении научного обоснования целесообразности разработки комбинированных технологических процессов необходимо провести исследования по созданию специального технологического оборудования в виде технологических комплексов. В течение последних лет такие работы выполняются совместно с белорусскими коллегами, которые обобщили результаты в форме монографии «Теоретические основы проектирования технологических комплексов» [5], выпущенной в Минске. Предложенный подход позволяет более полно и эффективно загрузить современное очень сложное, дорогое, труднодоступное оборудование и создать научную базу для обоснованного выбора оборудования при переоснащении производства под новые изделия.

5. В условиях нарастающего дефицита специалистов по наукоемким технологиям, особенно в оборонных отраслях машиностроения, намечается высвобождение части исполнителей за счёт применения искусственного интеллекта (ИИ) и цифровизации производственного процесса. Этот подход через ИИ давно используется в машиностроении, хотя в большей степени нам известен как применяемый при шахматных и военных баталиях. Действительно, разве не ИИ применяется в разработанных в стране и зарубежными специалистами станках с управлением процессом обработки непрофилированным электродом-инструментом по методу обратного копирования. Имеются в виду болгарские и швейцарские станки типа ЭЛФА731 для комбинированной обработки и отечественные станки группы СЭХО с адаптивным управлением перемещения электродов и технологическим процессом по сигналам обратной связи [6]. Подобное оборудование десятки лет выпускали малыми сериями в Казани по патентам профессора Садыкова З. Б. До перестройки они поставлялись многим отечественным и зарубежным, в основном приборостроительным, предприятиям. Однако сейчас при возрождении отечественного станкостроения потребуется выполнить немало сложных исследований, в том числе с использованием ИИ, для совершенствования технологии и оборудования и достижения лидирующего положения в этой отрасли отечественной технологической науки. Наиболее весомые научные достижения в этой области машиностроения получены при разработке и совершенствовании комбинированных методов обработки для применения их в технологических комплексах.

*1.2 Состояние и возможности использования в машиностроении комбинированных методов обработки для получения изделий с высоким качеством продукции*

На рис. 1 приведены различные виды воздействий, которые используются для повышения качества изделий при разработке процессов и средств технологического оснащения. Рассмотренные на рис. 1 исходные методы физических воздействий включают механические, тепловые, химические, магнитные, лучевые, ядерные составляющие комбинированных систем, определяющих возможности повышения потребительского уровня изделий за счёт совершенствования известных и создания новых технологических приёмов, методов и средств управления качеством продукции с использованием системы отработки технологичности, искусственного интеллекта и основ цифровой технологии.



Рисунок 1 – Классификация методов воздействий и комбинированные методы обработки, применяемые в технологических комплексах

**2 Материалы и методы**

На рис. 2 раскрыто взаимодействие различных видов воздействий, приведённых на рис. 1, что служит основой для построения механизма системы управления качеством с использованием комбинированных методов обработки, в том числе при проектировании для этого технологических комплексов. В работах [1, 2] разработаны методы оптимизации расчётов, обоснования, закономерностей выбора видов воздействий в едином комбинированном процессе, способы применения законов совместимости предлагаемых воздействий в технологических комплексах. На рис. 2 рассмотрены те факторы, которые к настоящему времени достаточно полно изучены в авиакосмической отрасли наукоемкого машиностроения. Они могут служить основой при разработке технических заданий на специальное оборудование и технологические комплексы с использованием для автоматизации процессов теоретических положений искусственного интеллекта и управления с помощью цифровых технологий. К базовым технологическим воздействиям такого оборудования и технологических комплексов согласно схемы (рис. 2) относятся: исходные воздействия базовых положений теории и практики резания (Р), глубоко изученные и освоенные электрические методы обработки, куда входят электрохимическая размерная и безразмерная обработка (ЭХО), тепловое воздействие при элект-

троэрозионном виде обработки (ЭЭО), импульсное механическое действие инструмента в ультразвуковом диапазоне частот (УЗО), лучевые методы (ЛО). Из них можно комбинировать новые технологические операции, обеспечивающие высокое качество наукоемкой продукции, отвечающей требованиям производственной технологичности. При этом следует учитывать внешние воздействия на технологический процесс: механическое (1); химическое (2); тепловое (3); механическое импульсное (4), а также внутренние свойства объекта: физико-механические (в рассматриваемом случае, прежде всего, тепло- и электропроводимость, состав (2), структуру (3), температуру плавления (5), отражательную способность поверхности (6), внутренние изменения свойств обрабатываемых материалов (наклёп (1), хрупкость (4), совместимость для обработки материалов заготовки и инструмента (7)).

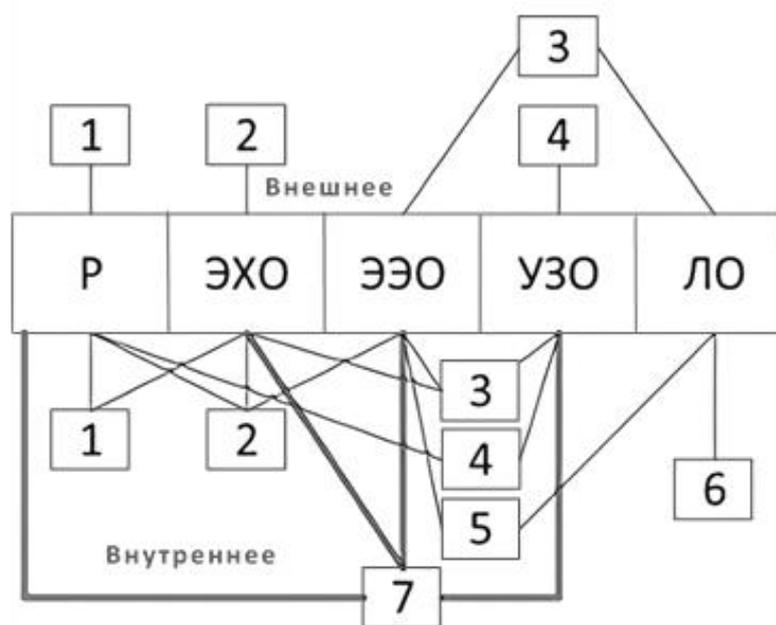


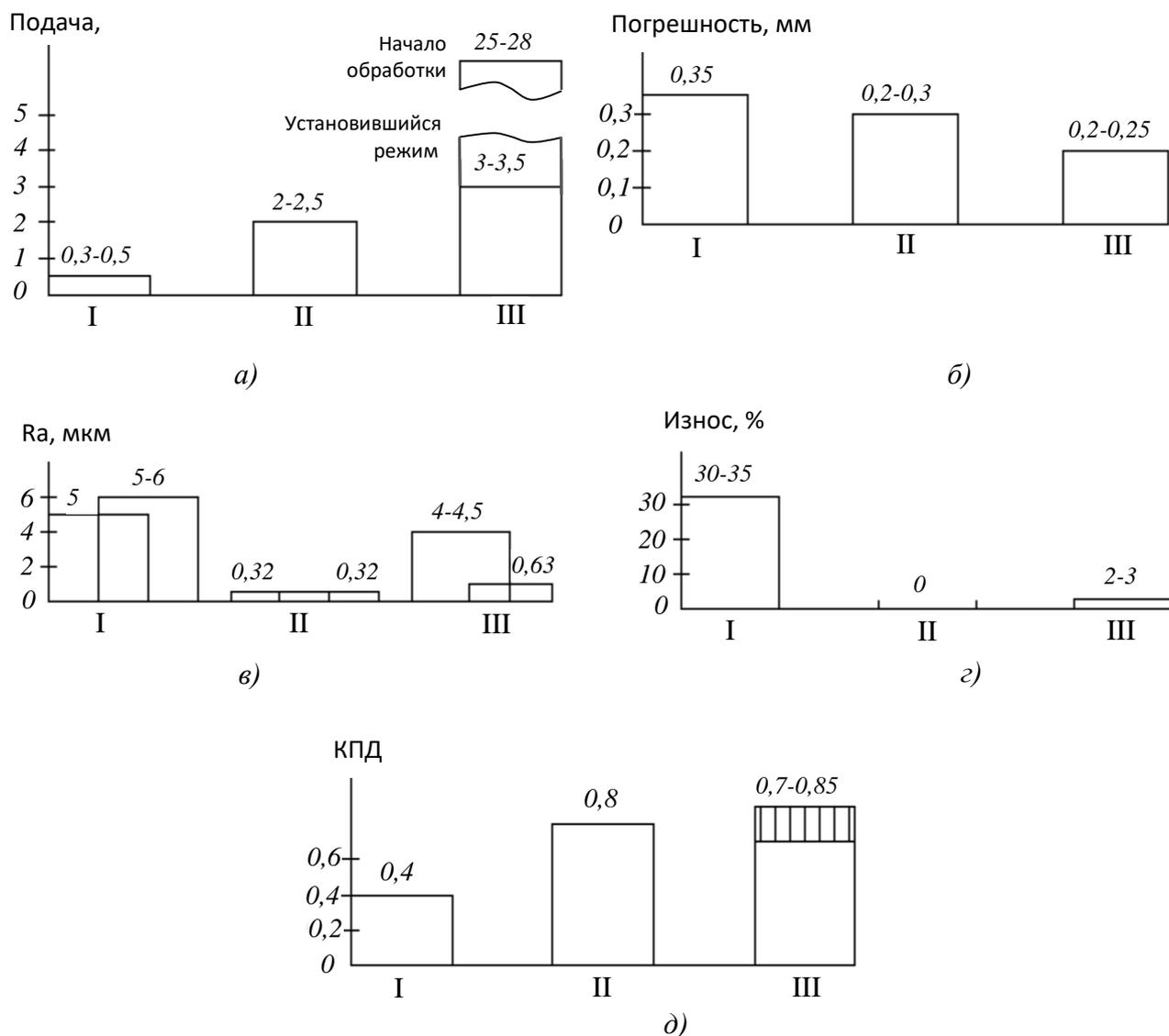
Рисунок 2 – Методология проектирования комбинированного размерного формообразования металлических деталей

### 3 Результаты исследований

На рис. 3 приведены достигнутые показатели качества при использовании различных видов воздействий на примерах прошивки каналов различной глубины и профиля в металлических деталях. Рассмотрена возможность получения индивидуальных и групповых форсунок, применяемых в жидкостных ракетных двигателях, где рабочие каналы могут иметь как постоянную, так и переменную по длине форму и величину сечения. В работе [7] приведён инструмент для изготовления глубоких каналов, где для этого применялись комбинированные методы прошивки, позволяющие получить в жаропрочных сплавах требуемый проточный тракт с сечением менее  $0,7 \text{ мм}^2$ .

Подобные операции выполняются различными методами, поэтому для оценки уровня производственной технологичности на рис. 3 рассмотрены технологические показатели электроэрозионной (I), электрохимической (II) и комбинированной эрозионнохимической (III) прошивки в жидкой рабочей среде, подаваемой под давлением в зону обработки. Показатели процессов, представленные на рис. 3, определяют качественные показатели изделий: на 3, а – скорость прошивки; 3, б – показатели различных методов по средней величине погрешности формы и размеров отверстий при их глубине 2-2,2 мм; 3, в – шероховатости торцевой и боковой поверхности (соответственно левые и правые участки столбиков обработок I, II, III); 3, г

– износ профильного инструмента по объёму в процентах от объёма удалённого с детали металла при работе в жидкой рабочей среде;  $\beta$ ,  $\delta$  – коэффициент полезного использования технологического тока относительно расхода энергии на весь процесс.



*a* – скорость прошивки; *b* – погрешности формы и размеров отверстий при их глубине 2-2,2 мм; *v* – шероховатость торцевой и боковой поверхности отверстий; *z* – относительный объёмный износ профильного инструмента в сравнении с объёмом удалённого металла; *d* – коэффициент полезного действия использования технологического тока; прошивка: I – электроэрозионная; II – электрохимическая; III – комбинированная эрозионно-химическая

Рисунок 3 – Технологические показатели и эффективность применения в авиакосмической отрасли машиностроения освоенных и новых процессов прошивания отверстий в типовых металлических деталях

Анализ рис. 3 показывает, что при обоснованном проектировании комбинированных процессов уровень технологичности можно повысить на порядок и более, сохранив при этом требуемые показатели качества. Замена освоенных тепловых и электрохимических методов обработки комбинированными процессами даёт весомые технико-экономические результаты, в том числе по повышению качества изделий и уровня производственной технологичности для

основных видов материалов, свойства которых приведены на рис. 3. Оценка выполнялась по изменению скорости продольной подачи инструмента (ЭИ) в жидкой рабочей среде под давлением в зависимости от глубины прошивки.

На рис. 4 зависимость 1 отражает изменение скорости подачи электрода-инструмента при обработке деталей из нержавеющей стали на базе железа, никеля, хрома, титана и других составляющих, применяемых в авиакосмической отрасли, а зависимость 2 характеризует те же показатели для конструкционной стали типа Ст45. Комбинированная электроэрозионно-химическая прошивка образцов из данных материалов выполнялась на режимах, приведённых в табл. 1 и 2, для сравнения с показателями, приведёнными на рис. 4, при изменении глубины до 4,5-5 мм. При дальнейшем увеличении глубины прошивки скорость подачи стабилизировалась до предельной глубины 8-9 мм. Наблюдаемое изменение зависимостей на рис. 4 для всех рассмотренных видов металлических материалов позволяет утверждать, что комбинированные процессы перспективны для применения в технологических комплексах, т.к. не требуют глубокой перенастройки оборудования при различных сочетаниях используемых в изделиях материалов.

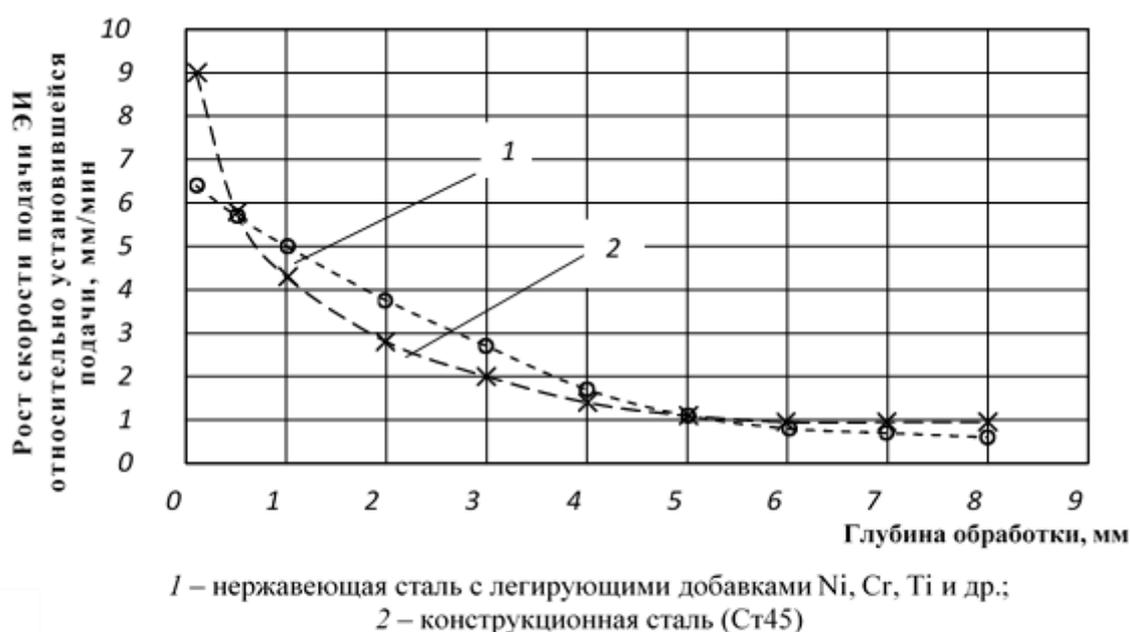


Рисунок 4 – Изменение скорости прошивки отверстий для различных металлов

В табл. 1 и 2 показаны рекомендуемые режимы прошивки отверстий малого сечения на примерах многоканальных форсунок огневого диска ракетных двигателей.

В табл. 1 приведены параметры технологических режимов метода комбинированной обработки при изготовлении каналов с наложением на инструмент вибраций различной частоты или совместно со световым облучением зоны обработки лазером. В расчётных зависимостях приняты следующие обозначения [1, 2]:  $\alpha$  – электрохимический эквивалент материала заготовки, г/А·сек;  $\gamma$  – плотность материала заготовки;  $n$  – выход материала заготовки по току;  $X$  – удельная проводимость рабочей среды;  $U$  – напряжение на электродах, В;  $\Delta U$  – потери напряжения, В;  $S$  – установившийся межэлектродный зазор, мм;  $S_0$  – начальный межэлектродный зазор, мм.

В табл. 2 даны сводные сведения по выбору жидких рабочих сред для типовых марок обрабатываемых материалов и диапазоны изменения основных режимных параметров при комбинированной прошивке. Приведённые здесь сведения носят рекомендательный характер и могут быть конкретизированы по результатам опытных работ, что частично отражено в работе [1].

Таблица 1 – Режимы и расчётные технологические показатели электроэрозионнохимической прошивки

| Наименование метода   | Режимы и расчётные технологические показатели [4]  | Достигнутые показатели  |
|---|--|---|
| 1   | 2  | 3   |
| Электрохимическая размерная обработка с наложением ультразвуковых колебаний | Напряжение – 10 ÷ 15 В;<br>Частота колебаний 18 ÷ 22 кГц;<br>Амплитуда колебаний – до 40 мкм;<br>Скорость подачи инструмента: $V_k = V_{\text{эхо}} + V_{\text{узо}}$ ,<br>где $V_{\text{узо}}$ – скорость съёма за счёт ультразвуковой обработки и интенсификации процесса анодного растворения   | Скорость прошивки – 2,5 ÷ 3 мм/мин;<br>Шероховатость – 2,5 ÷ 3 мкм;<br>Погрешность – 0,35 ÷ 0,4 мм;<br>Удельный расход энергии – 100 ÷ 120 кВт·час/кг |
| Электрохимическая размерная обработка с наложением низкочастотных колебаний | Напряжение – 10 ÷ 15 В,<br>Частота колебаний – 10 ÷ 100 Гц,<br>Амплитуда (0,3 ÷ 0,5) $S_0$ ,<br>Скорость прокачки рабочей среды $V_{\text{ж}} > 2$ м/с,<br>Скорость подачи инструмента:<br>$V_k = \frac{\alpha}{\gamma} \eta \frac{\beta \chi (U - \Delta U)}{S},$<br>где $\beta = (1,2 \div 1,3)$ – показатель степени, учитывает воздействие колебаний | Скорость прошивки возрастает на 20 %;<br>Остальные показатели соответствуют электрохимической размерной обработке                                     |
| Электрохимическая размерная обработка с облучением лазером                  | Напряжение – 6 ÷ 8 В,<br>Скорость подачи инструмента:<br>$V_L = \frac{\alpha}{\gamma} \eta \frac{\bar{\beta} \chi (U - \Delta U)}{S},$<br>где $\bar{\beta} = 1,5 \div 3,0$   | Скорость прошивки в начале обработки возрастает до 20 раз   |

Таблица 2 – Состав рабочей среды и отличительные режимы электроэрозионнохимической прошивки для различных металлических сплавов

| Обрабатываемый материал          | Состав рабочей среды  | Напряжение, В | Скорость прокачки рабочей среды, м/с |
|----------------------------------|---|---------------|--------------------------------------|
| 1                                | 2   | 3             | 4                                    |
| Сталь конструкционная            | Токопроводящие эмульсии (СОЖ);<br>Слабые растворы: $\text{NaNO}_3$ (6 ÷ 8 %) с 0,5 ÷ 1% $\text{NaNO}_2$ | 45 ÷ 65       | более 4                              |
| Нержавеющие и жаропрочные сплавы | Те же   | 30 ÷ 40       | 4 ÷ 6                                |
| Титановые сплавы                 | Слабые растворы $\text{NaCl}$ (6 ÷ 10 %)  | 40 ÷ 60       | 5 ÷ 8                                |
| Алюминиевые сплавы               | Слабые растворы $\text{NaNO}_3$   | 45 ÷ 55       | 3 ÷ 5                                |

В работе [8] были проведены исследования по разработке комбинированных технологий для повышения качества изделий за счёт использования различных сочетаний и комбинаций покрытий с целью повышения эксплуатационных характеристик изделий. Эти работы можно рассматривать, как одно из главных направлений перспективных технологиче-

ских исследований в области повышения качества продукции машиностроения. Так, для деталей горячей зоны ракетных двигателей в работах [8] и [9] предложено применять многокомпонентные, многослойные покрытия с использованием керамических гранул, что совместно с охлаждением топлива позволило достичь многократного повышения термостойкости камеры сгорания жидкостных ракетных двигателей и обеспечить многократные успешные пуски космических аппаратов. В настоящее время уже достигнуто 4-5-кратное повышение ресурса современных жидкостных ракетных двигателей и изучается возможность увеличения количества пусков до 45-50 раз, что значительно снижает затраты на изделия, их эксплуатацию и подготовку к очередным пускам.

Табл. 3 отражает результаты исследований работы [10] по повышению термостойкости деталей из алюминиевых сплавов путём нанесения защитных покрытий из чугуна в рабочих средах предложенного состава с различным агрегатным состоянием на базе известных флюсов, применяемых преимущественно в форме паст различной вязкости. За счёт тугоплавкости чугуна достигнута возможность получить для горячей зоны изделий облегчённые детали с хорошими защитными свойствами, например, при работе в морской воде. А при использовании более лёгких алюминиевых сплавов снижается масса изделий, облегчается и удешевляется их изготовление, что может являться решающим фактором при оценке производственной технологичности и показателей качества создаваемой продукции [4].

Таблица 3 – Состав используемых флюсовых паст для термостойких покрытий из чугуна

| Марка флюса | Массовая доля элемента, % |                                       |                  |                                |                  |     |      |                                  |
|-------------|---------------------------|---------------------------------------|------------------|--------------------------------|------------------|-----|------|----------------------------------|
|             | NaF                       | TiO <sub>2</sub>                      | Ti порошок (ПТМ) | Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | SiO <sub>2</sub> | KCl | NaCl | Na <sub>3</sub> AlF <sub>6</sub> |
| ФС-71       | 6,4                       | 13,6                                  | 13,6             | 9,1                            | 57,3             | –   | –    | –                                |
| АН-А1       | –                         | –                                     | –                | –                              | –                | 50  | 20   | 30                               |
| ЖА-64       | –                         | –                                     | –                | –                              | 3                | 38  | 15   | 44                               |
| АНФ-28      | CaF<br>41-49              | Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub><br>0-5 | CaO<br>26-32     | MgO<br>0-6                     | 11-15            | –   | –    | –                                |

#### 4 Обсуждение и заключение

Результаты работы показывают, что замена освоенных тепловых и электрохимических методов обработки деталей комбинированными процессами позволяет:

- повысить уровень технологичности на порядок и более, сохранив при этом требуемые показатели качества обработки для основных видов материалов;
- обеспечить весомые технико-экономические результаты, в том числе, за счёт отсутствия необходимости глубокой перенастройки оборудования при различных сочетаниях используемых в изделиях материалов;
- получать как прошивные отверстия разного профиля в деталях, так и многокомпонентные, многослойные термостойкие покрытия.

Обоснованность полученных результатов комбинированных методов на основе разработанных режимов и выбранных жидких рабочих сред для типовых марок обрабатываемых материалов подтверждается примерами их эффективного применения в авиакосмической отрасли машиностроения:

- для освоенных и новых процессов комбинированного прошивания отверстий в типовых металлических деталях, в том числе, в многоканальных форсунках жидкостных ракетных двигателей с наложением на инструмент вибраций различной частоты или совместно со световым облучением зоны обработки лазером.

– для нанесения покрытий на теплонагруженные детали, теплостойкость которых обеспечивается за счёт использования материальной композиции чугуна с керамическими гранулами, в рабочих средах предложенного состава с различным агрегатным состоянием на базе известных флюсов, применяемых преимущественно в форме паст различной вязкости. Это особенно важно для деталей из лёгких алюминиевых сплавов, при использовании которых снижается масса изделий, облегчается и удешевляется их изготовление, что может являться решающим фактором при оценке производственной технологичности и показателей качества создаваемой продукции [4].

Следует отметить, что приведённые в работе сведения носят рекомендательный характер и могут быть конкретизированы по результатам опытных работ.

Рассмотренные в статье материалы позволяют оценить состояние и пути совершенствования комбинированных методов обработки наукоемких изделий, обосновать основные направления исследований по повышению качества продукции и развитию технологической науки в области отечественного машиностроения.

### Список литературы

- 1 Смоленцев, Е. В. Проектирование электрических и комбинированных методов обработки. М: Машиностроение, 2005. – 511 с.
- 2 Справочник технолога / Под общей редакцией А. Г. Сулова М: Инновационное машиностроение, 2019. – 800 с.
- 3 Аддитивные технологии изготовления инструментов для комбинированных методов обработки / В. П. Смоленцев, Н. Н. Ненахов, А. А. Извеков, И. Г. Стародубцев // Наукоемкие технологии в машиностроении. – 2022. – № 7 (133). – С. 3-8.
- 4 Сафонов, С. В. Методология отработки технологичности при запуске в производство наукоемких изделий авиакосмической техники / С. В. Сафонов, В. П. Смоленцев, А. В. Мандрыкин // Наукоемкие технологии в машиностроении, №7 (97), 2019. - С.30-34.
- 5 Теоретические основы проектирования технологических комплексов / А. М. Русецкий и др.; под. общ. ред. А.М. Русецкого // Минск: Беларус. наука. – 2012. – 239 с.
- 6 Смоленцев, В. П. Электрохимическое маркирование деталей / В. П. Смоленцев, Г. П. Смоленцев, З. Б.Садыков // М: Машиностроение. – 1983. – 72 с.
- 7 Пат. 2537410.РФ.В23Н. Электрод-инструмент для прошивки отверстий / Смоленцев В. П. Салтанаева Е. А, Смоленцев Е. В, Коптев И. Т., Пишкова Н. В. // Патентообладатель ГОУВПО «ВГТУ» №2012140004, заявл.18.09.2012, опубл.10.01.2015. Бюл. №1.
- 8 Смоленцев, В. П. Механизм формирования высокоресурсного термостойкого покрытия / В. П. Смоленцев, А. И. Портных, Е. В. Паничев // Вестник Воронежского государственного технического университета. - 2019. – Т.15. – № 1. – С. 96-99.
- 9 Портных, А. И. Повышение эксплуатационных характеристик деталей путём модификации поверхностного слоя. / А. И. Портных, С. В. Сафонов, В. П. Смоленцев // Прогрессивные машиностроительные технологии, оборудование и инструменты. - Том 3. Коллект. монография. – М.: Изд. дом «Спектр», 2014. – С. 365-405.
- 10 Смоленцев, В. П. Модификация поверхностного слоя алюминиевых сплавов электроэрозийным нанесением покрытий / В. П. Смоленцев, А. В. Норман, В. В. Золотарев Наукоемкие технологии в машиностроении. – 2016. – № 4. – С.14-21.

### References

- 1 Smolentsev E. V. Design of electrical and combined processing methods. Moscow: Mechanical Engineering, 2005. – 511 p.
- 2 Handbook of a technologist / Under the general editorship of A. G. Suslov Moscow: Innovative mechanical engineering, 2019. – 800 p.
- 3 Additive technologies for manufacturing tools for combined processing methods / V. P. Smolentsev, N. N. Nenakhov, A. A. Izvekov, I. G. Starodubtsev // Science-intensive technologies in mechanical engineering. – 2022. – No. 7 (133). – P. 3-8.

4 Safonov S. V. Methodology for testing manufacturability when launching high-tech aerospace products into production / S. V. Safonov, V. P. Smolentsev, A. V. Mandrykin // High-tech technologies in mechanical engineering, No. 7 (97), 2019. – P. 30-34.

5 Theoretical foundations for designing technological complexes / A. M. Rusetsky et al.; under. general. ed. A. M. Rusetsky // Minsk: Belarusian. science. – 2012. – 239 p.

6 Smolentsev V. P. Electrochemical marking of parts / V. P. Smolentsev, G. P. Smolentsev, Z. B. Sadykov // M: Mechanical Engineering. – 1983. – 72 p.

7 Patent. 2537410.RF.B23N. Electrode-tool for drilling holes / Smolentsev V. P., Saltanaeva E. A., Smolentsev E. V., Koptev I. T., Pishkova N. V. // Patent holder of the State Educational Institution of Higher Professional Education “VSTU” No. 2012140004, declared. 18.09.2012, published. 10.01.2015. Bulletin №1.

8 Smolentsev V. P. Mechanism of formation of high-resource heat-resistant coating / V. P. Smolentsev, A. I. Portnykh, E. V. Panichev // Bulletin of the Voronezh State Technical University. – 2019. – Vol. 15. – No. 1. – P. 96-99.

9 Portnykh A. I. Improving the performance characteristics of parts by modifying the surface layer. / A. I. Portnykh, S. V. Safonov, V. P. Smolentsev // Progressive mechanical engineering technologies, equipment and tools. - Volume 3. Collected monograph. – M.: Publishing house "Spectr", 2014. – P. 365-405.

10 Smolentsev V. P. Modification of the surface layer of aluminum alloys by electrical discharge coating / V. P. Smolentsev, A. V. Norman, V. V. Zolotarev High-tech technologies in mechanical engineering. – 2016. – No. 4. – P. 14-21.

© Смоленцев В. П., Извеков А. А., Стародубцев И. Г., 2024



2.9.5 – эксплуатация автомобильного транспорта

**ВЛИЯНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК  
МЕЖОСЕВОГО ДИФФЕРЕНЦИАЛА  
НА РАСПРЕДЕЛЕНИЕ КРУТЯЩИХ  
МОМЕНТОВ МЕЖДУ ВЕДУЩИМИ  
ОСЯМИ ПОЛНОПРИВОДНОГО  
АВТОМОБИЛЯ**

**THE EFFECT OF THE CHARACTERISTICS  
OF THE CENTER DIFFERENTIAL  
ON THE DISTRIBUTION OF TORQUES  
BETWEEN THE DRIVING AXLES  
OF AN ALL-WHEEL DRIVE CAR**

✉<sup>1</sup> **Волков Владимир Сергеевич**,  
д.т.н., профессор, Воронежский государственный лесотехнический университет имени Г.Ф. Морозова, г. Воронеж, e-mail: [vl.volkov@yandex.ru](mailto:vl.volkov@yandex.ru)

✉<sup>1</sup> **Volkov Vladimir Sergeevich**,  
doctor of engineering sciences, professor, Voronezh state forestry university named after G.F. Morozov, Voronezh, e-mail: [vl.volkov@yandex.ru](mailto:vl.volkov@yandex.ru)

**Лебедев Евгений Григорьевич**,  
ассистент, Воронежский государственный лесотехнический университет имени Г.Ф. Морозова, г. Воронеж, e-mail: [lebedev-rti@mail.ru](mailto:lebedev-rti@mail.ru)

**Lebedev Evgeniy Grigoryevich**,  
assistant, Voronezh state forestry university named after G.F. Morozov, Voronezh, e-mail: [lebedev-rti@mail.ru](mailto:lebedev-rti@mail.ru)

**Митрохин Евгений Александрович**,  
магистрант, Воронежский государственный лесотехнический университет имени Г.Ф. Морозова, г. Воронеж, e-mail: [mitrohin20154@gmail.com](mailto:mitrohin20154@gmail.com)

**Mitrohin Evgeniy Alexandrovich**,  
master's student, Voronezh state forestry university named after G.F. Morozov, Voronezh, e-mail: [mitrohin20154@gmail.com](mailto:mitrohin20154@gmail.com)

**Аннотация.** Рассмотрена схема влияния коэффициента блокировки межосевого дифференциала на распределение крутящих моментов между ведущими мостами автомобиля с полным приводом и возникающими при этом касательными реакциями на ведущих колёсах. При этом учтено влияние характеристик деформации эластичных шин при переездах дорожных неровностей.

**Annotation.** The scheme of the influence of the locking coefficient of the center differential on the distribution of torques between the drive axles of a four-wheel drive car and the tangential reactions on the drive wheels that occur in this case is considered. At the same time, the influence of the deformation characteristics of elastic tires when moving road bumps is taken into account.

**Ключевые слова:** ДИФФЕРЕНЦИАЛ, ПОЛНЫЙ ПРИВОД, КРУТЯЩИЙ МОМЕНТ, КОЛЁСА, КАСАТЕЛЬНЫЕ РЕАКЦИИ, ШИНА.

**Keywords:** DIFFERENTIAL, ALL-WHEEL DRIVE, TORQUE, WHEELS, TANGENTIAL REACTIONS, TIRE.

<sup>1</sup> Автор для ведения переписки

## 1 Состояние вопроса исследования и актуальность работы

Транспортная работа автомобиля с полным приводом предусматривает его использование преимущественно во внедорожных условиях с наличием труднопроходимых участков, характеризуемых большим числом неровностей на опорной поверхности. В этой связи, силы сцепления шин с опорной поверхностью и циркуляция крутящего момента между ведущими осями во многом определяются характеристиками межосевого дифференциала, распределяющего потоки мощности двигателя к ведущим колёсам. Относительно широкое распространение получили конструкции с так называемым заблокированным приводом [1, 2], совмещаемым с отключаемым, как правило, передним ведущим мостом. В качестве основных достоинств такого решения можно рассматривать его конструктивную простоту, а также достаточно высокую проходимость транспортного средства, обеспечиваемую локализацией колебаний касательных реакций на ведущих колёсах при переездах неровностей [3]. Вместе с тем, такой тип привода обладает значительной материалоёмкостью, а также повышенным расходом топлива вследствие наличия циркуляции крутящего момента между колёсами ведущих мостов. Введение в схему трансмиссии дифференциального привода позволяет ликвидировать затраты мощности на циркуляцию крутящего момента между колёсами ведущих мостов и в определённой мере способствует снижению материалоёмкости агрегатов трансмиссии, однако не может полностью локализовать колебания касательных реакций на ведущих колёсах, вследствие чего являются их частые пробуксовки при изменениях режимов движения транспортного средства.

Тема влияния характеристик дифференциального привода на касательные реакции, возникающие в зонах контактных поверхностей сцепления ведущих колёс с опорной поверхностью затронута во многих научных публикациях, в значительной части которых рассматривается зависимость касательных продольных и боковых сил на колёсах от коэффициента блокировки дифференциала. В частности, в работе [4] приведены сведения о влиянии характеристик трансмиссии на распределение крутящего момента между колёсами ведущего моста с учётом неустановившихся режимов движения автомобиля по деформируемому грунту. В работе [5] содержатся результаты исследований по влиянию дифференциального привода ведущих колёс на углы увода колёс ведущих осей при движении по криволинейным траекториям. В работе [6] указывается о влиянии характеристик дифференциального привода на стабилизацию автомобиля при выходе из поворота. В работе [7] затронуты вопросы корреляции характеристик межколёсного дифференциала и показателей проходимости автомобиля. В работах [8, 10] рассматриваются вопросы влияния характеристик дифференциала на показатели устойчивости прямолинейного движения автомобиля.

### *Формулировка проблемы исследования*

В практике транспортной работы автомобилей с так называемым интеллектуальным полным приводом [9, 11, 12] часто возникают ситуации, когда при движении по деформируемой опорной поверхности, включение дополнительного, как правило, заднего моста происходит с некоторым запаздыванием после начала буксования колёс переднего ведущего моста, причём, с резким возрастанием продольных касательных реакций, что приводит к буксованию колёс и снижению проходимости автомобиля. Как показывают проведенные ранее исследования [10, 13, 14], наличие симметричного межосевого дифференциала не может обеспечить в сложных дорожных условиях стабильную величину касательных реакций на колёсах, позволяющую снизить вероятность их пробуксовки и сохранить курсовую устойчивость автомобиля.

Целью настоящей работы является попытка установления оптимальной величины коэффициента блокировки межосевого дифференциала, позволяющей снизить риск возникновения их пробуксовки и предотвратить при этом боковые смещения автомобиля.

## 2 Материалы и методы

Характер распределения крутящих моментов между карданными валами привода ведущих мостов, а, следовательно, и касательных реакций между колёсами этих мостов, зависит от типа межосевого дифференциала, в качестве основной характеристики которого выступает коэффициент ( $k_6$ ) его блокировки, определяемый по отношению [15]:

$$k_6 = \frac{M_{отс} - M_{заб}}{M_{отс} + M_{заб}} = \frac{M_{тр}}{M_{кд}},$$

где  $M_{отс}$  и  $M_{заб}$  – соответственно моменты на отстающем и забегающем карданных валах привода ведущих мостов, Н·м;  $M_{тр}$  – момент внутреннего трения в дифференциале, Н·м;  $M_{кд}$  – момент, подводимый к коробке дифференциала, Н·м.

В варианте при заблокированном дифференциале, когда  $k_6 = 1$  и связь между мостами является жёсткой, при наличии симметричных дифференциалов между колёсами на ведущих мостах, возникают суммарные касательные реакции  $P_{x1}$  и  $P_{x2}$ . С учётом того, что для одного колеса зависимость между радиусом качения колеса  $r_k$  и его касательной реакцией  $P_x$  определяется выражением [16]:

$$r_k = r_{k0} - k_x P_x,$$

где  $r_{k0}$  – радиус свободного качения колеса, м;  $k_x$  – коэффициент тангенциальной эластичности шины, для колёс передней и задней ведущих осей такие зависимости будут иметь вид:

$$r_{x1} = r_{k01} - k_{x1} P_{x1}; r_{x2} = r_{k02} - k_{x2} P_{x2}.$$

Кроме этого, по уравнению  $v_k = r_k \omega_k$  связи линейной  $v_k$  и угловой  $\omega_k$  скорости колеса, можно определить текущие значения радиусов колёс передней и задней ведущих осей:

$$r_{k1} = \frac{v_{k1}}{\omega_{k1}}; r_{k2} = \frac{v_{k2}}{\omega_{k2}}.$$

При этом в качестве допущения принимается, что межколёсные дифференциалы передней и задней осей являются симметричными и в расчёте используется средняя угловая скорость, определяемая как полусумма угловых скоростей левого и правого колёс каждой оси [10, 17]. Применительно к схеме, показанной на рис. 1:

$$P_{x1} = P_{x1п} + P_{x1л}; P_{x2} = P_{x2п} + P_{x2л}.$$

Тогда проекция на продольную ось автомобиля всех внешних сил, действующих на ведущие мосты:

$$P_{\Sigma x} = P_{x1} + P_{x2}.$$

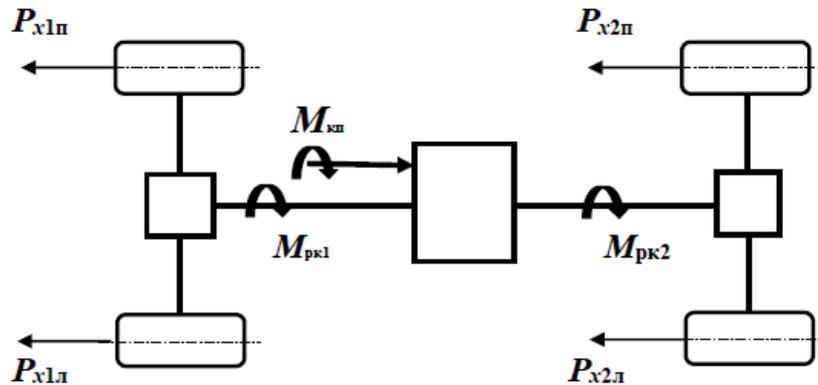
Исходя из этого, можно получить суммарные касательные реакции, действующие на колёса передней и задней осей:

$$P_{x1} = \frac{P_{\Sigma x} k_{x1} + (r_{kx1} - r_{kx2})}{k_{x1} + k_{x2}}; P_{x2} = \frac{P_{\Sigma x} k_{x2} + (r_{kx1} - r_{kx2})}{k_{x1} + k_{x2}}.$$

С использованием связи между моментами, подводимыми к колёсным дифференциалам передней и задней осей и касательными реакциями на колёсах, получается:

$$\frac{M_{pk1}}{M_{pk2}} = \frac{P_{\Sigma x} k_{x2} + (r_{kx1} - r_{kx2}) + \left( P_{\Sigma z1} f_{k1} + \frac{J_k j_a}{r_k r_d} \right) (k_{x1} + k_{x2})}{P_{\Sigma x} k_{x1} - (k_{x1} - k_{x2}) + \left( P_{\Sigma z2} f_{k2} + \frac{J_k j_a}{r_k r_d} \right) (k_{x1} + k_{x2})}$$

где  $j_a$  – ускорение автомобиля,  $m/c^2$ ;  $J_k$  – момент инерции колеса относительно оси его вращения,  $kgm^2$ ;  $r_d$  – радиус посадочного обода диска колеса,  $m$ ;  $f_1$  и  $f_2$  – соответственно коэффициенты сопротивления качению передних и задних колёс;  $P_{z1}$  и  $P_{z2}$  – соответственно вертикальные нагрузки на переднюю и заднюю оси,  $kg$ .



$M_{кп}$  – момент, подводимый к раздаточной коробке;  $M_{рк1}$  и  $M_{рк2}$  – соответственно моменты, подводимые к передней и задней ведущим осям;  $P_{x1л}$ ,  $P_{x1п}$ ,  $P_{x2п}$  и  $P_{x2л}$  – соответственно продольные касательные реакции на правом и левом колёсах передней и задней осей

Рисунок 1 – Схема к расчёту сил и моментов, действующих в трансмиссии автомобиля с полным приводом

В случае, если соблюдаются условия равенства:

$$P_{\Sigma x} k_{x1} + \left( P_{\Sigma z2} f_2 + \frac{J_k j_a}{r_k r_d} \right) (k_{x1} + k_{x2}) = r_{k01} + r_{k02},$$

то движение автомобиля осуществляется при отключённой задней оси и  $\frac{M_{pk1}}{M_{pk2}} = \infty$ .

В случае, если соблюдаются условия равенства:

$$P_{\Sigma x} k_{x1} + \left( P_{\Sigma z2} f_2 + \frac{J_k j_a}{r_k r_d} \right) (k_{x1} + k_{x2}) = r_{k02} - r_{k01},$$

то движение автомобиля осуществляется при отключённой передней оси и  $\frac{M_{pk1}}{M_{pk2}} = 0$ .

В случаях  $P_{\Sigma x} k_{x1} + \left( P_{\Sigma z2} f_2 + \frac{J_k j_a}{r_k r_d} \right) (k_{x1} + k_{x2}) < r_{k01} + r_{k02}$ ,

или  $P_{\Sigma x} k_{x1} + \left( P_{\Sigma z2} f_2 + \frac{J_k j_a}{r_k r_d} \right) (k_{x1} + k_{x2}) < r_{k02} - r_{k01}$ ,

будет соблюдаться неравенство  $\frac{M_{pk1}}{M_{pk2}} < 0$ , то соотношение между моментами привода передней и задней осей будет ограничиваться пределами  $\frac{1}{k_6} \leq \frac{M_{pk1}}{M_{pk2}} \leq k_6$ , откуда следует, что если межосевой дифференциал не срабатывает, то распределение моментов между ведущими мостами осуществляется в равных долях [18]. В случае срабатывания дифференциала можно принять допущение, что соотношение моментов в приводах мостов равно коэффициенту его блокировки дифференциала, то есть  $\frac{M_{pk1}}{M_{pk2}} = k_6$ , то есть колёса передней оси являются отстающими, а колёса задней оси – забегающими [15]. Тогда распределение касательных реакций на колёсах передней и задней осей определится следующими выражениями:

$$P_{x1} = \frac{M_{pk1}}{r_d} - P_{\Sigma z1} f_1 - \frac{J_k j_a}{r_k r_d}; \quad P_{x2} = \frac{M_{pk2}}{r_d} - P_{\Sigma z2} f_2 - \frac{J_k j_a}{r_k r_d},$$

при этом  $P_{x1} + P_{x2} = P_{\Sigma x}$ ;  $M_{pk1} = M_{pk2} k_6$ .

Суммарные касательные силы  $P_{x1}$  и  $P_{x2}$ , действующие на колёса передней и задней осей, определяются выражениями:

$$P_{x1} = \frac{P_{\Sigma x} k_6 - P_{x1} f_1 + P_{x2} f_2 k_6 + \frac{J_k j_a}{r_k r_d} (1 - k_6)}{1 + k_6}; \quad P_{x2} = \frac{P_{\Sigma x} k_6 - P_{x2} f_2 + P_{x1} f_1 k_6 + \frac{J_k j_a}{r_k r_d} (1 - k_6)}{1 + k_6}.$$

### 3 Результаты исследований

В рассмотренном случае радиус качения передних колёс превышает радиус качения задних колёс,  $r_{k1} > r_{k2}$ , и соответственно, разность радиусов их свободного качения  $r_{k01}$  и  $r_{k02}$ , должна определяться неравенством:

$$r_{k01} - r_{k02} > \frac{(k_{x1} k_6 - k_{x2}) P_{\Sigma x} - \left[ P_{z1} f_1 - k_6 P_{x2} f_2 - \frac{J_k j_a}{r_k r_d} (1 - k_6) \right] (k_{x1} + k_{x2})}{1 + k_6}.$$

В случае, когда  $\frac{M_{pk2}}{M_{pk1}} = k_6$ , то есть колёса передней оси являются забегающими, а колёса задней оси – отстающими, распределение касательных реакций на колёсах ведущих осей будет характеризоваться выражениями:

$$P_{x1} = \frac{P_{\Sigma x} k_6 - P_{x1} f_1 + P_{x2} f_2 - \frac{J_k j_a}{r_k r_d} (1 - k_6)}{1 + k_6}; \quad P_{x2} = \frac{P_{\Sigma x} k_6 + P_{x2} f_2 - P_{x1} f_1 - \frac{J_k j_a}{r_k r_d} (1 - k_6)}{1 + k_6}.$$

В данном случае радиус качения задних колёс превышает радиус качения передних колёс, то есть  $r_{k1} < r_{k2}$ . Соответственно разность радиусов их свободного качения определится неравенством:

$$r_{k01} - r_{k02} < \frac{(k_{x1} k_6 - k_{x2}) P_{\Sigma x} + \left[ P_{z1} f_1 - k_6 P_{x2} f_2 + \frac{J_k j_a}{r_k r_d} (1 - k_6) \right] (k_{x1} + k_{x2})}{1 + k_6}.$$

При проезде передними колёсами автомобиля выступающей неровности распределение угловых скоростей колёс определяется зависимостью:

$$\frac{h_d + r_{k1}}{h_d - r_{k2}} = \frac{r_{k2}\omega_{k2}}{r_{k1}\omega_{k1}},$$

где  $h_d$  – высота дорожной неровности, м;  $\omega_1$  и  $\omega_2$  – соответственно угловые скорости колёс передней и задней осей, рад/с.

Если межосевой дифференциал заблокирован, то распределение продольных касательных реакций определяется зависимостями:

$$P_{x1} = \frac{(2r_k - h_d)P_{z1}\varphi_x k_{x2} + 2h_d(r_{k0} - r_k)}{2h_d(k_{x1} + k_{x2})}; P_{x2} = \frac{(2r_k - h_d)P_{z2}\varphi_x k_{x1} + 2h_d(r_{k0} - r_k)}{2h_d(k_{x1} + k_{x2})}.$$

В таком случае момент, циркулирующий между колёсами ведущих осей, при условии отсутствия буксования колёс, определится из выражения:

$$M_{ц} = (P_{x1} - P_{x2})r_k(k_{x1} + k_{x2}) = M_1 - M_2(k_{x1} + k_{x2}).$$

При этом моменты начала буксования ведущих колёс:

$$M_{1букс} = P_{1z}r_k\varphi_x; M_{2букс} = P_{2z}r_k\varphi_x.$$

Из приведенных формул видно, что величина циркулирующего между ведущими осями момента  $M_{ц}$ , определяется высотой дорожной неровности  $h_d$ , радиусом колеса  $r_k$ , а также коэффициентами тангенциальной эластичности колёс передней и задней осей. Применительно к конструкции автомобиля УАЗ-2206 зависимость циркулирующего между осями момента от высоты дорожной неровности показана на рис. 2.

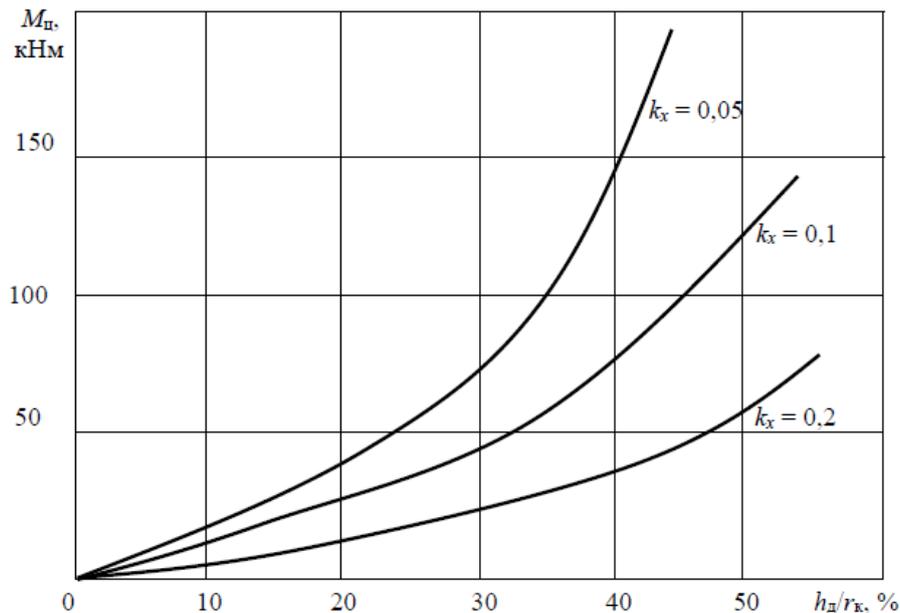


Рисунок 2 – Зависимость момента, циркулирующего между ведущими осями от соотношения высоты дорожной неровности к радиусу колеса при разных значениях коэффициента тангенциальной эластичности шин  $k_x$

Как видно из рис. 2, циркуляция момента в трансмиссии автомобиля имеет нелинейную зависимость от высоты переезда дорожной неровности. При этом такая зависимость происходит тем значительнее, чем меньше коэффициент тангенциальной эластичности шин. Следовательно, чем большей эластичностью обладают шины, тем меньше величина циркулирующего в трансмиссии автомобиля момента.

При известных значениях циркулирующего момента и определяющих его величину факторах можно определить мощность, затрачиваемую на его циркуляцию в трансмиссии автомобиля при заблокированном межосевом дифференциале с использованием зависимости:

$$N_{ц} = \frac{M_{ц} V_a}{2\pi r_k \cdot 9549} = \frac{M_{ц} V_a}{59967 r_k},$$

где  $V_a$  – скорость автомобиля при переезде неровности, м/с;  $r_k$  – радиус колеса, м.

Как видно из рис. 3, мощность, затрачиваемая на циркуляцию крутящего момента между полуосями, определяется, прежде всего, скоростью движения автомобиля при переезде препятствия, а также соотношением высоты препятствия к радиусу колеса. В расчёте использовалась величина коэффициента тангенциальной эластичности шин  $k_x = 0,1$ , соответствующая номинальному давлению воздуха в шинах.

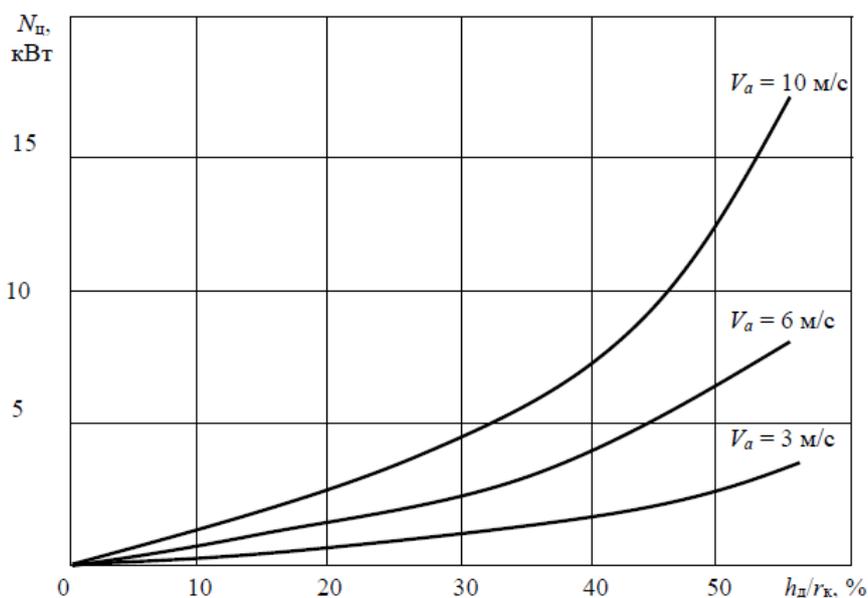


Рисунок 3 – Зависимость мощности, затрачиваемой на циркуляцию момента между ведущими осями от соотношения высоты неровности и радиуса колеса при заблокированном межосевом дифференциале

При разблокированном симметричном дифференциале величины  $M_{ц}$  и  $N_{ц}$  обнуляются, однако в таком случае возрастает вероятность начала пробуксовки ведущих колёс, что вызывает ухудшение проходимости автомобиля. Рациональным решением может быть использование межосевого самоблокирующегося или дифференциала повышенного трения, обладающего приемлемым уровнем коэффициента его блокировки

Как видно из рис. 4, циркулирующий в трансмиссии момент, возникающий при переезде препятствия, в значительной мере зависит от величины коэффициента блокировки межосевого дифференциала. При характеристике  $k_6 = 0,1$ , близкой к характеристике симметричного дифференциала, величина циркулирующего в трансмиссии момента является минимальной,

однако, это повышает вероятность начала буксования колёс. При больших величинах коэффициента блокировки дифференциала колёса приобретают меньшую склонность к пробуксовке, но это приводит к некоторому возрастанию циркулирующего момента, что является нежелательным. Предметом дальнейшего поиска может быть определение оптимальной величины коэффициента блокировки межосевого дифференциала, снижающего вероятность наступления буксования ведущих колёс при умеренном возрастании циркулирующего момента в трансмиссии.

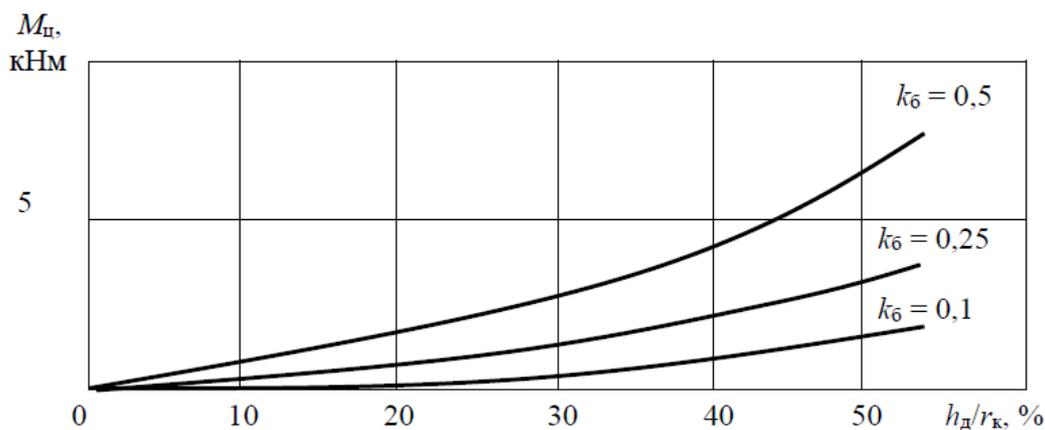


Рисунок 4 – Зависимость момента, циркулирующего в трансмиссии автомобиля с полным приводом от соотношения высоты неровности и радиуса колеса при разных значениях коэффициента блокировки межосевого дифференциала.

#### 4 Обсуждение и заключение

Результаты работы по оценке влияния характеристик межосевого дифференциала на распределение крутящих моментов между ведущими осями обсуждались на научно-практических конференциях, проводимых в Воронежском государственном лесотехническом университете имени Г.Ф. Морозова в 2019-2021 годах и в Орловском государственном университете в 2022 и 2023 годах. При этом было отмечено, что наличие заблокированного привода, способствует повышению проходимости автомобиля, однако значительно нагружает агрегаты трансмиссии циркулирующим моментом. Авторам данной работы было указано, что направление поиска целесообразно сосредоточить на вопросах определения оптимальной величины коэффициента блокировки дифференциала, позволяющей снизить вероятность пробуксовки колёс при незначительной величине циркулирующего в трансмиссии момента. Авторами работы было выражено согласие с данным замечанием, однако при этом было пояснено, что поиск оптимальной величины коэффициента блокировки межосевого дифференциала необходимо согласовывать с показателями жёсткости и поглощающей способности используемых на автомобиле шин, а также уровнем их тангенциальной эластичности. При обсуждении результатов работы отмечалось, что по результатам, показанным на рис. 3 и 4, может быть осуществлён анализ влияния циркулирующего в трансмиссии момента на показатели топливной экономичности автомобиля.

##### Заключение

1 Принудительная блокировка межосевого дифференциала в трансмиссии автомобиля с полным приводом при переезде неровности сопровождается значительным уровнем циркулирующего момента и мощности, затрачиваемой на его преодоление.

2 Циркулирующие в трансмиссии автомобиля момент и мощность резко возрастают с увеличением скорости движения автомобиля через препятствие.

3 Величина коэффициента блокировки межосевого дифференциала существенно влияет на уровень циркулирующего в трансмиссии момента.

В дальнейшей работе целесообразно сосредоточить внимание на определении оптимальной величины коэффициента блокировки межосевого дифференциала, позволяющей снизить вероятность пробуксовки колёс при незначительном уровне циркулирующего в трансмиссии момента и мощности, затрачиваемой на его преодоление.

### Список литературы

- 1 Антонов, Д. А. Теория движения многоосных автомобилей / Д.А. Антонов. - М.: Машиностроение, 1978. – 216 с.
- 2 Аксенов, П. В. Многоосные автомобили / П. В. Аксенов. - М.: Машиностроение, 1980. – 207 с.
- 3 Агейкин, Я. С. Проходимость автомобилей / Я.С. Агейкин. - М.: Машиностроение, 1981. – 232 с.
- 4 Андреев, А. Ф. Дифференциалы колёсных машин / А.Ф. Андреев, В.В. Ванцевич, А.Х. Лефаров; под общ. редакцией А.Х. Лефарова. – М.: Машиностроение, 1987. – 176 с.
- 5 Андреев, А. Ф. Статическая поворотливость полноприводных колёсных машин с дифференциальным межосевым приводом / А.Ф. Андреев, А.Х. Лефаров. - Автотракторостроение. - Минск: Вышэйша школа, 1978, вып. 11. С. 117-125.
- 6 Бухарин, Н. А. Автомобили. Конструкция, нагрузочные режимы, рабочие процессы, прочность агрегатов автомобиля. Учебное пособие для вузов. / Н.А. Бухарин, В.С. Прозоров, М.М. Щукин. – Л.: Машиностроение, 1973. – 504 с.
- 7 Волков, В. С. Специализированный подвижной состав автомобильного транспорта: учебное пособие для вузов / В.С. Волков. – Санкт-Петербург: Лань, 2023. – 216 с.
- 8 Лефаров, А. Х. Дифференциалы автомобилей и тягачей / А.Х. Лефаров. - М.: Машиностроение, 1972. – 147 с.
- 9 Гришкевич, А. И. Автомобили. Теория. Учебник для вузов / А.И. Гришкевич. - Минск: Вышэйша школа, 1986. – 208 с.
- 10 Литвинов, А. С. Управляемость и устойчивость автомобиля / А.С. Литвинов. – М.: Транспорт, 1971. – 416 с.
- 11 Тарасик, В. П. Математическое моделирование технических систем: учебник для вузов / В. П. Тарасик. – Минск, дизайн ПРО, 2004. – 640 с.
- 12 Тарасик, В. П. Моделирование дифференциальных приводов ведущих колёс мобильных машин / В. П. Тарасик, Пузанова О.В., Курстак В.И. – Вестник Белорусско-Российского университета, 2009, № 3 (24). – С. 42-52.
- 13 Круташов, А. В. Дифференциал повышенного трения плюс ПБС. Энергетическая эффективность распределения мощности / А.В. Круташов. //Автомобильная промышленность, 2011, №1. С. 11-13.
- 14 Круташов А.В., Баулина Е.Е., Серебряков В.В. Цилиндрический дифференциал с сателлитами непрерывного чередования (дифференциал «Квайф»). Конструкция, расчёт зацепления, расчёт коэффициента блокировки. - М: Тракторы и сельхозмашины, 2014 – 58 с.
- 15 Лукин, П. П. Конструирование и расчет автомобиля. Учебник для студентов ВТУЗов, обучающихся по специальности "Автомобили и тракторы" / П.П. Лукин, Г.А. Гаспарянц, В.Ф. Родионов. – М.: Машиностроение, 1984 – 376 с.
- 16 Афанасьев, Б.А. Проектирование полноприводных колесных машин: Учебник для вузов / Б.А. Афанасьев, Б.Н. Белоусов, Г.И. Гладов; под ред. А.А. Полуняна. – М.: МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2008 – 496 с.
- 17 Селифонов, В. В. Многоцелевые полноприводные АТС и дифференциал повышенного трения / В.В. Селифонов, А.В. Круташов, Е.Е. Баулина. // Автомобильная промышленность, 2005, №3. – С. 25-29.
- 18 Gethoffen H. Einsatz von Mikroprozessoren in der Nachrichtentechnik. Mikroprozessoren und ihre Anwendungen. / H. Gethoffen // Hrsg. von W. Hiibert und R. Piloty. Munchen, Wien, R. Oldenbourg Verlag, 1977.

### References

- 1 Antonov, D. A. Theory of motion of multi-axle vehicles / D. A. Antonov. - M.: Mashinostroenie, 1978. - 216 p.
- 2 Aksenov, P. V. Multi-axle vehicles / P. V. Aksenov. - M.: Mashinostroenie, 1980. - 207 p.
- 3 Ageikin, Ya. S. Cross-country ability of vehicles / Ya. S. Ageikin. - M.: Mashinostroenie, 1981. - 232 p.

- 4 Andreev, A. F. Differentials of wheeled vehicles / A. F. Andreev, V. V. Vantsevich, A. Kh. Lefarov; under the general editorship of A. Kh. Lefarov. - M.: Mashinostroenie, 1987. - 176 p.
- 5 Andreev, A. F. Static turning ability of all-wheel drive wheeled vehicles with differential interaxle drive / A. F. Andreev, A. Kh. Lefarov. - Automotive and tractor manufacturing. - Minsk: Higher School, 1978, issue 11. Pp. 117-125.
- 6 Bukharin, N. A. Automobiles. Design, load conditions, working processes, strength of vehicle units. Textbook for universities. / N. A. Bukharin, V. S. Prozorov, M. M. Shchukin. - L.: Mechanical Engineering, 1973. - 504 p.
- 7 Volkov, V. S. Specialized rolling stock of automobile transport: textbook for universities / V. S. Volkov. - St. Petersburg: Lan, 2023. - 216 p.
- 8 Lefarov, A.Kh. Differentials of cars and tractors / A.Kh. Lefarov. - M.: Mashinostroenie, 1972. - 147 p.
- 9 Grishkevich, A.I. Cars. Theory. Textbook for universities / A.I. Grishkevich. - Minsk: Vysheysya shkola, 1986. - 208 p.
- 10 Litvinov, A.S. Controllability and stability of the car / A.S. Litvinov. - M.: Transport, 1971. - 416 p.
- 11 Tarasik, V.P. Mathematical modeling of technical systems: textbook for universities / V.P. Tarasik. - Minsk, design PRO, 2004. - 640 p.
- 12 Tarasik, V. P. Modeling of differential drives of driving wheels of mobile machines / V. P. Tarasik, O. V. Puzyanova, V. I. Kurstak. - Bulletin of the Belarusian-Russian University, 2009, No. 3 (24). - P. 42-52.
- 13 Krutashov, A. V. Limited slip differential plus LSD. Energy efficiency of power distribution / A. V. Krutashov. // Automobile industry, 2011, No. 1. P. 11-13.
- 14 Krutashov A. V., Baulina E. E., Serebryakov V. V. Cylindrical differential with continuous alternation satellites (differential "Quaif"). Design, engagement calculation, locking coefficient calculation. - M.: Tractors and agricultural machinery, 2014 – 58 p.
- 15 Lukin, P. P. Design and calculation of the car. Textbook for students of higher technical educational institutions studying in the specialty "Cars and tractors" / P. P. Lukin, G. A. Gasparyanc, V. F. Rodionov. - M.: Mechanical Engineering, 1984 – 376 p.
- 16 Afanasyev, B. A. Design of all-wheel drive wheeled vehicles: Textbook for universities / B. A. Afanasyev, B. N. Belousov, G. I. Gladov; edited by A. A. Polungyan. - M.: Bauman Moscow State Technical University, 2008 – 496 p.
- 17 Selifonov, V. V. Multipurpose all-wheel drive vehicles and limited slip differential / V. V. Selifonov, A.V. Krutashov, E.E. Baulina. // Automotive industry, 2005, No. 3. – pp. 25-29.
- 18 Gethoffen H. Einsatz von Mikroprozessoren in der Nachrichtentechnik. Mikroprozessoren und ihre Anwendungen. / H. Gethoffen // Hrsg. von W. Hiibert und R. Piloty. Munchen, Wien, R. Oldenbourg Verlag, 1977.

© Волков В. С., Лебедев Е. Г., Митрохин Е. А., 2024



2.9.5 – эксплуатация автомобильного транспорта

**ИССЛЕДОВАНИЕ ПОКАЗАТЕЛЕЙ ТЯЖЕСТИ ПОСЛЕДСТВИЙ ОТ ДОРОЖНО-ТРАНСПОРТНЫХ ПРОИСШЕСТВИЙ НА ПРИМЕРЕ СВЕРДЛОВСКОЙ ОБЛАСТИ**

**THE STUDY OF INDICATORS OF THE SEVERITY OF CONSEQUENCES FROM ROAD ACCIDENTS ON THE EXAMPLE OF THE SVERDLOVSK REGION**

✉<sup>1</sup> Цариков Алексей Алексеевич, к.т.н., доцент кафедры «Проектирование и эксплуатация автомобилей», Уральский государственный университет путей сообщения, г. Екатеринбург, e-mail: [Zarikof@mail.ru](mailto:Zarikof@mail.ru)

✉<sup>1</sup> Tsarikov Aleksey Alekseevich, candidate of technical sciences, professor of the department of "Design and operation of automobiles", Ural state university of railway engineering, Yekaterinburg, e-mail: [Zarikof@mail.ru](mailto:Zarikof@mail.ru)

Неволин Дмитрий Германович, д.т.н., профессор кафедры «Проектирование и эксплуатация автомобилей», Уральский государственный университет путей сообщения, г. Екатеринбург, e-mail: [innotrans@mail.ru](mailto:innotrans@mail.ru)

Nevolin Dmitry Germanovich, doctor of technical sciences, professor of the department of "design and operation of automobiles", Ural state university of railway engineering, Yekaterinburg, e-mail: [innotrans@mail.ru](mailto:innotrans@mail.ru)

Сорогин Игорь Георгиевич, к.т.н., доцент кафедры «Проектирование и эксплуатация автомобилей», Уральский государственный университет путей сообщения, г. Екатеринбург, e-mail: [ISorogin@usurt.ru](mailto:ISorogin@usurt.ru)

Sorogin Igor Georgievich, candidate of technical sciences, professor of the department of "Design and operation of automobiles", Ural state university of railway engineering, Yekaterinburg, e-mail: [ISorogin@usurt.ru](mailto:ISorogin@usurt.ru)

**Аннотация.** В статье рассматриваются виды дорожно-транспортных происшествий, повлекших за собой тяжкие последствия. На основе выполненного исследования предложены меры, которые позволят повысить безопасность дорожного движения.

**Annotation.** The article discusses the types of road accidents that have led to serious consequences. Based on the completed research, measures have been proposed that will improve road safety.

**Ключевые слова:** АВАРИЙНОСТЬ, БЕЗОПАСНОСТЬ ДОРОЖНОГО ДВИЖЕНИЯ, ДОРОЖНО-ТРАНСПОРТНОЕ ПРОИСШЕСТВИЕ, ТЯЖЕСТЬ ПОСЛЕДСТВИЙ ОТ ДОРОЖНО-ТРАНСПОРТНОГО ПРОИСШЕСТВИЯ.

**Keywords:** ACCIDENT RATE, TRAFFIC SAFETY, TRAFFIC ACCIDENT, SEVERITY OF CONSEQUENCES FROM A TRAFFIC ACCIDENT.

<sup>1</sup> Автор для ведения переписки

### 1 Состояние вопроса исследования и актуальность работы

В последние годы вопросам безопасности дорожного движения в нашей стране уделяется особое внимание. Различные исследования рассматривают основные причины возникновения дорожно-транспортных происшествий в рамках системы Автомобиль-Водитель-Дорога-Среда [1-4]. Данные исследования позволяют разработать мероприятия по снижению аварийности [5, 6] и использовать регрессионные модели для оценки причин дорожно-транспортных происшествий [7].

Одновременно с этим, федеральным правительством разработан национальный проект «Безопасные и качественные дороги» [8], основная цель которого – уменьшить число погибших в дорожно-транспортных происшествиях (ДТП) до 4 чел. на 100 тыс. жителей в год. Отметим, что в странах, где процесс автомобилизации начался на 30-50 лет раньше, чем в России, аналогичные проекты уже реализуются (табл. 1).

Таблица 1 – Показатели смертности в результате ДТП в развитых странах мира за 1966 и 2016 гг. [9, 10]

| Страна         | Количество погибших на 100 тыс. жителей |         | Снижение за 50 лет, раз |
|----------------|---|---------|-------------------------|
|                | 1966 г.                                 | 2016 г. |                         |
| Австралия      | 28,3                                    | 5,6     | 5,05                    |
| Австрия        | 28                                      | 5,2     | 5,38                    |
| Германия       | 27,9                                    | 4,1     | 6,8                     |
| США            | 27,1                                    | 12,4    | 2,19                    |
| Канада         | 27                                      | 5,8     | 4,66                    |
| Великобритания | 15,4                                    | 3,1     | 4,97                    |
| Италия         | 18,2                                    | 5,6     | 3,25                    |
| Япония         | 14,3                                    | 4,1     | 3,49                    |
| Франция        | 31,6                                    | 5,5     | 5,75                    |

Анализ табл. 1 говорит о том, что показателя 4 погибших на 100 тыс. жителей пока удалось достичь далеко не везде, к тому же страны шли к этому показателю практически полвека. В рамках данной задачи, особое внимание должно уделяться тяжести последствий от дорожно-транспортных происшествий [11, 12].

В России на момент принятия решения о реализации проекта «Безопасные и качественные дороги» в 2017 г. число погибших в ДТП составляло 13 чел. на 100 тыс. жителей. Причем, чтобы выйти на показатели национального проекта, федеральным правительством отведено всего 12 лет. Достичь установленных показателей довольно сложно, вместе с тем это не означает, что национальный проект не может быть выполнен в заданные сроки. Однако для его реализации необходимы не только глубокий анализ большого количества данных и параметров в области безопасности дорожного движения, но и разработка эффективных мероприятий во всех российских регионах.

Рассмотрим ситуацию по Свердловской области. В 2017 г. на дорогах региона число погибших составило 9,56 чел. на 100 тыс. жителей, а в соответствии с национальным проектом этот показатель к 2030 г. должен быть снижен до 2,7 погибших (рис.1).

Как видно из рис.1, количество погибших на дорогах региона постепенно снижается, однако темпы снижения уже сейчас отстают от значений, установленных планом. Это говорит о том, что принятых мероприятий по повышению безопасности дорожного движения недостаточно для достижения поставленных целей. Иными словами, нужны дополнительные исследования о причинах гибели жителей региона в дорожно-транспортных происшествиях.

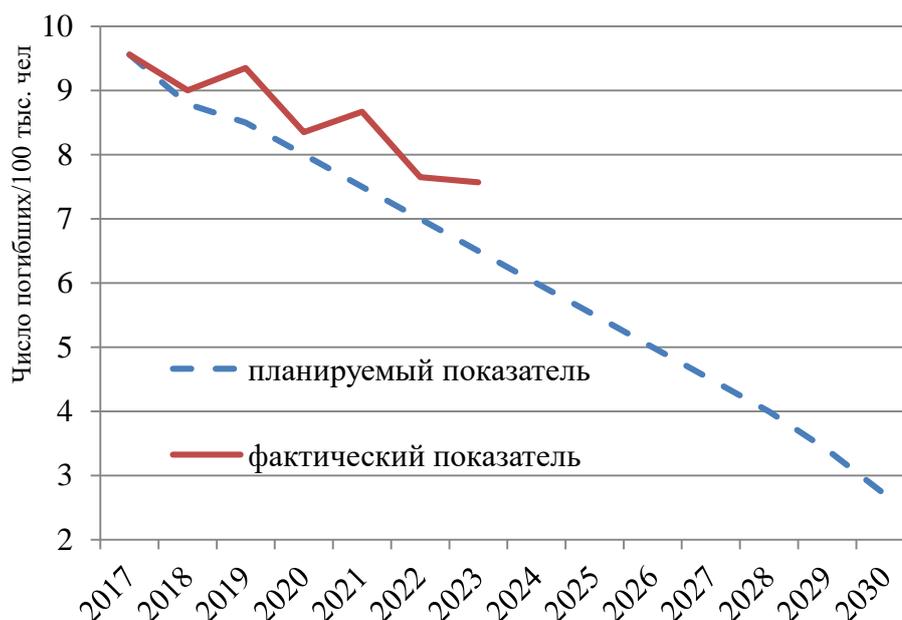


Рисунок 1 – Динамика изменения числа погибших в результате ДТП на 100 тыс. жителей по Свердловской области

## 2 Материалы и методы

Учитывая вышесказанное, авторы статьи запросили статистику и материалы по ДТП из базы данных ГИБДД Свердловской области. В задачи исследования входило выявление видов происшествий с наиболее тяжелыми последствиями. Стоит подчеркнуть, что количество ДТП не так важно для реализации национального проекта. Более важным является показатель числа погибших: чем большее число погибших, тем хуже ситуация с безопасностью движения. Поэтому, в первую очередь необходимы исследования, которые позволят установить виды происшествий, гибель в которых наиболее вероятна.

Стоит отметить, что в отечественной литературе, многие авторы [13, 14] используют аналогичные методы, для выявления причин и последствий дорожно-транспортных происшествий.

## 3 Результаты исследований

Транспортная сеть Свердловской области достаточно неоднородна по территории и отличается не только плотностью, но и интенсивностью движения. Кроме того, дороги и улицы региона относятся к юрисдикции различных ведомств, финансирование в которых тоже отличается.

При анализе данных о ДТП на территории Свердловской области всю транспортную сеть региона авторы разделили на пять групп (табл. 2). В первую группу включены автомобильные дороги федерального значения, протяженность которых в Свердловской области составляет 652,345 км. Их можно отнести к дорогам высшей категории с высокой интенсивностью движения: практически на всей сети федеральных дорог региона преобладают высокие скорости, а движение транспорта можно считать насыщенным и перенасыщенным. За содержание, ремонт и строительство автомобильных дорог федерального значения отвечает правительство Российской Федерации в лице Федерального дорожного агентства.

Как видно из табл. 2, за 4 года на сети федеральных автодорог произошло 1031 ДТП с пострадавшими, в результате 417 человек погибло, и еще 2111 получили ранения. Необходимо отметить, что на федеральной сети дорог доля ДТП с пострадавшими составляет 9,1 % от общего числа происшествий в пределах региона, однако доля погибших в результате ДТП достигает 19 % от общего числа зафиксированных на территории Свердловской области.

Таблица 2 – Распределение количества ДТП по транспортной сети Свердловской области за 2017-2020 гг.

| Группа транспортной сети                      | Количество ДТП с пострадавшими, ед. | Число, чел.   |              |
|---|-------------------------------------|---------------|--------------|
|   |                                     | раненых       | погибших     |
| I. Федеральные автодороги                     | 1031 (9,1 %)                        | 2111 (8,8 %)  | 417 (19 %)   |
| II. Региональные автодороги                   | 2841 (25,2 %)                       | 5569 (23,2 %) | 895 (40,9 %) |
| III. Улично-дорожная сеть (УДС) Екатеринбурга | 3649 (32,3 %)                       | 8125 (33,8 %) | 313 (14,3 %) |
| IV. УДС Нижнего Тагила                        | 703 (6,2 %)                         | 2157 (9 %)    | 116 (5,3 %)  |
| V. УДС прочих городов Свердловской области    | 3068 (27,2 %)                       | 6076 (25,3 %) | 448 (20,5 %) |
| Итого по Свердловской области                 | 11292 (100 %)                       | 24041 (100 %) | 2189 (100 %) |

Ко второй группе отнесена сеть автомобильных дорог регионального значения (см. табл. 2), их протяженность составляет 10895 км, преобладают автодороги III и IV технических категорий. За содержание, ремонт и строительство автомобильных дорог регионального значения отвечает правительство Свердловской области.

Региональные автодороги, как и федеральные, включены в национальный проект, поэтому частично финансируются из федерального бюджета. Региональная сеть крайне неоднородна с точки зрения интенсивности движения и мест концентрации ДТП. Как показал пространственный анализ, 90 % мест концентрации дорожно-транспортных происшествий на региональных автодорогах сосредоточено в пределах Екатеринбургской агломерации, при этом 40,9 % всех погибших в результате ДТП приходится на долю дорог регионального значения.

Отличительной чертой улично-дорожной сети Екатеринбурга, отнесенной к третьей группе (см. табл. 2), является высокая доля улиц, большинство которых имеют 4 и более полос для движения транспорта. Как и в любом другом мегаполисе России с населением свыше 1 млн. жителей, в Екатеринбурге в часы пик образуется множество заторов. При этом скорость движения транспорта в городе в несколько раз ниже, чем на загородных участках автомобильных дорог.

За содержание, ремонт и строительство улиц, а также автодорог в Екатеринбурге отвечает администрация муниципального образования. При этом, будучи ядром агломерации, Екатеринбург включен в национальный проект, т.е. программы по безопасности дорожного движения в городе реализуются не только за счет муниципальных средств, но и за счет федерального и регионального бюджетов.

Несмотря на то, что средняя скорость движения транспорта на УДС Екатеринбурга в несколько раз ниже, чем на региональных автодорогах, количество ДТП с пострадавшими здесь можно оценить как достаточно большое: 3649 ед., или треть всех происшествий по области. Поскольку скоростные ограничения, установленные в городах России, оказывают существенное влияние на снижение тяжких последствий от ДТП, на долю Екатеринбурга приходится 313 погибших, или 14,3 % от общего числа зафиксированных на территории региона.

В четвертой группе рассмотрена улично-дорожная сеть Нижнего Тагила, которая тоже включена в национальный проект в качестве ядра Нижнетагильской агломерации. На улично-дорожной сети Нижнего Тагила установлены такие же скоростные ограничения, как в Екатеринбурге, но численность населения в 4 раза меньше, что сказалось на общем количестве пострадавших от ДТП. Как видно из табл.2, показатели аварийности в Нижнем Тагиле в 3-4 раза ниже, чем в Екатеринбурге, что коррелирует с численностью населения городов.

К пятой (последней) группе отнесены все остальные города Свердловской области, которые не попали в национальный проект «Безопасные качественные дороги». Однако, как видно из табл. 2, 3068 происшествий, или 27,2 % от зафиксированных на территории Свердловской области, приходится именно на эти города, а доля погибших составляет 20,5 %.

За ремонт, содержание и безопасность дорожного движения в городах, отнесенных к пятой группе, отвечают местные администрации. Отличительной чертой этих городов можно

считать мизерное финансирование дорожных программ, а также отсутствие понимания проблемных мест с точки зрения безопасности дорожного движения. Детальных проектов по организации и безопасности дорожного движения, которые смогли бы снизить уровень аварийности в городах пятой группы, не проводилось достаточно давно, а в некоторых из них не проводилось совсем. Данный факт говорит о том, что для снижения уровня аварийности на территории Свердловской области до показателей, установленных федеральным правительством, необходимо очень активно работать с малыми и средними городами.

Как уже говорилось, разные транспортные сети Свердловской области отличаются условиями движения (скоростью и интенсивностью), качеством содержания дорог (ровностью покрытия, коэффициентом сцепления шин с дорогой), наличием необходимых технических средств организации дорожного движения (таких как знаки, разметка, светофоры, парапетные ограждения и пр.). Все эти факторы оказывают существенное влияние и на количество ДТП, и на тяжесть их последствий (табл. 3).

Таблица 3 – Тяжесть последствий от ДТП на транспортной сети Свердловской области за 2017-2020 гг.

| Группа транспортной сети                      | Число, чел.            |                       |                          |
|---|------------------------|-----------------------|--------------------------|
|   | погибших на 100<br>ДТП | раненых на 100<br>ДТП | пострадавших на 1<br>ДТП |
| I. Федеральные автодороги                     | 40                     | 205                   | 2,5                      |
| II. Региональные автодороги                   | 32                     | 196                   | 2,3                      |
| III. УДС Екатеринбурга                        | 9                      | 223                   | 2,3                      |
| IV. УДС Нижнего Тагила                        | 17                     | 307                   | 3,2                      |
| V. УДС прочих городов<br>Свердловской области | 15                     | 198                   | 2,1                      |
| В среднем по Свердловской<br>области          | 19                     | 213                   | 2,3                      |

Как видно из табл. 3, наиболее тяжелые последствия дорожно-транспортных происшествий отмечены на сети федеральных автодорог: на 100 ДТП приходится 40 погибших и 205 раненых. Достаточно высокие показатели тяжких последствий характерны и для региональных автодорог: 32 погибших и 196 раненых на 100 ДТП.

Что касается улично-дорожной сети городов Свердловской области, то здесь тяжесть последствий от дорожно-транспортных происшествий значительно ниже, чем на загородных участках, и в первую очередь это связано с более низкой скоростью движения.

Например, в Екатеринбурге на 100 ДТП приходится 9 погибших и 223 раненых. При этом УДС Екатеринбурга можно отнести к сети с высокой концентрацией технических средств организации дорожного движения. В Нижнем Тагиле показатель тяжести последствий выше: соответственно 17 погибших и 307 раненых на 100 ДТП. К тому же количество технических средств организации дорожных движений здесь значительно меньше, чем в Екатеринбурге, а участков, на которых можно превысить разрешенную скорость движения, гораздо больше.

Как видно из табл. 3, меньшие скорости движения транспорта положительно влияют на снижение показателя тяжести последствий от дорожно-транспортных происшествий. На транспортных сетях Свердловской области общее число пострадавших на 100 ДТП колеблется от 213 до 334 чел. При этом низкие скорости сообщения в условиях городских УДС в большинстве случаев позволяют избежать гибели людей.

Вместе с тем тяжесть последствий от дорожно-транспортных происшествий разных участников движения существенно отличается. Учитывая это, авторы выполнили отдельный анализ по видам ДТП.

Все дорожно-транспортные происшествия в соответствии с Приказом МВД РФ № 328 [15] и отраслевым документом ОДМ 218.6.015-2015 [16] делятся на 10 видов. В нашем исследовании рассматривались 8 видов ДТП, при которых погибли или были ранены люди (рис. 2), поскольку количество случаев по таким видам, как падение пассажиров и прочие происшествия, пренебрежительно мало.

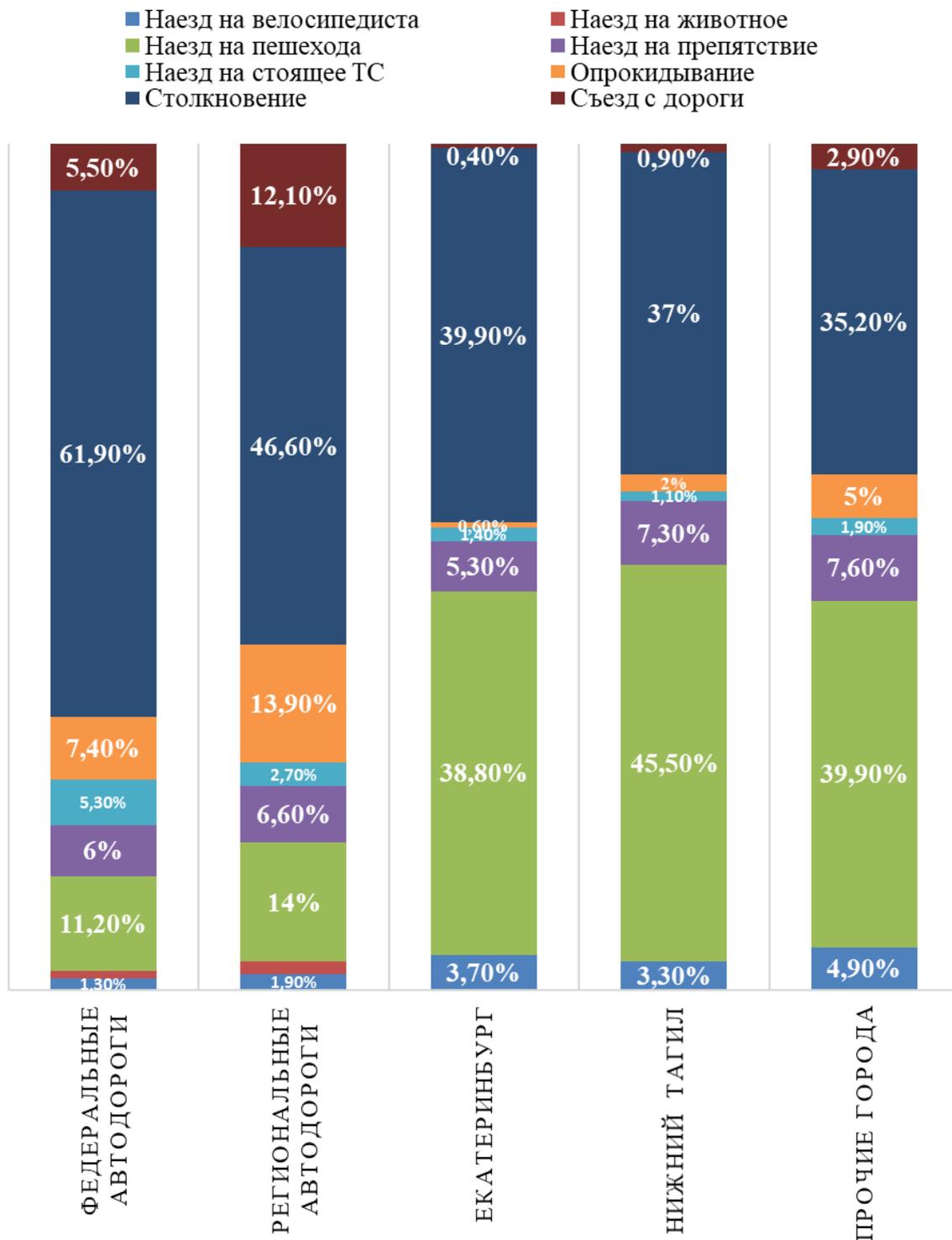


Рисунок 2 – Распределение видов ДТП по транспортным сетям Свердловской области (2017-2020 гг.)

Из рис. 2 видно, что на загородных участках наибольшее распространение имеет такой вид ДТП, как столкновение: на федеральных и региональных дорогах доля столкновений составляет соответственно 61,9 и 46,6 % от общего числа происшествий.

Вторую позицию на загородных участках занимает такой вид происшествий, как наезд на пешехода: на региональной сети автомобильных дорог – 14 %, на федеральной сети – 11,2 % от общего числа ДТП.

Отдельного рассмотрения требуют такие виды происшествий, как съезд с дороги и опрокидывание, и прежде всего для региональной сети автодорог, где на эти два вида приходится 26 % всех ДТП с пострадавшими. Авторами уже отмечалось, что региональная сеть значительно отличается по загрузке и плотности. При этом в Свердловской области есть несколько автомобильных дорог со сложными дорожными условиями, такими как крутые подъемы и спуски, повороты с малыми радиусами.

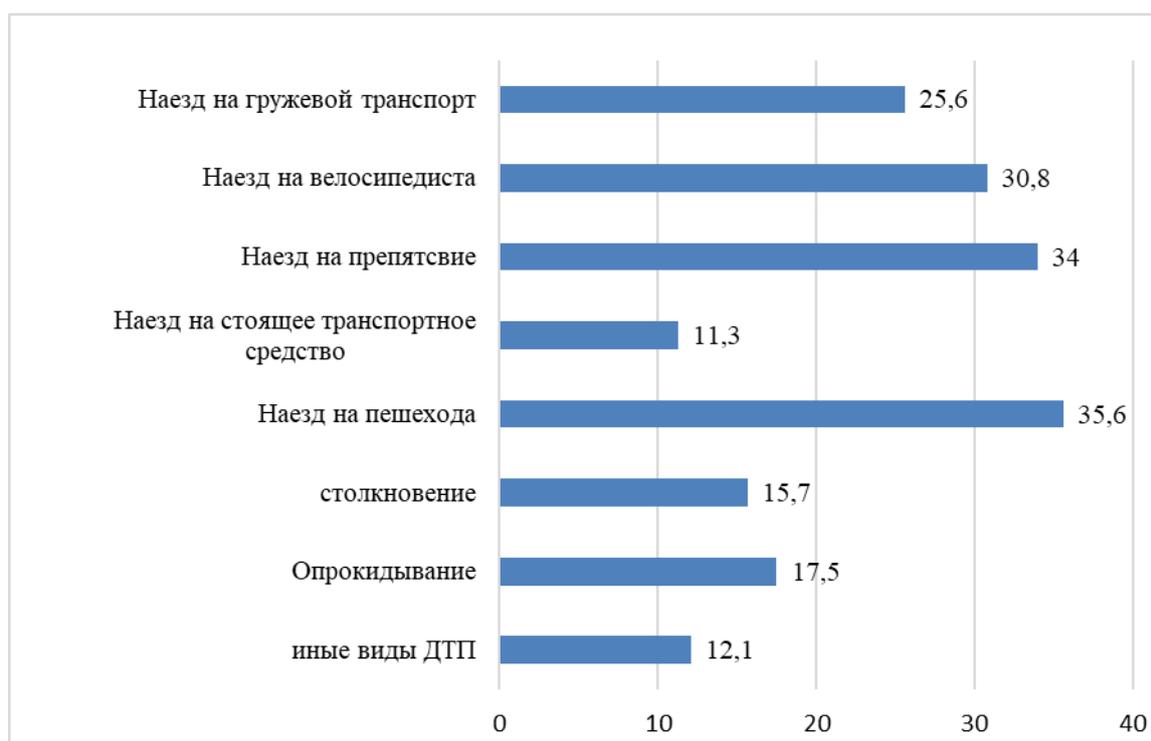


Рисунок 3 – Показатели тяжести (на 100 ДТП) последствий от видов ДТП на российских автомобильных дорогах федерального значения в 2008 г. [20]

Сеть федеральных автодорог по рельефу местности можно считать более благоприятной, поэтому на такой вид происшествия, как съезд с дороги, здесь приходится 5,5 % случаев, а на опрокидывание – 7,4 %.

Улично-дорожные сети городов Свердловской области формировались под действием иных нормативов, нежели загородные участки автомобильных дорог. Поэтому наиболее серьезным здесь можно считать такой вид происшествий, как наезд на пешехода. В частности, в Екатеринбурге доля ДТП с наездом на пешеходов составляет 38,8 % всех происшествий с пострадавшими, в Нижнем Тагиле этот показатель несколько выше – 45,5 %.

В условиях городского движения довольно часто происходят столкновения автомобилей. Этот вид ДТП в городах занимает вторую позицию после наезда на пешехода. Как видно из рис. 2, в Екатеринбурге на столкновение автомобилей приходится 39,9 % всех происшествий с пострадавшими, в Нижнем Тагиле и прочих городах Свердловской области – соответственно 37 и 35,2 %.

В практике оценки ДТП нередко используется такой показатель, как тяжесть последствий [17-19], т.е. число погибших участников движения на 100 пострадавших. В 2008 г. по сети

федеральных автодорог России был проведен анализ этого параметра [20] (рис. 3). Установлено, что наиболее тяжелыми являются такие виды происшествий, как наезд на пешехода (35,6 погибших), наезд на препятствие (34 погибших) и наезд на велосипедиста (30,8 погибших).

Авторы статьи выполнили аналогичные исследования по транспортной сети Свердловской области, результаты представлены на рис. 4 и 5.

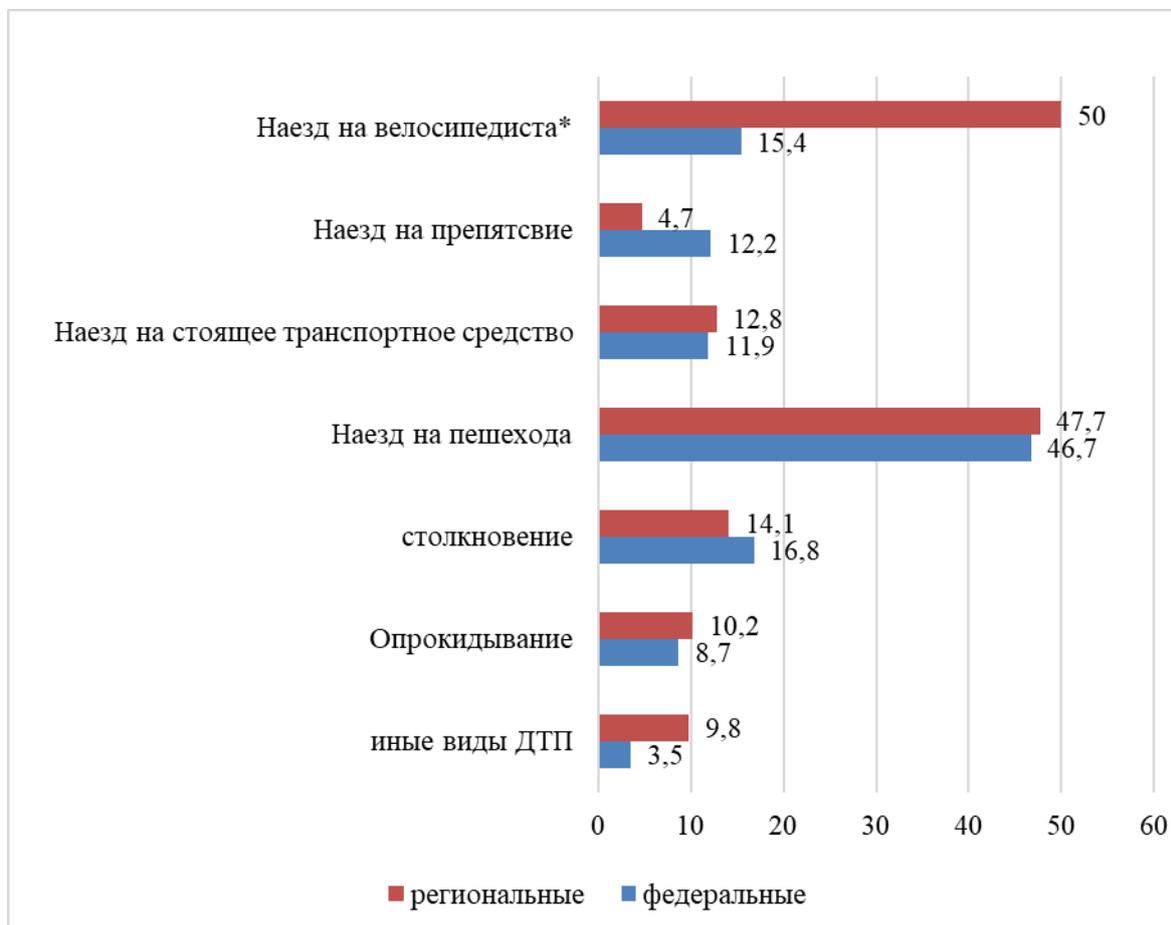


Рисунок 4 – Показатели тяжести последствий от видов ДТП на автомобильных дорогах Свердловской области в 2017-2020 гг.

Как видно из рис. 4, на загородных участках автомобильных дорог региона зафиксированы иные значения тяжести последствий, чем в целом по России. Самый опасный вид ДТП – наезд на пешехода: на 100 пострадавших приходится 46,7 погибших. Это говорит о том, что на федеральных и региональных автодорогах необходимо уделить особое внимание организации пешеходного движения.

На региональных дорогах зафиксирован достаточно высокий показатель при наезде на велосипедистов – 50 погибших. Однако объем выборки по этому виду происшествия невелик. За 4 года на региональной сети автомобильных дорог Свердловской области установлено всего два случая наезда на велосипедистов, при этом в одном случае велосипедист погиб, а во втором получил ранения. На федеральной сети автомобильных дорог количество наездов на велосипедистов в несколько раз больше, поэтому тяжесть последствий ниже (15,4 погибших на 100 пострадавших).

Если рассматривать дорожно-транспортные происшествия с автомобилями, то видно, что здесь тяжесть последствий значительно ниже. На такой вид происшествий, как столкновение, приходится 14,1-16,8 погибших на 100 пострадавших. По остальным видам ДТП тяжесть последствий гораздо ниже.

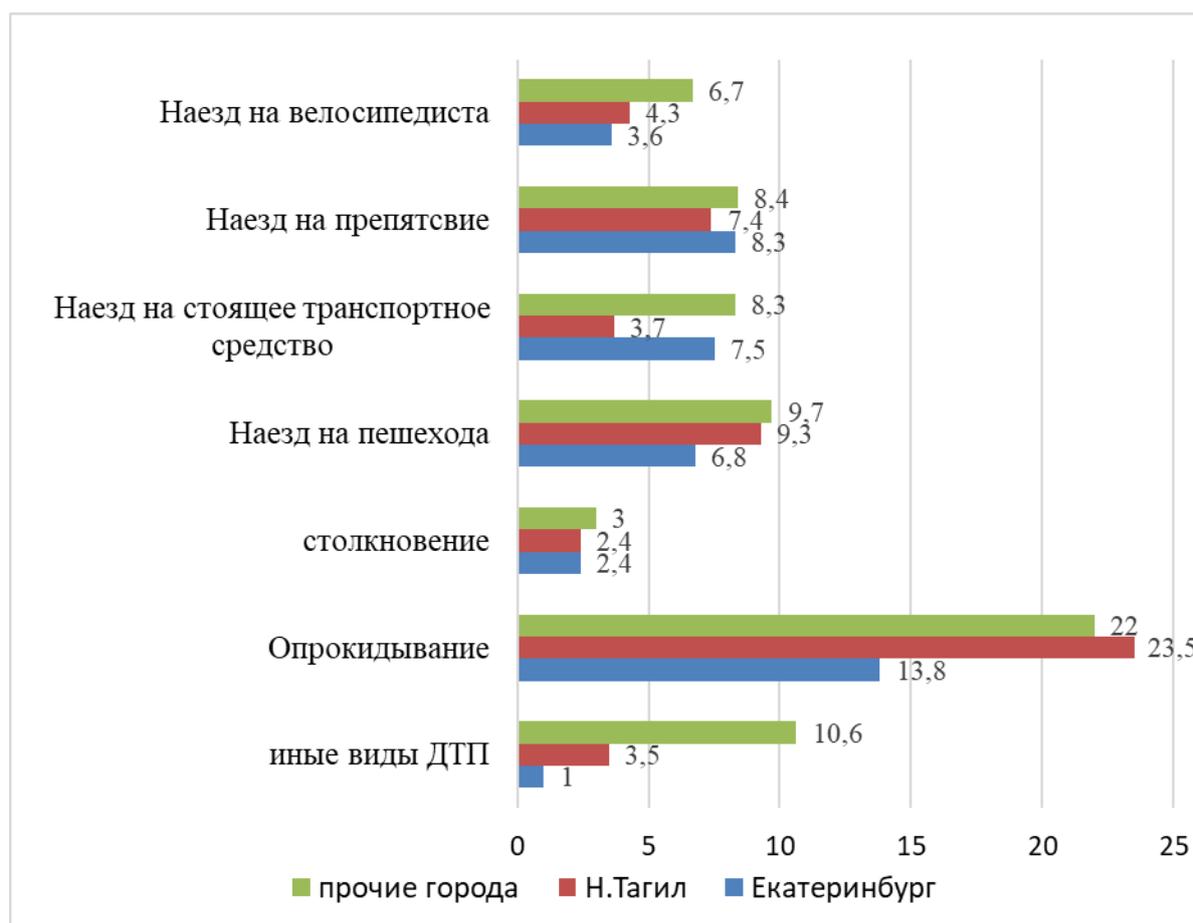


Рисунок 5 – Показатели тяжести последствий от видов ДТП на улично-дорожной сети городов Свердловской области в 2017-2020 гг.

Отдельные исследования тяжести последствий от ДТП в городах Свердловской области показали, что наибольшее число погибших приходится на такой вид происшествий, как опрокидывание (см. рис. 5). Например, в Нижнем Тагиле на 100 пострадавших при опрокидывании автомобилей приходится 23,5 погибших. Даже по Екатеринбургу, где достаточно сложно разогнаться до критических значений, число погибших при опрокидывании автомобиля составляет 13,8 чел. Отметим, что на загородных участках автомобильных дорог тяжесть последствий от опрокидывания в 2 раза ниже, чем в городских условиях.

Этот фактор говорит о том, что в городских условиях такой вид ДТП, как опрокидывание, происходит при грубых нарушениях правил дорожного движения. Сюда необходимо добавить кратное превышение разрешенной скорости движения в комплексе с агрессивным вождением. По остальным видам дорожно-транспортных происшествий тяжесть последствий практически не отличается.

#### 4 Обсуждение и заключение

Проведенные исследования тяжести последствий дорожно-транспортных происшествий позволили сделать следующие выводы.

1 Национальный проект «Безопасные и качественные дороги» необходимо распространить на малые и средние города России, поскольку ежегодно в таких населенных пунктах фиксируется более 20 % погибших участников движения. Расширение национального проекта значительно ускорит процесс снижения такого показателя, как число погибших на 100 тыс. жителей.

2 На загородных участках автодорог особое внимание следует уделить организации пешеходного движения. Как показали исследования, каждый третий погибший участник движения на загородных трассах – пешеход. В связи с этим в местах конфликта транспортных средств и пешеходов требуется строительство надземных пешеходных переходов, устройство тротуаров и освещения. Иными словами, нужно минимизировать количество пересечений между путями следования автомобилей и пешеходов, а в местах, где это невозможно сделать, необходимо снизить разрешенную скорость движения и повысить информативность.

3 Большое число погибших отмечено на участках автомобильных дорог с высокой интенсивностью движения. Это касается автодорог с двухполосным движением, где наблюдаются частые выезды на полосу встречного направления. Реконструкция таких участков с увеличением количества полос движения позволит исключить лобовые столкновения транспортных средств, а следовательно, число погибших в ДТП.

4 Такой вид ДТП, как наезды на стоящие транспортные средства, свидетельствует о необходимости устройства на загородных участках дорог, а также на магистральной сети городов площадок для стоянки автомобилей. Это позволит исключить наезды на стоящие транспортные средства, особенно в условиях недостаточной видимости.

5 Высокая смертность участников движения при опрокидывании автомобилей свидетельствует о плохих дорожных условиях. Сюда необходимо отнести ненормативные уклоны и радиусы поворотов. Поэтому в городах Свердловской области предлагается провести реконструкцию таких проблемных участков улиц.

6 Отдельное внимание следует уделить конструкции транспортных средств. Уровень активной, пассивной и послеварийной безопасности напрямую оказывает влияние на процесс выживания пассажиров. Чем более совершенна конструкция автомобиля, тем ниже тяжесть последствий ДТП. Учитывая этот фактор, предприятия-производители должны совершенствовать конструкцию транспортных средств.

### Список литературы

- 1 Абдуганиев, Ш. О. Анализ и оценка дорожно-транспортных происшествий в обеспечении безопасности движения / Ш. О. Абдуганиев, А. Ш. Насриддинов, А. Я. Разаков и др // *Universum: технические науки : электрон. научн. журн.* – 2023. – 2(107). – URL: <https://7universum.com/ru/tech/archive/item/15022>
- 2 Коновалова, Т. В. Элементы дорожной инфраструктуры и влияние их на безопасность дорожного движения / Т. В. Коновалова, С. Л. Надирян, А. А. Изюмский и др. *International Journal of Advanced Studies: Transport and Information Technologies*, Vol. 12, No 2, 2022. s. 49 -68.
- 3 Кондратьев, В. Д. Обеспечение безопасности дорожного движения. Вопросы теории (система «Дорожное движение») // *Безопасность дорожного движения.* – 2023. – № 2. – С. 6–10.
- 4 Горбатенко, Д. С. Исследование причин и факторов, влияющих на уровень аварийности на улично-дорожных сетях городов и населенных пунктов РФ: Сб. докладов к семинарам и конференциям по Федеральной целевой программе «Повышение безопасности дорожного движения в 2006 – 2012 гг.». М., 2007.
- 5 Кудрявцев, В. В. Приоритетные мероприятия по сокращению дорожно-транспортных происшествий / *Civil Security Technology*, vol. 6, 2009, № 1-2 (19-20). С. 150 – 152.
- 6 Горбатенко Д.С., Рябчинский А.И. Методические подходы к разработке региональных программ повышения безопасности дорожного движения // *Инновационные технологии управления в автотранспортных системах: Сб. науч. тр. Факультета «Управление».* М.: МАДИ (ГТУ) – 2008. – С. 156.
- 7 Горбатенко Д.С., Рябчинский А.И. Методические основы создания многофакторных регрессионных моделей аварийности на автомобильных дорогах // *Вестник МАДИ (ГТУ).* 2007. – № 2(9). – С. 90.
- 8 Паспорт национального проекта «Национальный проект «Безопасные качественные дороги». URL: <https://mintrans.gov.ru/documents/8/11524/> (дата обращения: 29.03.2023).
- 9 *Global status report on road safety 2018.* World Health Organization. Management of Noncommunicable Diseases, Disability, Violence and Injury Prevention (NVI). 20 Avenue Appia 1211 Geneva 27 Switzerland.
- 10 Боровский, Б. Е. Условия безаварийной работы. Автотранспортные дорожные происшествия, их предупреждение и анализ. Ленинград: Лениздат, 1971. – 352 с.

11 Тимофеева С. С., Тимофеев С. С., Таскаев А. А. Риски дорожно-транспортных происшествий в Иркутской области. // XXI век. Техносферная безопасность. 2020. – 5(4) – С. 411-420. <https://doi.org/10.21285/2500-1582-2020-4-411-420>

12 Седов Д. В., Тимофеева С. С. Риски дорожно-транспортных происшествий: техническая ответственность водителей и дорожных служб // XXI век. Техносферная безопасность. – 2017. – Т. 2. – № 4. – С. 78–85.

13 Клачкова, А. В. Анализ статистики ДТП в Российской Федерации / А. В. Клачкова, Е. Д. Семёнова, Л. Е. Кущенко // Инновационная наука. Международный научный журнал. –2010 – №12. – С 26-28.

14 Баканов К. С., Ляхов П. В., Айсанов А. С. и др. Дорожно-транспортная аварийность в Российской Федерации за 2022: информационно-аналитический обзор. М.: ФКУ «НЦ БДД МВД РФ». – 2023. – 150 с.

15 О мерах по реализации Постановления Правительства Российской Федерации от 29.06.1995г. №647: приказ МВД РФ от 18.06.1996г. №328.

16 ОДМ 218.6.015-2015. Рекомендации по учету и анализу дорожно-транспортных происшествий на автомобильных дорогах Российской Федерации. Москва: Росавтодор, 2015. – 81с.

17 Капский, Д. В. Аудит дорожного движения – инструмент повышения безопасности движения / Д.В. Капский, А.К. Головнич, В.П. Иванов // ВЕСТНИК ПОЛОЦКОГО ГОСУДАРСТВЕННОГО УНИВЕРСИТЕТА. Серия В. Промышленность. Прикладные науки. – Литературно-научный журнал. – 2018. – Том 1. – С. 22 – 33.

18 Капский, Д. В. Прогнозирование аварийности в дорожном движении / Д. В Капский. – Минск: БНТУ, 2008. – 243 с.

19 Врубель Ю. А., Капский Д.В. Опасности в дорожном движении. Минск: Новое знание. – 2013. – 244 с.

20 Справочник по безопасности дорожного движения. Москва: Росавтодор. –2010. –384 с.

#### References

1 Abduganiyev, Sh. O. Analysis and assessment of road accidents in ensuring traffic safety / Sh. O. Abduganiyev, A. Sh. Nasriddinov, A. Ya. Razokov et al. // Universum: technical sciences: electronic scientific journal. - 2023. - 2 (107). - URL: <https://7universum.com/ru/tech/archive/item/15022>

2 Konovalova, T. V. Elements of road infrastructure and their impact on road safety / T. V. Konovalova, S. L. Nadiryan, A. A. Izyumsky et al. International Journal of Advanced Studies: Transport and Information Technologies, Vol. 12, No. 2, 2022. pp. 49 -68.

3 Kondratiev, V. D. Ensuring road safety. Theoretical Issues (Road Traffic System) // Road Safety. – 2023. – No. 2. – P. 6–10.

4 Gorbatenko, D. S. Study of Causes and Factors Affecting the Accident Rate on Street and Road Networks of Cities and Towns of the Russian Federation: Collection of Papers for Seminars and Conferences on the Federal Target Program “Improving Road Safety in 2006–2012”. Moscow, 2007.

5 Kudryavtsev, V. V. Priority Measures to Reduce Road Accidents / Civil Security Technology, vol. 6, 2009, No. 1–2 (19–20). P. 150–152.

6 Gorbatenko, D. S., Ryabchinsky, A. I. Methodological approaches to the development of regional programs to improve road safety // Innovative management technologies in motor transport systems: Coll. sci. t. of the Faculty of Management. Moscow: MADI (STU) - 2008. - P. 156.

7 Gorbatenko D.S., Ryabchinsky A.I. Methodological foundations for creating multifactor regression models of accidents on roads // Bulletin of MADI (STU). 2007. - No. 2 (9). - P. 90.

8 Passport of the national project "National project "Safe quality roads". URL: <https://mintrans.gov.ru/documents/8/11524/> (date of access: 03/29/2023).

9 Global status report on road safety 2018. World Health Organization. Management of Noncommunicable Diseases, Disability, Violence and Injury Prevention (NVI). 20 Avenue Appia 1211 Geneva 27 Switzerland.

10 Borovsky, B. E. Conditions for accident-free operation. Motor transport accidents, their prevention and analysis. Leningrad: Lenizdat, 1971. - 352 p.

11 Timofeeva S. S., Timofeev S. S., Taskaev A. A. Risks of road accidents in the Irkutsk region. // XXI century. Technosphere safety. 2020. - 5 (4) - P. 411-420. <https://doi.org/10.21285/2500-1582-2020-4-411-420>

12 Sedov D. V., Timofeeva S. S. Risks of road accidents: technical responsibility of drivers and road services // XXI century. Technosphere safety. – 2017. – V. 2. – No. 4. – P. 78–85.

13 Klachkova, A. V. Analysis of traffic accident statistics in the Russian Federation / A. V. Klachkova, E. D. Semenova, L. E. Kushchenko // Innovative science. International scientific journal. –2010 – No. 12. – P. 26–28.

14 Bakanov K. S., Lyakhov P. V., Aisanov A. S., et al. Road traffic accidents in the Russian Federation in 2022: information and analytical review. Moscow: Federal State Institution "Research Center for Traffic Safety of the Ministry of Internal Affairs of the Russian Federation". – 2023. – 150 p.

15 On measures to implement the Decree of the Government of the Russian Federation of June 29, 1995. №647: order of the Ministry of Internal Affairs of the Russian Federation dated 18.06.1996 №328.

16 ODM 218.6.015-2015. Recommendations for recording and analyzing road accidents on the roads of the Russian Federation. Moscow: Rosavtodor, 2015. - 81 p.

17 Kapsky, D. V. Road traffic audit - a tool for improving traffic safety / D. V. Kapsky, A. K. Golovnich, V. P. Ivanov // BULLETIN OF POLOTSK STATE UNIVERSITY. Series B. Industry. Applied sciences. - Literary and scientific journal. - 2018. - Vol. 1. - P. 22 - 33.

18 Kapsky, D. V. Forecasting accidents in road traffic / D. V. Kapsky. – Minsk: BNTU, 2008. – 243 p.

19 Vruble Yu. A., Kapsky D. V. Dangers in road traffic. Minsk: New knowledge. – 2013. – 244 p.

20 Handbook of road safety. Moscow: Rosavtodor. – 2010. – 384 p.

© Цариков А. А., Неволин Д. Г., Сорогин И. Г., 2024

DOI: 10.34220/2311-8873-2024-53-63



УДК 656.13

UDC 656.13

2.9.5 – эксплуатация автомобильного транспорта

**ВЛИЯНИЕ СОВРЕМЕННЫХ ТОРМОЗНЫХ СИСТЕМ НА ПАРАМЕТРЫ ТОРМОЖЕНИЯ АТС ПРИ РЕКОНСТРУКЦИИ ДТП**

**INFLUENCE OF MODERN BRAKING SYSTEMS ON VEHICLE BRAKING PARAMETERS DURING ACCIDENT RECONSTRUCTION**

**Барнови Наталья Вячеславовна,** к.т.н., доцент кафедры транспортно-технологических процессов и машин, Санкт-Петербургский Горный университет Императрицы Екатерины II, г. Санкт-Петербург.

**Barnovi Natalia Vyacheslavovna,** candidate of technical sciences, associate professor of the department of transport technological processes and machines, St. Petersburg Mining university of Empress Catherine II, St. Petersburg.

✉<sup>1</sup> **Шаврина Валентина Сергеевна,** студент, Санкт-Петербургский Горный университет Императрицы Екатерины II, г. Санкт-Петербург, e-mail: [shavrina.valentina@yandex.ru](mailto:shavrina.valentina@yandex.ru)

✉<sup>1</sup> **Shavrina Valentina Sergeevna,** student, St. Petersburg Mining university of Empress Catherine II, St. Petersburg, e-mail: [shavrina.valentina@yandex.ru](mailto:shavrina.valentina@yandex.ru)

**Аннотация.** В статье отмечена важность проблемы, касающейся количества ДТП, а также проведения качественной дорожной экспертизы, описана методика проведения эксперимента, представлены полученные результаты, проведен сравнительный анализ с нормативными значениями. В ходе проведения исследования было решено экспериментальным путем получить значения установившегося замедления на транспортных средствах, оборудованных вспомогательными тормозными системами и без них. Таким образом, благодаря проведенному исследованию определено влияние современных тормозных систем на процесс торможения транспортного средства.

**Annotation.** The article notes the importance of the problem concerning the number of road accidents, as well as the conduct of high-quality road expertise, describes the methodology of the experiment, presents the obtained results, and conducts a comparative analysis with standard values. During the study, it was decided to experimentally obtain the values of the established deceleration on vehicles equipped with auxiliary braking systems and without them. Thus, thanks to the study, the influence of modern braking systems on the braking process of a vehicle was determined.

**Ключевые слова:** ДОРОЖНО-ТРАНСПОРТНОЕ ПРОИСШЕСТВИЕ, ПАРАМЕТРЫ ТОРМОЖЕНИЯ, ТОРМОЗНЫЕ СИСТЕМЫ, УСТАНОВИВШЕЕСЯ ЗАМЕДЛЕНИЕ.

**Keywords:** ROAD TRAFFIC ACCIDENT, BRAKING PARAMETERS, BRAKING SYSTEMS, STEADY-STATE DECELERATION.

<sup>1</sup> Автор для ведения переписки

### 1 Состояние вопроса исследования и актуальность работы

В настоящее время проблема аварийности на автомобильном транспорте является одной из наиболее серьезных [1].

Кроме того, основываясь на статистике, большую часть всех дорожно-транспортных происшествий отличают действия водителя, направленные на применение экстренного торможения в связи с попытками избежать столкновения или наезда [2]. В связи с этим, в конструкции тормозных устройств современных автомобилей используются вспомогательные тормозные системы, такие как:

- антиблокировочная система (ABS),
- система распределения тормозных усилий (EBD),
- система курсовой устойчивости (ESP).

Актуальность исследования связана с неутешительной статистикой, касающейся большого количества произошедших дорожно-транспортных происшествий, а также важности проведения достоверной экспертизы ДТП для выявления деталей происшествий, что, в свою очередь, может поспособствовать повышению уровня безопасности дорожного движения [3].

Практическая значимость данного исследования обусловлена возможностью использования полученных результатов при проведении экспертизы ДТП для получения более достоверной информации.

Научная новизна состоит в получении результатов непосредственно в ходе проведения эксперимента, отражающих важность использования вспомогательных тормозных систем в процессе торможения транспортного средства.

Информация, связанная с количеством дорожно-транспортных происшествий, произошедших за год, начиная с 2019 года, представлена в виде гистограммы на рис.1 [4].

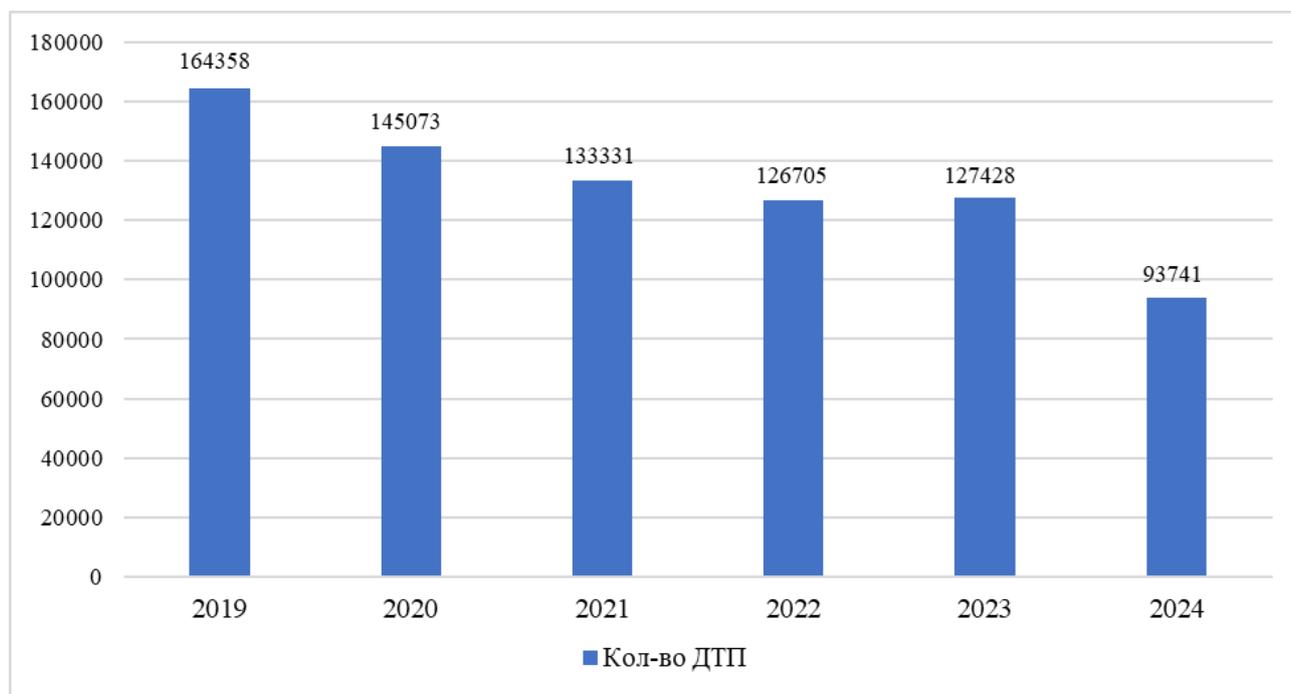


Рисунок 1 – Гистограмма количества ДТП по годам

Проанализировав указанные выше данные, можно отметить снижение количества ДТП в динамике, на что, в свою очередь, также оказала влияние разработка Стратегии безопасности дорожного движения в Российской Федерации на 2018-2024 годы [5].

Однако, полученные результаты все равно говорят о том, что необходимо предпринимать более активные меры по уменьшению числа дорожно-транспортных происшествий.

Кроме того, в виде гистограммы на рис.2 приведены данные, отражающие количество пострадавших и количество погибших от дорожно-транспортных происшествий также по годам, начиная с 2019 года [4].

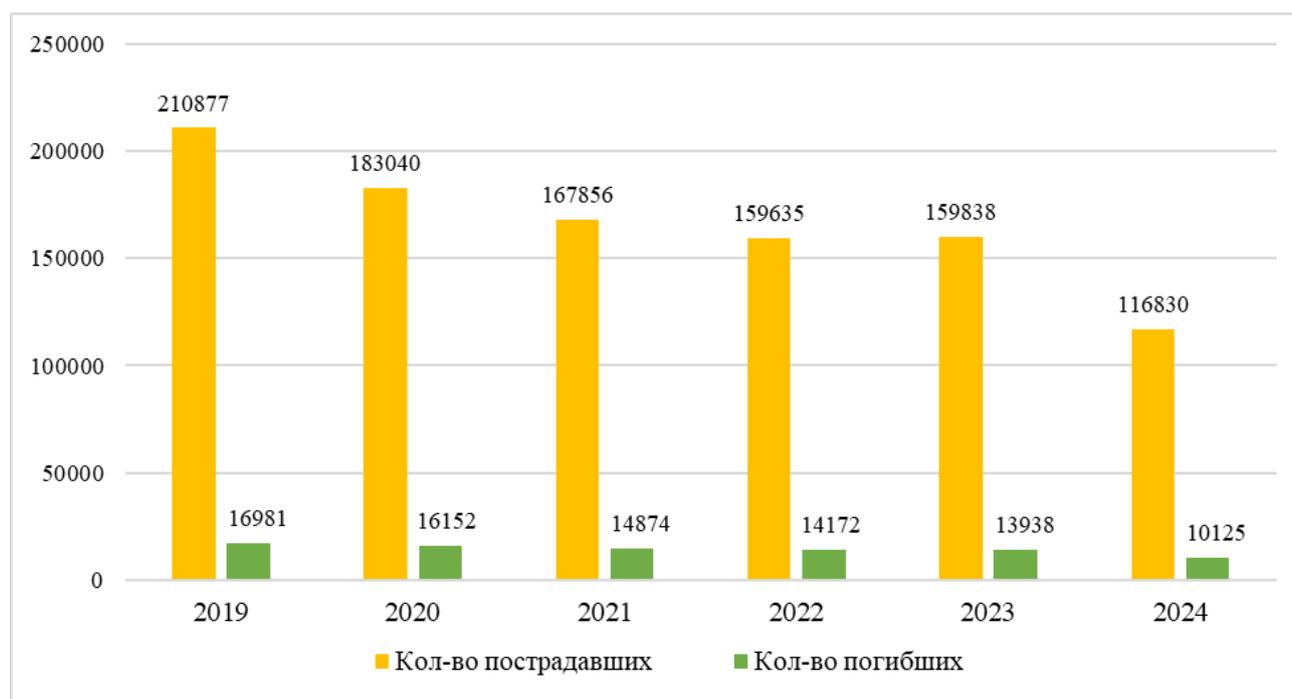


Рисунок 2 – Гистограмма количества пострадавших и погибших от ДТП по годам

Согласно статистике, чаще всего ДТП происходит с участием транспортных средств категории М1. Именно поэтому в данной работе в качестве исследуемого транспортного средства был рассмотрен легковой автомобиль.

Рассматриваемая тематика довольно актуальна и посвящена проблеме безопасности дорожного движения, в частности использованию современных тормозных систем в процессе торможения транспортного средства, а также проведению реконструкции дорожно-транспортных происшествий. Множество статей и трудов освещают эту тему. На рис. 3 в виде схемы представлен краткий анализ рассмотренных статей, а именно – автор и название, а также краткие тезисы [6-9].



Рисунок 3 – Краткий анализ существующих исследований

## 2 Материалы и методы

Согласно ГОСТ 33997-2016 были определены нормативные значения при оценке эффективности торможения колесных транспортных средств, перечень которых представлен в виде схемы на рис.4 [10].

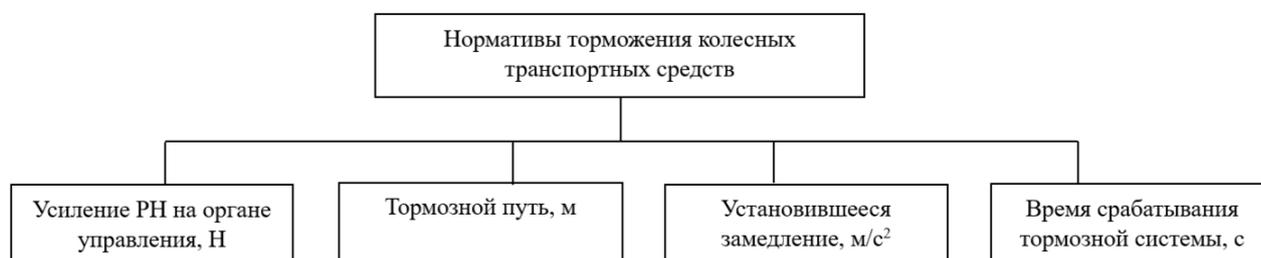


Рисунок 4 – Перечень нормативов торможения транспортных средств

Установившееся замедление является критически важным параметром для обеспечения безопасности как водителя и пассажиров, так и других участников дорожного движения [11]. Чем выше значение установившегося замедления, тем быстрее транспортное средство может остановиться, что особенно важно в экстренных ситуациях, когда требуется быстрое реагирование [12].

Кроме того, данный показатель позволяет оценить работу различных тормозных систем, включая традиционные и современные вспомогательные системы, рассматриваемые в рамках

данного исследования [13]. Установившееся замедление помогает выявить, насколько эффективно тормозная система может справляться с задачами торможения в различных условиях [14].

Таким образом, исследование установившегося замедления именно в рамках выявления оказываемого современными вспомогательными тормозными системами влияния на определенные параметры торможения транспортных средств может стать одним из инструментов, благодаря которым безопасность дорожного движения выйдет на более высокий уровень [15]. В этой связи, в ходе реализации данного эксперимента была поставлена задача по определению значений установившегося замедления в зависимости от наличия вспомогательных тормозных систем.

Для выполнения эксперимента была составлена блок-схема, которая изображена на рис. 5.

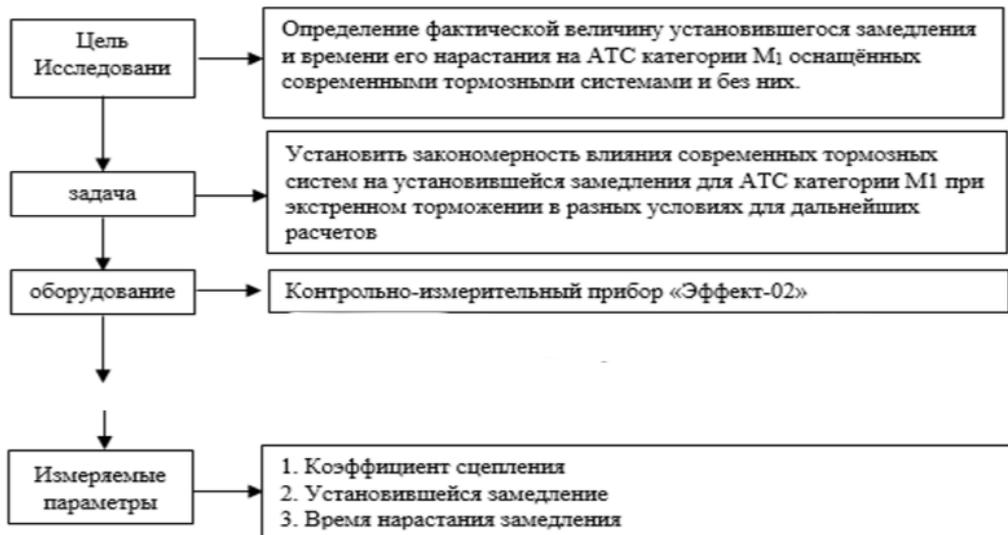


Рисунок 5 – Блок-схема проведения эксперимента

Эксперимент был проведен в летний период на участке автомобильной дороги на улице Нахимова (рис. 6).

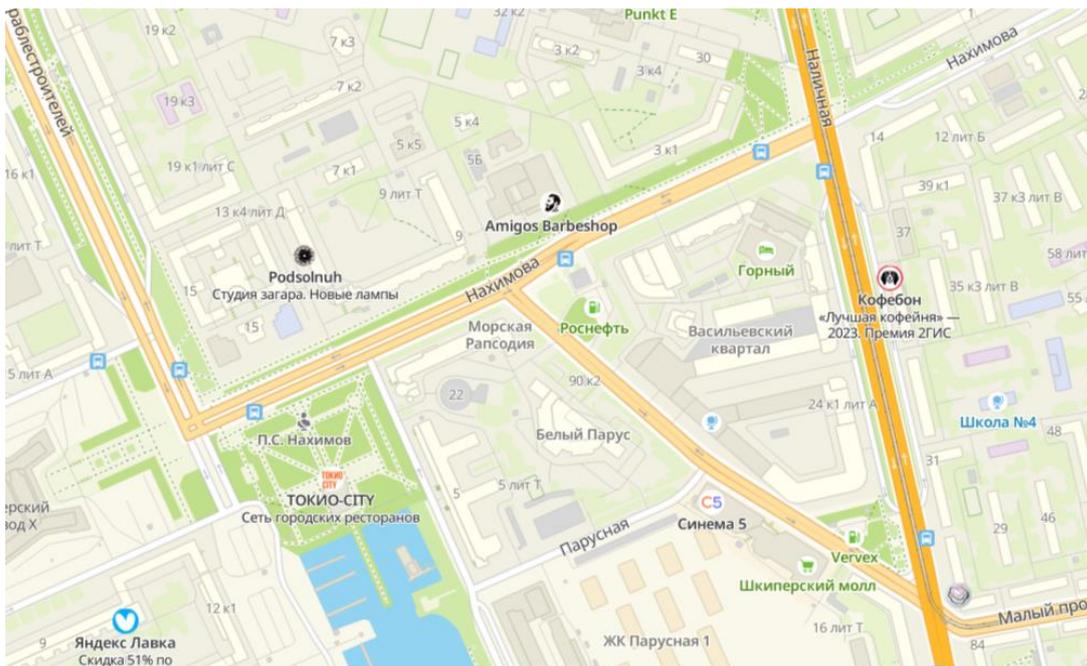


Рисунок 6 – Исследуемый участок автомобильной дороги

Непосредственно значения установившегося замедления в ходе исследования были определены с помощью использования контрольно-измерительного прибора «Эффект-02» (рис. 7). Данный тип прибора предназначен для определения эффективности тормозной системы автомобиля [16].



Рисунок 7 – Контрольно-измерительный прибор «Эффект-02»

Далее на рис. 8 представлено изображение используемого прибора, непосредственно установленного в транспортном средстве.



Рисунок 8 – Установленный на автомобиле прибор «Эффект-02»

Кроме того, далее в табл.1 перечислены условия, при которых были проведены исследования.

Таблица 1 – Условия, при которых был проведен эксперимент

| Показатель                | Состояние           | Согласно чему определено         |
|---------------------------|---------------------|----------------------------------|
| Системы ABS, EBD, BAS     | Работоспособное     | Контроль световых индикаторов    |
| Шины                      | Летние              | -                                |
| Износ шин                 | Допустимый          | Индикатор износа                 |
| Остаточная глубина износа | Не превышает 1,6 мм | Требования ПДД [17]              |
| Давление в шинах          | Допустимое          | Рекомендации завода-изготовителя |

### 3 Результаты исследований

В ходе проведения данного исследования были получены данные, характеризующие значения установившегося замедления для транспортного средства категории М1. Также важно отметить, что эксперимент проводился при нескольких значениях загрузки транспортного средства:

- 20 % - водитель,
- 40 % - водитель и один пассажир,
- 60 % - водитель и два пассажира,
- 80 % - водитель и три пассажира,
- 100 % - водитель и четыре пассажира.

Таким образом, результаты эксперимента представлены в виде табл. 2, 3.

Таблица 2 – Полученные значения установившегося замедления

| Тип дорожного покрытия   | Загруженность АТС |      |      |      |       |
|--|-------------------|------|------|------|-------|
|  | 20 %              | 40 % | 60 % | 80 % | 100 % |
| Для автомобилей с тормозными системами ABS, EBD, BAS                           |                   |      |      |      |       |
| Сухое асфальтобетонное покрытие, коэффициент сцепления $\varphi \approx 0,79$  | 8,7               | 8,6  | 8,6  | 8,5  | 8,4   |
| Мокрое асфальтобетонное покрытие, коэффициент сцепления $\varphi \approx 0,49$ | 7,7               | 7,5  | 7,4  | 7,2  | 7,1   |

Таблица 3 – Полученные значения установившегося замедления

| Тип дорожного покрытия   | Загруженность АТС |      |      |      |       |
|--|-------------------|------|------|------|-------|
|  | 20 %              | 40 % | 60 % | 80 % | 100 % |
| Для автомобилей без тормозных систем ABS, EBD, BAS                             |                   |      |      |      |       |
| Сухое асфальтобетонное покрытие, коэффициент сцепления $\varphi \approx 0,79$  | 6,8               | 6,7  | 6,6  | 6,5  | 6,3   |
| Мокрое асфальтобетонное покрытие, коэффициент сцепления $\varphi \approx 0,49$ | 5,7               | 5,5  | 5,4  | 5,3  | 5,2   |

Далее, в результате проведения сравнительного анализа данных, полученных непосредственно в ходе исследования, соответствующим транспортным средствам с вспомогательными тормозными системами, с показателями, указанными в ВНИИСЭ и ТР 018-2011, была составлена гистограмма, которая представлена на рис. 9 [18, 19].

Затем был проведен анализ полученной информации и определено насколько процентов удалось снизить значение установившегося замедления в результате применения вспомогательных тормозных систем (рис. 10).

Следовательно, проанализировав полученные данные, можно отметить, что среднему арифметическому значению будет соответствовать - 25 %, что, в свою очередь, свидетельствует о том, что применение таких современных тормозных систем как ABS, EBD и BAS позволяет сократить значения установившегося замедления практически на четверть.

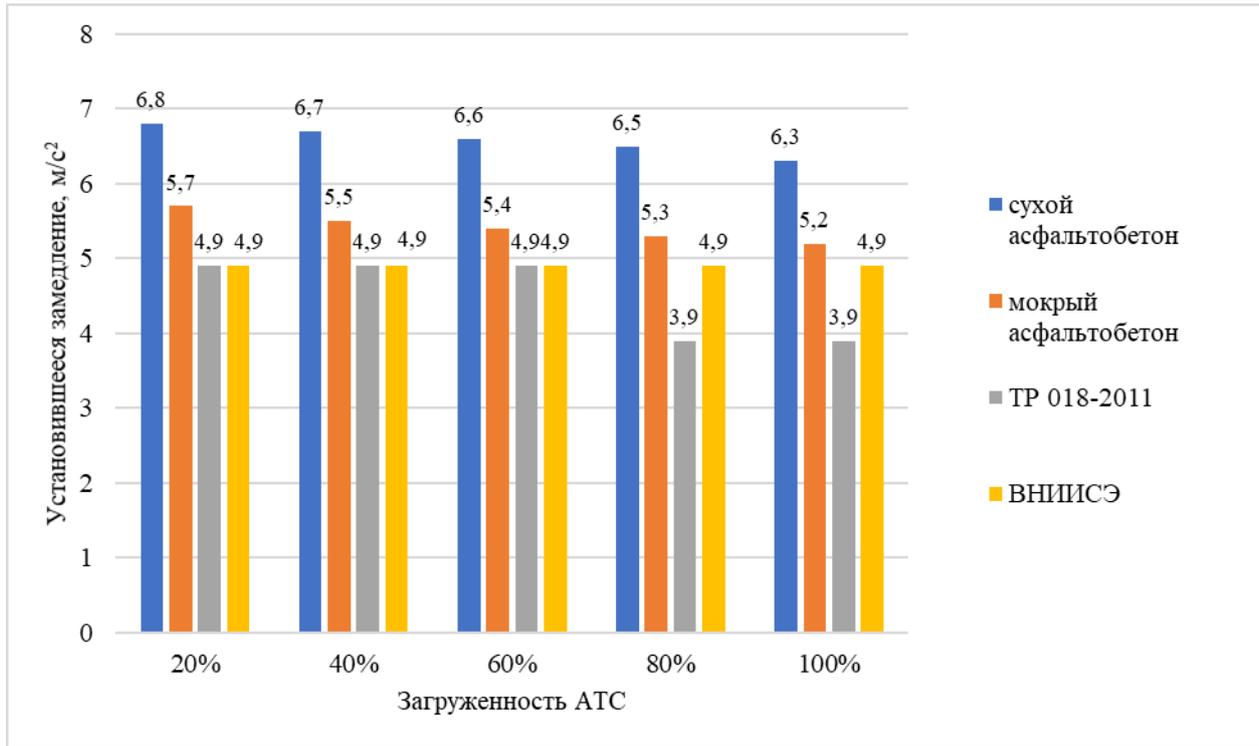


Рисунок 9 – Гистограмма отклонений значений установившегося замедления при наличии вспомогательных тормозных систем

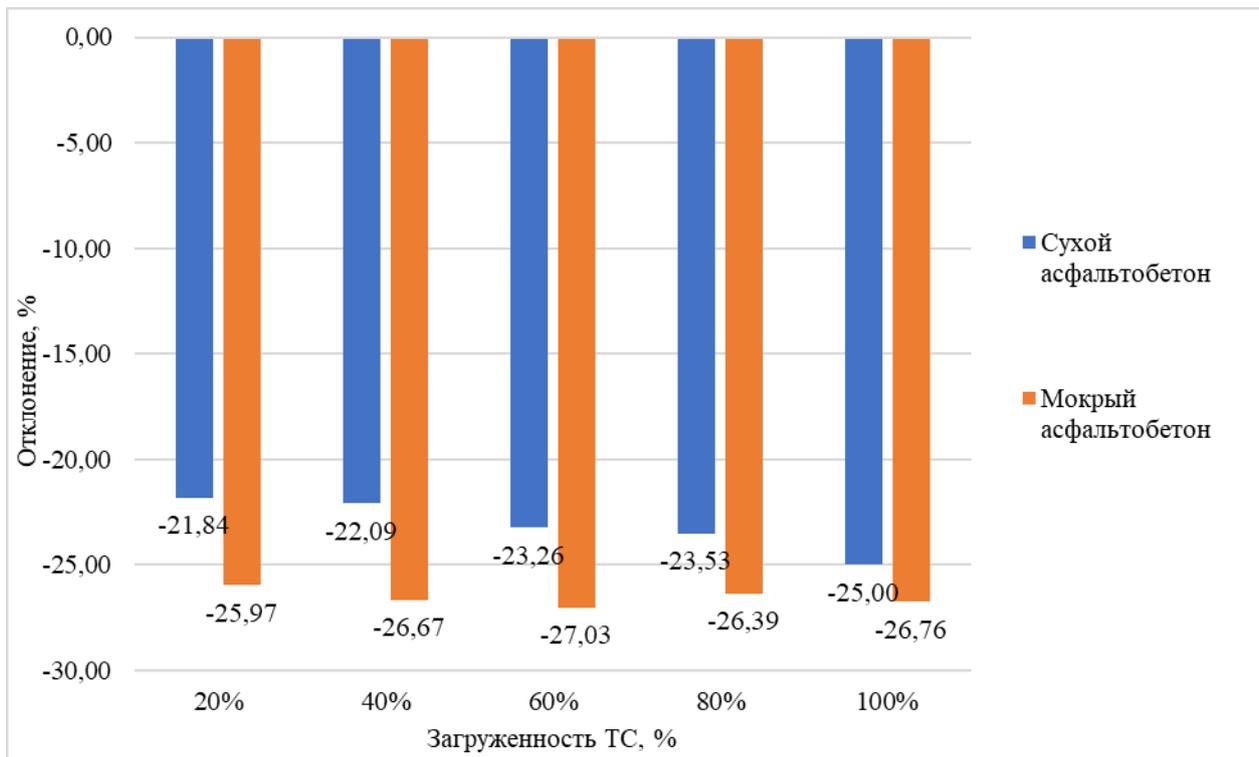


Рисунок 10 – Гистограмма отклонений значений установившегося замедления при наличии вспомогательных тормозных систем

#### 4 Обсуждение и заключение

Таким образом, в ходе выполнения данной работы была отмечена важность проведения таких мероприятий как дорожная экспертиза в рамках установления и определения деталей совершенных дорожно-транспортных происшествий [20]. Также было определено влияние наличия вспомогательных тормозных систем таких как ABS, EBD и BAS непосредственно на процесс торможения.

В рамках проведения дорожных испытаний были получены данные, отражающие значения установившегося замедления на транспортных средствах как оснащенных современными тормозными системами, так и без них. Кроме того, в ходе проведения эксперимента было использовано асфальтобетонное покрытие с двумя коэффициентами сцепления, а также автомобили с разной загруженностью, что позволило собрать более подробную информацию.

В результате исследования был проведен сравнительный анализ, который, в свою очередь, отразил разницу между значениями, полученными непосредственно в ходе эксперимента, и данными, установленными в нормативных документах. Кроме того, было определено, что благодаря использованию вспомогательных тормозных систем сокращается значение установившегося замедления в среднем на 25 %.

Полученные данные подтверждают важность применения вспомогательных тормозных систем, так как влияют на безопасность дорожного движения, а также значимость их применения в экспертизе дорожно-транспортных происшествий, о чем, в свою очередь, свидетельствуют конкретные значения установившегося замедления, которые были определены непосредственно в ходе проведения вышеуказанного эксперимента.

#### Список литературы

- 1 Ярьско, В. А. Безопасность дорожного движения // Вестник магистратуры. 2019. №3-2 (90). С. 59-66. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/bezopasnost-dorozhnogo-dvizheniya> (дата обращения: 18.10.2024).
- 2 Кузьяк, Н. В. Тенденции развития тормозных систем легковых автомобилей / Студенческий научный форум, 2021. С. 46-49. – URL: <https://publish2020.scienceforum.ru/ru/article/view?id=567>
- 3 Юшкевич, А. В. Тормозные системы двухколесных транспортных средств / Юшкевич А. В., Сазонов И. С., Мельников А. С., Петренко М. Л., Амельченко Н. П. // Вестник Белорусско-Российского университета. 2014. – №2 (43). С. 94-104. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/tormoznye-sistemy-dvuh-kolesnyh-transportnyh-sredstv>
- 4 Официальный сайт МВД России. Доклад о состоянии безопасности дорожного движения в Российской Федерации – URL: <https://мвд.рф/?ysclid=m3ne5axnf9695759044>
- 5 Стратегия безопасности дорожного движения в Российской Федерации на 2018-2024 годы. – URL: <http://static.government.ru/media/files/g6BXGgDI4fCEiD4xDdJUwIudPATBC12.pdf>
- 6 Шамаева, И. И. Как антиблокировочная система тормозов повлияла на повышение безопасности при вождении автомобилей/ Шамаева И. И., Пономарев Д.А., Марченко В.В., Башлаков Д.М. / Наука и общество на пути к модернизации: современные взгляды, новые горизонты. Ростов-на-Дону, 2023. С. 141-143. – URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?edn=utbpmb&ysclid=m3nc9r9lec534996629>.
- 7 Ткачева, Т. М. Влияние антиблокировочной системы (АБС) на поведение автомобиля в процессе торможения / Ткачева Т. М., Ларин Е.С., Лаубе А.И., Шевченко Н.М. // Автомобиль. Дорога. Инфраструктура – URL: <https://www.adi-madi.ru/madi/article/view/1173> (Дата обращения: 01.10.2024).
- 8 Бахмутов, С. В. Развитие антиблокировочных систем современных автомобилей, включая электромобили и гибридные транспортные средства / Машиностроительные компоненты. Москва, 2023. – №3(60) – С. 43-50 – URL: <https://mmmm.by/pdf/ru/2022/03/03.pdf?ysclid=m3neeou86o186740384>.
- 9 Подопригра, Н. В. Определение параметров процесса торможения автотранспортных средств при реконструкции и экспертизе ДТП / Мир транспорта и технологических машин, 2015. С. 93-102. – URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?edn=tnijjb&ysclid=m3nehe8h8a482259673>
- 10 ГОСТ 33997-2016. Национальный стандарт Российской Федерации. Нормативные значения при оценке эффективности торможения колесных транспортных средств. – URL: <https://docs.cntd.ru/document/1200146241?ysclid=m3nazh5yn250788053> (Дата обращения: 01.10.2024).
- 11 Федотов Александр Иванович, Громалова Виктория Олеговна Анализ влияния работы abs на эффективность торможения автомобиля на летних дорогах // Вестник ИргТУ. 2014. №3 (86). С. 4-

12. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/analiz-vliyaniya-raboty-abs-na-effektivnost-tormozheniya-avtomobilya-na-letnih->

12 Давлатшоев, Р. А. Сравнительный анализ эффективности торможения автомобиля в различных дорожных условиях // Известия вузов. Машиностроение. 2007. №3. С. 46-51. – URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/sravnitelnyy-analiz-effektivnosti-tormozheniya-avtomobilya-v-razlichnyh-dorozhnyh-usloviyah>.

13 Федотов, А. И. Влияние работы abs на тормозную эффективность и устойчивость автомобиля / А. И. Федотов, В. О. Громалова // Вестник ИрГТУ. 2013. – №8 (79). С. 101-105. – URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/vliyanie-raboty-abs-na-tormoznyuyu-effektivnost-i-ustoychivost-avtomobilya>.

14 Мельников, А. С. ЭФФЕКТИВНОСТИ РАБОТЫ ТОРМОЗНОЙ СИСТЕМЫ АВТОМОБИЛЯ / А. С. Мельников, М. Л. Петренко, О. А. Пономарева, А. А. Мельников // Вестник Белорусско-Российского университета. 2023. – №1. – (78). С. 22-31. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/ispytaniya-effektivnosti-raboty-tormoznoy-sistemy-avtomobilya>.

15 Клименко В. И., Сараев О. В., Давиденко И. А. Исследование влияния антиблокировочной системы на эффективность торможения легкового автомобиля // Автомобильный транспорт. – 2011. – №29. – С. 245-250. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/issledovanie-vliyaniya-antiblokirovочноy-sistemy-na-effektivnost-tormozheniya-legkovogo-avtomobilya>.

16 Прибор «Эффект-02» Компания «МЕТА». – URL: <http://www.metamoscw.ru/ru/store/diagnosticheskoe-oborudovanie/effekt-02.html>.

17 Правила дорожного движения Российской Федерации: офиц. текст. – URL: [https://www.consultant.ru/document/cons\\_doc\\_LAW\\_2709/824c911000b3626674abf3ad6e38a6f04b8a7428/?ysclid=m3nel89r4n692152054](https://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_2709/824c911000b3626674abf3ad6e38a6f04b8a7428/?ysclid=m3nel89r4n692152054)

18 Судебная автотехническая экспертиза. Ч. 2 / Под ред. В. А. Илларионова. М.: ВНИИСЭ, 1980. 491 с.

19 Технический регламент таможенного союза ТР ТС 018/2011 «О безопасности колесных транспортных средств» от 09.11.2011 № 877, 465 с.

20 Лазарев, Д. А. Совершенствование дорожно-транспортной экспертизы на основе Исследования процесса торможения автомобиля: дис. канд. Техн. Наук: 05. 22.10. Орел, 2018. 120 с.

## References

1 Yaresko, V. A. Road safety // Bulletin of the Magistracy. 2019. No. 3-2 (90). P. 59-66. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/bezopasnost-dorozhnogo-dvizheniya> (date of access: 18.10.2024).

2 Kuznyak, N. V. Trends in the development of braking systems of cars / Student Scientific Forum, 2021. P. 46-49. - URL: <https://publish2020.scienceforum.ru/ru/article/view?id=567>

3 Yushkevich, A. V. Brake systems of two-wheeled vehicles / Yushkevich A. V., Sazonov I. S., Melnikov A. S., Petrenko M. L., Amelchenko N. P. // Bulletin of the Belarusian-Russian University. 2014. – No. 2 (43). P. 94-104. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/tormoznye-sistemy-dvuhkolesnyh-transportnyh-sredstv>

4 Official website of the Ministry of Internal Affairs of Russia. Report on the state of road safety in the Russian Federation – URL: <https://мвд.пф/?ysclid=m3ne5axnf9695759044>

5 Road safety strategy in the Russian Federation for 2018-2024. – URL: <http://static.government.ru/media/files/g6BXGgDI4fCEiD4xDdJUwIxdPATBC12.pdf>

6 Shamaeva, I. I. How the anti-lock braking system influenced the improvement of driving safety / Shamaeva I. I., Ponomarev D. A., Marchenko V. V., Bashlakov D. M. / Science and society on the way to modernization: modern views, new horizons. Rostov-on-Don, 2023. P. 141-143. – URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?edn=utbpmb&ysclid=m3nc9r9lec534996629>.

7 Tkacheva, T. M. The influence of the anti-lock braking system (ABS) on the behavior of the car during braking / Tkacheva T. M., Larin E. S., Laube A. I., Shevchenko N. M. // Automobile. Road. Infrastructure - URL: <https://www.adi-madi.ru/madi/article/view/1173> (Accessed: 01.10.2024).

8 Bakhmutov, S. V. Development of anti-lock braking systems of modern cars, including electric cars and hybrid vehicles / Mechanical engineering components. Moscow, 2023. - No. 3 (60) -. P. 43-50 - URL: <https://mmmm.by/pdf/ru/2022/03/03.pdf?ysclid=m3neeou86o186740384>.

9 Podoprigora, N. V. Determination of the parameters of the braking process of vehicles during the reconstruction and examination of road accidents / World of transport and technological machines, 2015. P. 93-102. - URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?edn=tnijjb&ysclid=m3nehe8h8a482259673>

10 GOST 33997-2016. National standard of the Russian Federation. Standard values for assessing the braking efficiency of wheeled vehicles. - URL: <https://docs.cntd.ru/document/1200146241?ysclid=m3nazh5yn250788053> (Accessed: 01.10.2024).

11 Fedotov Aleksandr Ivanovich, Gromalova Victoria Olegovna Analysis of the influence of ABS operation on the braking efficiency of a car on summer roads // Bulletin of IrSTU. 2014. No. 3 (86). P. 4-12. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/analiz-vliyaniya-raboty-abs-na-effektivnost-tormozheniya-avtomobilya-na-letnih->

12 Davlatshoev, R. A. Comparative analysis of the braking efficiency of a car in various road conditions // News of universities. Mechanical engineering. 2007. No. 3. P. 46-51. – URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/sravnitelnyy-analiz-effektivnosti-tormozheniya-avtomobilya-v-razlichnyh-dorozhnyh-usloviyah>.

13 Fedotov, A. I. The influence of ABS on the braking efficiency and stability of the car / A. I. Fedotov, V. O. Gromalova // Bulletin of IrSTU. 2013. – No. 8 (79). P. 101-105. – URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/vliyanie-raboty-abs-na-tormoznuyu-effektivnost-i-ustoychivost-avtomobilya>.

14 Melnikov, A. S. EFFICIENCY OF THE CAR BRAKING SYSTEM / A. S. Melnikov, M. L. Petrenko, O. A. Ponomareva, A. A. Melnikov // Bulletin of the Belarusian-Russian University. 2023. - No. 1. - (78). P. 22-31. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/ispytaniya-effektivnosti-raboty-tormoznoy-sistemy-avtomobilya>.

15 Klimenko V. I., Saraev O. V., Davidenko I. A. Study of the influence of the anti-lock braking system on the braking efficiency of a passenger car // Automobile transport. - 2011. - No. 29. - P. 245-250. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/issledovanie-vliyaniya-antiblokirovochnoy-sistemy-na-effektivnost-tormozheniya-legkovogo-avtomobilya>.

16 Device "Effect-02" Company "META". – URL: <http://www.meta-moscow.ru/ru/store/diagnosticheskoe-oborudovanie/effekt-02.html>.

17 Traffic rules of the Russian Federation: official text. – URL: [https://www.consultant.ru/document/cons\\_doc\\_LAW\\_2709/824c911000b3626674abf3ad6e38a6f04b8a7428/?ysclid=m3nel89r4n692152054](https://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_2709/824c911000b3626674abf3ad6e38a6f04b8a7428/?ysclid=m3nel89r4n692152054)

18 Forensic automotive expertise. Part 2 / Ed. by V. A. Illarionov. Moscow: VNIIE, 1980. 491 p.

19 Technical Regulations of the Customs Union TR CU 018/2011 "On the Safety of Wheeled Vehicles" dated 09.11.2011 No. 877, 465 p.

20 Lazarev, D. A. Improving Road Transport Expertise Based on the Study of the Car Braking Process: dis. Cand. Tech. Sciences: 05. 22.10. Orel, 2018. 120 p.

© Барнови Н. В., Шаврина В. С., 2024



2.9.5 – эксплуатация автомобильного транспорта

## ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫЕ МЕТОДЫ СОВЕРШЕНСТВОВАНИЯ СИСТЕМЫ ДОСТАВОК В СФЕРЕ ЭЛЕКТРОННОЙ КОММЕРЦИИ

**Макарова Ирина Викторовна**,  
д.т.н., профессор, заведующий кафедрой  
«Сервис транспортных систем», Набережно-  
челнинский институт (филиал) Казанского  
(Приволжского) федерального университета,  
г. Набережные Челны, e-mail: [kamivm@mail.ru](mailto:kamivm@mail.ru)

✉<sup>1</sup> **Бойко Алексей Дмитриевич**,  
старший преподаватель кафедры  
«Сервис транспортных систем», Набережно-  
челнинский институт (филиал) Казан-  
ского (Приволжского) федерального  
университета, г. Набережные Челны,  
e-mail: [boykoaleksey94@gmail.com](mailto:boykoaleksey94@gmail.com)

**Мавляутдинова Гульназ Рашидовна**,  
старший преподаватель кафедры «Сервис  
транспортных систем», Набережночелнинский  
институт (филиал) Казанского (Приволжского)  
федерального университета, г. Набережные  
Челны, e-mail: [sadygova\\_1988@mail.ru](mailto:sadygova_1988@mail.ru)

**Аннотация.** Конкуренция в системе элек-  
тронной коммерции в связи с ее быстрым  
развитием вынуждает компании к поиску  
решений для повышения эффективности.  
Наиболее важным вопросом при этом явля-  
ются логистические операции, от которых  
зависит удовлетворение требований клиен-  
тов. Появление интеллектуальных техноло-  
гий позволяет перестроить систему до-  
ставки интернет-заказов, делая ее более гиб-  
кой и удобной. В статье рассматривается  
один из способов решения данной про-  
блемы. На примере построения двухзвенной  
системы доставки из интернет-магазина по-  
казано, что предлагаемая система позволит  
не только ускорить процесс доставки,  
но и снизить нагрузку на транспортную сеть

## INTELLIGENT METHODS FOR IMPROV- ING DELIVERY SYSTEM IN E-COMMERCE INDUSTRY

**Makarova Irina Viktorovna**,  
doctor of technical sciences, professor, head of the  
department "Service of transport systems", Na-  
berezhnye Chelny institute (branch) Kazan (Volga  
region) federal university, Naberezhnye Chelny, e-  
mail: [kamivm@mail.ru](mailto:kamivm@mail.ru)

✉<sup>1</sup> **Boyko Aleksey Dmitrievich**,  
senior lecturer at the department of  
"Service of transport systems", Naberezhnye  
Chelny institute (branch) Kazan (Volga Region)  
federal university, Naberezhnye Chelny,  
e-mail: [boykoaleksey94@gmail.com](mailto:boykoaleksey94@gmail.com)

**Mavlyautdinova Gulnaz Rashidovna**,  
senior lecturer at the department of  
"Service of transport systems", Naberezhnye  
Chelny institute (branch) Kazan (Volga Region)  
federal university, Naberezhnye Chelny,  
e-mail: [sadygova\\_1988@mail.ru](mailto:sadygova_1988@mail.ru)

**Annotation.** Competition in the e-commerce sys-  
tem due to its rapid development forces companies  
to search for solutions to improve efficiency. The  
most important issue in this case is logistics oper-  
ations, on which customer satisfaction depends.  
The advent of intelligent technologies makes it  
possible to rebuild the online order delivery sys-  
tem, making it more flexible and convenient. The  
article discusses one of the ways to solve this  
problem. Using the example of building a two-link  
delivery system from an online store, it is shown  
that the proposed system will not only speed up  
the delivery process, but also reduce the load on  
the city's transport network both in terms of traffic  
and from an environmental point of view. Ulti-  
mately, the proposed delivery option will contrib-  
ute to the implementation of the ESG concept. The

города как с точки зрения трафика, так и с экологической точки зрения. В конечном итоге предлагаемый вариант доставки будет способствовать реализации концепции ESG. Предлагаемая система использует имитационные модели, которые хорошо себя зарекомендовали для решения подобных задач. Рекомендованы разные варианты курьерских доставок «последней мили».

**Ключевые слова:** ГОРОДСКАЯ ЛОГИСТИКА, ДОСТАВКА "ПОСЛЕДНЕЙ МИЛИ", ЭЛЕКТРОННАЯ КОММЕРЦИЯ, УСТОЙЧИВОЕ РАЗВИТИЕ, ИМИТАЦИОННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ.

proposed system uses simulation models that have proven themselves well for solving such problems. Different options for "last mile" courier deliveries are recommended.

**Keywords:** URBAN LOGISTICS, LAST MILE DELIVERY, E-COMMERCE, SUSTAINABLE DEVELOPMENT, SIMULATION MODELING.

<sup>1</sup> Автор для ведения переписки

### 1 Состояние вопроса исследования и актуальность работы

Тенденции в сфере розничной торговли и электронной коммерции привели к росту спроса на городские перевозки и курьерские доставки. Это беспокоит не только градостроителей и работников сферы традиционных городских перевозок, но и перевозчиков посылок и жителей городов, поскольку растущие грузовые потоки на городских улицах и придомовых территориях, создают проблемы, которые требуют эффективных решений. Эта тема также получила соответствующее распространение в научной литературе, поскольку исследователи предлагают решения в сфере логистики, в том числе проблемы доставки «последней мили». Использование для этих целей имитационных моделей позволит выбрать оптимальное решение.

Курьерская доставка «e-commerce» – это процесс доставки товаров, приобретенных через интернет-магазины или платформы электронной коммерции, с помощью курьерских служб. Это один из ключевых элементов электронной коммерции, который обеспечивает удобство и скорость доставки товаров покупателям.

Расходы на транспортную логистику стали стремительно расти по целому ряду причин, среди которых неадекватное планирование, отсутствие прозрачности и неправильное принятие решений [1], неразвитая логистическая инфраструктура, низкая эффективность управления логистическими рисками, недостаточная эффективность существующих цепей поставок, что приводит к росту цен, пропущенным поставкам, недовольным клиентам и потере бизнеса [2, 3]. Поэтому выявленные проблемы связаны с необходимостью совершенствования и оптимизации логистики.

Доставка «последней мили» – это заключительный этап логистической цепочки, когда товар доходит до покупателей. Как показывает практика, на доставку «последней мили» приходится больше всего ресурсов и времени, поскольку водителям приходится останавливаться в нескольких адресах для выполнения своих задач. Городская логистика связана с оптимизацией транспортной деятельности в городских районах и планированием распределения товаров. Она становится актуальной проблемой ввиду роста объемов электронной коммерции на урбанизированных территориях. «Последняя миля» доставки вызывает особую озабоченность

из-за давления на ресурсы предприятий и влияния на окружающую среду. Устойчивость становится ключевым направлением в этой области, требуя вовлечения граждан и заинтересованных сторон в процессы принятия решений. Для этого необходимы новые подходы, включая использование концепции умных городов и технологий больших данных и Интернета вещей для сбора и анализа данных в реальном времени. Исследование в Португалии [4] показало возможность разработки модели, которая динамически сотрудничает с заинтересованными сторонами для удовлетворения потребностей граждан в реальном времени и сокращения использования транспортных средств при доставке на «последней миле».

В некоторых исследованиях [5] подчеркивается, что последние несколько лет были периодом кардинальных изменений в электронной коммерции и доставке товаров на дом. Рост каналов доставки на дом и все более широкий спектр услуг, предлагаемых розничными торговцами (например, click & collect), – все это приводит к изменениям в структуре городских грузовых потоков и перемещении транспортных средств в городах. На сложные изменения влияют и другие факторы, такие как демографические изменения и внедрение новых потребительских технологий.

Влияние изменений остается неопределенным. Фрагментация розничного канала может привести к росту движения транспортных средств в городах, поскольку розничные торговцы вынуждены предлагать все более высокий уровень обслуживания более требовательным потребителям. С другой стороны, возросший уровень обслуживания может побудить потребителей изменить свое поведение в поездках и совершать меньше поездок на автомобиле, поскольку их потребности удовлетворяются с помощью сложных систем доставки на дом (или других подходящих альтернатив). Новые сервисы также, вероятно, будут в авангарде внедрения новых транспортных технологий поскольку операция доставки на дом очень заметна потребителям и осуществляется в уязвимых районах городов (т.е. жилых зонах). Многие компании рассматривают возможность использования транспортных средств, работающих на альтернативном топливе, для доставки товаров на дом, что важно с точки зрения экологии и в качестве маркетингового фактора.

Обсуждаемые здесь предлагаемые изменения создают серьезные проблемы для городского планирования. Новые объекты розничной торговли могут очень отличаться по виду, планировке и объемам продаж, что произошло в течение последних 10-20 лет и привело к совершенно иным грузопотокам и схемам передвижения. Это повлияло на движение транспорта и на формирование точек консолидации, необходимых в новых каналах распределения. Важно рассматривать изменения комплексно, принимая во внимание поведение путешественников, а также городскую логистику. Только используя этот целостный подход, можно выявить и оценить потенциальное воздействие расширения использования доставки на дом на эффективность городского планирования в отношении транспортной логистики и экологии.

Проблемы с логистикой в курьерской доставке «e-commerce» могут возникать на различных этапах процесса доставки товаров. Некоторые из них включают:

1. Неэффективное планирование маршрутов: Курьерские службы могут столкнуться с проблемами при планировании маршрутов доставки, что может привести к задержкам и увеличению времени доставки.

2. Недостаточная инфраструктура: недостаток инфраструктуры, такой как склады, транспортные средства и оборудование, может привести к задержкам и неэффективности в процессе доставки.

3. Недостаточная автоматизация: ручной процесс обработки заказов и доставки может быть неэффективным и привести к ошибкам и задержкам.

4. Недостаточная координация: недостаточная координация между различными участниками процесса доставки, такими как интернет-магазин, курьерская служба и покупатель, может привести к задержкам и неэффективности.

5. Недостаточная прозрачность: отсутствие прозрачности в процессе доставки может вызвать недоверие у клиентов и привести к неудовлетворенности.

6. Недостаточная гибкость: недостаточная гибкость в процессе доставки может привести к проблемам при изменении адреса доставки или других условий заказа.

7. Недостаточная безопасность: недостаточная безопасность в процессе доставки может привести к краже или повреждению товаров.

Влияние изменений остается неопределенным. С одной стороны, этот канал розничной торговли может увеличить количество транспортных средств в городах; с другой стороны, электронная коммерция может изменить поведение потребителей в поездках, что может привести к сокращению числа поездок на автомобилях.

*Интеллектуальные решения в системах доставки в контексте растущей электронной коммерции*

Последние мировые тенденции, связанные с растущим использованием электронной коммерции, становятся проблемой для курьерских перевозок, особенно в процессе «последней мили» доставки товаров конечному розничному получателю. Одним из способов доставки является личное получение посылки в автоматизированном почтовом ящике, доступном для клиента 24/7. Анализ [6] был проведен путем опроса польских пользователей почтоматов, которые предоставили данные, закодированные в соответствии с измерениями модели Кано. Анкета включала двадцать один атрибут, связанных с качеством услуг почтовых автоматов, опрос был проведен среди 468 респондентов. Дальнейшие исследования, по мнению авторов, могут касаться разработки модели принятия решений, расширяя область атрибутов оценки качества услуг почтоматов.

Интерес потребителей к системе электронной коммерции быстро развивается, особенно в сфере онлайн-доставки еды. В связи с этим, обеспечение удовлетворенности клиентов – важная цель для компаний, работающих в этой области. Прогнозирование и сокращение времени курьерской доставки решается как аналитическими методами, так и с помощью моделирования на основе данных систем позиционирования курьеров с помощью GPS, однако проблема усложняется многофакторностью реальной системы городского дорожного движения. В статье [7] представлено применение байесовского вывода для прогнозирования времени доставки еды, что ранее не применялось для решения этой проблемы. По мнению авторов исследования, в дальнейших работах модели могут использовать разные наборы данных для изучения взаимосвязей предикторов.

Использование мобильных устройств для заказов продуктов питания и свежих продуктов очень распространено, но сложность организации их доставки, стимулирует повышение качества логистических услуг (LSQ), особенно в электронной коммерции. Целью исследования [8] было изучение влияния качества обслуживания на удовлетворенность клиентов в сфере электронной коммерции свежих продуктов. Результаты исследования показали, что надежность, удобство, свежесть и качество контакта с персоналом являются четырьмя ключевыми измерениями шкалы LSQ на платформе электронной коммерции для свежих и скоропортящихся товаров.

Целью данного исследования [9] является разработка и изучение измерения опыта клиентов в процессе доставки «последней мили», что является критическим шагом на пути к их удовлетворенности и будущему намерению снова заказывать продукты у того же ритейлера. Предметом исследования был пользовательский опыт при доставке «последней мили», и целью было создание измерительного инструмента для измерения этого опыта. Этот инструмент называется Customer Delivery Experience - Last-Mile Delivery (CDX-LMD). Он представляет собой самооценочную шкалу, которая была разработана для оценки опыта онлайн-покупателей в процессе доставки товаров. Шкала включает шесть факторов:

Delivery Efficiency (Эффективность доставки) – предпочтение эффективности и профессионализму курьерских служб и интернет-магазинов.

Parcel Tracking (Отслеживание посылки) – поведение отслеживания статуса заказа.

Smooth Delivery (Гладкая доставка) – опыт беспроблемного получения посылки.

Visual Appeal (Визуальная привлекательность) – важность визуальной привлекательности компании по доставке и упаковке товара.

Joyful Anticipation (Радостное ожидание) – чувство радости от ожидания и получения посылки.

Convenience (Удобство) – убеждение в удобстве и полезности онлайн-шопинга по сравнению с традиционным походом в магазин.

Авторы провели обширный анализ психометрических свойств этого инструмента и подтвердили его надежность и валидность. Инновационность этой работы отражена в предлагаемом измерительном инструменте, который может иметь решающее значение для будущих исследований.

Основная цель исследования [10] – определить, какие факторы наиболее существенно влияют на удовлетворенность клиентов в процессе доставки «последней мили» (LMD), в котором было применено структурное уравнение моделирования (SEM). Предложенная модель SEM показала хорошее соответствие. Статистически значимыми предикторами удовлетворенности клиентов при этом были доверие к курьерской службе, цена доставки, скорость и звонок курьера перед доставкой. Авторы считают, что развитию электронной коммерции и логистических услуг в области доставки продукции служат непрерывные исследования в этой области.

#### *Предлагаемые интеллектуальные решения в области доставки*

В статье [11] рассматривается проблема оптимизации ассортимента в нескольких местах при совместной доставке дронами и людьми-курьерами. Для максимизации дохода розничного продавца, одновременно настраиваются ассортимент товаров и методы доставки «последней мили». Для описания поведения клиентов применяют смешанную полиномиальную логит-модель. Учитывается также грузоподъемность дронов и ограничение по расстоянию доставки дронов и курьеров-людей. Новизна предложенного решения обусловлена применением модели смешанно-целочисленного линейного программирования (MILP), которая преобразуется в квадратичную смешанно-целочисленную модель с неравенствами Маккормика (Conic + MC).»

Хотя использование курьеров-дронов для доставки имеет множество преимуществ по сравнению с традиционными методами, однако большинство городских жителей не могут пока оценить преимущество такого способа доставки. Целью исследования [12] является выяснение причин такого отношения с целью расширения метода доставки дронами в ближайшей перспективе. Актуальность этой статьи обусловлена необходимостью разработки и внедрения правил и стандартов

безопасности полетов дронов для других видов воздушного движения и массовых мероприятий, а также их содействию общим целям городского планирования и устойчивого развития.

Цифровизация становится все более важной для экономической деятельности и экономического развития. Электронная коммерция, как часть местной и международной торговли, приобретает все большее значение и тесно связана с технологическим прогрессом и инновациями. В исследовании [13] изучается актуальность драйверов по глобальному развитию электронной коммерции. Авторы использовали для анализа панельные и жесткие данные из различных БД (ЮНКТАД, Всемирный банк и т. д.). Новизна исследования заключается в использовании данных по странам, собранных из различных источников за несколько лет, что обеспечивает альтернативный подход в области электронной коммерции.

В обзоре [14] изучаются основные математические модели, применяемые в городской логистике, с упором на проблемы маршрутизации, местоположения и перевалки. Исследование рассматривает растущий спрос на эффективные и устойчивые логистические решения, обусловленные ростом населения и расширением электронной коммерции. Эвристические методы наиболее широко используются из-за их способности предоставлять надежные и высококачественные решения за сокращенное время вычислений, что имеет решающее значение для приложений в реальном времени. Было показано, что эти методы значительно повышают эксплуатационную эффективность и снижают затраты, особенно в сценариях с участием электромобилей.

Для удовлетворения переменчивого рыночного спроса и конкуренции в сфере электронной коммерции, усиливается необходимость соблюдения более жестких сроков доставки. Поэтому для минимизации эксплуатационных расходов и повышения экономической и экологической устойчивости, необходимо повышать эффективность работы распределительных центров. В исследовании [15] использовался инструмент моделирования для воспроизведения 1260 различных конфигураций склада.

В мире электронного бизнеса развивается концепция и практика шопстриминга (шопинга в прямом эфире), поскольку он интегрирует технологию шопинга в прямом эфире с электронной коммерцией. Исследование [16] посвящено изучению связей между этими технологиями путем изучения ассоциации в контексте моды и товаров личной гигиены (FPC), на основе когнитивных, эмоциональных и физиологических процессов, влияющих на поведение покупателя.

Цель статьи [17] – рекомендовать продукты с помощью интеллектуального анализа ассоциативных правил с сайта электронной коммерции с помощью концепции фильтрации. Авторы использовали алгоритмы Argioi и FP-Growth для того, чтобы покупатели могли получать рекомендации и покупать продукты. Рекомендательные системы являются неотъемлемой частью успеха платформ электронной коммерции, предоставляя персонализированный опыт покупок, который стимулирует вовлеченность пользователей и продажи. Помимо этого, был разработан гибридный алгоритм для рекомендации продуктов и его полученная точность составила 81 %.

Быстрый рост рынка электронной коммерции в секторе розничной торговли привел к увеличению спроса на услуги доставки на дом в последние годы. Статья [18] фокусируется на связи между близостью к станциям общественного скоростного транспорта и механизмом выбора способа совершения покупок. Исследование показывает, что модели путешествий, характеризующиеся зависимостью от MRT, могут привести к различным механизмам выбора способа совершения покупок и различным уровням склонности к онлайн-покупкам.

Быстрое развитие цифровых технологий размывало грань между онлайн- и традиционными магазинами, что привело к распространению многоканальной розничной торговли. В

исследовании [19] рассматриваются две широко используемые стратегии — «Купить онлайн и забрать в магазине» (BOPS) и «Доставка из магазина» (SFS). Анализируется цепочка поставок, в которой производитель продает продукцию национальных брендов через платформу электронной коммерции (e-platform), которая также предлагает продукцию своих собственных брендов. Такой подход повышает гибкость выполнения заказов и отвечает разнообразным покупательским предпочтениям потребителей, тем самым повышая прибыльность компаний.

#### *Последствия пандемии*

Пандемия COVID-19 значительно увеличила количество курьеров для доставки в сфере электронной коммерции в России. С введением локдаунов и ограничений на передвижение, онлайн-покупки стали наиболее предпочтительным способом приобретения товаров. Например, в 2020 году Ozon зафиксировал резкий рост заказов, что вызвало необходимость удвоить количество курьеров для выполнения доставки. В условиях пандемии компании электронной коммерции такие как Wildberries и Ozon, активно набирали новых курьеров и заключали договоры с внешними логистическими партнерами для обработки возросшего объема заказов [20, 21].

По данным различных исследований, спрос на курьерские услуги увеличился в несколько раз. Например, рынок доставки продуктов и готовой еды вырос на 69% по сравнению с предыдущим годом. Компании, такие как Delivery Club и «Яндекс.Еда», также зафиксировали значительный рост количества заказов и пользователей, что потребовало увеличения штата курьеров. В целом, пандемия COVID-19 привела к структурным изменениям в секторе электронной коммерции, где курьерская доставка стала неотъемлемой частью обслуживания клиентов, обеспечивая их потребности в условиях строгих ограничений [22].

В апреле 2019 года интернет-магазин Ozon, третий по обороту среди онлайн-ритейлеров в России (согласно данным Data Insight), столкнулся с резким увеличением числа заказов. Продажи товаров для творчества возросли на 164%, товаров для фитнеса — на 166%, для ремонта — на 76%, а машинок для стрижки волос — на 317% по сравнению с предыдущим годом. В результате ритейлер доставил рекордное количество посылок — 2,2 миллиона заказов за апрель [23].

Крупнейший российский ритейлер X5 Retail Group сообщил о росте онлайн-продаж в 4,7 раза до 1,7 миллиарда рублей за апрель. В конце месяца X5 доставляла более 23 000 заказов в день. Сервис доставки еды из ресторанов Delivery Club отчитался о выполнении свыше 5,5 миллионов заказов в мае — это в три раза больше по сравнению с маем 2019 года и на 1 миллион заказов больше, чем в апреле. Пользовательская база сервисов «Яндекс.Еда» и «Яндекс.Лавка» с марта увеличилась на 121 %: охват «Еды» в России утроился, число новых ресторанов выросло на 7000 до 24 000, а «Лавка» распространила свою деятельность на всю Москву и почти весь Санкт-Петербург, начав работать круглосуточно.

Основная нагрузка от возросшего спроса легла на службы доставки. Если ранее покупатели Ozon предпочитали забирать свои заказы в пунктах выдачи, постаматах или почтовых отделениях, то с апреля доля курьерской доставки увеличилась вдвое и впервые сравнялась с долей пунктов выдачи, а в Москве достигла 80%. Незадолго до карантина Ozon отказался от собственной курьерской службы: в конце января компания объявила о полной передаче «последней мили» партнёрским организациям [24].

## 2 Материалы и методы

На данный момент крупные игроки рынка электронной коммерции производят доставку из крупных сортировочных центров напрямую клиентам. Такой способ не позволяет точно определить время доставки до клиента, из-за чего временное окно доставки составляет весь день. Для таких доставок применяются фургоны, либо индивидуальные автомобили, которым не всегда можно удобно добраться до адреса, а также неэффективно его использовать для доставки малогабаритных товаров.

В качестве решения предлагается ввести звено доставки в виде ближайшего до клиента ПВЗ откуда курьер на средствах индивидуальной мобильности (СИМ) или же пеший курьер доставляет уже до клиента. Поток товаров объединяется до звена в виде ПВЗ, где клиент уже может забрать заказ самостоятельно, либо заказ переходит на этап доставки последней мили посредством курьера. Таким образом мы снижаем количество фургонов на дорогах города, переводя доставку последней мили на курьеров с СИМ.

Переводя доставку последней мили на аутсорсинг, оставляя за собой управление, подготовку и планирование, а также применяя современные информационные технологии, мы приближаем данную логистическую систему к уровню 5PL. Пятый уровень логистики (5PL) представляет собой систему, которая занимается планированием, подготовкой, управлением и контролем всех составляющих единой цепи транспортировки грузов с использованием электронных средств информации [25].

## 3 Результаты исследований

Актуальной проблемой для города Набережные Челны с населением более 500 тыс. человек является наличие многочисленных пунктов выдачи заказов различных сетей электронной коммерции, расположенных в черте города, что затрудняет доставку грузов и увеличивает время курьерских доставок, особенно в дневное время. Проблему можно решить, снизив количество грузовиков на дорогах города за счет совмещения доставки грузов до пунктов выдачи заказов с теми грузами, которые впоследствии будут развозить курьеры. Тем самым курьерская доставка будет производиться не с центрального склада, а с пункта выдачи заказов, который находится вблизи адреса доставки. Цель – ускорить процесс курьерской доставки, а также снизить интервал времени ожидания клиентом получения посылки. Достичь этой цели возможно путем создания системы поддержки принятия решений (СППР) (рис. 1), интеллектуальным ядром которой станет имитационная модель. Для создания модели использовалась система имитационного моделирования AnyLogic.

Применение СППР позволит сократить время принятия решений, так как в базе данных будут храниться эффективные решения. Это позволит в случае повторяющихся ситуаций быстро находить подходящий вариант, а в случае незначительных отличий вносить соответствующие коррективы. Модульная архитектура СППР позволяет с минимальными затратами корректировать систему по мере возникновения новых задач. Интеллектуальное ядро системы в виде Имитационной модели также может корректироваться при изменении внешних условий. Для упрощения работы пользователей и взаимодействия между модулями разработаны соответствующие интерфейсы.

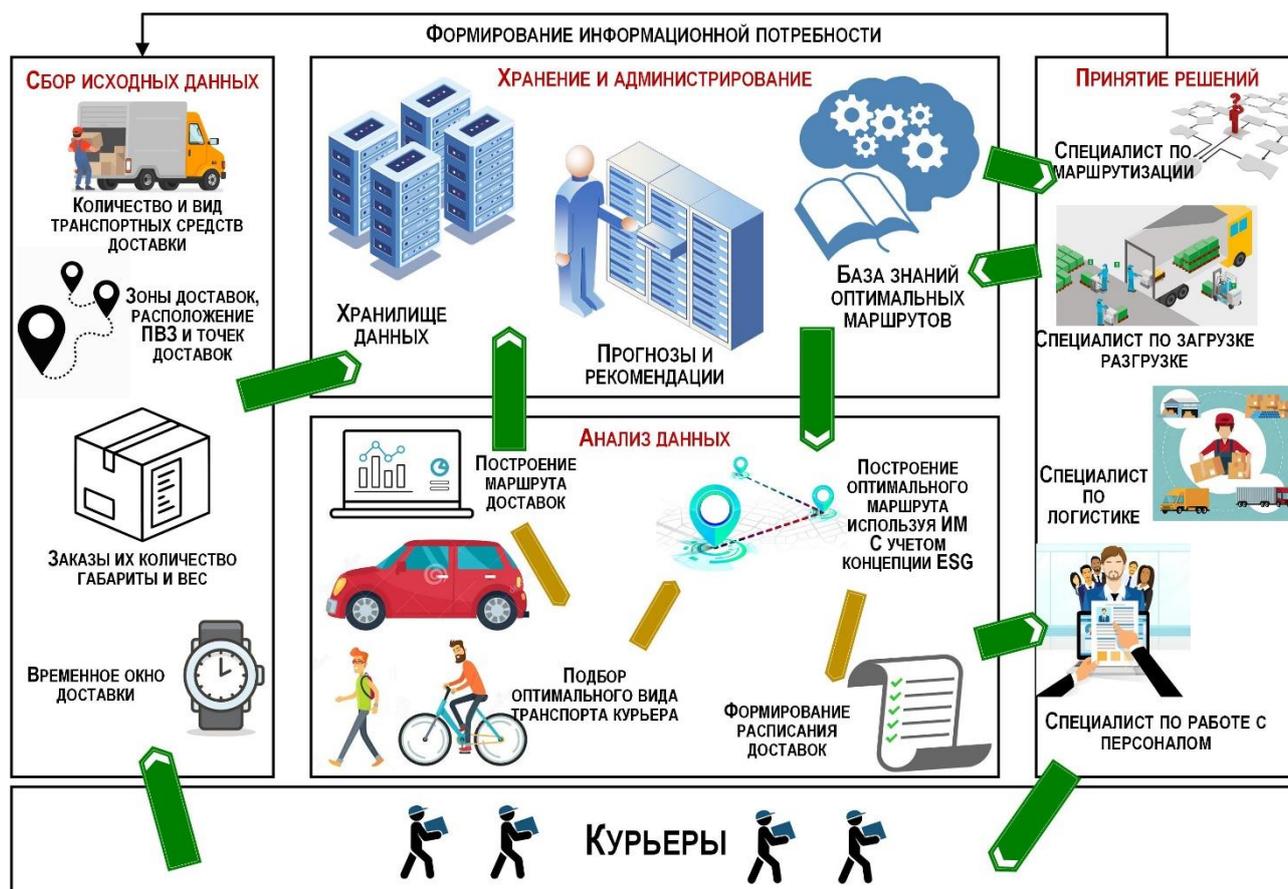


Рисунок 1 – Концептуальная схема системы

### Транспортная модель

Эффективность предлагаемого решения необходимо проверить на имитационной модели (рис.2). За основу была взята часть района Нового города Набережные Челны. Для размещения ГИС-точек пунктов выдачи заказов и сортировочного центра использовалась существующая сеть интернет-магазина ОЗОН. Для наглядного сравнения было построено несколько моделей, в первой было отображено текущее положение пунктов логистики доставок. Из сортировочного центра автомобили с заказами отправляются в пункты выдачи заказов и по адресам клиентов. Во второй модели было отображено предлагаемое решение, при котором не создается нагрузка на транспортную систему города, т.к. доставка «последней мили» передается на курьеров, не перемещающихся по дорогам общего пользования. В модели отображены только фургоны доставки до пунктов выдачи заказов, доставляющие заказы для самовывоза и для последующей передачи курьерам.

Цель построения имитационной модели – определение оптимального количества автомобилей, необходимых для доставки в системе электронной коммерции. В качестве целевой функции выбирается степень загрузки автомобиля, она максимизируется, но и не должна превышать 85 % от наибольшей (рис. 3, 4).

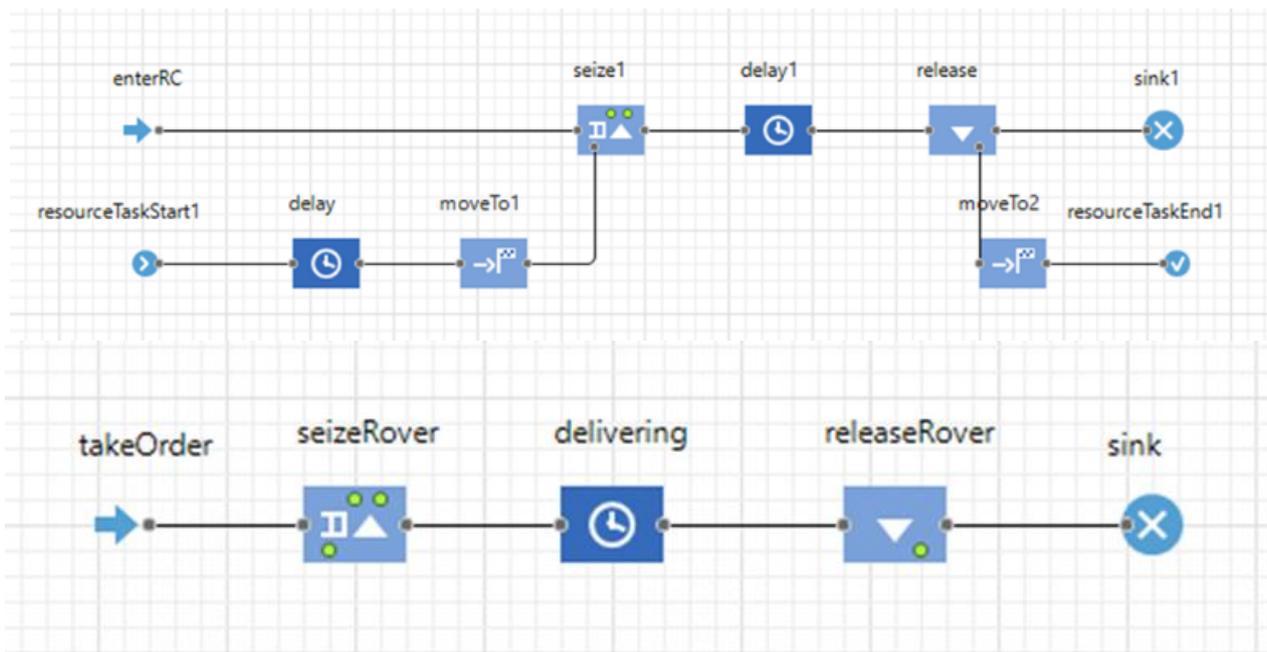


Рисунок 2 – Схема (скрин из «AnyLogic») имитационной модели двухзвенной доставки

|               | Текущее   | Лучшее |
|---------------|-----------|--------|
| Итерация:     | 39        | 32     |
| Функционал↑   | 0.781     | 0.848  |
| Параметры     | Copy best |        |
| колГрузовиков | 23        | 14     |



Рисунок 3 – Оптимизационный эксперимент для текущего варианта доставок в системе электронной коммерции (скрин из «AnyLogic»)

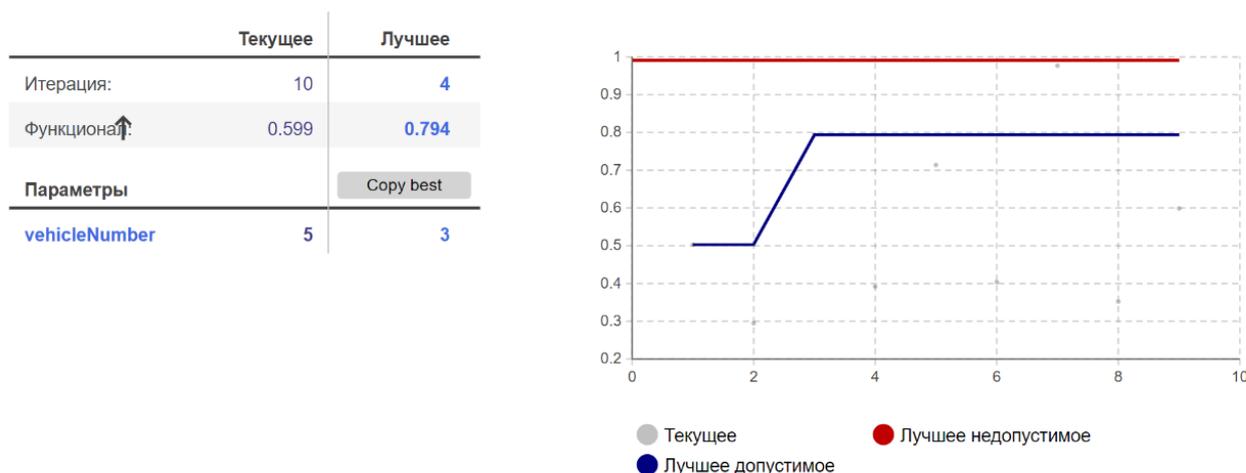


Рисунок 4 – Оптимизационный эксперимент для предлагаемого варианта доставки в системе электронной коммерции (скрин из «AnyLogic»)

Согласно оптимизационному эксперименту для предлагаемого варианта доставки в системе электронной коммерции необходимое количество автомобилей равно 3. В то время как для текущего варианта доставки требуется 14. Такое существенное изменение достигается за счет перевода доставки «последней мили» на курьеров, не передвигающихся по дорогам общего пользования, что позволит снизить нагрузку на транспортную сеть города.

#### *Оценка социального эффекта внедрения предлагаемого решения*

Предположительный социальный эффект может быть оценен величиной временного окна, необходимого для доставки заказа клиенту. В текущем случае курьер собирает множество заказов для доставки по всему городу в течении целого рабочего дня, что приводит к временному окну (необходимости заказчику ожидания курьера) равному рабочему дню курьера. Это создает неудобства, вызываемые неопределенностью времени доставки. При предлагаемом варианте доставки, ПВЗ, где лежит заказ клиента, находится в небольшой удаленности от клиента. Согласно брендбукам крупнейших онлайн магазинов минимальное расстояние между ПВЗ должно составлять 500 м. Получается, при условии максимальной удаленности от ПВЗ в 500 метров, с учетом времени на загрузку курьера, окно доставки можно сократить до получаса.

Кроме того, снижение используемых курьерскими службами транспортных средств положительно сказывается на транспортной сети города. Это поможет сократить количество заторов, уменьшить количество ДТП, улучшить экологическую ситуацию. Комплексные решения, направленные на совершенствование транспортной системы города с использованием парадигмы ESG, позволяют сделать город биопозитивным и устойчивым за счет оптимизации транспортной системы.

#### *Оценка экологической эффективности*

Экологическая эффективность обеспечивается снижением общего числа фургонов, используемых в доставке электронной коммерции, а также переводом курьеров на доставку пешком или с использованием СИМ.

Суммарное время езды для фургонов выбиралось из имитационной модели для текущего варианта доставки (параметр routeK), оно составило 2110 часов.

В то же время, суммарное время езды для фургонов из имитационной модели для предлагаемого варианта доставки электронной коммерции составило 71 час.

Такая существенная разница обусловлена уменьшением парка фургонов с последующим привлечением курьеров на СИМ.

Если пройденный путь, взятый из имитационных моделей, умножить на пробеговые выбросы, то получаем значения выбросов для каждого варианта курьерских доставок (табл. 1).

Таблица 1 – Выбросы согласно перемещениям автомобилей имитационных моделей

| Выброс, г/км   | Выбросы в варианте 1, г | Выбросы в варианте 2, г    |
|--|-------------------------|----------------------------|
| СО – 4,60  | 349416                  | 11757,6                    |
| NO <sub>x</sub> (в пересчете на NO <sub>2</sub> ) – 1,80 | 136728                  | 4600,8                     |
| СН – 0,70  | 53172                   | 1789,2                     |
| Сажа – $3,70 \times 10^{-2}$                             | 2810,52                 | 94,572                     |
| SO <sub>2</sub> – $1,40 \times 10^{-2}$                  | 1063,44                 | 35,784                     |
| Формальдегид – $2,50 \times 10^{-3}$                     | 189,9                   | 6,39                       |
| Бенз(а)пирен – $0,20 \times 10^{-6}$                     | $15192 \times 10^{-6}$  | $0,0005112 \times 10^{-6}$ |

Полученные результаты выбросов свидетельствуют о снижении выбросов для предлагаемого варианта доставки.

#### 4 Обсуждение и заключение

Рассматриваемые тенденции в сфере электронной коммерции и городских перевозок подчеркивают необходимость оптимизации логистики, особенно доставки "последней мили". Рост спроса на курьерские услуги и изменение структуры городских грузопотоков требуют новых подходов к транспортной системе городов. Применение инновационных решений, таких как перевод части доставки на курьеров с использованием СИМ, а также использование пунктов выдачи заказов (ПВЗ), может значительно сократить нагрузку на транспортную сеть и улучшить экологическую обстановку. Имитационная модель показала значительное сокращение количества используемых автомобилей и выбросов вредных веществ, что способствует повышению устойчивости городов и улучшению качества жизни их жителей.

#### Список литературы

- 1 Интернет-ресурс: 6 Ways to Reduce Costs in Logistics (2023). URL: <https://alliance.net/blog/detail/6-ways-to-reduce-costs-in-logistics> (дата обращения 14.02.2023).
- 2 Ryashko M.L. Logistics. Fundamentals of planning and evaluating the effectiveness of logistics systems. [Логистика. Основы планирования и оценки эффективности логистических систем]. Ekaterinburg: Publishing house of Ural University. 2014. С. 12-25.
- 3 Shaforostova N.I. Methods for optimizing logistics costs. [Методы оптимизации логистических издержек]. Young scientist. 2021. № 2 (344). pp. 286-288.
- 4 Diogo Correia, Cristiano Vagos, João Lourenço Marques & Leonor Teixeira. Fulfilment of last-mile urban logistics for sustainable and inclusive smart cities: a case study conducted in Portugal, International Journal of Logistics Research and Applications, 2022. pp. 931-958. DOI: 10.1080/13675567.2022.2130211.
- 5 Интернет-ресурс: Edoardo Marcucci, Valerio Gatta, Giacomo Lozzi. City Logistics landscape in the era of on-demand economy. Main challenges, trends and factors influencing city logistics. D1.1 - City Logistics landscape in the era of on-demand economy. URL: [https://www.leadproject.eu/wp-content/uploads/2021/02/LEAD\\_D1.1\\_City-Logistics-landscape-in-the-era-of-on-demand-economy-1.pdf](https://www.leadproject.eu/wp-content/uploads/2021/02/LEAD_D1.1_City-Logistics-landscape-in-the-era-of-on-demand-economy-1.pdf) (дата обращения 14.02.2023).
- 6 Cieśla, M. Perceived Importance and Quality Attributes of Automated Parcel Locker Services in Urban Areas. Smart Cities 2023, 6, 2661-2679. <https://doi.org/10.3390/smartcities6050120>.
- 7 Pomykacz, J.; Gibas, J.; Baranowski, J. Bayesian Modeling of Travel Times on the Example of Food Delivery: Part 2 – Model Creation and Handling Uncertainty. Electronics 2024, 13, 3418-3439. <https://doi.org/10.3390/electronics13173418>,
- 8 Wang, L.; Tang, Y.-M.; Chau, K.-Y.; Zheng, X. Empirical Research of Cold-Chain Logistics Service Quality in Fresh Product E-Commerce. J. Theor. Appl. Electron. Commer. Res. 2024, 19, С 2543-2556. <https://doi.org/10.3390/jtaer19030122>.

9 Vrhovac, V.; Vasić, S.; Milisavljević, S.; Dudić, B.; Štarchoň, P.; Žižakov, M. Measuring E-Commerce User Experience in the Last-Mile Delivery. *Mathematics* 2023, 11, 1482. pp. 1482-1502. <https://doi.org/10.3390/math11061482>.

10 Vrhovac, V.; Dakić, D.; Milisavljević, S.; Ćelić, Đ.; Stefanović, D.; Janković, M. The Factors Influencing User Satisfaction in Last-Mile Delivery: The Structural Equation Modeling Approach. *Mathematics* 2024, 12, pp. 1857-1885. <https://doi.org/10.3390/math12121857>.

11 Wu, M.; Pei, Z. Multi-Location Assortment Optimization with Drone and Human Courier Joint Delivery. *Appl. Sci.* 2023, 13, pp. 5441-5457. <https://doi.org/10.3390/app13095441>.

12 Zhang, Z.; Xiao, C.-Y.; Zhang, Z.-G. Analysis and Empirical Study of Factors Influencing Urban Residents' Acceptance of Routine Drone Deliveries. *Sustainability* 2023, 15, pp. 13335-13361. <https://doi.org/10.3390/su151813335>.

13 Paun, C.; Ivascu, C.; Olteteanu, A.; Dantis, D. The Main Drivers of E-Commerce Adoption: A Global Panel Data Analysis. *J. Theor. Appl. Electron. Commer. Res.* 2024, 19, pp. 2198-2217. <https://doi.org/10.3390/jtaer190301070>.

14 Moreno, R.P.R.; Lopes, R.B.; Ferreira, J.V.; Ramos, A.L.; Correia, D. A Study of the Main Mathematical Models Used in Mobility, Storage, Pickup and Delivery in Urban Logistics: A Systematic Review. *Systems* 2024, 12, pp. 374-400. <https://doi.org/10.3390/systems12090374>.

15 Suppini, C.; Lysova, N.; Bocelli, M.; Solari, F.; Tebaldi, L.; Volpi, A.; Montanari, R. From Single Orders to Batches: A Sensitivity Analysis of Warehouse Picking Efficiency. *Sustainability* 2024, 16, pp. 8231-8248. <https://doi.org/10.3390/su16188231>.

16 Mutambik, I. The Emerging Phenomenon of Shopstreaming: Gaining a More Nuanced Understanding of the Factors Which Drive It. *J. Theor. Appl. Electron. Commer. Res.* 2024, 19, pp. 2522-2542. <https://doi.org/10.3390/jtaer19030121>.

17 Padhy, N.; Suman, S.; Priyadarshini, T.S.; Mallick, S. A Recommendation System for E-Commerce Products Using Collaborative Filtering Approaches. *Eng. Proc.* 2024, 67, pp. 50-60. <https://doi.org/10.3390/engproc2024067050>.

18 Onuma, Y.; Sakai, T.; Hyodo, T. Does Proximity to MRT Stations Affect Online Shopping Use? An Analysis Using Data from Japan and New York. *Urban Sci.* 2024, 8, pp. 154-173. <https://doi.org/10.3390/urbansci8040154>.

19 Yu, J.; Ren, Y.; Zhou, C. Strategic Interactions in Omnichannel Retailing: Analyzing Brand Competition and Optimal Strategy Selection. *J. Theor. Appl. Electron. Commer. Res.* 2024, 19, pp.2557-2581. <https://doi.org/10.3390/jtaer19040123>.

20 Интернет-ресурс: Основные тенденции развития электронной коммерции в России и мире в 2023 году: ТОП-15 трендов. URL: <https://vc.ru/trade/620609-osnovnye-tendencii-razvitiya-elektronnoy-kommercii-v-rossii-i-mire-v-2023-godu-top-15-trendov>. (дата обращения 14.02.2023).

21 Интернет-ресурс: Рынок e-commerce в России: тренды и новые решения. URL: <https://plus.rbc.ru/partners/5fd0cfff7a8aa90fc83656b1>. (дата обращения 14.02.2023).

22 Гончарук, И. В. Обзор исследований о влиянии пандемии covid-19 на развитие мировой и российской электронной торговли. Таможенная политика России на Дальнем Востоке. 2021. – №1. – (94). С. 66-82

23 Ребязина В.А., Шарко Е.Р., Березка С.М., Старков А.Г. Развитие электронной коммерции в России: влияние пандемии COVID-19. НИУ ВШЭ, 2021. С. 28-36.

24 Интернет-ресурс: Мальцева А. Диванная революция: как самоизоляция вывела службы доставки на сверхскорости. URL: <https://www.vedomosti.ru/partner/articles/2020/06/17/832457-divannaya-revolyuutsiya>. (дата обращения 14.02.2023).

25 Пауль Д.А., Бедило Д.С., Лядова А.А., Лямина О.С. Исследование рынка PL-провайдеров России и Челябинской области, современная экономика и общество глазами молодых исследователей, сборник статей участников Международной научно-практической конференции V Уральского вернисажа науки и бизнеса: в 3 томах. Том 3. – 2018. – С. 20-24.

## References

1 Internet resource: 6 Ways to Reduce Costs in Logistics (2023). URL: <https://alliance.net/blog/detail/6-ways-to-reduce-costs-in-logistics> (accessed 14.02.2023).

2 Ryashko M.L. Logistics. Fundamentals of planning and evaluating the effectiveness of logistics systems. [Logistics. Fundamentals of planning and evaluating the effectiveness of logistics systems]. Ekaterinburg: Publishing house of Ural University. 2014. pp. 12-25.

- 3 Shaforostova N.I. Methods for optimizing logistics costs. [Methods for optimizing logistics costs]. Young scientist. 2021. No. 2 (344). pp. 286-288.
- 4 Diogo Correia, Cristiano Vagos, João Lourenço Marques & Leonor Teixeira. Fulfillment of last-mile urban logistics for sustainable and inclusive smart cities: a case study conducted in Portugal, *International Journal of Logistics Research and Applications*, 2022. pp. 931-958. DOI: 10.1080/13675567.2022.2130211.
- 5 Internet resource: Edoardo Marcucci, Valerio Gatta, Giacomo Lozzi. City Logistics land-scape in the era of on-demand economy. Main challenges, trends and factors influencing city logistics. D1.1 - City Logistics landscape in the era of on-demand economy. URL: [https://www.leadproject.eu/wp-content/uploads/2021/02/LEAD\\_D1.1\\_City-Logistics-landscape-in-the-era-of-on-demand-economy-1.pdf](https://www.leadproject.eu/wp-content/uploads/2021/02/LEAD_D1.1_City-Logistics-landscape-in-the-era-of-on-demand-economy-1.pdf) (accessed 02/14/2023).
- 6 Cieśla, M. Perceived Importance and Quality Attributes of Automated Parcel Locker Services in Urban Areas. *Smart Cities* 2023, 6, 2661-2679. <https://doi.org/10.3390/smartcities6050120>.
- 7 Pomykacz, J.; Gibas, J.; Baranowski, J. Bayesian Modeling of Travel Times on the Example of Food Delivery: Part 2 – Model Creation and Handling Uncertainty. *Electronics* 2024, 13, 3418-3439. <https://doi.org/10.3390/electronics13173418>,
- 8 Wang, L.; Tang, Y.-M.; Chau, K.-Y.; Zheng, X. Empirical Research on Cold-Chain Logistics Service Quality in Fresh Product E-Commerce. *J. Theor. Appl. Electron. Commer. Res.* 2024, 19, pp. 2543-2556. <https://doi.org/10.3390/jtaer19030122>.
- 9 Vrhovac, V.; Vasić, S.; Milisavljević, S.; Dudić, B.; Starchoň, P.; Žižakov, M. Measuring E-Commerce User Experience in the Last-Mile Delivery. *Mathematics* 2023, 11, 1482. pp. 1482-1502. <https://doi.org/10.3390/math11061482>.
- 10 Vrhovac, V.; Dakić, D.; Milisavljević, S.; Celić, Đ.; Stefanović, D.; Janković, M. The Factors of Influencing User Satisfaction in Last-Mile Delivery: The Structural Equation Modeling Approach. *Mathematics* 2024, 12, pp. 1857-1885. <https://doi.org/10.3390/math12121857>.
- 11 Wu, M.; Pei, Z. Multi-Location Assortment Optimization with Drone and Human Courier Joint Delivery. *Appl. Sci.* 2023, 13, pp. 5441-5457. <https://doi.org/10.3390/app13095441>.
- 12 Zhang, Z.; Xiao, C.-Y.; Zhang, Z.-G. Analysis and Empirical Study of Factors of Influencing Urban Residents' Acceptance of Routine Drone Deliveries. *Sustainability* 2023, 15, pp. 13335-13361. <https://doi.org/10.3390/su151813335>.
- 13 Paun, C.; Ivascu, C.; Olteteanu, A.; Dantis, D. The Main Drivers of E-Commerce Adoption: A Global Panel Data Analysis. *J. Theor. Appl. Electron. Commer. Res.* 2024, 19, pp. 2198-2217. <https://doi.org/10.3390/jtaer190301070>.
- 14 Moreno, R.P.R.; Lopes, R.B.; Ferreira, J.V.; Ramos, A. L.; Correia, D. A Study of the Main Mathematical Models Used in Mobility, Storage, Pickup and Delivery in Urban Logistics: A Systematic Review. *Systems* 2024, 12, pp. 374-400. <https://doi.org/10.3390/systems12090374>.
- 15 Suppini, C.; Lysova, N.; Bocelli, M.; Solari, F.; Tebaldi, L.; Volpi, A.; Montanari, R. From Single Orders to Batches: A Sensitivity Analysis of Warehouse Picking Efficiency. *Sustainability* 2024, 16, pp. 8231-8248. <https://doi.org/10.3390/su16188231>.
- 16 Mutambik, I. The Emerging Phenomenon of Shopstreaming: Gaining a More Nuanced Understanding of the Factors Which Drive It. *J. Theor. Appl. Electron. Commer. Res.* 2024, 19, pp. 2522-2542. <https://doi.org/10.3390/jtaer19030121>.
- 17 Padhy, N.; Suman, S.; Priyadarshini, T.S.; Mallick, S. A Recommendation System for E-Commerce Products Using Collaborative Filtering Approaches. *Eng. Proc.* 2024, 67, pp. 50-60. <https://doi.org/10.3390/engproc2024067050>.
- 18 Onuma, Y.; Sakai, T.; Hyodo, T. Does Proximity to MRT Stations Affect Online Shopping Use? An Analysis Using Data from Japan and New York. *Urban Sci.* 2024, 8, pp. 154-173. <https://doi.org/10.3390/urbansci8040154>.
- 19 Yu, J.; Ren, Y.; Zhou, C. Strategic Interactions in Omnichannel Retailing: Analyzing Brand Competition and Optimal Strategy Selection. *J. Theor. Appl. Electron. Commer. Res.* 2024, 19, pp.2557-2581. <https://doi.org/10.3390/jtaer19040123>.
- 20 Internet resource: The main trends in the development of e-commerce in Russia and the world in 2023: TOP-15 trends. URL: <https://vc.ru/trade/620609-osnovnye-tendencii-razvitiya-elektronnoy-kommercii-v-rossii-i-mire-v-2023-godu-top-15-trendov>. (date of access 02/14/2023).
- 21 Internet resource: The e-commerce market in Russia: trends and new solutions. URL: <https://plus.rbc.ru/partners/5fd0cfff7a8aa90fc83656b1>. (date accessed 14.02.2023).
- 22 Goncharuk, I. V. Review of research on the impact of the covid-19 pandemic on the development of global and Russian e-commerce. *Russian Customs Policy in the Far East.* 2021. - No. 1. - (94). P. 66-82

23 Rebyazina V. A., Sharko E. R., Berezka S. M., Starkov A. G. Development of e-commerce in Russia: the impact of the COVID-19 pandemic. HSE University, 2021. P. 28-36.

24 Internet resource: Maltseva A. Sofa revolution: how self-isolation brought delivery services to super speed. URL: <https://www.vedomosti.ru/partner/articles/2020/06/17/832457-divannaya-revolyutsiya>. (date of access 02/14/2023).

25 Paul D.A., Bedilo D.S., Lyadova A.A., Lyamina O.S. Research of the PL-providers market of Russia and the Chelyabinsk region, modern economy and society through the eyes of young researchers, collection of articles by participants of the International scientific and practical conference of the V Ural Vernissage of Science and Business: in 3 volumes. Volume 3. – 2018. – P. 20-24.

© Макарова И. В., Бойко А. Д., Мавляутдинова Г. Р., 2024

DOI: 10.34220/2311-8873-2024-79-93



УДК 656.13.078.14

UDC 656.13.078.14

2.9.5 – эксплуатация автомобильного транспорта

**РАЗРАБОТКА МОДЕЛИ  
МУЛЬТИМОДАЛЬНОЙ  
ТРАНСПОРТНОЙ СЕТИ ГОРОДСКОГО  
ПАССАЖИРСКОГО ТРАНСПОРТА  
ГОРОДОВ-МИЛЛИОННИКОВ  
НА ПРИМЕРЕ Г. ВОЛГОГРАДА**

**DEVELOPMENT OF A MODEL OF A  
MULTIMODAL TRANSPORT NETWORK  
OF URBAN PASSENGER TRANSPORT  
IN CITIES WITH MILLIONS  
OF INHABITANTS ON THE EXAMPLE  
OF VOLGOGRAD**

✉<sup>1</sup> Куликов Алексей Викторович,  
к.т.н., доцент кафедры «Автомобильные пере-  
возки», Волгоградский государственный тех-  
нический университет, г. Волгоград,  
e-mail: [y2xoda@ya.ru](mailto:y2xoda@ya.ru)

✉<sup>1</sup> Kulikov Alexey Viktorovich,  
candidate of technical sciences, associate professor of  
the department Automobile transportation,  
Volgograd state technical university, Volgograd,  
e-mail: [y2xoda@ya.ru](mailto:y2xoda@ya.ru)

Миротин Леонид Борисович,  
д.т.н., профессор кафедры «Менеджмент»,  
Московский автомобильно-дорожный госу-  
дарственный технический университет,  
г. Москва, e-mail: [mirotin2004@mail.ru](mailto:mirotin2004@mail.ru)

Mirotin Leonid Borisovich,  
doctor of technical sciences professor of the depart-  
ment of Management, Moscow state automobile and  
road technical university, Moscow,  
e-mail: [mirotin2004@mail.ru](mailto:mirotin2004@mail.ru)

Вальковская Анна Аловсатовна,  
магистр кафедры «Транспортная телематика»  
Московский автомобильно-дорожный госу-  
дарственный технический университет, г. Москва,  
e-mail: [anna.valkovskay2000@yandex.ru](mailto:anna.valkovskay2000@yandex.ru)

Valkovskaya Anna Alovsatovna,  
master of the department Transport Telematics  
Moscow state automobile and road technical university,  
Moscow, e-mail: [anna.valkovskay2000@yandex.ru](mailto:anna.valkovskay2000@yandex.ru)

Куликов Андрей Алексеевич,  
студент, Волгоградский государственный тех-  
нический университет, г. Волгоград,  
e-mail: [UncherYT@yandex.ru](mailto:UncherYT@yandex.ru)

Kulikov Andrey Alekseevich,  
student, Volgograd State Technical University, Vol-  
gograd, e-mail: [UncherYT@yandex.ru](mailto:UncherYT@yandex.ru)

**Аннотация.** В статье представлены этапы формирования модели мультимодальной транспортной сети городского пассажирского транспорта города-миллионника. Предложен метод определения местоположения оптимального мультимодального транспортно-пересадочного узла на улично-дорожной сети города. Проведен анализ изменения численности населения г. Волгограда, по административным районам города определено расположение предлагаемых мультимодальных транспортно-пересадочных узлов. Построена мультимодальная модель, представляющая собой плоский граф

**Annotation.** The article presents the stages of forming a model of a multimodal transport network of an urban passenger transport port of a million-plus city. A method for determining the location of an optimal multimodal transport interchange hub on the city's road network is proposed. The analysis of the change in the population of Volgograd was carried out, the location of the proposed multimodal transport hubs was determined by the administrative districts of the city. A multimodal model is constructed, which is a flat graph with vertices in multimodal transport hubs and transport links, characterized by distances along the city's street and road network.

с вершинами в мультимодальных транспортно-пересадочных узлах и транспортными связями, характеризуемые расстояниями по улично-дорожной сети города.

**Ключевые слова:** ТРАНСПОРТНАЯ СЕТЬ, МУЛЬТИМОДАЛЬНЫЕ ПАССАЖИРСКИЕ ПЕРЕВОЗКИ, МОДЕЛЬ, ГОРОДА-МИЛЛИОННИКИ, ТРАНСПОРТНО-ПЕРЕСАДОЧНЫЕ УЗЛЫ, ГОРОДСКОЙ ПАССАЖИРСКИЙ ТРАНСПОРТ.

**Keywords:** TRANSPORT NETWORK, MULTIMODAL PASSENGER TRANSPORTATION, MODEL, MILLION-DOLLAR CITIES, TRANSPORT HUBS, URBAN PASSENGER TRANSPORT.

<sup>1</sup> Автор для ведения переписки

### 1 Состояние вопроса исследования и актуальность работы

В настоящее время маршрутная система городского пассажирского транспорта (ГПТ) требует пересмотра, изменения и трансформации. Это связано с поиском путей повышения привлекательности использования различных видов ГПТ населением крупных городов. Для экономии временных затрат целесообразно использовать скоростные виды ГПТ в ежедневных передвижениях населения. Но прямая доступность скоростного ГПТ обеспечена не для всех жителей города, для этого необходимо использовать различные виды подвозящего транспорта (городской автомобильный, личный автомобиль, СИМ и др.) к остановочному пункту скоростного. Для снижения временных и финансовых затрат при перемещениях пассажиров ГПТ необходимо обеспечить оптимальное взаимодействие различных видов транспорта в транспортной системе города и его агломерации. Создание мультимодальной транспортной сети ГПТ обеспечит комфортное и качественное передвижение пассажиров как внутри города, так и в границах его агломерации. Оптимальная мультимодальная транспортная сеть ГПТ должна учитывать особенность планировочной структуры крупного города, численность постоянно проживающих жителей и приезжающих туристов, уровень развития транспортной системы города, природно-климатические особенности, влияющие на сезонные колебания пассажиропотоков и экономический потенциал региона.

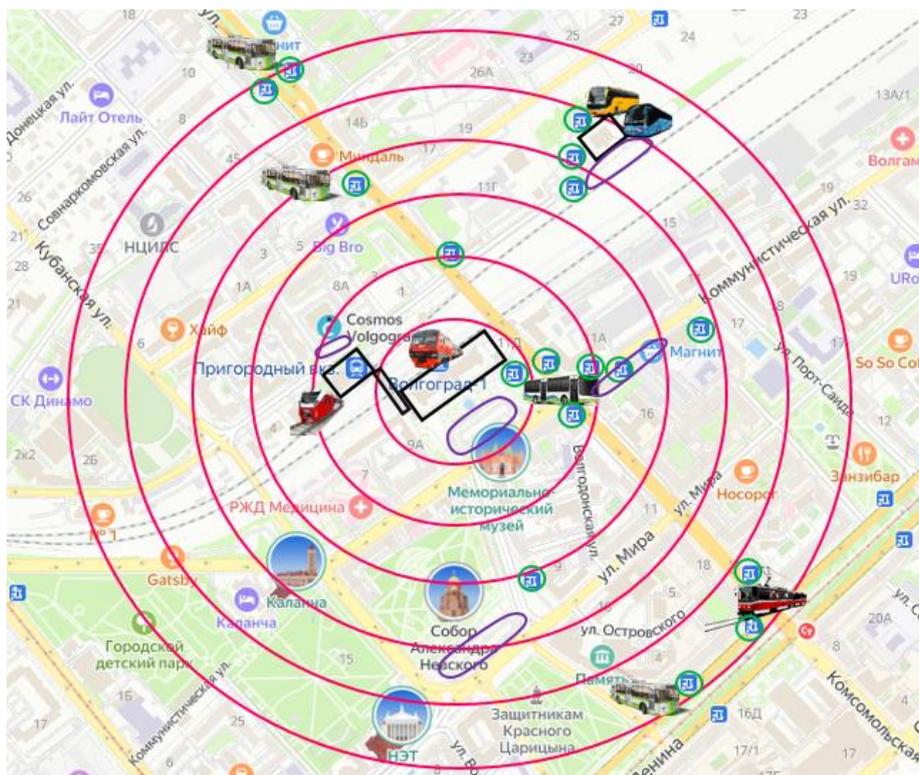
Целью работы является разработка современной топологической схемы города основанной на мультимодальности, обеспечивающей привлекательность использования ГПТ населением города-миллионника.

По литературным источникам [1-3] отмечается, что основными этапами транспортного проектирования городов являются технико-экономические основы, генеральный план и комплексная транспортная схема. Исходными материалами для транспортного проектирования служат данные различных исследований городского движения. Совершенствование маршрутной системы городов-миллионников сложный и трудоемкий процесс, он невозможен без применения экономико-математических методов, внедрения телематических систем и цифровой инфраструктуры [4-6]. При создании оптимальной мультимодальной модели маршрутной системы пассажирских перевозок необходимы сведения о пассажирообороте остановочных пунктах, объеме перевозок пассажиров по маршрутам и видам транспорта. Одной из главных характеристик маршрутной системы являются затраты времени пассажиров: суммарные или средние на одну сетевую поездку (от пункта отправления до пункта назначения). На снижение этих затрат и направлена оптимизация мультимодальной маршрутной сети, которую можно представить моделью, состоящей из трех частей: топологической схемы, перечня маршрутов и матрицы пассажиропотоков.

## 2 Материалы и методы

Транспортно-пересадочные узлы (ТПУ) [7] являются основным звеном в мультимодальной транспортной системе города и выполняют важную функцию в транспортной системе, обеспечивая смену видов транспорта и координируя передвижение людей. Организация мультимодальных пассажирских перевозок позволит сформировать эффективную систему транспортного обслуживания населения, сочетать различные виды транспорта с целью использования преимуществ каждого вида и оптимизировать временные и финансовые затраты, а также выполнить ряд других первоочередных задач [8-11, 12-13].

В ранее разработанных методах исследования транспортного удаления от остановочных пунктов и мест тяготения, профессоров: Гудкова, Миротина, Вельможина [1, 3] не учитывали все возможности телематических систем, в связи с чем методы были доработаны для определения оптимального местоположения ТПУ. Предлагаем ТПУ представлять в виде круговых секторов с меняющимся радиусом от 100 до 600 м. Центром узла является остановочный пункт главного транспорта (чаще всего это скоростной транспорт или транспорт с большими провозными возможностями). Используя графоаналитический метод можно определить количество остановочных пунктов, попадающих в зону комфортной шаговой доступности для пассажира – 600 м от крупного ТПУ, и составить его полную характеристику [14, 15]. На рис. 1 представлен пример формирования мультимодального ТПУ в Центральном районе г. Волгограда – «Железнодорожный вокзал «Волгоград-1» с обозначением пригородного вокзала, парковок и остановочных пунктов различных видов транспорта [15].



– транспортные терминалы; 
  – автомобильные парковки; 
  – остановочные пункты различных видов транспорта.

Рисунок 1 – ТПУ «Железнодорожный вокзал «Волгоград-1»»

В табл. 1 представлены все виды взаимодействующего транспорта и перехватывающие парковки в ТПУ «Железнодорожный вокзал «Волгоград-1»».

Таблица 1 – Остановочные пункты ГПТ и перехватывающие парковки в ТПУ «Железнодорожный вокзал «Волгоград-1»»

| Вид транспорта   | Радиус действия, м |         |         |         |         |         |
|------------------|--------------------|---------|---------|---------|---------|---------|
|                  | 0-100              | 100-200 | 200-300 | 300-400 | 400-500 | 500-600 |
| Автобус          | -                  | 3       | -       | 2       | 2       | 5       |
| Маршрутное такси | 1                  | 4       | 2       | 4       | 1       | 4       |
| Троллейбус       | -                  | -       | -       | 1       | -       | 4       |
| Трамвай          | -                  | -       | -       | -       | -       | -       |
| Метротрам        | -                  | -       | -       | -       | -       | 1       |
| Электропоезд     | 1                  | -       | -       | -       | -       | -       |
| Парковка         | 1                  | 1       | -       | 1       | -       | -       |

Центром ТПУ является железнодорожный вокзал «Волгоград-1» – крупный транспортный узел пригородного и междугороднего сообщения. Узел оснащен большим количеством остановочных пунктов ГПТ, перехватывающими парковками, находится вблизи парковых зон и учебного заведения и является примером формирования других значимых ТПУ крупного города.

Количество и расположение ТПУ в городе связано с количеством населения, проживающего в районах, зависит от значимости административного района (промышленной, культурной, развлекательной и др.) и от транспортной подвижности населения, а также от выходных линий транспорта в агломерацию. На рис. 2 приведена схема распределения численности населения по административным районам г. Волгограда за 2024 г.

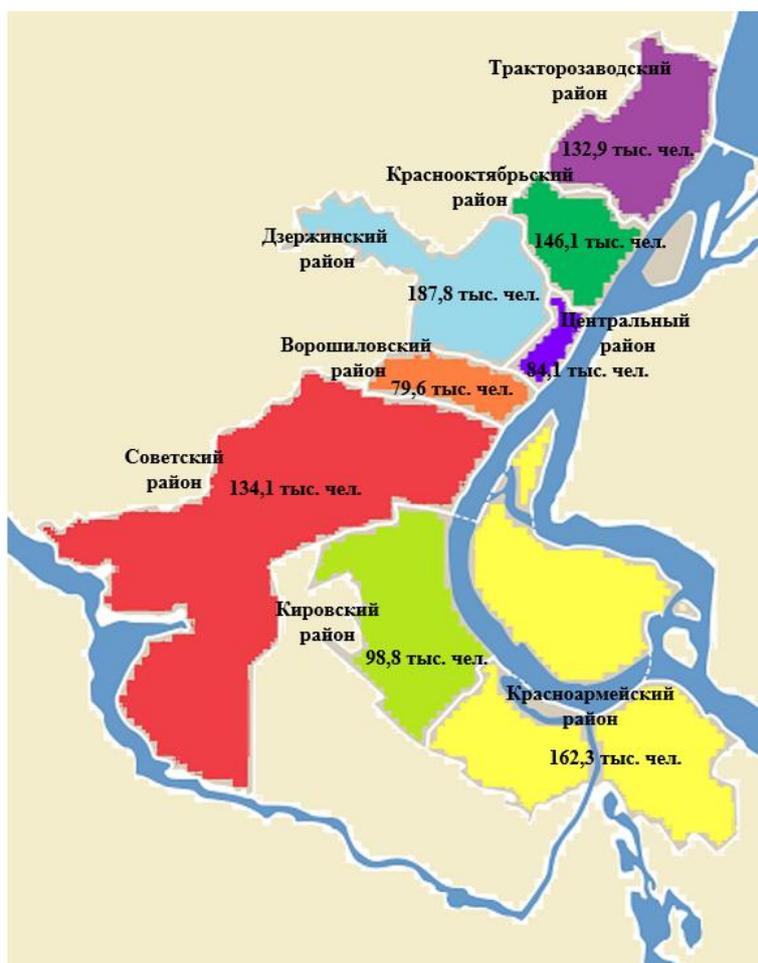


Рисунок 2 – Схема распределения численности населения по административным районам г. Волгограда (данные 2024 г.)

В 2010 г. по итогам переписи населения г. Волгограда был присвоен статус города-миллионника [16]. По данным рис. 2 можно сделать вывод, г. Волгоград разделен на 8 административных районов с неравной численностью населения. По численности населения самым большим является Дзержинский район (187,8 тыс. чел.), а самым малым – Центральный район (84,1 тыс. чел.), но дневное пребывание населения в Центральном районе может превышать его численность в три, а то и в шесть раз (и более) в зависимости от будних (рабочих) дней и праздничных (день Города, праздник Победы, футбол и др.) По площади самым крупным является Красноармейский район (133 км<sup>2</sup>), а самым малым – Центральный район (11 км<sup>2</sup>). Размещение ТПУ в центральной части города требует особого внимания [17] – формирования компактных, функциональных и экологично вписывающихся в архитектуру умного города кибирфизических элементов единой умной транспортной системы пассажирских перевозок.

По административным районам г. Волгограда необходимо выделить основные ТПУ, в которых осуществляется взаимодействие различных видов ГПТ.

На рис. 3 представлено размещение предлагаемых ТПУ Центрального района г. Волгограда.

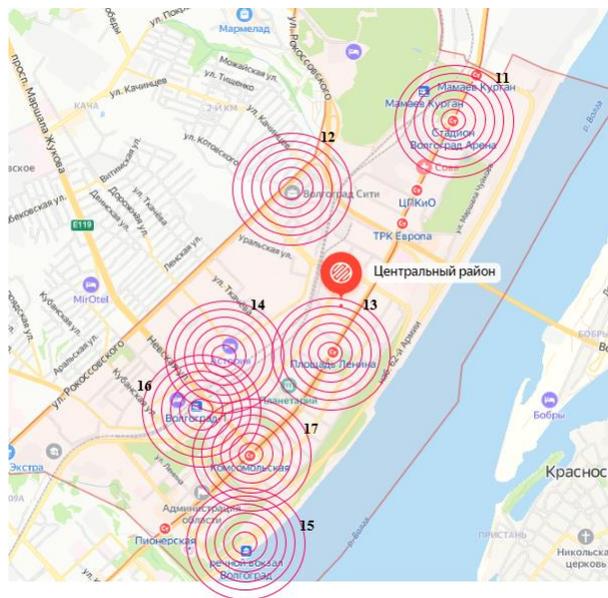


Рисунок 3 – Размещение предлагаемых ТПУ Центрального района

В табл. 2 представлены ТПУ Центрального района г. Волгограда и наличие в них взаимодействующих видов транспорта и перехватывающих парковок.

Таблица 2 – ТПУ Центрального района г. Волгограда

| Название района города | Основные ТПУ  | Взаимодействующие виды транспорта |   |                |                |    |    |    |   |
|------------------------|---|-----------------------------------|---|----------------|----------------|----|----|----|---|
|                        |   | М <sub>т</sub>                    | А | Т <sub>1</sub> | Т <sub>2</sub> | МТ | ЭП | ВТ | П |
| Центральный            | 11. Центральный стадион «Волгоград-Арена»                         | +                                 | + | +              | -              | +  | +  | -  | + |
|                        | 12. Волгоград-Сити (пересечение ул. Хиросимы и ул. Рокоссовского) | +                                 | + | -              | -              | -  | +  | -  | + |
|                        | 13. Площадь им. В.И. Ленина                                       | +                                 | + | +              | -              | +  | -  | -  | + |
|                        | 14. Центральный автовокзал г. Волгограда                          | +                                 | + | +              | -              | -  | +  | -  | + |
|                        | 15. Речпорт г. Волгограда   | +                                 | + | -              | -              | -  | -  | +  | + |
|                        | 16. ЖД вокзал «Волгоград-1»                                       | +                                 | + | +              | -              | +  | +  | -  | + |
|                        | 17. Ул. Комсомольская   | +                                 | + | +              | -              | +  | -  | -  | + |

\*Обозначение: М<sub>т</sub> – маршрутное такси; А – автобус; Т<sub>1</sub> – троллейбус; Т<sub>2</sub> – трамвай; МТ – метротрам; ЭП – электропоезд; ВТ – водный транспорт; П – перехватывающая парковка.

Проанализировав данные табл. 3 можно сделать вывод, что в каждом ТПУ присутствуют различные виды транспорта либо перехватывающая парковка (которая обеспечивает возможность использования личного транспорта), в результате можно считать, что ТПУ является мультимодальным.

### 3 Результаты исследований

По предложенному методу определения оптимального местоположения мультимодального ТПУ в г. Волгограде выделено 29 ТПУ, в которых происходит взаимодействие различных видов ГПТ. Построена модель мультимодальной транспортной сети ГПТ, представляющая собой плоский граф: вершины – предложенные мультимодальные ТПУ, а ребра – участки улично-дорожной сети автомобильного транспорта (рис. 4). Такая модель позволяет получить важные характеристики маршрутной системы. Алгоритм расчета оптимизации маршрутной системы заключается в поиске вариантов, обеспечивающих минимизацию суммарных затрат времени пассажиров на поездки на базе матрицы пассажиропотоков и транспортной сети, заданной топологической схемой связи ТПУ с использованием цифровой концепция интеллектуальной транспортной системы пассажирского транспорта мегаполиса и его агломерации  $K(1; 0)$  [18].

Определение кратчайших расстояний между пассажирообразующими и пассажиропоглощающими пунктами производится с помощью математической модели и разработанной программы для ЭВМ [19-22].

Отыскание кратчайшего расстояния относится к классу экстремальных задач. В терминах сетевой модели каждому маршруту  $(i, j) \in G$  сети соответствует несколько вариантов его выполнения. Математическая постановка задач имеет вид:

$$\begin{aligned} & \text{минимизировать} && \sum_{(i,j) \in G} \sum l_{ij} x_{ij} \\ & \text{при ограничениях} && \sum_{(k,j) \in G} x_{kj} - \sum_{(i,k) \in G} x_{ik} = \begin{cases} 1, k = A \text{ (пункт производства);} \\ 0 \text{ (для всех остальных);} \\ -1, k = B \text{ (пункт потребления).} \end{cases} \end{aligned}$$

$$x_{ij} \geq 0 \text{ для всех } (i, j) \in G,$$

где  $l_{ij}$  – расстояние между  $i$  и  $j$  вершинами транспортной сети, км;  $x_{ij}$  – объем перевозок пассажиров между  $i$  и  $j$  вершинами транспортной сети, пасс.

Результаты расчетов кратчайших расстояний между пассажирообразующими и пассажиропоглощающими пунктами модели мультимодальной сети ГПТ г. Волгограда представлены в табл. 3.

Разработана модель мультимодальной транспортной сети г. Волгограда, позволит формировать маршруты различных видов транспорта либо исследовать характеристики существующих, а также проводить моделирование с прогнозом изменения возможного состояния ГПТ в будущем.



Рисунок 4 – Разработанная модель мультимодальной транспортной сети г. Волгограда

Таблица 3 – Кратчайшие расстояния между пассажирообразующими и пассажиропоглощающими пунктами модели мультимодальной сети ГПТ г. Волгограда, км

|   |    | Пассажиропоглощающие пункты (номер мультимодального ТПУ) |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |
|---|----|--|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|
|   |    | 1  | 2    | 3    | 4    | 5    | 6    | 7    | 8    | 9    | 10   | 11   | 12   | 13   | 14   | 15   | 16   | 17   | 18   | 19   | 20   | 21   | 22   | 23   | 24   | 25   | 26   | 27   | 28   | 29   |
| Пассажирообразующие пункты (номер мультимодального ТПУ) | 1  | 0  | 9,2  | 10,5 | 11,5 | 15,2 | 17,3 | 33,4 | 14,6 | 12,2 | 18,2 | 21,7 | 25,4 | 24   | 24,6 | 24,7 | 21,8 | 22,9 | 24,5 | 27,4 | 36,6 | 32,5 | 27,9 | 39,8 | 35,4 | 37   | 38,4 | 55,1 | 56,5 | 57,7 |
|   | 2  | 9,2  | 0    | 4,1  | 3,1  | 6,8  | 8,2  | 24,2 | 5,4  | 3    | 9    | 12,6 | 16,2 | 14,8 | 15,4 | 15,5 | 12,6 | 13,7 | 15,3 | 18,2 | 27,4 | 23,3 | 18,7 | 30,6 | 26,2 | 27,8 | 29,2 | 45,9 | 47,3 | 48,5 |
|   | 3  | 10,5   | 4,1  | 0    | 1    | 4,7  | 6,8  | 28,3 | 11,2 | 7,1  | 13,1 | 11,2 | 15,5 | 15,5 | 18,2 | 18,4 | 16,7 | 16,6 | 18,5 | 21,9 | 31,5 | 26,5 | 21,9 | 33,8 | 29,4 | 31   | 32,4 | 49,1 | 50,5 | 51,7 |
|   | 4  | 11,5   | 3,1  | 1    | 0    | 3,7  | 5,8  | 27,3 | 8,5  | 6,1  | 12,1 | 10,2 | 14,5 | 14,5 | 17,2 | 17,4 | 15,7 | 15,6 | 17,5 | 20,9 | 30,5 | 25,5 | 20,9 | 32,8 | 28,4 | 30   | 31,4 | 48,1 | 49,5 | 50,7 |
|   | 5  | 15,2   | 6,8  | 4,7  | 3,7  | 0    | 2,1  | 28,5 | 9,7  | 7,3  | 13,3 | 6,5  | 10,8 | 10,8 | 13,5 | 13,7 | 13   | 11,9 | 13,8 | 17,2 | 26,8 | 21,8 | 17,2 | 29,1 | 24,7 | 26,3 | 27,7 | 44,4 | 42,8 | 47   |
|   | 6  | 17,3   | 8,2  | 6,8  | 5,8  | 2,1  | 0    | 26,4 | 7,6  | 5,2  | 11,2 | 4,4  | 8,7  | 8,7  | 11,4 | 11,6 | 10,9 | 9,8  | 11,7 | 15,1 | 24,7 | 19,7 | 15,1 | 27   | 22,6 | 24,2 | 25,6 | 42,3 | 43,7 | 44,9 |
|   | 7  | 33,4   | 24,2 | 28,3 | 27,3 | 28,5 | 26,4 | 0    | 18,8 | 21,2 | 15,2 | 25,1 | 22,2 | 20,8 | 21,4 | 21,5 | 18,6 | 19,7 | 21,3 | 24,4 | 33,4 | 23,3 | 24,7 | 32,4 | 28   | 29,6 | 31   | 47,7 | 49,1 | 50,3 |
|   | 8  | 14,6   | 5,4  | 11,2 | 8,5  | 9,7  | 7,6  | 18,8 | 0    | 2,4  | 3,6  | 9    | 10,8 | 9,4  | 10   | 10,1 | 7,2  | 8,3  | 9,9  | 12,8 | 22   | 17,9 | 13,3 | 25,2 | 20,8 | 22,4 | 23,8 | 40,5 | 41,9 | 43,1 |
|   | 9  | 12,2   | 3    | 7,1  | 6,1  | 7,3  | 5,2  | 21,2 | 2,4  | 0    | 6    | 9,6  | 3    | 11,8 | 12,6 | 12,5 | 9,6  | 10,7 | 12,3 | 15,2 | 24,4 | 20,3 | 15,7 | 27,6 | 23,2 | 24,8 | 26,2 | 42,9 | 44,3 | 45,5 |
|   | 10 | 18,2   | 9    | 13,1 | 12,1 | 13,3 | 11,2 | 15,2 | 3,6  | 6    | 0    | 10,1 | 7,2  | 5,8  | 6,4  | 6,5  | 6    | 4,7  | 6,3  | 9,2  | 18,4 | 14,3 | 9,7  | 21,6 | 17,2 | 18,8 | 20,2 | 36,9 | 38,3 | 39,5 |
|   | 11 | 21,7   | 12,6 | 11,2 | 10,2 | 6,5  | 4,4  | 25,1 | 9    | 9,6  | 10,1 | 0    | 4,3  | 4,3  | 7    | 7,2  | 6,5  | 5,4  | 7,3  | 10,7 | 20,3 | 15,3 | 10,7 | 22,6 | 18,2 | 19,8 | 21,2 | 37,9 | 39,3 | 40,5 |
|   | 12 | 25,4   | 16,2 | 15,5 | 14,5 | 10,8 | 8,7  | 22,2 | 10,8 | 3    | 7,2  | 4,3  | 0    | 5,8  | 3,6  | 6,5  | 3,6  | 4,7  | 6,3  | 9,7  | 18,4 | 14,3 | 9,7  | 21,6 | 17,2 | 18,8 | 20,2 | 36,9 | 38,3 | 39,5 |
|   | 13 | 24   | 14,8 | 15,5 | 14,5 | 10,8 | 8,7  | 20,8 | 9,4  | 11,8 | 5,8  | 4,3  | 5,8  | 0    | 2,7  | 3,9  | 2,2  | 1,1  | 3    | 6,4  | 16   | 11   | 6,4  | 18,3 | 13,9 | 15,5 | 16,9 | 33,6 | 35   | 36,2 |
|   | 14 | 24,6   | 15,4 | 18,2 | 17,2 | 13,5 | 11,4 | 21,4 | 10   | 12,4 | 6,4  | 7    | 3,6  | 2,7  | 0    | 3,5  | 2,8  | 1,7  | 3,6  | 7    | 16,6 | 11,6 | 7    | 18,9 | 14,5 | 16,1 | 17,5 | 34,2 | 35,6 | 36,8 |
|   | 15 | 24,7   | 15,5 | 18,4 | 17,4 | 13,7 | 11,6 | 21,5 | 10,1 | 12,5 | 6,5  | 7,2  | 6,5  | 3,9  | 3,5  | 0    | 2,9  | 1,8  | 3,7  | 7,1  | 16,7 | 11,7 | 7,1  | 19   | 14,6 | 16,2 | 17,6 | 32,3 | 35,7 | 36,9 |
|   | 16 | 21,8   | 12,6 | 16,7 | 15,7 | 13   | 10,9 | 18,6 | 7,2  | 9,6  | 6    | 6,5  | 3,6  | 2,2  | 2,8  | 2,9  | 0    | 1,1  | 2,7  | 6,1  | 14,8 | 10,7 | 6,1  | 18   | 13,6 | 15,2 | 16,6 | 33,3 | 34,7 | 35,9 |
|   | 17 | 22,9   | 13,7 | 16,6 | 15,6 | 11,9 | 9,8  | 19,7 | 8,3  | 10,7 | 4,7  | 5,4  | 4,7  | 1,1  | 1,7  | 1,8  | 1,1  | 0    | 1,9  | 5,3  | 14,9 | 9,9  | 5,3  | 17,2 | 12,8 | 14,4 | 15,8 | 32,5 | 33,9 | 35,1 |
|   | 18 | 24,5   | 15,3 | 18,5 | 17,5 | 13,8 | 11,7 | 21,3 | 9,9  | 12,3 | 6,3  | 7,3  | 6,3  | 3    | 3,6  | 3,7  | 2,7  | 1,9  | 0    | 3,4  | 13   | 8    | 3,4  | 15,3 | 10,9 | 12,5 | 13,9 | 30,6 | 32   | 33,2 |
|   | 19 | 27,4   | 18,2 | 21,9 | 20,9 | 17,2 | 15,1 | 24,4 | 12,8 | 15,2 | 9,2  | 10,7 | 9,7  | 6,4  | 7    | 7,1  | 6,1  | 5,3  | 3,4  | 0    | 11,6 | 5,7  | 6,8  | 14,8 | 10,4 | 12   | 13,4 | 30,1 | 31,5 | 32,7 |
|   | 20 | 36,6   | 27,4 | 31,5 | 30,5 | 26,8 | 24,7 | 33,4 | 22   | 24,4 | 18,4 | 20,3 | 18,4 | 16   | 16,6 | 16,7 | 14,8 | 14,9 | 13   | 11,6 | 0    | 17,3 | 16,4 | 26,4 | 22   | 23,6 | 25   | 41,7 | 43,1 | 44,3 |
|   | 21 | 32,5   | 23,3 | 26,5 | 25,5 | 21,8 | 19,7 | 23,3 | 17,9 | 20,3 | 14,3 | 15,3 | 14,3 | 11   | 11,6 | 11,7 | 10,7 | 9,9  | 8    | 5,7  | 17,3 | 0    | 4,6  | 9,1  | 4,7  | 6,3  | 7,7  | 24,4 | 25,8 | 27   |
|   | 22 | 27,9   | 18,7 | 21,9 | 20,9 | 17,2 | 15,1 | 24,7 | 13,3 | 15,7 | 9,7  | 10,7 | 9,7  | 6,4  | 7    | 7,1  | 6,1  | 5,3  | 3,4  | 6,8  | 16,4 | 4,6  | 0    | 11,9 | 7,5  | 9,1  | 10,5 | 27,2 | 28,6 | 29,8 |
|   | 23 | 39,8   | 30,6 | 33,8 | 32,8 | 29,1 | 27   | 32,4 | 25,2 | 27,6 | 21,6 | 22,6 | 21,6 | 18,3 | 18,9 | 19   | 18   | 17,2 | 15,3 | 14,8 | 26,4 | 9,1  | 11,9 | 0    | 4,4  | 6    | 7,4  | 24,1 | 25,5 | 26,7 |
|   | 24 | 35,4   | 26,2 | 29,4 | 28,4 | 24,7 | 22,6 | 28   | 20,8 | 23,2 | 17,2 | 18,2 | 17,2 | 13,9 | 14,5 | 14,6 | 13,6 | 12,8 | 10,9 | 10,4 | 22   | 4,7  | 7,5  | 4,4  | 0    | 1,6  | 3    | 19,7 | 21,1 | 22,3 |
|   | 25 | 37   | 27,8 | 31   | 30   | 26,3 | 24,2 | 29,6 | 22,4 | 24,8 | 18,8 | 19,8 | 18,8 | 15,5 | 16,1 | 16,2 | 15,2 | 14,4 | 12,5 | 12   | 23,6 | 6,3  | 9,1  | 6    | 1,6  | 0    | 1,4  | 18,1 | 19,5 | 20,7 |
|   | 26 | 38,4   | 29,2 | 32,4 | 31,4 | 27,7 | 25,6 | 31   | 23,8 | 26,2 | 20,2 | 21,2 | 20,2 | 16,9 | 17,5 | 17,6 | 16,6 | 15,8 | 13,9 | 13,4 | 25   | 7,7  | 10,5 | 7,4  | 3    | 1,4  | 0    | 16,7 | 18,1 | 19,3 |
|   | 27 | 55,1   | 45,9 | 49,1 | 48,1 | 44,4 | 42,3 | 47,7 | 40,5 | 42,9 | 36,9 | 37,9 | 36,9 | 33,6 | 34,2 | 34,3 | 33,3 | 32,5 | 30,6 | 30,1 | 41,7 | 24,4 | 27,2 | 24,1 | 19,7 | 18,1 | 16,7 | 0    | 3,2  | 4    |
|   | 28 | 56,5   | 47,3 | 50,5 | 49,5 | 45,8 | 43,7 | 49,1 | 41,9 | 44,3 | 38,3 | 39,3 | 38,3 | 35   | 35,6 | 35,7 | 34,7 | 33,9 | 32   | 31,5 | 43,1 | 25,8 | 28,6 | 25,5 | 21,1 | 19,5 | 18,1 | 3,2  | 0    | 1,2  |
|   | 29 | 57,7   | 48,5 | 51,7 | 50,7 | 47   | 44,9 | 50,3 | 43,1 | 45,5 | 39,5 | 40,5 | 39,5 | 36,2 | 36,8 | 36,9 | 35,9 | 35,1 | 33,2 | 32,7 | 44,3 | 27   | 29,8 | 26,7 | 22,3 | 20,7 | 19,3 | 4    | 1,2  | 0    |

В табл. 4 представлено количество ТПУ по каждому району города, наличие различных видов остановочных пунктов ГПТ и перехватывающих парковок.

Проанализировав существующие ТПУ можно отметить, что по административным районам города они будут размещены следующим образом: в Тракторозаводском – 4 ед.; Краснооктябрьском – 2 ед.; Дзержинском – 4 ед.; Центральном – 7 ед.; Ворошиловском – 2 ед.; Советском – 5 ед.; Кировском – 2 ед.; Красноармейском – 3 ед.

На рис. 5 представлены результаты анализа распределения остановочных пунктов ГПТ и перехватывающих парковок по предложенным круговым секторам (100-600 м) в 29 разработанных мультимодальных ТПУ.

Таблица 4 – Характеристика ТПУ г. Волгограда

| Название района города | Основные ТПУ  | Количество остановочных пунктов ГПТ и перехватывающих парковок |    |                |                |    |    |    |   |
|------------------------|---|--|----|----------------|----------------|----|----|----|---|
|                        |   | М <sub>т</sub>   | А  | Т <sub>1</sub> | Т <sub>2</sub> | МТ | ЭП | ВТ | П |
| Тракторозаводской      | 1. Пересечение 1-й и 2-й Продольной магистрали                    | 3  | 2  | -              | -              | -  | -  | -  | - |
|                        | 2. Новая Спартановка  | 7  | 8  | 6              | -              | -  | -  | -  | - |
|                        | 3. Рынок ТЗР  | 10   | 13 | 7              | -              | 1  | 1  | -  | 1 |
|                        | 4. ТРЦ «Семь звезд»   | 12   | 19 | 9              | -              | 1  | 1  | -  | 1 |
| Краснооктябрьский      | 5. Завод «Баррикады»  | 4  | 2  | 3              | -              | 2  | 1  | -  | 1 |
|                        | 6. Завод «Красный Октябрь»  | 8  | 7  | 5              | 2              | 1  | 1  | -  | 3 |
| Дзержинский            | 7. Аэропорт «Гумрак»  | 3  | 3  | -              | -              | -  | 1  | -  | 4 |
|                        | 8. Ул. Землячки (Больница скорой помощи № 25)                     | 9  | 8  | 6              | -              | -  | -  | -  | 1 |
|                        | 9. ТРК «Мармелад»   | 8  | 4  | -              | -              | -  | -  | -  | 2 |
|                        | 10. Пересечение 3-й Продольной магистрали и просп. Маршала Жукова | 9  | 10 | 5              | 4              | -  | -  | -  | - |
| Центральный            | 11. Центральный стадион «Волгоград-Арена»                         | 4  | 4  | 4              | -              | 2  | 1  | -  | 3 |
|                        | 12. Волгоград-Сити (пересечение ул. Хиросимы и ул. Рокоссовского) | 7  | 6  | -              | -              | -  | 1  | -  | 2 |
|                        | 13. Площадь им. В.И. Ленина                                       | 3  | 4  | 3              | -              | 1  | -  | -  | 4 |
|                        | 14. Центральный автовокзал г. Волгограда                          | 18   | 11 | 3              | -              | -  | 1  | -  | 2 |
|                        | 15. Речпорт г. Волгограда   | 1  | 2  | -              | -              | -  | -  | 1  | 3 |
|                        | 16. ЖД вокзал «Волгоград-1»                                       | 16   | 12 | 5              | -              | 1  | 1  | -  | 3 |
|                        | 17. Ул. Комсомольская   | 12   | 8  | 6              | -              | 1  | -  | -  | 3 |
| Ворошиловский          | 18. ТЦ «Ворошиловский»  | 7  | 7  | 7              | 2              | 1  | -  | -  | 1 |
|                        | 19. ЖД станция «Волгоград-2»                                      | 8  | 2  | 2              | 6              | 1  | 1  | -  | 1 |
| Советский              | 20. Поселок «Горьковский»   | 2  | 2  | -              | -              | -  | 1  | -  | - |
|                        | 21. Университет «ВолГАУ»  | 8  | 4  | -              | -              | -  | -  | -  | - |
|                        | 22. Мкр. «Тулака»   | 8  | 4  | 6              | -              | 1  | -  | -  | - |
|                        | 23. Мкр. «Родниковая долина»                                      | 14   | 11 | -              | -              | -  | -  | -  | 1 |
|                        | 24. ТРЦ «Акварель» и университет «ВолГУ»                          | 13   | 9  | -              | -              | -  | 1  | -  | 4 |
| Кировский              | 25. ЖК «Санаторный»   | 6  | 8  | -              | -              | -  | -  | -  | 1 |
|                        | 26. Дом культуры «Авангард»                                       | 7  | 7  | -              | -              | -  | -  | -  | - |
| Красноармейский        | 27. Автовокзал «Южный»  | 15   | 6  | -              | -              | -  | -  | -  | - |
|                        | 28. Комплекс «Юбилейный»  | 11   | 12 | -              | 6              | -  | 1  | -  | 1 |
|                        | 29. Клуб «Строитель»  | 15   | 8  | -              | 6              | -  | -  | -  | - |

\*Обозначение: М<sub>т</sub> – маршрутное такси; А – автобус; Т<sub>1</sub> – троллейбус; Т<sub>2</sub> – трамвай; МТ – метротрам; ЭП – электропоезд; ВТ – водный транспорт; П – перехватывающая парковка.

По данным рис. 5 можно сделать вывод, что размещение остановочных пунктов различных видов ГПТ по представленным круговым секторам с плавающим радиусом (100 м) происходит неравномерно [14, 15]. Полученное распределение является основанием для дальнейшего поиска путей совмещения остановочных пунктов различных видов ГПТ и создания эффективных мультимодальных ТПУ. Решение вопроса о перемещениях остановочных пунктов в городских транспортных сетях требует проведения дополнительных исследований.

Представленные мультимодальные ТПУ города обеспечивают взаимодействие различных видов ГПТ. В них пассажир может осуществить «бесшовную» пересадку с одного вида транспорта на другой. Развивающиеся информационные технологии на транспорте в среде умного города позволяют обеспечить режимы совместной работы различного ГПТ – мультимодальность перевозок и своевременно информировать об этом пассажиров [4, 6, 12, 17, 23-26].

Данные табл. 5 представляют собой результаты анализа транспортных систем ГПТ в различные периоды: количество остановочных пунктов и мультимодальных ТПУ г. Волгограда [27-29].

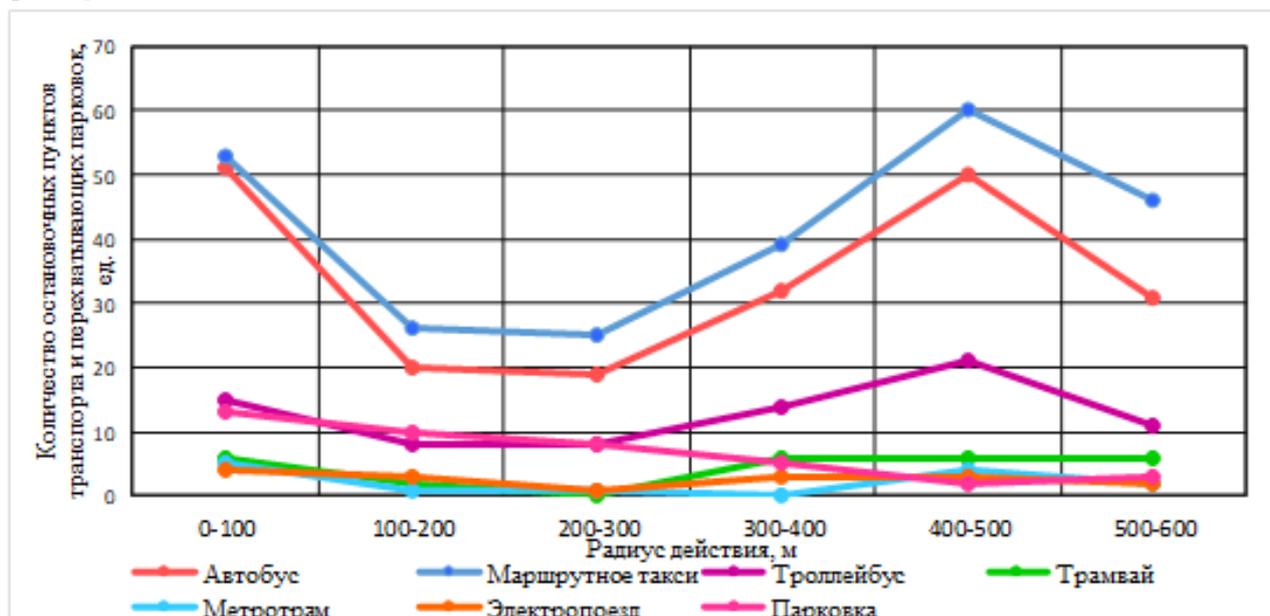


Рисунок 5 – Распределение количества остановочных пунктов ГПТ и перехватывающих парковок в 29 мультимодальных ТПУ г. Волгограда

Таблица 5 – Результаты распределения количества маршрутов по мультимодальным ТПУ г. Волгограда

| Наименование транспортной схемы                | Год  | Количество остановочных пунктов, ед. | Количество мультимодальных ТПУ, ед. | Количество маршрутов в мультимодальных ТПУ, ед. |   |   |   |   |   |   |   |
|--|------|--------------------------------------|-------------------------------------|---|---|---|---|---|---|---|---|
|  |      |                                      |                                     | 1   | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 |
| Маршруты трамвая                               | 2023 | 108                                  | 13                                  | 8   | 3 | - | 1 | 1 | - | - | - |
| Маршруты троллейбуса                           | 2023 | 104                                  | 15                                  | 1   | 1 | 6 | 3 | 4 | - | - | - |
| Маршруты электропоезда                         | 2023 | 43                                   | 13                                  | 1   | - | 4 | 1 | 1 | 1 | - | 5 |
| Ранее действующая сеть троллейбусов и трамваев |      |                                      |                                     |   |   |   |   |   |   |   |   |
| Маршруты троллейбусов и трамваев               | 2010 | 245                                  | 20                                  | 6   | - | 2 | 3 | 2 | 5 | - | 2 |
| Ранее действующая сеть электропоездов          |      |                                      |                                     |   |   |   |   |   |   |   |   |
| Маршруты электропоезда                         | 2010 | 42                                   | 12                                  | -   | - | 4 | 1 | 1 | 1 | - | 5 |

В настоящее время трамвайная и троллейбусная сеть г. Волгограда содержит 212 остановочных пунктов, из них 28 мультимодальных; электропоезд – 43 ед., мультимодальных – 13 ед.; автобусная – 617 ед., мультимодальных – 29 ед. Трансформация рассмотрена на ранее действующей сети троллейбусов и трамваев, сеть содержала 245 остановочных пунктов, из них 20 мультимодальных, а электропоезд – 42 ед., мультимодальных – 12 ед., автобусная сеть содержала – 724 ед., мультимодальных – 29 ед.

Все 29 мультимодальных ТПУ включает в себя комплексная транспортная схема г. Волгограда (рис. 6). Разработанная модель мультимодальной транспортной сети органично вписывается в комплексную транспортную схему г. Волгограда, что является показателем выполнения одного из этапов эффективного транспортного проектирования города-миллионника.



Рисунок 6 – Комплексная транспортная схема г. Волгограда с предлагаемыми мультимодальными ТПУ

#### 4 Обсуждение и заключение

В настоящей статье авторами предлагается метод для определения оптимального местоположения мультимодальных ТПУ в г. Волгограде. Установлено, что количество и расположение ТПУ в городе связано с количеством населения, проживающего в районах, зависит от значимости административного района (промышленной, культурной, развлекательной и др.) и от транспортной подвижности населения, а также от выходных линий транспорта в агломерацию. Предложенные мультимодальные ТПУ являются опорными центрами, через которые можно прокладывать маршруты различных видов ГПТ и организовывать движение подвижного состава по этим маршрутам согласно возникающим неравномерностям пассажиропотоков. Разработана модель мультимодальной транспортной сети г. Волгограда и предложено обоснованное географическое местоположение мультимодальных ТПУ на улично-дорожной сети города-миллионника. В городе предлагается организовать 29 мультимодальных ТПУ: в Тракторозаводском – 4 ед.; Краснооктябрьском – 2 ед.; Дзержинском – 4 ед.; Центральном – 7 ед.; Ворошиловском – 2 ед.; Советском – 5 ед.; Кировском – 2 ед.; Красноармейском – 3 ед. Через разработанные мультимодальные ТПУ возможно перестраивать (трансформировать) транспортные сети каждого вида ГПТ, изменяя характеристики всей транспортной системы ГПТ города-миллионника в целом. Определены кратчайшие расстояния между мультимодальными ТПУ транспортной сети с помощью математической модели и разработанной программы для ЭВМ. В настоящее время трамвайная и троллейбусная сети г. Волгограда включают 212 остановочных пункта, из них 28 мультимодальных; электропоезд – 43 ед. (мультимодальных – 13 ед.); автобусная – 617 ед. (мультимодальных – 29 ед.). Трансформация рассмотрена на ранее действующей сети троллейбусов и трамваев, сеть содержала 245 остановочных пунктов, из них 20 мультимодальных, а электропоезд – 42 ед. (мультимодальных – 12 ед.), автобусная сеть содержала – 724 ед. (мультимодальных – 29 ед.). Разработанная модель мультимодальной транспортной сети г. Волгограда ориентирована на использование всех видов ГПТ (с использованием перехватывающих парковок личного транспорта) с выходом на транс-

порт агломерации. Трансформация и совершенствование транспортной системы ГПТ, внедрение цифровой инфраструктуры и телематических систем позволят обеспечить слаженную работу ГПТ, взаимосвязь участников транспортного процесса, взаимодовлетворение интересов перевозчиков, пассажиров и муниципального управления города и повысят уровень качества жизни городского населения [13, 30].

### Список литературы

- 1 Пассажи́рские автомоби́льные пере́возки: учебник для вузов / В. А. Гудков, Л. Б. Миротин, А. В. Вельможин, С. А. Ширяев. – Москва: Горячая линия – Телеком, 2006. – 488 с.
- 2 Вельможин, А. В. Теория транспортных процессов и систем: учебник. / А. В. Вельможин, В. А. Гудков, Л. Б. Миротин. – Москва: Транспорт, 2012. – 167 с.
- 3 Эффективность городского пассажирского общественного транспорта / А. В. Вельможин, В. А. Гудков, А. В. Куликов, А. А. Сериков; Волгоградский государственный технический университет. – Волгоград: Волгоградский государственный технический университет, 2002. – 256 с.
- 4 Власов, В. М. Применение цифровой инфраструктуры и телематических систем на городском пассажирском транспорте: учебник. / В. М. Власов, Д. Б. Ефименко, В. Н. Богумил. – Москва : ИНФРА-М, 2021. – 352 с.
- 5 Богумил, В. Н. Телематика на городском пассажирском транспорте: монография / В. Н. Богумил, М. Х. Дуке Саранго. – Москва: ИНФРА-М, 2022. – 200 с.
- 6 Власов, В. М. Цифровая инфраструктура как основа функционирования наземного городского пассажирского транспорта / В. М. Власов // Автотранспортное предприятие. – 2016. – № 12. – С. 3–7.
- 7 СП 395.1325800.2018. Транспортно-пересадочные узлы. Правила проектирования: издание официальное / Федер. агенство по тех. регулированию и метрологии. – Москва: Минстрой России, 2018. – 26 с.
- 8 Спи́рин, И. В. Определение затрат времени пассажиров на поездки в городах / И. В. Спи́рин // Мир транспорта. – 2020. – Т. 18, № 3(88). – С. 28-43.
- 9 Спи́рин, И. В. Методология планирования автомобильных пассажирских перевозок / И. В. Спи́рин, В. М. Беляев, В. В. Антонова // Мир транспорта. – 2019. – Т. 17, № 1(80). – С. 20-37.
- 10 Спи́рин, И. В. Расчет цены контракта на перевозки пассажиров по регулируемым тарифам / И. В. Спи́рин, А. К. Аредова, О. Ю. Матанцева // Транспорт: наука, техника, управление. Научный информационный сборник. – 2019. – № 3. – С. 44-50.
- 11 Дрю́чин, Д. А. Оценка эффективности применения троллейбусных транспортных систем для обслуживания регулярных маршрутов городского пассажирского транспорта / Д. А. Дрю́чин, О. И. Кабанов, Н. Н. Якунин // Прогрессивные технологии в транспортных системах : Материалы XVIII международной научно-практической конференции, Оренбург, 15–17 ноября 2023 года. – Оренбург: Оренбургский государственный университет, 2023. – С. 150-157.
- 12 Интеллектуализация процессов в городских транспортных системах / А. Н. Новиков, И. А. Новиков, Н. А. Загородний, А. Г. Шевцова. – Белгород: Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова, Орловский государственный университет им. И.С. Тургенева, 2020. – 419 с.
- 13 Тишкова, А. О. Система показателей качества для пассажирского автотранспортного комплекса города / А. О. Тишкова, Н. Н. Якунин, Н. В. Якунина // Университетский комплекс как региональный центр образования, науки и культуры : сборник материалов Всероссийской научно-методической конференции, Оренбург, 26–27 января 2023 года. – Оренбург: Оренбургский государственный университет, 2023. – С. 3130-3136.
- 14 Яндекс. Карты – транспорт, навигация, поиск мест. – Режим доступа: <https://yandex.ru/maps/>
- 15 Куликов, А. В. Возможность применения телематических систем в узлах взаимодействия пассажирского транспорта города-миллионника на примере г. Волгограда / А. В. Куликов, А. А. Вальковская // XVIII Международная научно-практическая конференция «Прогрессивные технологии в транспортных системах» (г. Оренбург, 15-17 ноября 2023 г.) ; ФГБОУ ВО «Оренбургский гос. университет». – Оренбург, 2023. – С. 224–231.
- 16 Официальная статистика // Территориальный орган Федеральной службы государственной статистики по Волгоградской области : офиц.сайт. – Режим доступа : <https://34.rosstat.gov.ru>.
- 17 Антюфеев, А. В. Планирование транспортно-пересадочных узлов в линейных городах (на примере Волгограда) / А. В. Антюфеев // Вестник Волгоградского государственного архитектурно-строительного университета. Серия: Строительство и архитектура. – 2024. – № 1(94). – С. 224-233.

18 Куликов, А. В. Цифровая концепция интеллектуальной транспортной системы пассажирского транспорта мегаполиса и его агломерации / А. В. Куликов // XVI Всероссийская мультиконференция по проблемам управления (МКПУ-2023) : материалы мультиконференции. В 4 т., Волгоград, 11–15 сентября 2023 года. Том 4. – Волгоград: Волгоградский государственный технический университет, 2023. – С. 215-220.

19 Егоров, Р. В. Составление графа транспортной сети объектов города / Р. В. Егоров, В. В. Шорин // Конкурс научно-исследовательских работ студентов Волгоградского государственного технического университета : Тезисы докладов, Волгоград, 25–29 апреля 2022 года / Редколлегия: С.В. Кузьмин (отв. ред.) [и др.]. – Волгоград: ВолГТУ, 2022. – С. 124.

20 Близнякова, Е. А. Сравнительный анализ методов поиска кратчайшего пути в графе / Е. А. Близнякова, А. А. Куликов, А. В. Куликов // Архитектура, строительство, транспорт. – 2022. – № 1. – С. 80-87. – DOI 10.31660/2782-232X-2022-1-80-87.

21 Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2023664443 Российская Федерация. Программа расчета ориентированного графа транспортной сети : № 2023663947 : заявл. 05.07.2023 : опубл. 05.07.2023 / А. В. Куликов, Е. Н. Асеева, Е. Р. Сулименова, А. А. Куликов ; заявитель Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Волгоградский государственный технический университет».

22 Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2022616507 Российская Федерация. Составление графа транспортной сети объектов города : № 2022616251 : заявл. 12.04.2022: опубл. 12.04.2022 / А. В. Куликов, Р. В. Егоров, В. В. Шорин ; заявитель Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Волгоградский государственный технический университет».

23 Власов, В. М. Транспортная телематика в дорожной области: учеб. пособие / В. М. Власов, Д. Б. Ефименко, В. Н. Богумил; Московский автомобильно-дорожный государственный технический университет. – Москва: МАДИ, 2013. – 80 с.

24 Куликов, А. В. Перспективы «бесшовных» перевозок пассажиров в транспортных системах российских городов-миллионников (на примере Волгограда) / А. В. Куликов, Л. Б. Миротин, А. А. Вальковская // Социология города. – 2022. – № 1–2. – С. 93–116.

25 Антюфеев, А. В. Линейный город. Градостроительная система "Большой Волгоград" / А. В. Антюфеев, Г. А. Птичникова ; Волгоградский государственный технический университет. – Волгоград : Волгоградский государственный технический университет, 2018. – 197 с.

26 Власов, Д. Н. Транспортно-пересадочные узлы : Монография / Д. Н. Власов. – Москва : Московский государственный строительный университет|Ай Пи Эр Медиа|ЭБС АСВ, 2017. – 192 с.

27 Автобусные остановки в Волгограде на карте. – Режим доступа: <https://2gis.ru/volgograd/search/>.

28 Маршруты и расписание. МетроЭлектроТранс : офиц. сайт. – Режим доступа: <https://gortransvolga.ru/routes/>.

29 Справочник маршрутов Волгограда. – Режим доступа: <https://wikiroutes.info/volgograd/catalog>.

30 Методологические аспекты управления качеством транспортного обслуживания / О. В. Сагинова, И. В. Спирин, Н. Б. Завьялова, Р. П. Сидорчук // МИР (Модернизация. Инновации. Развитие). – 2016. – Т. 7, № 2(26). – С. 28-37.

## References

1 Passenger Automobile Transportation: a textbook for universities / V. A. Gudkov, L. B. Miro-tin, A. V. Velmozhin, S. A. Shiryaev. - Moscow: Goryachaya Liniya - Telecom, 2006. - 488 p.

2 Velmozhin, A. V. Theory of Transport Processes and Systems: a textbook. / A. V. Velmozhin, V. A. Gudkov, L. B. Miro-tin. - Moscow: Transport, 2012. - 167 p.

3 Efficiency of Urban Passenger Public Transport / A. V. Velmozhin, V. A. Gudkov, A. V. Kulikov, A. A. Serikov; Volgograd State Technical University. - Volgograd: Volgograd State Technical University, 2002. - 256 p.

4 Vlasov, V. M. Application of digital infrastructure and telematics systems in urban passenger transport: textbook. / V. M. Vlasov, D. B. Efimenko, V. N. Bogumil. - Moscow: INFRA-M, 2021. - 352 p.

5 Bogumil, V. N. Telematics in urban passenger transport: monograph / V. N. Bogumil, M. H. Duque Sarango. - Moscow: INFRA-M, 2022. - 200 p.

- 6 Vlasov, V. M. Digital infrastructure as the basis for the functioning of ground urban passenger transport / V. M. Vlasov // *Automobile transport enterprise*. - 2016. - No. 12. - P. 3-7.
- 7 SP 395.1325800.2018. Transport hubs. Design rules: official publication / Federal Agency for Technical Regulation and Metrology. - Moscow: Ministry of Construction of Russia, 2018. - 26 p.
- 8 Spirin, I. V. Determining the time spent by passengers on trips in cities / I. V. Spirin // *World of Transport*. - 2020. - Vol. 18, No. 3 (88). - Pp. 28-43.
- 9 Spirin, I. V. Methodology for planning automobile passenger transportation / I. V. Spirin, V. M. Belyaev, V. V. Antonova // *World of Transport*. - 2019. - Vol. 17, No. 1 (80). - Pp. 20-37.
- 10 Spirin, I. V. Calculation of the contract price for the transportation of passengers at regulated tariffs / I. V. Spirin, A. K. Aredova, O. Yu. Matantseva // *Transport: science, technology, management. Scientific information collection*. - 2019. - No. 3. - P. 44-50.
- 11 Dryuchin, D. A. Evaluation of the efficiency of using trolleybus transport systems for servicing regular routes of urban passenger transport / D. A. Dryuchin, O. I. Kabanov, N. N. Yakunin // *Progressive technologies in transport systems: Proceedings of the XVIII international scientific and practical conference, Orenburg, November 15-17, 2023*. - Orenburg: Orenburg State University, 2023. - P. 150-157.
- 12 Intellectualization of processes in urban transport systems / A. N. Novikov, I. A. Novikov, N. A. Zagorodniy, A. G. Shevtsova. - Belgorod: Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov, Oryol State University named after I.S. Turgenev, 2020. - 419 p.
- 13 Tishkova, A. O. System of quality indicators for the passenger motor transport complex of the city / A. O. Tishkova, N. N. Yakunin, N. V. Yakunina // *University complex as a regional center of education, science and culture: collection of materials of the All-Russian scientific and methodological conference, Orenburg, January 26-27, 2023*. - Orenburg: Orenburg State University, 2023. - P. 3130-3136.
- 14 Yandex. Maps - transport, navigation, place search. – Access mode: <https://yandex.ru/maps/>
- 15 Kulikov, A. V. The possibility of using telematics systems in the interaction nodes of passenger transport of a city with a population of over a million using the example of Volgograd / A. V. Kulikov, A. A. Valkovskaya // *XVIII International Scientific and Practical Conference "Advanced Technologies in Transport Systems"* (Orenburg, November 15-17, 2023); Orenburg State University. – Orenburg, 2023. – P. 224–231.
- 16 Official statistics // Territorial body of the Federal State Statistics Service for the Volgograd Region: official website. – Access mode: <https://34.rosstat.gov.ru>.
- 17 Antyufeev, A. V. Planning of transport hubs in linear cities (on the example of Volgograd) / A. V. Antyufeev // *Bulletin of the Volgograd State University of Architecture and Civil Engineering. Series: Construction and Architecture*. - 2024. - No. 1 (94). - P. 224-233.
- 18 Kulikov, A. V. Digital concept of an intelligent transport system of passenger transport of a metropolis and its agglomeration / A. V. Kulikov // *XVI All-Russian multi-conference on management problems (MKPU-2023): materials of the multi-conference*. In 4 volumes, Volgograd, September 11-15, 2023. Volume 4. - Volgograd: Volgograd State Technical University, 2023. - P. 215-220.
- 19 Egorov, R. V. Compilation of a graph of the transport network of city objects / R. V. Egorov, V. V. Shorin // *Competition of scientific research works of students of Volgograd State Technical University: Abstracts of reports, Volgograd, April 25-29, 2022* / Editorial board: S. V. Kuzmin (editor) [et al.]. - Volgograd: VolGTU, 2022. - P. 124.
- 20 Bliznyakova, E. A. Comparative analysis of methods for finding the shortest path in a graph / E. A. Bliznyakova, A. A. Kulikov, A. V. Kulikov // *Architecture, construction, transport*. - 2022. - No. 1. - P. 80-87. - DOI 10.31660 / 2782-232X-2022-1-80-87.
- 21 Certificate of state registration of the computer program No. 2023664443 Russian Federation. Program for calculating the directed graph of the transport network: No. 2023663947: declared. 05.07.2023; publ. 05.07.2023 / A. V. Kulikov, E. N. Aseeva, E. R. Sulimeno-nova, A. A. Kulikov; applicant Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education "Volgograd State Technical University".
- 22 Certificate of state registration of computer program No. 2022616507 Russian Federation. Compilation of a transport network graph of city facilities: No. 2022616251: declared 12.04.2022; published 12.04.2022 / A. V. Kulikov, R. V. Egorov, V. V. Shorin; applicant Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education "Volgograd State Technical University".
- 23 Vlasov, V. M. Transport telematics in the road field: textbook. manual / V. M. Vlasov, D. B. Efimenko, V. N. Bogumil; Moscow Automobile and Road State Technical University. - Moscow: MADI, 2013. - 80 p.
- 24 Kulikov, A. V. Prospects for "seamless" passenger transportation in the transport systems of Russian million-plus cities (using Volgograd as an example) / A. V. Kulikov, L. B. Mirotin, A. A. Valkovskaya // *Sociology of the city*. - 2022. - No. 1-2. - P. 93-116.

- 25 Antyufeev, A. V. Linear city. Urban development system "Greater Volgograd" / A. V. Antyufeev, G. A. Ptichnikova; Volgograd State Technical University. – Volgograd: Volgograd State Technical University, 2018. – 197 p.
- 26 Vlasov, D. N. Transport hubs: Monograph / D. N. Vlasov. – Moscow: Moscow State University of Civil Engineering|IPR Media|EBS ASV, 2017. – 192 p.
- 27 Bus stops in Volgograd on the map. – Access mode: <https://2gis.ru/volgograd/search/>.
- 28 Routes and schedule. MetroElectroTrans: official website. – Access mode: <https://gortransvolga.ru/routes/>.
- 29 Directory of Volgograd routes. – Access mode: <https://wikiroutes.info/volgograd/catalog>.
- 30 Methodological aspects of transport service quality management / O. V. Saginova, I. V. Spirin, N. B. Zavyalova, R. R. Sidorchuk // MIR (Modernization. Innovations. Development). - 2016. - Vol. 7, No. 2 (26). - P. 28-37.

© Куликов А. В., Миротин Л. Б., Вальковская А. А., Куликов А. А., 2024



2.9.5 – эксплуатация автомобильного транспорта

**АВТОМАТИЗАЦИЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ПАССАЖИРОПОТОКОВ НА ОСТАНОВОЧНЫХ ПУНКТАХ ГОРОДСКИХ АГЛОМЕРАЦИЙ**

**AUTOMATION OF PASSENGER TRAFFIC DETECTION AT BUS STOPS IN URBAN AGGLOMERATIONS**

**Семкин Александр Николаевич**,  
генеральный директор ЗАО «Группа компаний «Навигатор», г. Орел, e-mail: [nvg@nvg-group.ru](mailto:nvg@nvg-group.ru)

**Semkin Aleksandr Nikolayevich**,  
General Director of CJSC Navigator Group of Companies, Orel, e-mail: [nvg@nvg-group.ru](mailto:nvg@nvg-group.ru)

✉<sup>1</sup> **Бодров Андрей Сергеевич**,  
к.т.н., руководитель отдела ИТС ЗАО «ЕНДС», г. Орел, e-mail: [bodrov57@gmail.com](mailto:bodrov57@gmail.com)

✉<sup>1</sup> **Bodrov Andrei Sergeevich**,  
candidate of technical sciences, head of the ITS department of JSC "ENDS", Orel, e-mail: [bodrov57@gmail.com](mailto:bodrov57@gmail.com)

**Бодров Максим Андреевич**,  
студент, Орловский государственный университет имени И.С. Тургенева, г. Орел, e-mail: [acemax03@gmail.com](mailto:acemax03@gmail.com)

**Bodrov Maxim Andreevich**,  
student, Oryol state university named after I.S. Turgenyev, Oryol, e-mail: [acemax03@gmail.com](mailto:acemax03@gmail.com)

**Аннотация.** Широкое внедрение интеллектуальных транспортных систем в городских агломерациях позволяет повысить эффективность функционирования и уровень автоматизации управления транспортной инфраструктуры. Для этого, на основе применения научно обоснованных подходов и методов, требуется разработка и внедрение отечественных программных продуктов и технических средств для ИТС.

**Annotation.** The widespread introduction of intelligent transport systems in urban agglomerations makes it possible to increase the efficiency of operation and the level of automation of transport infrastructure management. To do this, based on the application of scientifically based approaches and methods, it requires the development and implementation of domestic software products and hardware for ITS.

**Ключевые слова:** ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫЕ ТРАНСПОРТНЫЕ СИСТЕМЫ, ГОРОДСКОЙ ПАССАЖИРСКИЙ ТРАНСПОРТ, УМНЫЕ ОСТАНОВКИ.

**Keywords:** INTELLIGENT TRANSPORT SYSTEMS, URBAN PASSENGER TRANSPORT, SMART STOPS.

<sup>1</sup> Автор для ведения переписки

**1 Состояние вопроса исследования и актуальность работы**

Современный этап развития транспортной отрасли нашей страны характеризуется широким внедрением цифровых технологий. Так, в частности, реализуются несколько Национальных проектов и программ, направленных на развитие и цифровизацию транспортной отрасли, в которых большое внимание уделяется обеспечению безопасности дорожного движе-

ния, а также повышению эффективности грузовых и пассажирских перевозок [1-3]. Так, в рамках национального проекта «Безопасные качественные дороги» реализуется федеральный проект «Развитие общественного транспорта» [1], который предусматривает повышение удовлетворенности качеством транспортного обслуживания пассажирским транспортом. При этом важную роль в достижении поставленных целей отводится интеллектуальным транспортным системам (ИТС) [4].

В связи с этим целью проводимых исследований является – повышение эффективности функционирования общественного транспорта посредством ИТС. Для достижения цели исследования необходимо решить следующие задачи:

- разработать архитектуру модуля управления общественным транспортом (ОТ);
- провести анализ алгоритмов определения пассажиропотоков на остановочных пунктах (ОП).

Вопросам автоматизации учета пассажиропотоков на маршрутах общественного транспорта посвящено множество научных трудов, отечественных и зарубежных учёных и исследователей. В основе своей учёт пассажиропотоков производится при помощи периферийного оборудования, расположенного в маршрутных транспортных средствах (МТС) [5]. Как правило, периферийное оборудование располагается в дверных проемах МТС и производит подсчёт входящих и выходящих пассажиров. Выделяются несколько видов такого оборудования:

- датчики подсчёта пассажиров типа «чувствительная ступенька»;
- инфракрасные датчики, работающие по принципу прерывания или отражения луча;
- единые массивы (матрицы) инфракрасных датчиков;
- датчики на основе интеллектуальной обработки изображений с обычных или стереоскопических видеокамер.

Для эффективного учёта пассажиропотоков на ОП необходимо точное определение на каком ОП производится подсчёт пассажиропотоков. Достигается это как, правило при помощи данных, полученных от глобальной спутниковой навигационной системы (ГНСС) [6]. Таким образом современные автоматизированные системы учёта пассажиропотоков производят увязку количества входящих и выходящих пассажиров на ОП и координат положения МТС, позволяющих отнести МТС к тому или иному ОП на маршруте. Для формирования полной картины пассажиропотоков необходим анализ всех маршрутов, проходящих через данный ОП, при этом определение численности пассажиров, ожидающих МТС на ОП не производится. Именно посредством ИТС, позволяющих управлять движением ОТ, по данным пассажиропотоков на ОП предполагается достичь цели научного исследования.

## 2 Материалы и методы

В качестве элементов ИТС, направленных на управление процессами перевозки пассажиров, выделяются три подсистемы (рис. 1) [7].

Подсистемы управления маршрутами и мониторинга перемещения общественного транспорта уже долгое время функционируют как в нашей стране, так и за рубежом. Наименее понятной для пользователей ИТС является подсистема управления «умными остановками» (ПУУО). Она представляется в основном, как подсистема, осуществляющая информирование пассажиров о планируемом времени прибытия МТС на ОП и степени наполненности салона МТС посредством электронного табло на ОП [8]. Хотя фактически, её функциональные возможности значительно больше. Практически все ПУУО оснащаются камерами видеонаблюдения, и соответственно имеется возможность анализа получаемых данных при помощи технологий искусственного интеллекта (ИИ). В частности, доступно определение государственного регистрационного знака (ГРЗ) МТС на ОП, а также, в соответствии с требованиями ПНСТ 893-2023, выявление чрезвычайных ситуаций [9].

Однако, ПУУО способна осуществлять сбор данных, необходимых для управления процессами перевозки. Речь идет об определении пассажиропотоков на ОП. Так, в частности

в работе [10] по данным пассажиропотока на ОП строится матрица межостановочных корреспонденций. В основном, при определении пассажиропотоков на маршрутной сети применяются методы, описанные в документе [11]. Однако с развитием существующих технологий, и в особенности технологий ИИ, процесс определения пассажиропотоков на ОП можно автоматизировать. Так, например, компания Insentry (Россия) осуществляет анализ численности пассажиров на ОП (рис. 2).



Рисунок 1 – Архитектура модуля управления движением общественного транспорта [7]

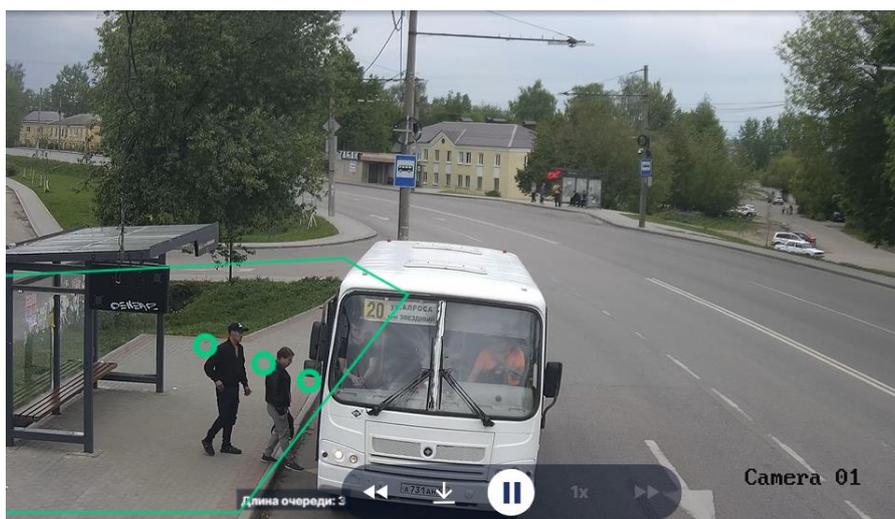


Рисунок 2 – Определение численности пассажиров на ОП от компании Insentry

ГК «Навигатор» (Россия) предложили свой алгоритм определения численности пассажиров на ОП (рис. 3).

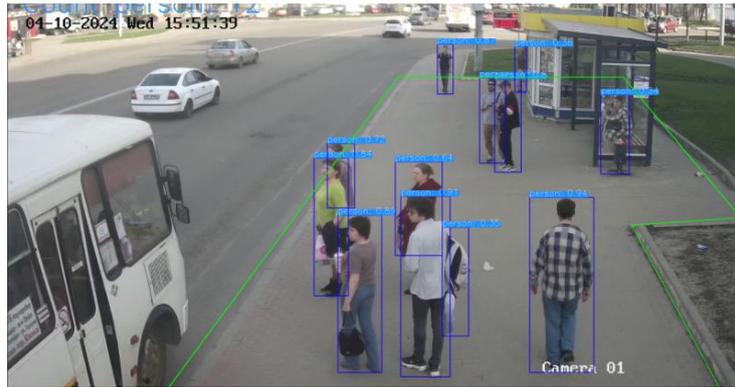


Рисунок 3 – Определение численности пассажиров на ОП от ГК «Навигатор»

Способность определения численности пассажиров на ОП, ещё не позволяет проводить анализ пассажиропотоков, т.к. не учитываются МТС, осуществляющие посадку-высадку пассажиров на данном ОП.

Представим ОП как систему массового обслуживания (СМО) (рис. 4).

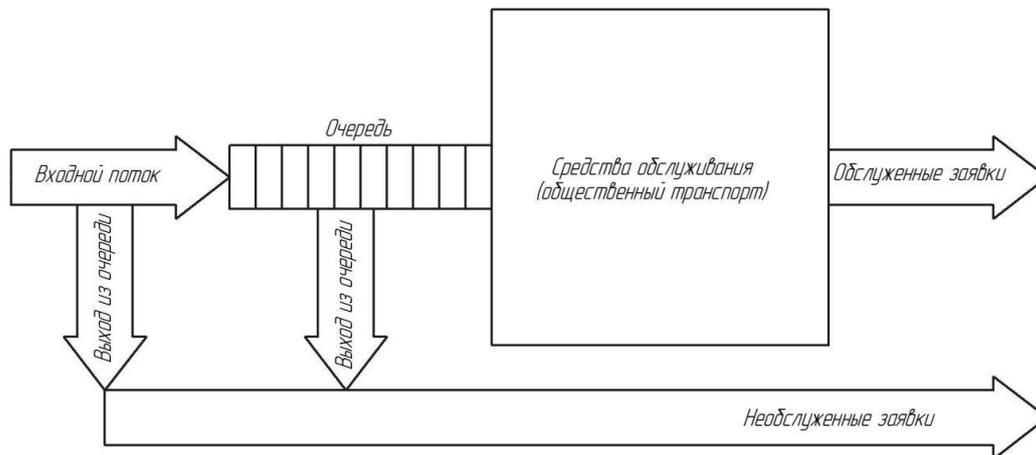


Рисунок 4 – Схема функционирования СМО

На представленной схеме функционирования СМО можно выделить:

- входной поток – заявки на отправку пассажиров ОТ;
- очередь – ожидание пассажиров прибытия ОТ;
- средства обслуживания – МТС;
- обслуженные заявки – отбывшие пассажиры;
- выход из очереди (необслуженные заявки) – пассажиры по каким-либо причинам, отказавшиеся от ожидания ОТ.

В нашем случае имеет место входной поток заявок, который представляет входной поток пассажиров, прибывающих на остановочный пункт (рис. 5).

Кроме этого, имеется исходящий поток пассажиров, отбывших с остановочного пункта, на различных видах общественного транспорта. Общая численность пассажиров на остановочном пункте будет составлять разницу между входящим и исходящим потоками пассажиров:

$$N_{ПАСС}^{ОБЩ} = N_{ПАСС}^{ВХ} - N_{ПАСС}^{ИСХ}$$

где  $N_{ПАСС}^{ОБЩ}$  – общая численность пассажиров на ОП, чел.;

$N_{ПАСС}^{ВХ}$  – входящий поток пассажиров, чел.;

$N_{ПАСС}^{ИСХ}$  – исходящий поток пассажиров, чел.

Таким образом для определения пассажиропотока на ОП необходимо контролировать следующие параметры:

- численность прибывших пассажиров;
- общую численность пассажиров на ОП;
- число убывших пассажиров.

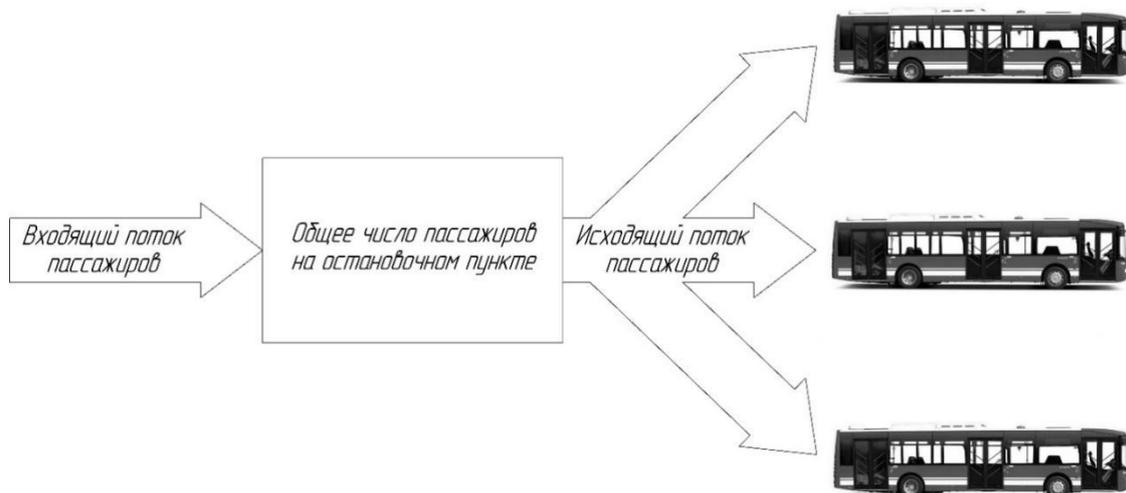


Рисунок 5 – Схема функционирования остановочного пункта

Для решения данных задач предлагается использование данных глобальной навигационной спутниковой системы (ГНСС) и технологий ИИ. При этом при помощи ГНСС определяется местоположение МТС и его нахождение в зоне притяжения ОП [8], а технологии ИИ применяются для детектирования пассажиров на ОП. В качестве модели ИИ предлагается YOLOv7.

### 3 Результаты исследований

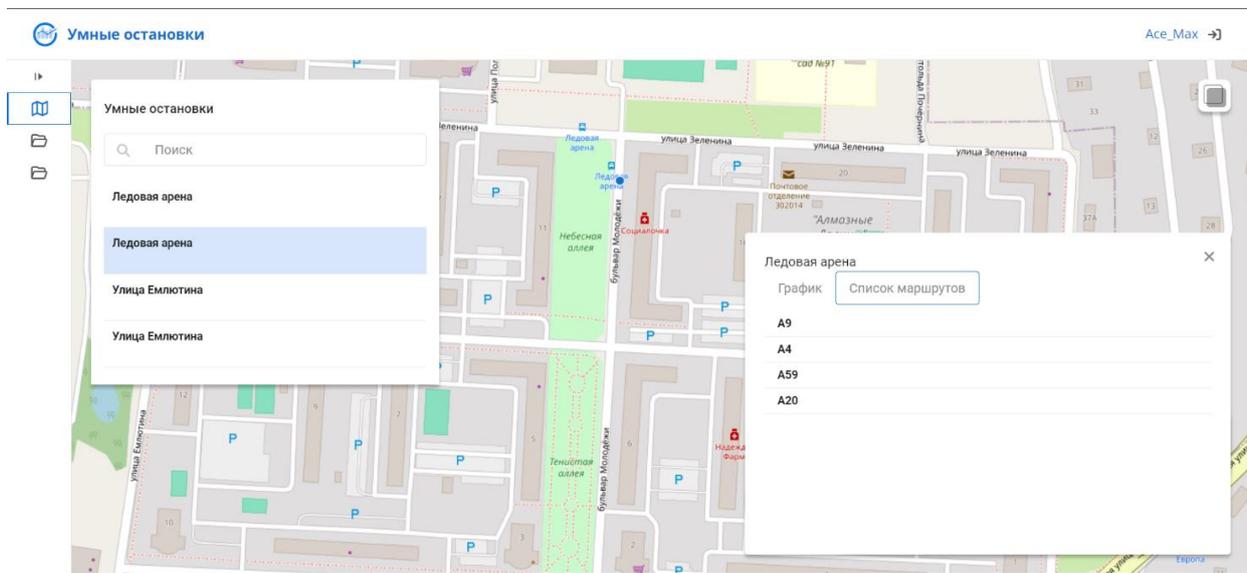
Результатом решения поставленных задач является разработка модуля анализа пассажиропотоков на ОП, реализованный на платформе ПО «Витрина данных ИТС» от ГК «Навигатор». Элементами данного модуля являются «Маршрут», «Остановочный пункт», «Посещение ОП МТС», «Список ОП для маршрутов», «Учет количества пассажиров на ОП»:

- элемент «Маршрут» хранит наименование и описание маршрута ОП;
- элемент «Остановочный пункт» содержит наименование и координаты ОП;
- элемент «Посещение ОП МТС» служит для хранения полученных данных о прибытии МТС на ОП;
- элемент «Учет количества пассажиров на ОП» служит для хранения информации о количестве пассажиров на ОП;
- элемент «Список ОП для маршрутов» служит для хранения списка ОП, которые должно посетить МТС на маршруте.

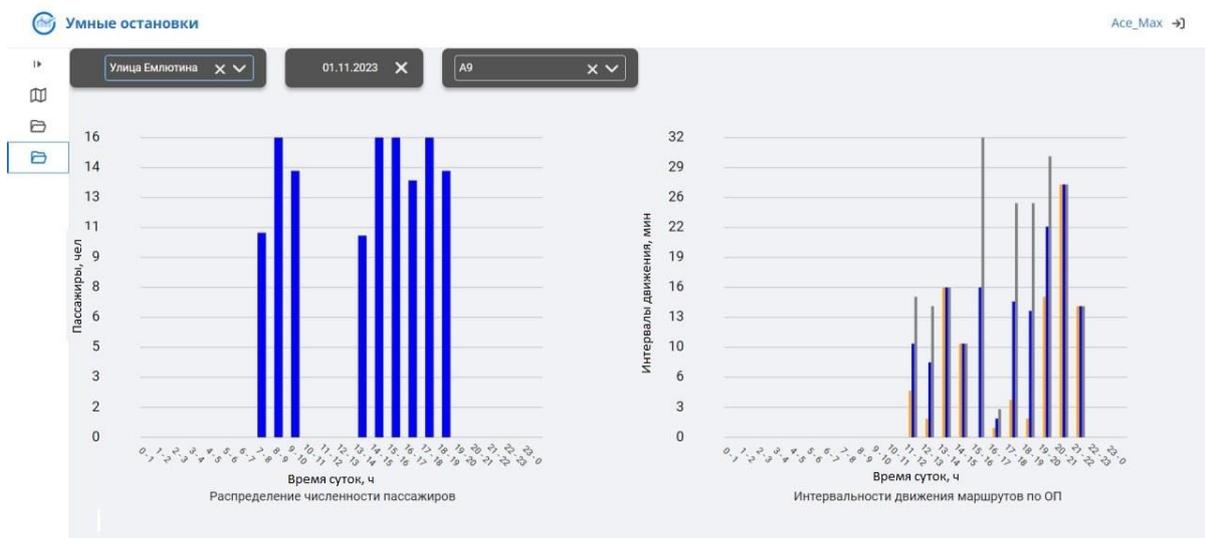
Модуль анализа пассажиропотоков на ОП имеет следующие функциональные характеристики:

- авторизация и аутентификация пользователя;
- изменение данных учетной записи пользователя;
- позволять переключение между вкладками: «Карта», «Графики» и, для пользователей с особыми правами, «Справочники».
- позволять изменять некоторые данные пользователям с особыми правами через раздел «Справочники»;

- просматривать карту и менять ее тайлы;
- отображать маркеры местоположения ОП на карте (а) виджет выбора ОП; б) виджет «Статистические данные» (рис.6, а);
- выбирать ОП через маркер на карте или через ОП и центрировать изображение на выбранном ОП;
- при выборе ОП система должна выводить карточку этого пункта с графиком распределения численности пассажиров за последний час и списком маршрутов, проходящих выбранный остановочный пункт;
- предоставлять возможность строить графики распределения численности пассажиров и интервальности движения маршрутов по ОП на различных временных промежутках для разных остановочных пунктов и маршрутов (а) виджет выбора ОП; б) виджет «Статистические данные» (рис. 6, б).



а)



б)

а) виджет выбора ОП; б) виджет «Статистические данные»

Рисунок 6 – Модуль анализа пассажиропотоков на остановочном пункте ПО «Витрина» данных ИТС»

#### 4 Обсуждение и заключение

Представленный программный продукт «Модуль анализа пассажиропотоков на ОП» позволит автоматизировать работу диспетчерских служб городских агломераций в области анализа и планирования работы МТС. Важным моментом при реализации ПО и технических средств ИТС является их построение на основе проводимых научных исследований и отражение современных и перспективных достижений в транспортной отрасли. Только в этом случае удастся добиться высоких показателей эффективности функционирования транспортной системы городских агломераций при помощи ИТС.

#### Список литературы

1 О национальных целях и стратегических задачах развития Российской Федерации на период до 2024 года : указ Президента РФ от 7 мая 2018 г. № 204 // <https://rg.ru/documents/2018/05/08/president-ukaz204-site-dok.html>.

2 Программа «Цифровая экономика Российской Федерации» : постановление Правительства РФ от 28 июля 2017г. № 1632-п // <https://digital.gov.ru/ru/activity/directions/858/>.

3 Транспортная стратегия Российской Федерации до 2030 года с прогнозом на период до 2035 года : распоряжение Правительства РФ от 27 ноября 2021 г. № 3363-п // Собр. законодательства РФ. - 2021. - №50 (13 декабря). - (Часть IV), ст. 8613.

4 Методические рекомендации по разработке заявок (включая локальные проекты по созданию и модернизации интеллектуальных транспортных систем) субъектов Российской Федерации на получение субсидий из федерального бюджета бюджетами субъектов Российской Федерации в целях реализации мероприятия «Внедрены интеллектуальные транспортные системы, предусматривающие автоматизацию процессов управления дорожным движением в городских агломерациях, включающих города с населением свыше 300 тысяч человек» в рамках федерального проекта «Общесистемные меры развития дорожного хозяйства» государственной программы Российской Федерации «Развитие транспортной системы» : распоряжение Министерства транспорта РФ от 27 апреля 2024 г. № АК-95-п // <https://www.consultant.ru>.

5 Семкин, А. Н. Перспективы внедрения подсистемы обеспечения приоритетного проезда транспортных средств в ИТС городских агломераций / А.Н. Семкин // Мир транспорта и технологических машин. – 2024. – №2-2(85). – С. 123-130.

6 Семкин, А. Н. Совершенствование алгоритмов информирования пассажиров на остановочных пунктах городских агломераций / А.Н. Семкин // Мир транспорта и технологических машин. – 2024. – №2-1(85). – С. 127-135.

7 Семкин, А. Н. Опыт внедрения систем координации движения общественного транспорта на примере Орловской городской агломерации / А.Н. Семкин А. Н., Шевляков // Мир транспорта и технологических машин. – 2023. – №1-1(80). – С. 50-59.

8 ПНСТ 892-2023 Интеллектуальные транспортные системы. Системы диспетчерского управления городским наземным пассажирским транспортом. Требования к архитектуре и функциям подсистемы информирования пассажиров, использующей фактическую и прогнозную информацию о движении транспортных средств на маршрутах.

9 ПНСТ 893-2023 Подсистема видеонаблюдения и детектирования дорожно-транспортных происшествий и чрезвычайных ситуаций. Общие технические требования.

10 Лебедева, О. А. Совершенствование методов мониторинга пассажиропотоков на маршрутах городского пассажирского транспорта общего назначения: специальность 05.22.10 «Эксплуатация автомобильного транспорта»: автореферат диссертации на соискание ученой степени кандидата технических наук / Лебедева Ольга Анатольевна; Иркутский государственный технический университет. - Иркутск, 2014. – 20 с. – Библиогр.: с. 18-20. – Место защиты: Иркутский государственный технический университет. - Текст: непосредственный.

11 Методологические рекомендации по проведению обследования по определению степени использования общественного транспорта различными категориями граждан (транспортной подвижности граждан). – Письмо Госкомстата ОР-09-23/692 от 14.02.2002.

References

- 1 On the national goals and strategic objectives of the development of the Russian Federation for the period up to 2024 : Decree of the President of the Russian Federation dated May 7, 2018 No. 204 // <https://rg.ru/documents/2018/05/08/president-ukaz204-site-dok.html>.
- 2 The Digital Economy of the Russian Federation Program : Decree of the Government of the Russian Federation dated July 28, 2017 No. 1632-r // <https://digital.gov.ru/ru/activity/directions/858/>.
- 3 Transport strategy of the Russian Federation until 2030 with a forecast for the period up to 2035 : Decree of the Government of the Russian Federation dated November 27, 2021 No. 3363-r // Collection of legislation of the Russian Federation. - 2021. - No.50 (December 13). - (Part IV), v. 8613.
- 4 Methodological recommendations for the development of applications (including local projects for the creation and modernization of intelligent transport systems) of the subjects of the Russian Federation for subsidies from the federal budget by the budgets of the subjects of the Russian Federation in order to implement the event "Intelligent transport systems have been introduced, providing automation of traffic management processes in urban agglomerations, including cities with a population of over 300 thousand people" in within the framework of the federal project "System-wide measures for the development of the road sector" of the state program of the Russian Federation "Development of the transport system" : Decree of the Ministry of Transport of the Russian Federation dated April 27, 2024 No. AK-95-r // <https://www.consultant.ru>.
- 5 Semkin, A. N. Prospects for the introduction of a subsystem for ensuring priority passage of vehicles in ITS urban agglomerations / A.N. Semkin // The world of transport and technological machines. – 2024. – №2-2(85). – Pp. 123-130.
- 6 Semkin, A. N. Improving algorithms for informing passengers at bus stops in urban agglomerations / A.N. Semkin // The world of transport and technological machines. – 2024. – №2-1(85). – Pp. 127-135.
- 7 Semkin, A. N. The experience of implementing public transport coordination systems on the example of the Orel urban agglomeration / A.N. Semkin, A. N., Shevlyakov // World of transport and technological machines. – 2023. – №1-1(80). – Pp. 50-59.
- 8 DNS 892-2023 Intelligent transport systems. Dispatch control systems for urban ground passenger transport. Requirements for the architecture and functions of the passenger information subsystem, which uses actual and forecast information about the movement of vehicles on routes.
- 9 DNS 893-2023 Subsystem of video surveillance and detection of traffic accidents and emergencies. General technical requirements.
- 10 Lebedeva, O. A. Improvement of methods of monitoring passenger flows on routes of urban passenger transport of general purpose: specialty 05.22.10 "Operation of motor transport": abstract of the dissertation for the degree of Candidate of Technical Sciences / Lebedeva Olga Anatolyevna; Irkutsk State Technical University. - Irkutsk, 2014. – 20 p. – Bibliography: pp. 18-20. – Place of protection: Irkutsk State Technical University. - Text: direct.
- 11 Methodological recommendations for conducting a survey to determine the degree of use of public transport by various categories of citizens (transport mobility of citizens). – Letter from the State Statistics Committee OR-09-23/692 dated 02/14/2002.

© Семкин А. Н., Бодров А. С., Бодров М. А., 2024