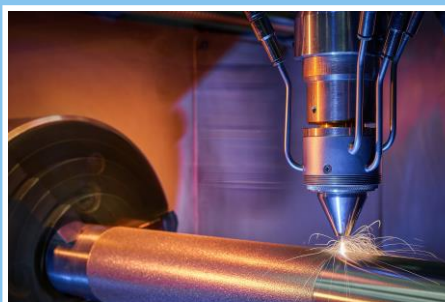
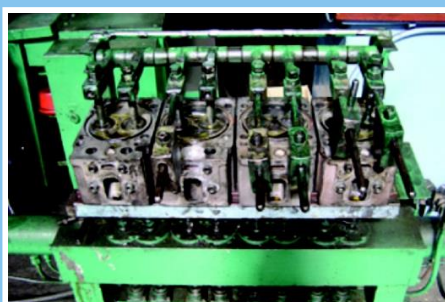


ВНТВ

Воронежский научно-технический вестник
1 (55) март 2026



Научно-технический
журнал [®]
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)
Терентьев 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
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

Таскинбаев А. А., Сухочев Г. А., Коденцев С. Н., Подгорнов С. Н., Смольяникова Е. Г. Проблемно-ориентированная оптимизация технологии обработки деталей энергоустановок из гранульных заготовок..... 3

Романов А. А., Трифионов Г. И. Комплексное экспериментальное исследование методов лазерной резки многослойных углепластиковых композиционных панелей.. 13

ТЕХНОЛОГИЯ МАШИНОСТРОЕНИЯ

Болдырев А. А., Григораиш В. В., Болдырев А. И., Падурец А. А., Перова А. В. Экспериментальное определение влияния изменения эффективной электропроводности электролита и выхода по току металла на логарифмический индекс рассеивания при электрохимической размерной обработке..... 25

Колесов А. В., Козлов А. А., Козлов А. М. Метод расчета ширины обработки для пятикоординатного фрезерования сферической фрезой..... 32

ЭКСПЛУАТАЦИЯ АВТОМОБИЛЬНОГО ТРАНСПОРТА

Белокуров С. В., Кононов М. С., Панявина Е. А., Белокуров В. П., Кораблев Р. А., Бусарин Э. Н., Голев А. Д. Методика расчетной оценки технико-экономических особенностей пассажирских перевозок..... 45

Жайворонок Д. А., Иванников В. А., Шаталов Е. В., Черников Э. А., Маклакова Е. А., Зеликов В. А. Оценка эффективности эксплуатации и ремонта автомобильного транспорта на основе ЛСС-анализа и управления износом..... 53

Куклина И. Г., Левичунов Л. С., Молев М. Ю., Федоренко А. В. К вопросу оценки управляемости транспортных средств с бортовым способом поворота..... 62

Макарова И. В., Габсалихова Л. М., Имомназаров С. К., Махмудов А. А. Влияние региональных особенностей на повышение безопасности пешеходов.... 74

Барыкин А. Ю., Мухаметдинов Э. М., Нигметзянова В. М., Россова Н. К., Гориков А. Л. Исследование работоспособности моторного масла, применяемого в силовых агрегатах транспортно-технологических машин..... 83

Гринченко А. В., Клявин В. Э., Ризаева Ю. Н. Теоретические основы принятия решений в интеллектуальной системе транспорта общего пользования..... 91

Маеврин В. Г., Макарова И. В., Зайнутдинова А. Р. Совершенствование логистических процессов вывоза отходов посредством имитационного моделирования..... 102

Семкин А. Н., Бодров А. С. Управление процессами перевозки пассажиров по данным параметров транспортного потока..... 114

Лихачев Д. В., Дорохин С. В., Артемов А. Ю., Кораблев Р. А., Паринюв Н. Н. Анализ методов организации левоповоротного движения на регулируемых перекрестках: сравнительное моделирование и оценка задержек..... 127

DOI: 10.34220/2311-8873-2026-3-12



УДК 621.048.7

UDC 621.048.7

2.5.5 – технология и оборудование механической и физико-технической обработки

ПРОБЛЕМНО-ОРИЕНТИРОВАННАЯ ОПТИМИЗАЦИЯ ТЕХНОЛОГИИ ОБРАБОТКИ ДЕТАЛЕЙ ЭНЕРГОУСТАНОВОК ИЗ ГРАНУЛЬНЫХ ЗАГОТОВОК

PROBLEM-ORIENTED OPTIMIZATION OF MACHINING TECHNOLOGY FOR POWER PLANT COMPONENTS FROM GRANIT BLANKS

Таскинбаев Андрей Артурович, аспирант кафедры «Технология машиностроения», Воронежский государственный технический университет, г. Воронеж, e-mail: andrey.taskinbaev@yandex.ru

Taskinbaev Andrey Arturovich, postgraduate student in the department of mechanical engineering technology, Voronezh state technical university, Voronezh, e-mail: andrey.taskinbaev@yandex.ru

✉¹ **Сухочев Геннадий Алексеевич**, д.т.н., профессор, Воронежский государственный технический университет, г. Воронеж, e-mail: suhotchev@mail.ru

✉¹ **Sukhochev Gennady Alekseevich**, doctor of technical sciences, professor Voronezh state technical university, Voronezh, e-mail: suhotchev@mail.ru

Коденцев Сергей Николаевич, к.т.н., доцент, Воронежский государственный технический университет, г. Воронеж, e-mail: kodentsev.sergey@mail.ru

Kodentsev Sergey Nikolaevich, candidate of technical sciences, associate professor, Voronezh state technical university, Voronezh, e-mail: kodentsev.sergey@mail.ru

Подгорнов Сергей Николаевич, конструкторское бюро химавтоматики, г. Воронеж, e-mail: s.n.podgornov.vmz@gmail.com

Podgornov Sergey Nikolaevich, chemical automation design bureau, Voronezh, e-mail: s.n.podgornov.vmz@gmail.com

Смольяникова Евгения Геннадьевна, к.т.н., доцент, Воронежский государственный технический университет, г. Воронеж, e-mail: sm.evgeniya@gmail.com

Smolyannikova Evgeniya Gennadyevna, candidate of technical sciences, associate professor, Voronezh state technical university, Voronezh, e-mail: sm.evgeniya@gmail.com

Аннотация. Целью исследований данной работы являются комплексные технологические процессы комбинированной доводки ответственных деталей из гранульных заготовок с целью оптимизации качества постобработки рабочих поверхностей.

Annotation. The objective of this study is to explore comprehensive combined finishing techniques for high-precision components produced from granular preforms, targeting improved surface quality after final processing.

Ключевые слова: ОПТИМИЗАЦИЯ, ТЕХНОЛОГИЧНОСТЬ, КОМБИНИРОВАННОЕ ВОЗДЕЙСТВИЕ, МИКРОШАРИКИ, НАКЛЕП, ШЕРОХОВАТОСТЬ.

Keywords: OPTIMIZATION, MANUFACTURABILITY, COMBINED EFFECT, MICROSPHERES, WORK HARDENING, ROUGHNESS.

¹ Автор для ведения переписки

1 Состояние вопроса исследования и актуальность работы

Экстремальные условия работы агрегатов перспективных образцов двигательных энергоустановок в агрессивных водородосодержащих эксплуатационных средах определяют особенности конструктивного исполнения отдельных деталей сложной формы и сборочных единиц, и выдвигают специальные условия к процессам их изготовления, специфику проведения отдельных операций и их контроля. Для технологического обеспечения эксплуатационных показателей агрегатов перспективных жидкостных ракетных двигателей (ЖРД) необходимо особое внимание обратить на наиболее уязвимые агрегаты и детали с точки зрения эксплуатации в экстремальных условиях.

К числу таких агрегатов относится турбонасосный агрегат (ТНА), который занимает особое место при разработке ЖРД. Он требует наряду с такими агрегатами, как камера сгорания, самого длительного цикла доводочных работ на всех этапах создания: проектирование, изготовление и отработка. Пространственная конструкция, высокая частота вращения, тесная взаимосвязь условий работы агрегата с процессами, протекающими в двигателе, являются причинами того, что количество дефектов по наиболее нагруженным ТНА может составлять 50-70 % от количества дефектов по всему двигателю в период его отработки. Сложность выявления причин дефектов, возникающих в процессе отработки двигателя, заключается в том, что процессы, происходящие в ТНА, быстротекущие: ротор ТНА совершает за одну секунду до 2000 оборотов, а процесс развития дефектов, связанный с высокотемпературным воздействием от горения топлива, длится сотые доли секунды. В связи с этим, создание ТНА современных ЖРД является сложной технической задачей [1].

Наличие в конструкции ТНА технологически труднодоступных элементов, в ряде случаев, исключает допуск инструмента в зону обработки для реализации финишных отделочно-упрочняющих операций и требует разработки принципиально новых подходов к технологии обеспечения заданных показателей качества рабочих поверхностей роторных деталей [2].

Значительный объем отработки характерен для таких деталей, как турбины закрытого типа с неразъемным бандажом, имеющие криволинейные участки сужающихся или расходящихся стенок межлопаточного пространства [3]. В этом случае каналы не имеют сквозного просвета и получение заготовок турбин технологически большей частью ограничено методами литья в оболочковые формы с последующей высокотемпературной газостатической обработкой. Межлопаточные пространства в заготовках формируются литейными формами в условиях трудно прогнозируемой кристаллизации жаропрочных сплавов и усадочных явлений, способствующих образованию корок с трещинами и пористости. Такие заготовки передают на последующие операции технологии изготовления наследованный поверхностный слой на лопатках с недопустимыми для эксплуатации дефектами. Широко известные отечественные научные школы (ИМАШ РАН, НИАТ, МГТУ им. Н.Э. Баумана, г. Москва, СГАУ им. С.П. Королёва, г. Самара, ДГТУ, г. Ростов-на-Дону, ВГТУ г. Воронеж и др.) для обработки литых поверхностей отдадут предпочтение традиционным эффективным, но непроеизводительным виброударным технологиям [4].

В последнее время колесо турбины с валом изготавливают из заготовки, полученной горячим изостатическим прессованием (ГИП) в индивидуальной капсульной оснастке из гранул сплава ЭП741НП. После извлечения заготовки из оснастки проводится электроэрозионная

обработка по формированию профиля лопаток, окончательная механическая обработка, нанесение покрытий и параметрические испытания. В результате функционально-стоимостного анализа сквозного технологического процесса было установлено, что самой трудоемкой и длительной являются операции электроэрозионного прошивания межлопаточных каналов в гранульной заготовке турбины. Трудоемкость данной операции доходит до 500 н/ч и длится более 30 календарных дней при полной загрузке низкопроизводительного дорогостоящего электроэрозионного оборудования с ЧПУ [5].

После выполнения электроэрозионной обработки межлопаточных каналов образуется поверхностный измененный слой до 300 мкм, что негативно влияет на эксплуатационные характеристики детали и надежность ТНА в целом. Все это снижает уровень прогнозируемой разработчиком технологичности в разы. Применительно к новым изделиям ситуация с механизированными технологиями отделки и упрочнения поверхностей роторных деталей по степени научного обоснования и оснащенности не обеспечивает требуемых параметров качества и не способствует повышению их производственной технологичности.

Остаются актуальными задачи выбора технологии получения заготовок детали и теоретического описания оптимальной последовательности и правил применения операций сквозного технологического процесса отделочной обработки цельных турбин для формирования требуемого физико-механического состояния поверхности при минимизации затрат. Решение этих научно-технических вопросов предлагается на основе обоснованной методики оценки и рационального проблемно-ориентированного повышения производственной технологичности лопаточных деталей выбором средств и режимов формообразования поверхностей межлопаточных каналов по конструктивно-технологическим признакам.

Целью работы является выбор оптимальной технологии изготовления, разработка теоретических основ и методики оценки и рационального проблемно-ориентированного повышения производственной технологичности роторных деталей выбором средств формообразования поверхностей по конструктивно-технологическим признакам.

Задачи:

1. Обосновать процесс выбора оптимальной последовательности и правил применения операций сквозного технологического процесса отделочной обработки гранульных заготовок цельных турбин для формирования требуемого физико-механического состояния поверхности труднообрабатываемого материала при минимизации затрат и при заданном уровне качества.

2. Установить область влияния технологических параметров и режимов процесса комплексного последовательного воздействия различных способов получения заготовки на стабильность показателей качества согласно технической документации.

3. По результатам экспериментальных сравнительных исследований процессов снижения шероховатости и упрочнения установить максимально производительные технологические операции обработки для различных роторных деталей, значительно различающихся по конструктивно-технологическим признакам.

4. Сформулировать регламент выбора наиболее технологичных отделочно-упрочняющих операций комбинированного технологического процесса обработки гранульных заготовок в соответствии с особенностями геометрии роторных деталей и требований к качеству их обработки.

Решение этих задач позволит теоретически и методически обосновать порядок оценки и рационального проблемно-ориентированного повышения производственной технологичности роторных деталей путем выбора методов и средств обработки по конструктивно-технологическим признакам [6, 7]. Результаты исследований дополняют достигнутый задел в области научно обоснованных методов и средств повышения производственной технологичности при изготовлении роторных деталей высокой конструктивно-технологической сложности.

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 индустрии, 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.

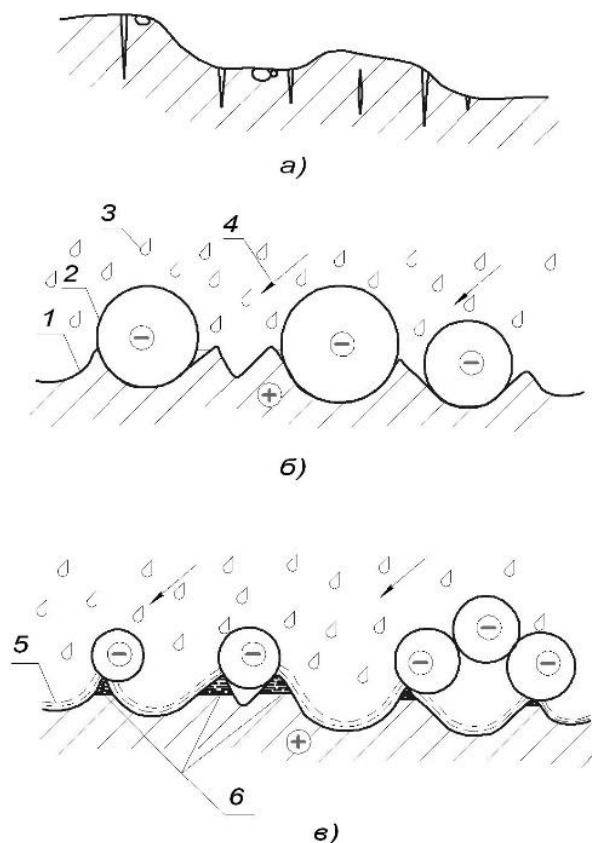
Таким образом, исследование фазового состава металлов в криогенном диапазоне температур становится актуальной задачей.

2 Материалы и методы

Объектами исследования являлись комплексные технологические процессы комбинированной отделочно-упрочняющей обработки поверхностей деталей роторной группы.

Предметом исследования явились технологии обработки гранульных заготовок из труднообрабатываемых сплавов в условиях разной степени доступности обрабатываемых поверхностей сложного профиля и проблемно-ориентированное повышение технологичности производства с учетом конструктивных особенностей основных агрегатов двигательных энергоустановок.

Для решения поставленной задачи оптимизирован способ комбинированной обработки внутренних поверхностей деталей токопроводящими микрогранулами с наложением низковольтного электрического поля в условиях использования газожидкостной слабопроводящей среды [8, 9]. Предложенный способ, апробированный на прерывистых конструктивных элементах с отверстиями и пазами [10], позволяет организовать в протяженном отверстии поток постоянно и равномерно (не менее 95 % сплошности покрытия) воздействующего поэтапно на все участки поверхности, создавая равномерный наклеп, выравнивая и снижая технологически наследованную шероховатость за счет интенсивного анодного растворения с деформированных и уплотненных микрогранулами вершин микровыступов. Последнее позволяет обеспечить стабильность силовых и электрохимических параметров комбинированного воздействия микрогранул на всей длине проточной части деталей. На рис. 1 показаны основные стадии этого способа комбинированной обработки микрошариками.



1 – деталь; 2 – микрошарики; 3 – токопроводящая газожидкостная среда; 4 – направление движения микрошариков; 5 – жидкостная пленка; 6 – микровыступы

Рисунок 1 – Схема и этапы способа комбинированной обработки микрошариками

Предлагаемое решение направлено на получение равномерной степени наклепа и устранения микротрещин по всей обрабатываемой поверхности. Это достигается тем, что обработка поверхностей по предлагаемому способу заключается в подаче на обрабатываемые поверхности сжатым воздухом потока микрошариков, и процесс обработки проводят в газожидкостной слабопроводящей среде с наложением низковольтного электрического поля. На рис. 1, а показана нестабильность исходного макрорельефа поверхности. Микротрещины в поверхностном слое могут выходить на поверхность или оставаться замкнутыми в материале подповерхностного слоя и выходить на поверхность в процессе эксплуатации изделия под действием знакопеременных нагрузок из-за пульсаций давления рабочего тела. Внутренние рабочие поверхности, особенно длинномерных деталей, имеют в большинстве случаев различные пазы и полости, недопустимые уступы, трещины и погрешности формы, выходящие зачастую за допуски на номинальные размеры, что в случаях гидродинамического, абразивного трения, знакопеременных нагрузок в водородосодержащих средах резко снижают работоспособность дорогостоящего в изготовлении и эксплуатации оборудования.

Формирование благоприятного для различного рода эксплуатационных свойств поверхностного слоя проходит в несколько этапов. Во-первых, на исходную дефектную поверхность 1 (рис. 1, б) с направлением к ней 4 под углом не более 60° подают микрошарики 2 более крупной фракции (150-200 мкм), которые за счет деформационного сдвига перераспределяют выступы и впадины и залечивают микродефекты. Наличие жидкостной токопроводящей среды 3 образует постоянно обновляющуюся пленку жидкости и препятствует перегреву мест соударений гранул с поверхностью и образованию остаточных напряжений растяжения, а также ускоряет процесс за счет явления анодного растворения материала. Затем, подают более

мелкую фракцию микрошариков 2 (до 50 мкм), которые окончательно выравнивает микроповерхность (рис. 1, в). Выравнивание микрогеометрии значительно зависит от скорости анодного растворения в месте микровыступа б, которая в момент контакта шарика с деталью через жидкостную токопроводящую пленку 5 резко увеличивается из-за повышения удельной проводимости в месте соударения, и тогда время обработки составляет не более 15 с на участок пятна распыла.

3 Результаты исследований

При моделировании процесса принимаются исходные данные: физико-механические свойства материала микрогранул и детали; радиус кривизны (диаметр) обрабатываемого отверстия; исходная и требуемая величина наклепа поверхностного слоя и высота микронеровностей. Граничными условиями являются: предельно достижимые значения наклепа или высоты неровностей после обработки в условиях экранирования среды; предельные значения давления в потоке обрабатывающей среды, определяемые расходом сжатого воздуха и концентрацией микрогранул. Основным показателем импульсного механического воздействия на поверхность является скорость ее деформации.

Параметры оптимизации процесса – расход обрабатывающей среды и скорость деформирования микровыступов обрабатываемой поверхности. Учитывая при определении скорости смеси микрошариков, воздуха или жидкости на основе известных законов гидродинамики скорость истечения газожидкостной смеси через сопла под давлением можно представить в следующем виде.

Для твёрдых сферических частицах радиусом описанной окружности R , падающих на поверхность детали со средней скоростью V_{cp} , средняя скорость ее деформации составляет V/R . Средняя скорость потока гранул с газожидкостной средой:

$$V_{cp} = k_{ж}k_{мкш}Q / (F_c \cdot 3600), \quad (1)$$

где Q – расход сжатого воздуха, м³/ч; F_c – площадь поперечного сечения отверстия сопла, м²; $k_{ж}$ – коэффициент, учитывающий влияние подмешиваемой в поток на выходе из сопла жидкости ($k_{ж} = 0,95-0,97$); $k_{мкш}$ – коэффициент, экспериментально учитывающий влияние расхода склонных к слипанию микрошариков через дозатор ($k_{мкш} = 0,7-0,85$) на скорость потока обрабатывающей среды.

Уравнение движения в процессе контактирования:

$$\frac{4\pi}{3} \rho R^3 \frac{dV}{dt} = -\pi R_a^2 \bar{P} \quad (2)$$

где R – радиус частицы, мм; R_a – радиус вмятины, мм, ρ – плотность материала детали, кг/м³; \bar{P} – среднее давление в зоне контакта, Па. Полная пластичность наступает при значениях $\bar{P} = 3\sigma_T$.

Среднее давление \bar{P} , оказывающее сопротивление движению, при соотношении параметра деформации $E/\sigma_T R \leq 36$, обеспечивает получение вмятины размером $0,004R$ для сталей, где отношение модуля текучести к модулю упругости $\sigma_T/E = 0,0024$, что установлено экспериментально. С учетом (2) после интегрирования при условии $\bar{p} = 3\sigma_T$

$$1/\Omega = \left\{ \left(0,2 + \frac{2}{9} \ln E / \sigma_T \right) + \frac{1}{9} \left[\ln(2\bar{Z}/R) - \frac{4\bar{Z}}{R} \right] \right\}^{\frac{1}{2}}, \quad (3)$$

где Ω – коэффициент, учитывающий степень предварительной деформации поверхности, \bar{Z}_{np} . Это уравнение описывает начальную стадию деформирования, как только величина давления

возрастет до $3\sigma_T$, для дальнейших расчетов следует пользоваться эмпирическими зависимостями для более многогранных условий при обработке труднообрабатываемых материалов.

У микрошарика диаметром 300-100 мкм есть в этом смысле ограничения по массе, к тому же ему необходимо присутствие жидкости от перегрева поверхности и удаления продуктов работы. Уравнение движения микрошариков с учетом экспериментальных исследований:

$$K = MV^2/2 - F_{св} - F_{тр} - g \cdot \cos\beta, \quad (4)$$

где M – масса шарика, кг; V – скорость вылета, м/с; $F_{св}$ – сила сопротивления воздуха среды, Н; $F_{тр}$ – сила трения в потоке, Н; $g \cdot \cos\beta$ – гравитационная составляющая, величина переменная, зависящая от массы шарика.

В итоге микрошарик при встрече с поверхностью достигал скорость только 10-12 м/с от требуемых 80-100 м/с, так что не удавалось разрушить образовавшуюся на поверхности окисную пленку и продолжить процесс деформирования. Соединение потока микрошариков с газожидкостным потоком при наложении тока низкого напряжения позволило сразу повысить скорость шариков при контакте до 30-40 м/с по нескольким причинам:

- снизилось на 14 % трение в потоке из-за уменьшения его плотности на 30 %;
- газовая среда, обладающая определенной (не более 1-1,15 % от $g \cdot \cos\beta$) несущей способностью в потоке пара, тоже вложила свою долю;
- микрошарик начинает пробивать окисную пленку, которая частично разрушается анодным низковольтным растворением.

Если принять в качестве исходной информации высоту микронеровностей до обработки, а граничными условиями – время действия анодного растворения при постоянной механической депассивации поверхности, то процесс съема неровностей с учетом известных выражений за единичный импульс контакта микрошариков в эффективном пятне распыла имеет вид:

$$(\Delta_1 + \Delta_2) = \Delta_0 - K_{гж} (\alpha/\gamma) \cdot \eta \cdot j_{ср} \cdot \tau_{и}, \quad (5)$$

где α – электрохимический эквивалент материала заготовки, кг/Кл; γ – удельная плотность материала заготовки, кг/м³; $j_{ср}$ – средняя за импульс плотность тока, А/м²; $\tau_{к}$ – длительность токопроводящего контакта при соударении, с; η – коэффициент выхода по току; $K_{гж}$ – концентрация жидкостной составляющей газожидкостной токопроводящей среды (по данным экспериментов 10-20 %).

Ток J в разряде, как известно, может достигать 100 А, площадь контактного действия F на первом этапе составляет всего 0,05-0,1 мм², а диаметр пятна распыла достигает 30 мкм. Тогда средняя плотность тока составляет $j_{ср} = 0,3J/F$, а плотность микрошариков в потоке – 20-30 %. Длительность токопроводящего контакта рассчитывается по зависимости:

$$t_{к} = K_{эж} r_{заг} \sqrt{\frac{\chi}{\mu \cdot f}}, \quad (6)$$

где $r_{заг}$ – радиус зоны обработки в заготовке (до 15 мм); μ – коэффициент Пуассона; f – постоянная частота соударений шариков с поверхностью.

На втором этапе площадь контакта гранулы с поверхностью заготовки составляет всего 0,02-0,05 мм². Расчет времени контакта позволяет получить несколько приближенные результаты, а прямые измерения, приведенные дают $t_{к} = 0,3-0,6$ мкс. Скорость съема вершин микронеровностей зависит от анодного растворения при наклепе, которая может быть откорректирована полученными экспериментально коэффициентом, учитывающим анодное растворение,

$K_{ap} = 1,05-1,15$ и коэффициентом механического удаления неровностей $K_{my} = 1,1-1,2$.

С учетом этого время выравнивания микрогеометрии в месте соударения составит:

$$t_e \leq t_k N = \frac{K_{эж} \delta_{пл} (\Delta_0 - \Delta_1 - \Delta_2)}{\frac{\alpha}{\gamma} \eta \chi U K_{ap} K_{my}}, \quad (6)$$

где $\delta_{пл}$ – толщина окисной пленки в зоне контакта, мм; N – количество соударений шариков до полного насыщения поверхностного слоя пластическим деформированием.

Длительность обработки $t_{уч}$ участка одного распыла с учетом значений F составит:

$$t_{уч} = \frac{t_k \pi R^2}{F} = \frac{K_{эж} \pi R^2 \delta_{пл} (\Delta_0 - \Delta_1 - \Delta_2)}{F \frac{\alpha}{\gamma} \eta \chi U K_{ap} K_{my}} \cdot N, \quad (7)$$

При соударении шариков с заготовкой известно, что когда разрушается окисная пленка и происходит небольшое анодное растворение контактной поверхности, то дальнейшее выравнивание микропрофиля поверхности микрошариками происходит в основном за счет динамического давления микрошариков на поверхность, определяемое нами под углом соударения α с поверхностью зависимостью:

$$\bar{p} = (3\sigma_T + \sigma^{++} + \sigma_{хруп}) \alpha, \quad (8)$$

где σ_T – предел текучести материала, МПа; σ^{++} – растягивающие напряжения от предыдущих этапов обработки (70-90 МПа). $\sigma_{хруп}$ – напряжение хрупкого разрушения окисных пленок после воздействия анодного растворения (до 40-50 % от \bar{p}).

Съем материала за 1 импульс тока (в промежутке между соударениями) на последнем этапе незначителен и составляет доли микрометра. Анодное воздействие в данном случае должно только удалять продукты деформационного воздействия и корректироваться напряжением U_0 в пределах 2-5 В.

Расчет технологических режимов комбинированной обработки:

1. Выбор диаметра микрошариков:

$$d_{ш} = 2R_{в пр} = R_a^2 / h_y, \text{ мм}, \quad (9)$$

где $R_{в пр}$ – вписанный в лунку и приведенный к среднему диаметру радиуса пластического отпечатка, мм; R_a – радиуса пластического отпечатка в горизонтальной плоскости, мм; h_y – глубина пластического отпечатка, мм.

Полученный результат после опытной обработки на имитаторе и сравнения с аналитическими расчетами округляют до стандартного значения. Если расчетное значение превышает размеры шариков, разделенных на фракции в вибрационном сите, то их величину берут с учетом имеющихся типоразмеров шариков.

2. Из технической документации на деталь устанавливаются требования по степени наклепа и шероховатости отверстия.

3. Если шероховатость заготовки отвечает требованиям чертежа, то расчет режимов ведут по заданному наклепу.

3. Если требуется снизить шероховатость от Δ_2 до R_{Zmin} , то припуск Z составит Δ_2 до R_{Zmin} и минимальное время обработки элементного участка ведут по (6) и (7).

4. Общее время обработки рассчитываем по формуле:

$$t_{\text{общ}} = \pi Dn / d, \quad (10)$$

где D – диаметр отверстия, мм; n – число оборотов детали с оснасткой, об/мин⁻¹; d – эффективное ядро распыла микрошариков, связанное с D .

4 Обсуждение и заключение

Предложены оптимальные режимы комбинированной обработки, включающие механическое воздействие и анодное растворение, что обеспечивает требуемые технологические показатели процесса. Оптимизированные режимы комбинированной доводки:

- напряжение источника питания – 5-10 В;
- время обработки каждого участка поверхности – 60 с;
- угол соударения потока микрошариков с поверхностью $\alpha = 60^\circ \pm 5^\circ$;
- диаметр сопла – 10 мм; скорость вращения шпинделя установки – 20-60 мин⁻¹;
- давление сжатого воздуха в струйном аппарате – 0,2-0,4 МПа;
- инструмент – металлические микрогранулы сферической формы диаметром 50–150 мкм в газожидкостной токопроводящей среде с использованием промышленной воды;
- расход газожидкостной слабопроводящей среды – 2 м³/мин.

Достигнутые технологические показатели: для легированных сталей $R_a = 0,16-0,32$ мкм, разброс по степени наклепа ± 3 %; для заготовок из жаропрочных сплавов $R_a = 0,16-0,25$ мкм, разброс по степени наклепа ± 3 %. Достигнутые показатели улучшают результаты, получаемые ранее. Испытания нагруженных деталей в условиях эксплуатации показали положительные результаты, что подтвердило правомерность результатов исследований, приведенных в работе.

Список литературы

- 1 Сухочев, Г.А. Управление качеством изделий, работающих в экстремальных условиях при нестационарных воздействиях / Г.А. Сухочев. – Воронеж: ВГУ, 2003. – 286 с.
- 2 Способ упрочнения внутренних поверхностей каналов деталей / Г.А. Сухочев, А.М. Некрылов, А.Ю. Грымзин, С.Н. Подгорнов, Д. В. Силаев // Патент №2788444 Российская Федерация, В23Н 5/06, В23В 09/00.; заявитель и патентообладатель Воронежский гос-ударственный технический университет. - № 2022100797, заявл. 25.05.20219; опубл. 19.01.2023, Бюл. №2. – 8с.
- 3 Technological methods for processing non-rigid finned shells of power plants / Suhochev G.A., Podgornov S.N., Grymzin A.U., Yukhnovich S.S. // Materials Today: Proceedings. «International Conference on Modern Trends in Manufacturing Technologies and Equipment 2020, ICMTMTE 2020». 2021. pp. 1943-1945.
- 4 Способ упрочняющей обработки внутренних поверхностей деталей / Г.А. Сухочев, Е.Г. Смольяникова, Д.М. Небольсин // Патент на изобретение RU 2491155 C2, 27.08.2013. Заявка № 2011106714/02 от 25.06.2012. Патентообладатель Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Воронежский государственный технический университет» (RU).
- 5 Сухочев Г.А. Технологическое обеспечение повышенного ресурса нагруженных поверхностей сложного профиля / Г.А. Сухочев., С.Н. Коденцев, В.А. Кашицин // Насосы. Турбины. Системы. – 2024. – № 4 (53). – С. 23-31.
- 6 Некрылов, А.М. Упрочняющая и отделочная обработка технологически труднодоступных проточных каналов деталей / А.М. Некрылов, А.Ю. Грымзин, С.Н. Подгорнов, В.Н. Сокольников, Г.А. Сухочев // Научные технологии в машиностроении. – 2020. – № 7 (109). – С. 20-23.
- 7 Некрылов, А.М. Повышение производственной технологичности рабочих поверхностей нагруженных деталей применением упрочняющей комбинированной обработки / А.М. Некрылов, А.Ю. Грымзин, С.Н. Подгорнов, Г.А. Сухочев, С.Н. Коденцев, В.Г. Грицок // Упрочняющие технологии и покрытия. – 2020. – Том Т. 16. – № 4 (184). – С. 182-186.
- 8 Сухочев, Г.А. Технологические аспекты изготовления деталей быстроходных роторов из мелкодисперсных порошков / Г.А. Сухочев, И.Г. Дроздов, Е.Г. Смольяникова, А.А. Таскинбаев // Насосы. Турбины. Системы. – 2025. – № 4 (57). – С. 7-78.

9 Подгорнов, С.Н. Технологичность и показатели качества проточных поверхностей после комбинированной обработки / С.Н. Подгорнов, А.Ю. Грымзин, С.Н. Коденцев, Г.А. Сухочев // Воронежский научно-технический вестник. – 2022. – № 4 (42). – С. 22-28.

10 Грымзин, А.Ю. Технологические методы для комбинированного упрочнения поверхностей при создании сложнопрофильных изделий / А.Ю. Грымзин, С.Н. Подгорнов, Г.А. Сухочев // Насосы. Турбины. Системы. – 2021. – № 2 (39). – С. 73-78.

References

1 Sukhochev, G.A. Quality Management of Products Operating under Extreme Conditions with Non-Stationary Loads / G.A. Sukhochev. Voronezh: VSU, 2003. 286 p.

2 Method for Hardening Internal Surfaces of Component Channels / G.A. Sukhochev, A.M. Nekrylov, A.Yu. Grymzin, S.N. Podgornov, D.V. Silaev // Patent No. 2788444 Russian Federation, B23H 5/06, B23B 09/00; applicant and patent holder Voronezh State Technical University. - No. 2022100797, filed 25.05.2019; publ. 19.01.2023, Bull. No. 2. - 8 p.

3 Technological methods for processing non-rigid finned shells of power plants / Suhochev G.A., Podgornov S.N., Grymzin A.U., Yukhnevich S.S. // Materials Today: Proceedings «International Conference on Modern Trends in Manufacturing Technologies and Equipment 2020», ICMTMTE 2020». 2021. pp. 1943-1945.

4 Method for Hardening Treatment of Internal Surfaces of Components / G.A. Sukhochev, E.G. Smolyanikova, D.M. Nebolsin // Patent for Invention RU 2491155 C2, 27.08.2013. Application No. 2011106714/02 dated 25.06.2012. Patent holder Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Professional Education «Voronezh State Technical University» (RU).

5 Sukhochev G.A. Technological Support for Increased Service Life of Loaded Surfaces with Complex Profiles / G.A. Sukhochev, S.N. Kodentsev, V.A. Kashizin // Pumps. Turbines. Systems. 2024. No. 4 (53). pp. 23-31.

6 Nekrylov A.M. Hardening and Finishing Treatment of Technologically Difficult-to-Access Flow Channels of Components / A.M. Nekrylov, A.Yu. Grymzin, S.N. Podgornov, V.N. Sokolnikov, G.A. Sukhochev // Science-Intensive Technologies in Mechanical Engineering. 2020. No. 7 (109). pp. 20-23.

7 Nekrylov A.M. Improving Manufacturing Processability of Working Surfaces of Loaded Components by Applying Combined Hardening Treatment / A.M. Nekrylov, A.Yu. Grymzin, S.N. Podgornov, G.A. Sukhochev, S.N. Kodentsev, V.G. Gritskov // Hardening Technologies and Coatings. 2020. Vol. 16. No. 4 (184). pp. 182-186.

8 Sukhochev G.A. Technological Aspects of Manufacturing High-Speed Rotor Components from Fine Powders / G.A. Sukhochev, I.G. Drozdov, E.G. Smolyanikova, A.A. Taskinbaev // Pumps. Turbines. Systems. 2025. No. 4 (57). pp. 7-78.

9 Podgornov S.N. Manufacturability and Quality Indicators of Flow Surfaces after Combined Machining / S.N. Podgornov, A.Yu. Grymzin, S.N. Kodentsev, G.A. Sukhochev // Voronezh Scientific and Technical Bulletin. 2022. No. 4 (42). pp. 22-28.

10 Grymzin A.Yu. Technological Methods for Combined Surface Hardening in the Development of Complex-Shaped Products / A.Yu. Grymzin, S.N. Podgornov, G.A. Sukhochev // Pumps. Turbines. Systems. 2021. No. 2 (39). pp. 73-78.

© Таскинбаев А. А., Сухочев Г. А., Коденцев С. Н.,
Подгорнов С. Н., Смольяникова Е. Г., 2026

DOI: 10.34220/2311-8873-2026-13-24



УДК 621.373.8

UDC 621.373.8

2.5.5 – технология и оборудование механической и физико-технической обработки

КОМПЛЕКСНОЕ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ МЕТОДОВ ЛАЗЕРНОЙ РЕЗКИ МНОГОСЛОЙНЫХ УГЛЕПЛАСТИКОВЫХ КОМПОЗИЦИОННЫХ ПАНЕЛЕЙ

COMPREHENSIVE EXPERIMENTAL STUDY OF LASER CUTTING METHODS FOR MULTILAYER CARBON FIBER COMPOSITE PANELS

Романов Александр Анатольевич, к.т.н., преподаватель кафедры восстановления авиационной техники ВУНЦ ВВС «ВВА», г. Воронеж.

Romanov Alexander Anatolyevich, candidate of technical sciences, teacher at the Air Force Engineering and Aviation Support management department the Air Force «Air Force Academy named after Professor N.E. Zhukovsky and Yu.A. Gagarin», Voronezh.

✉¹ **Трифонов Григорий Игоревич**, к.т.н., заместитель начальника отдела научно-исследовательского ВУНЦ ВВС «ВВА», г. Воронеж, e-mail: i@gtrifonov.ru

✉¹ **Trifonov Grigory Igorevich**, candidate of technical sciences, deputy head of the research department of the Air Force «Air Force Academy named after Professor N.E. Zhukovsky and Yu.A. Gagarin», Voronezh, e-mail: i@gtrifonov.ru

Аннотация. В рамках исследования методов лазерной резки многослойных углепластиковых композитных панелей были проведены эксперименты, целью которых являлась последующая оценка влияния скорости резки, числа проходов, расстояния от лазерной головки до поверхности материала, диаметра сопла, наличия двойной апертуры в сопле и предварительно нанесенной траншеи на качество линейных разрезов. В результате проведенного исследования было установлено, что лазерная резка углепластика, включая траншейную технологию и использование сопла с двойной апертурой, предоставляет возможности для применения волоконного лазера в качестве альтернативы механической резке в процессах восстановления и ремонта деталей, изготовленных из полимерных композитных материалов.

Annotation. As part of the study of laser cutting methods for multilayer carbon fiber composite panels, experiments were conducted to further evaluate the effect of cutting speed, number of passes, distance from the laser head to the surface of the material, nozzle diameter, the presence of a double aperture in the nozzle and a pre-applied trench on the quality of linear cuts. As a result of the research, it was found that laser cutting of carbon fiber, including trench technology and the use of a double-aperture nozzle, provides opportunities for the use of a fiber laser as an alternative to mechanical cutting in the restoration and repair of parts made of polymer composite materials.

Ключевые слова: УГЛЕРОДНОЕ ВОЛОКНО, ПОЛИМЕРНЫЕ КОМПОЗИЦИОННЫЕ МАТЕРИАЛЫ, ПОВРЕЖДЕНИЕ ВОЛОКНА, ЛАЗЕРНАЯ РЕЗКА, ОПТИМИЗАЦИЯ, ВОЛОКОННЫЙ ЛАЗЕР, ВОССТАНОВЛЕНИЕ.

Keywords: CARBON FIBER, POLYMER COMPOSITE, FIBER DAMAGE, LASER CUTTING, OPTIMIZATION, FIBER LASER, RESTORATION.

¹ Автор для ведения переписки

1 Состояние вопроса исследования и актуальность работы

В современном авиастроении, благодаря своим механическим свойствам, углепластик стал заменой существующим материалам. Согласно научным исследованиям [1, 2], углепластик обладает следующими эксплуатационными свойствами: малым весом, высокой прочностью, твердостью, устойчивостью к разрушению и низким тепловым расширением. Отметим, что применение углепластика в авиационной отрасли привело к значительному снижению массы конструкций летательных аппаратов, а следовательно, и расхода топлива.

Было установлено, что замена металлических элементов на композитные материалы может обеспечить сокращение общего веса на 30-40 % и затрат на 30-50 % [1-4]. Следовательно, разработка методов и средств обработки (резки) панелей из углепластика является актуальной задачей.

Для использования углепластика в авиационной промышленности необходимо использовать соответствующую технологию обработки. Из-за неоднородной структуры полимерных композиционных материалов (ПКМ) обычная механическая обработка, например, сверление, фрезерование, распиливание и абразивная водоструйная резка, имеет существенные недостатки, такие как расслоение волокон, вырывание материала, внутренние трещины, износ инструмента, поглощение влаги, а это приводит к ухудшению механических свойств изделия, поскольку увлажненные полимеры становятся мягче и ухудшают адгезию волокон с матрицей эпоксидной смолы [5, 6].

Зачастую для резки углепластика используются два метода: электроэрозионная обработка и проволочная электроэрозионная обработка [7, 8]. Оба метода позволяют вырезать небольшие и сложные формы с высокой точностью и гладкой поверхностью. При этом отмечается, что важно учитывать, как движется инструмент и в каком направлении расположены волокна материала, чтобы точно удалить лишний материал. Высокая плотность тока, используемая в процессах электроэрозионной и проволочной электроэрозионной обработки, может вызывать плавление полимера на поверхности разреза, увеличивая степень негативного влияния на поверхность разреза, тем самым удлиняя протяженность зоны термического воздействия (ЗТВ) на поверхности реза. Чтобы уменьшить непропорциональное плавление поверхности среза требуется низкая сила тока, но при малых значениях силы тока скорость удаления материала составляет 2-5 мм³/мин [9].

В работе [9] авторы предложили альтернативу традиционным процессам обработки изделий из ПКМ, а именно лазерную резку, которая не требует механических усилий и износа инструмента. Благодаря малому размеру пятна луча можно вырезать сложные формы.

Помимо длины волны, лазер характеризуется другими параметрами, включая непрерывное и импульсное излучение. Это два разных типа источников лазерного излучения, которые могут использоваться для лазерной резки. Небольшие размеры ЗТВ могут быть достигнуты с помощью импульсного лазерного излучения благодаря очень малому времени воздействия на обрабатываемую поверхность за один импульс и времени охлаждения материала между импульсами [10, 11]. Однако скорость обработки с помощью импульсного лазерного излучения из-за низкого значения средней мощности, доступной на сегодняшний день, ниже, чем у непрерывного лазера [12]. В исследованиях, моделирующих процесс резки углепластика

с помощью одномерного термического анализа [13-16], определено, что максимальная скорость резки зависит от средней мощности лазерного излучения. Степень повреждения матрицы прямо коррелирует с временной интенсивностью лазерного излучения, которая может быть увеличена посредством повышения средней мощности лазера. Это достигается либо путем модуляции лазерной энергии в виде нескольких коротких импульсов, либо посредством оптического уменьшения размера фокального пятна. В результате глубина лазерной обработки снижается. Важно отметить, что при уменьшении пиковой мощности лазерного излучения вследствие сокращения длительности импульса, средняя мощность и энергия, выделяемая на один импульс, также уменьшаются.

В работе [14] использовали импульсный твердотельный лазер, в качестве активной среды которого используется кристалл алюмо-иттриевого граната ($Y_3Al_5O_{12}$), легированный ионами неодима (Nd^{3+}) (Yttrium Aluminum Garnet, (YAG)). Данный лазер может работать в импульсном режиме с длительностью импульса от 0,5 мс до 50 мс. Также использовали дисковый лазер в непрерывном режиме излучения и в квазинепрерывном режиме CO_2 лазер для исследования качества резки. Было определено, что наименьшая ЗТВ была получена при использовании YAG: Nd-лазера.

В работе [14] авторы провели экспериментальное исследование влияния параметров обработки на ширину реза. ЗТВ и область резания с использованием YAG: Yb-лазера. Сделан вывод, что скорость резки, ширина реза и зона термического воздействия зависят от энергии импульса, которая представляет собой энергию, выделяемую на единицу площади и от охлаждающего эффекта. Также определено, что при многопроходном методе уменьшается и улучшается геометрия ЗТВ и реза, и скорость прохода и направление волокон влияют на ширину реза и величину ЗТВ.

В работе [17] использовали волоконный лазер непрерывного действия для изучения качества резки и полученной поверхности реза с использованием многопроходного и однопроходного методов резки. Сделан вывод, что микротрещины, расслоения, отверстия и нависающие волокна являются основными дефектами, обнаруживаемыми во время лазерной резки углепластика.

Авторами данной работы проводились эксперименты по лазерной резке, в ходе которых исследовалось влияние скорости резки, количества проходов, расстояния от сопла до поверхности разреза, диаметра сопла, наличия сопла двойной апертуры (двойного отверстия) и предварительного нанесения траншеи на степень повреждения волокна, для уменьшения степени повреждения волокна до 100 мкм и скорости резки более 2,5 м/мин. При использовании метода нанесения траншеи и использовании сопла двойной апертуры, которая не исследована в литературе, была достигнута ЗТВ 50 мкм и скорость резания 7,5 м/мин. Качество резки анализировали с помощью сканирующего электронного микроскопа и оптического микроскопа.

При лазерной резке расплавленный материал удаляется с помощью вспомогательного газа, при этом образуется пропилен на определенную глубину. Пропил образуется при более низких плотностях лазерного луча, около $102-103 \text{ Вт/см}^2$ в композитных материалах и 106 Вт/см^2 – в металлах. Металлы достигают расплавленного состояния, а затем испаряются или подвергаются сдвигу. Полимерная матрица в композите в некоторой степени ведет себя аналогичным образом. Она также может разрушаться под воздействием облучения и плазмы. Углеродные волокна могут потребовать более высокой плотности лазерного луча, чем металлы. На кромке прореза процесс разрушения материала вызван сдвигом расплава с использованием реактивного газа, химической деградацией и преобразованием [18]. При перемещении режущей головки образуется тонкий слой нагара из-за плавления и охлаждения материала, который повреждает обрабатываемую поверхность и снижает качество реза. Поэтому для минимизации повреждения волокон и образования нагара необходима оптимизация параметров резки.

2 Материалы и методы

Исследуемый тип углепластика – углерод с модулем упругости 12 кПа. В экспериментах использовались квадратные пластины из углепластика размером 100×100 мм и толщиной 2 мм, состоящие из восьми тонких слоёв ткани из углепластика.

Схема расположения ткани подробно представлена в табл. 1. В качестве матрицы в материале использована эпоксидная смола средней вязкости, состоящая из трёх компонентов: смолы, аминного отвердителя и добавки.

Измерения, используемые для оценки качества лазерной резки:

1. Глубина повреждения волокна.
2. Глубина удаления эпоксидной смолы.
3. Верхнее расслоение.
4. Нижнее расслоение.

Таблица 1 – Схема расположения ткани из углепластика в пластине толщиной 2 мм

Номер слоя	Плотность слоя (г/м ²)
1	150
2	148
3	148
4	150
5	150
6	148
7	148
8	150

Первоначальные испытания проводились с использованием волоконного лазера мощностью 2 кВт. Всего было проведено 84 серии испытаний (по 12 для каждого метода). Результаты предварительных испытаний показали, что скорость резки была очень низкой (0,05 м/мин), однако степень повреждения волокна оказалась менее 100 мкм.

В процессе исследований использовался лазерный станок, содержащий двухкоординатный XY-стол. Станок оснащен защитным окном для наблюдения за лазером, как показано на рис. 1.

Оптическое волокно было присоединено к параллельной и перефокусирующей оптической системе с коэффициентом размытия 1:1 с линзой, регулируемой по высоте и имеющей фокусное расстояние 200 мм. Использовалось сменное сопло с различными апертурами, а технологический газ-аргон подавался сонаправлено с пучком. В ходе экспериментов использовались сопла с одинарным и двойным отверстием. Сопло с двойной апертурой (двойным отверстием) использовалось для более точной корректировки направления газовой струи с целью получения более глубоких разрезов.

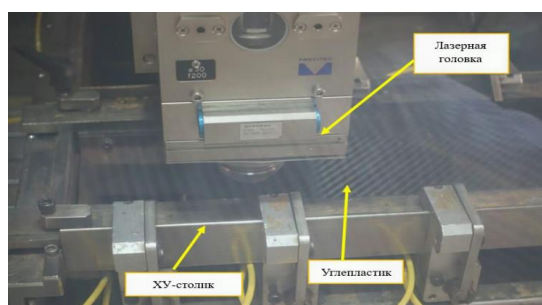


Рисунок 1 – Фокусирующая оптическая лазерная система, размещенная над образцом

Для микроскопического анализа использовались окуляр с 10-кратным увеличением и градуировочной сеткой 100 мкм, микроскоп с 60-100-кратным увеличением и градуировочной сеткой 10 мкм, и USB-микроскоп с 50-кратным увеличением и градуировочной сеткой 50 мкм. Автоэмиссионный анализ проводили с помощью сканирующего электронного микроскопа. Для тепловизионной съемки процесса использовали цифровую тепловизионную камеру Flir с разрешением 320×240 пикселей и температурной чувствительностью 0,1 °С с ручной фокусировкой.

Эксперименты проводились при следующих параметрах: мощность лазера – 1500 Вт, давление газа и расход газа поддерживались постоянными на уровне 16 бар и 126 л/мин. Более детальные параметры экспериментов представлены в табл. 2.

Таблица 2 – Экспериментальные условия проводимых исследований

	Количество испытаний	Отступ, мм	Зазор сопла, мм	Линейная скорость прохода, м/мин	Диаметр сопла, мм	Количество проходов
Многопроходная техника	12	0	1,0	5–10	1,0	2–3
Изменение расстояния от сопла до объекта	12	1–2	1,0	2,5	1,0	1–3
Изменение диаметра сопла	12	1,3	1,0	2,5–12	1,0; 2,0	1–3
Применение канавки	12	1,3	1,0	7,5–15	1–2	1
Применение канавки с двойным проемом	12	1,3	1,0	7,5	2,0; 1,5	1
Использование двойной апертуры сопла	12	1,3	1,0	2,5–10	2,0; 1,5	1–3

Так как температура испарения углеволокна выше, чем у смолы, то резка углепластика занимает больше времени, и это приводит к повреждению волокон. В углепластике волокно имеет высокий коэффициент теплопроводности и проводит тепло быстрее, чем матрица эпоксидной смолы, и это приводит к обширному повреждению волокон.

При многопроходном методе резки материал испаряется лазерным лучом на определённую глубину за один проход. Процесс повторяется до тех пор, пока материал не будет прорезан на всю толщину. При многопроходной технологии снижается риск повреждения волокна, поскольку время между проходами позволяет материалу рассеивать тепло.

Расстояние от сопла до объекта также имеет решающее значение [19, 20]. Оно обеспечивает необходимую плотность энергии на поверхности материала. Расстояние также влияет на структуру потока газа, что напрямую влияет на производительность и качество резки. Сопло подает газ к передней части реза, обеспечивая его соосность с лазерным лучом и стабилизируя давление на образец. Двойное отверстие имеет внешний диаметр 2,0 мм и внутренний диаметр 1,5 мм.

Прокладка траншей осуществляется лазером, путём проведения трёх параллельных линий, расположенных рядом друг с другом. Цель – создание канавки или траншеи, ширина которой превышает ширину канала, проложенного одним лучом. После определения ширины траншеи, ее центр располагается по одной из сторон на верхней поверхности траншеи. После того, как зазор был расширен за два прохода вдоль одной из сторон полученной траншеи, лазерный луч проходит третий раз через центр траншеи. Этот подход обеспечивает лучший доступ к более глубоким слоям материала без воздействия лазера на края углепластика, как показано на рис. 2.

3 Результаты исследований

Были проведены эксперименты для изучения влияния скорости резки на качество полученного прореза. Сводка усреднённых результатов измеренных параметров представлена в табл. 3 при мощности лазера 1,5 кВт, числе проходов 1, диаметре сопла 1,0 мм и давлении вспомогательного газа 16 бар. При таких условиях удалось полностью разрезать углепластик.

Авторами было отмечено, что с увеличением скорости резки повреждение волокон уменьшалось, но увеличивался объем удаленной эпоксидной смолы и отслоение верхнего слоя.

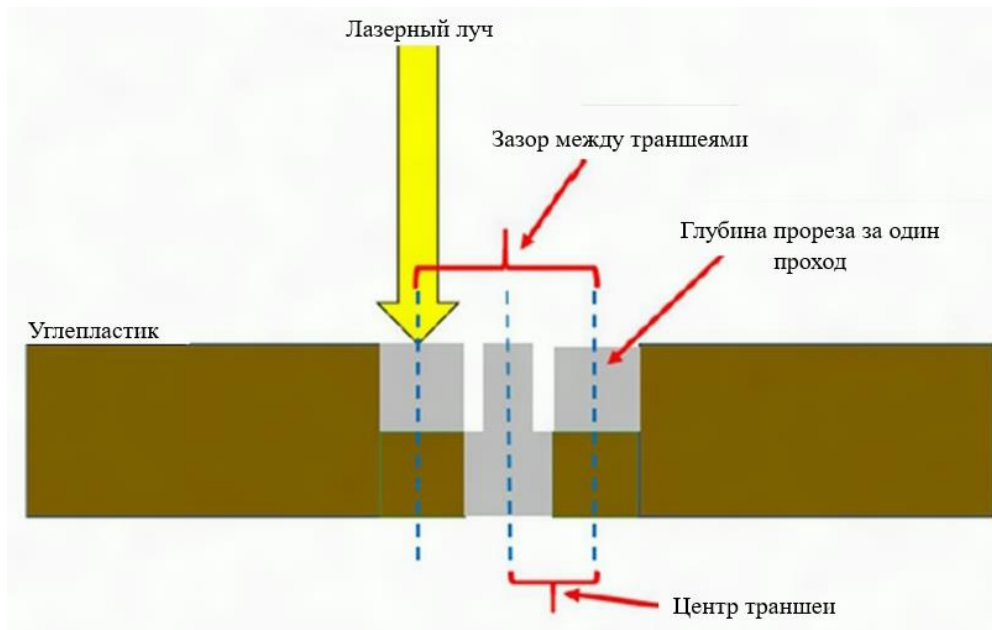


Рисунок 2 – Положение линий реза траншеи относительно центра прореза/траншеи

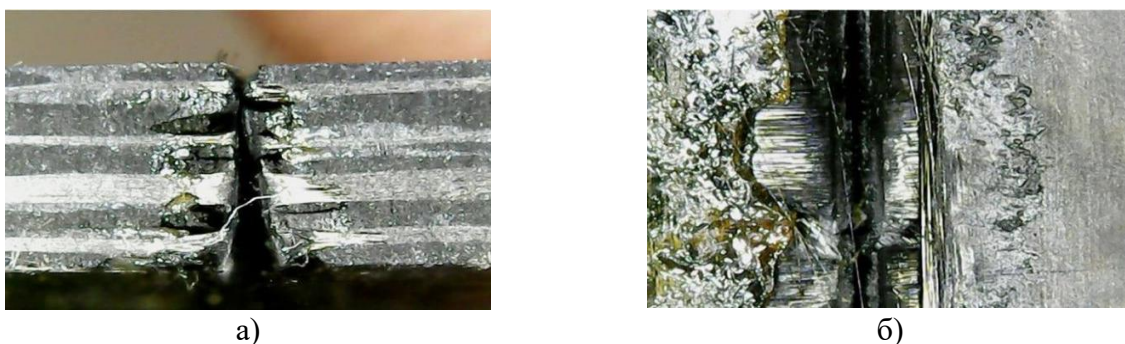
Таблица 3 – Сводка усредненных измеренных параметров

	Скорость резки, м/мин	Степень повреждения волокна, мкм	Степень удаления эпоксидной смолы, мм	Расслоение верхнего слоя, мкм	Расслоение нижнего слоя, мкм	Количество тестов
Многопроходная техника	3,3	89	400	128	60	12
Изменение расстояния от сопла до объекта	2,8	48	312	120	53	12
Изменение диаметра сопла	3,2	99	283	134	88	12
Применение канавки	9,4	31	196	135	102	12
Применение канавки с двойным проемом	3,8	59	157	122	110	12
Использование двойной апертуры сопла	2,8	75	396	139	82	12

В ходе экспериментов наблюдалось значительное истирание поверхности углепластика как снизу, так и сверху, как показано на рис. 3. Это объясняется неплотным плетением образцов с большим расстоянием между узлами. Кромки истирающихся волокон видны на кадрах с микроскопа и представлены на рис. 4. Результаты также подтверждены снимком, полученным с помощью электронного микроскопа и представлены на рис. 5.



Рисунок 3 – Образец тестовых резов углепластика при скорости резки 2,5 м/мин



а)

б)

а – вид сбоку, *б* – вид сверху

Рисунок 4 – Микроскопическое изображение испытаний с использованием 1 прохода при скорости резки 2,5 м/мин с давлением газа 16 бар через газовое сопло 1 мм



Рисунок 5 – Микрофотография с электронного микроскопа

Эффект многопроходного метода резки исследовался путем увеличения количества проходов до 2 и 3. С каждым шагом скорость прохода также пропорционально увеличивалась для поддержания общей скорости резки 2,5 м/мин. Второй и третий проходы – скорость 5 м/мин и 7,5 м/мин соответственно. В моменте было зафиксировано, что с ростом числа проходов наблюдалось снижение степени повреждения волокон и расслоения верхнего слоя. При этом линейная скорость дополнительно увеличена до 10 м/мин, что привело к уменьшению глубины повреждения волокон, уменьшению глубины расслоения верхнего слоя и уменьшению глубины удаления эпоксидной смолы, в то время как расслоение нижнего слоя увеличилось на 60 мкм. Повреждение, возможно, вызвано во время 3-го прохода, когда сжатый газ и перегрев лазерным излучением вытесняют нижний слой волокон из стабильного положения.

При скорости прохода 10 м/мин и количестве проходов, установленном на 2, измеренные характеристики улучшаются, за исключением степени удаления эпоксидной смолы, которая достигает глубины 180 мкм.

На рис. 6 показан образец, разрезанный при скорости резки 2,5 м/мин с 3 проходами и без истирания верхнего слоя. На рис. 7 показана микрофотография, полученная с помощью электронного микроскопа, со степенью повреждения волокна на глубину 65,6 мкм. Оптимизация изменения расстояния от сопла до объекта не привела к заметному улучшению измеряемых характеристик. Однако наблюдалось некоторое визуальное улучшение ориентации волокон и расслоения. Микрофотографии, полученные с помощью электронного микроскопа при резке со скоростью 2,5 м/мин, показали повреждения волокон на глубину 42,3 мкм.

Размер отверстия сопла был увеличен с 1,0 до 2,0 мм. Однако это не привело к существенному улучшению измеряемых характеристик, а глубина повреждения волокон и расслоение нижнего слоя увеличились в 1,5 и 2 раза соответственно. На рис. 8 представлена фотография опытного образца, разрезанного соплом 2,0 мм и тремя проходами, где видно значительно меньшее истирание верхнего слоя.

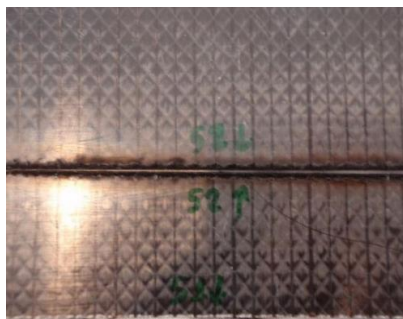


Рисунок 6 – Контрольный разрез без истирания верхнего слоя

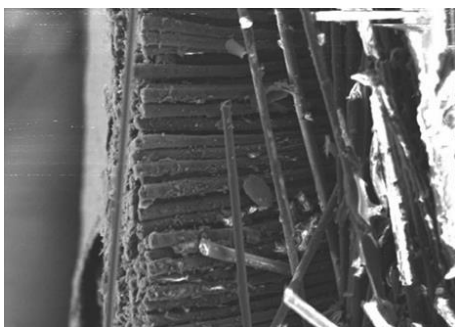


Рисунок 7 – Микрофотография, полученная с помощью электронного микроскопа, со степенью повреждения волокна при 65,6 мкм



Рисунок 8 – Результат обработки углепластика с использованием сопла диаметром 2 мм и 3-мя проходами

Повреждение волокон достигало глубины 30-80 мкм при использовании сопла двойной апертуры. Глубина удаления эпоксидной смолы снизилась в среднем до 157 мкм. Это сравнительно меньше среднего значения глубины удаления эпоксидной смолы, равной 341 мкм для резки с использованием сопла диаметром 2,0 мм и глубины 345 мкм с использованием сопла диаметром 1,0 мм. Сопло двойной апертуры создает поток воздуха под высоким давлением, направленный вниз на поверхность, и уменьшает количество воздуха, направляемого в сторону. Это снижает давление, отталкивающее верхний слой эпоксидной смолы от лазерного излучения или потока газа во время обработки.

Для испытаний использовались два размера зазора между траншеями: 50 мкм и 100 мкм при высокой скорости прохода 15 м/мин. Однако установленная скорость прохода не обеспечила получения разреза у образца толщиной 2 мм. Полные разрезы были успешно реализованы при значительно сниженной скорости проходки, составляющей 7,5 метров в минуту. При этом удовлетворительные результаты по уменьшению глубины повреждения волокон были достигнуты при диаметре сопла 1,0 мм и зазоре между траншеями в 100 мкм. Зазор между траншеями 50 мкм дал лучшие результаты с точки зрения глубины удаления эпоксидной смолы 55 мкм. При использовании метода траншеи был сделан вывод о том, что средняя глубина повреждения волокна составила 31 мкм, а глубина удаления эпоксидной смолы – 196 мкм по сравнению с другими методами.

Глубина удаления эпоксидной смолы была уменьшена с помощью сопла двойной апертуры, достигнув значения 157 мкм по сравнению со средним значением 308 мкм без сопла двойной апертуры. Минимальная достигнутая глубина удаления эпоксидной смолы составила 110 мкм с траншеей и 130 мкм без траншеи.

Было отмечено, что увеличение скорости обработки за счёт большего количества проходов может уменьшить глубину удаления эпоксидной смолы и параметры отслоения верхнего слоя. Это обусловлено малым временем пребывания луча над облучаемой областью в процессе обработки, что позволяет материалу рассеивать тепло до того, как лазерный луч нанесет ему какой-либо ущерб до следующего прохода.

Таким образом, многопроходный метод резки обеспечивает подачу одинакового количества энергии на облучаемую область в течение более длительной продолжительности общего времени обработки, что снижает плотность энергии, выделяемой на обрабатываемую поверхность за единицу времени при каждом проходе.

4 Обсуждение и заключение

В экспериментальном исследовании было проанализировано влияние различных параметров процесса лазерной резки на качество поверхности углепластика. Был сделан вывод о том, что изменение параметров материала во время резки обусловлено плетением углеволокна, особенно в верхнем и нижнем слоях, где материал подвергается значительному истиранию при обработке. Можно использовать многопроходный метод, выполняя каждый проход с эквивалентно более высокой скоростью. Фактически, при таком подходе и пропорциональном увеличении скорости, можно получить преимущество в скорости резки без потери качества резки. Обнаружено, что многопроходный метод резки углепластика с тремя проходами значительно снижает истирание верхнего и нижнего слоев и улучшает качество резки, независимо от того, обрабатывались ли они соплами с большим или малым диаметром, а также соплом с двойным отверстием. Резка, выполненная с использованием одного прохода, не достигает требуемой скорости резки и приводит к повреждению волокон.

Испытания, проведенные с использованием одного прохода, повредили волокна на глубину более 100 мкм. Дальнейшие испытания с использованием одного прохода были проведены с различными расстояниями от поверхности материала до лазера, и повреждение волокна на глубину менее 70 мкм было достигнуто при скорости резки от 2,5 м/мин до 3,5 м/мин. Резка с использованием траншеи обеспечивает стабильное качество резки. Траншейная резка или

обработка с использованием двух апертур (двойного отверстия) обеспечивает низкую степень повреждения волокна: глубина менее 100 мкм, в среднем глубина около 50 мкм. Также было отмечено, что температура образца не превышает 100 °С. Лазерная резка углепластика как траншейная, так и с использованием сопла двойной апертуры открывают возможности для использования волоконного лазера в качестве замены механической резке в процессах ремонта и восстановления деталей авиационной техники из ПКМ, обеспечивая более высокую точность, производительность и значительное снижение экономических затрат.

Список литературы

- 1 Галиев, Л.С. Оценка конкурентных преимуществ композиционных материалов в строительных конструкциях / Л.С. Галиев, В.В. Полити, В.С. Канхва // Отходы и ресурсы. – 2022. – Т. 9. – № 3. URL: <https://resources.today/PDF/19ECOR322.pdf> DOI: 10.15862/19ECOR322.
- 2 Dudarev, A. S. Study of thermophysics during diamond drilling of fibreglass and carbon fibre-reinforced polymer composites / A. S. Dudarev, E. Kh. Gumarov // Proceedings of Irkutsk State Technical University. – 2021. – Vol. 25. No. 3(158). – P. 290-299. – DOI 10.21285/1814-3520-2021-3-290-299.
- 3 Pasechnik, K. A. Numerical and experimental study on CFRP structure optimization for coefficient of thermal expansion / K. A. Pasechnik, I. V. Obvertkin, A. Y. Vlasov // PNRPU Mechanics Bulletin. – 2023. – No. 3. – P. 114-123. – DOI 10.15593/perm.mech/2023.3.10.
- 4 Chashchin, N. S. Optimisation of the bore reaming process in hybrid stacks made of carbon fibre and metal alloys / N. S. Chashchin // iPolytech Journal. – 2022. – Vol. 26. No. 1. – P. 35-42. – DOI 10.21285/1814-3520-2022-1-35-42.
- 5 Раскутин, А.Е. Технологические особенности механообработки композиционных материалов при изготовлении деталей конструкций // А.Е. Раскутин, А.В. Хрульков, Р.И. Гирш // Труды ВИАМ. – 2016. – №9. URL: <https://dx.doi.org/10.18577/2307-6046-2016-0-9-12-12>.
- 6 Stress-deformable state of glass during waterjet cutting / G.M. Bazenov, G.T. Itybayeva, R.B. Kussainov [et al.] // Science and Technology of Kazakhstan. 2023. No. 3. – P. 93-101. DOI 10.48081/GOJT6833.
- 7 Алтынбаев А.К. Электроэрозионные методы обработки глубоких прецизионных отверстий в деталях авиационных двигателей / А.К. Алтынбаев, В.А. Гейкин // Металлообработка. – 2003. – № 6 (18). – С. 47-49.
- 8 Сабельников, Б. Н. Композитные материалы в строительстве: стеклопластик и углепластик / Б. Н. Сабельников, А. В. Шлеенко, Н. М. О. Алиев // БСТ: Бюллетень строительной техники. – 2025. – № 9(1093). – С. 56-58.
- 9 Петров М.Г. Влияние низких температур и влаги на прочностные свойства углепластика / М.Г. Петров, М.П. Лебедев, О.В. Старцев, М.М. Копырин // Доклады Российской академии наук. Химия, науки о материалах. – 2021. – Т. 500. – № 1. – С. 62-68.
- 10 Либенсон М.Н., Яковлев Е.Б., Шандыбина Г.Д. Взаимодействие лазерного излучения с веществом (силовая оптика). Часть II. Лазерный нагрев и разрушение материалов. Учебное пособие. Под общей редакцией В.П. Вейко – СПб: НИУ ИТМО. –2014. – 181 с.
- 11 Chashchin, N. S. Optimisation of the bore reaming process in hybrid stacks made of carbon fibre and metal alloys / N. S. Chashchin // iPolytech Journal. 2022. Vol. 26. No. 1. – P. 35-42. – DOI 10.21285/1814-3520-2022-1-35-42.
- 12 Борейшо А.С., Ивакин С.В. Лазеры: устройство и действие: Учебное пособие. – СПб.: Издательство «Лань». – 2016. – 304 с.
- 13 Мазеин П.Г. Применение станков лазерной резки: учебное пособие / П.Г. Мазеин, М.Р. Ахметов, С.Р. Сайфутдинов // Челябинск: Издательский центр ЮУрГУ. 2011. – 106 с.
- 14 Григорьянц А.Г. Теоретические основы лазерной обработки / А.Г. Григорьянц, И.Н. Шиганов, А.И. Мисюров // Под редакцией А.Г. Григорьянца. Москва: Издательство МГТУ им. Н.Э. Баумана. – 2022. – 286 с.
- 15 Bogachkov, I. V. Identification of single-mode optical fiber types and determination of the parameters of their longitudinal strain / I. V. Bogachkov // T-Comm. – 2023. – Vol. 17. - No. 11. – P. 51-57. – DOI 10.36724/2072-8735-2023-17-11-51-57.

16 Rimshin, V. I. Strengthening of reinforced concrete structures by composite materials taking into consideration the carbonization of concrete / V. I. Rimshin, P. S. Truntov // *Structural Mechanics of Engineering Constructions and Buildings*. – 2023. – Vol. 19. - No. 2. – P. 178-185. – DOI 10.22363/1815-5235-2023-19-2-178-185.

17 Галиновский А.Л. Новые методы и технологии обработки углепластиков / А.Л. Галиновский, Цзя Чженьюань, С.Н. Цыпышева, К. А. Терновских, С.А. Рябенкова, С.А. Ерохин // *Справочник. Инженерный журнал с приложением*. – 2021. – № 8. – С. 10-19.

18 Богданов А.В. Волоконные технологические лазеры и их применение [Электронный ресурс]: учебное пособие для вузов // А.В. Богданов, Ю.В. Голубенко. 5-е изд., стер. – Санкт-Петербург: Лань. – 2023. – 236 с.

19 Trifonov G.I. Surface Restoration of Metal Parts by Plasma Spraying of Powder / G.I. Trifonov, S.Yu. Zhachkin, I.N. Kravchenko // *Russian Engineering Research*. 2025. Vol. 45. No. 5. – P. 635-640.

20 Panov, D. I. Laser Processing of Gallium Oxide Crystals in the Preparation of Samples for Microelectronics / D. I. Panov, V. A. Spiridonov, O. S. Vasilev [et al.] // *Reviews on Advanced Materials and Technologies*. 2025. Vol. 7. No. 3. – P. 198-202. – DOI 10.17586/2687-0568-2025-7-3-198-202.

References

1 Galiev, L.S. Evaluation of Composite Materials' Competitive Advantages in Building Structures / L.S. Galiev, V.V. Politi, V.S. Kankhva // *Waste and Resources*. - 2022. - Vol. 9. - No. 3. URL: <https://resources.today/PDF/19ECOR322.pdf> DOI: 10.15862/19ECOR322.

2 Dudarev, A. S. Study of Thermophysics during Diamond Drilling of Fiberglass and Carbon Fiber-Reinforced Polymer Composites / A. S. Dudarev, E. Kh. Gumarov // *Proceedings of Irkutsk State Technical University*. - 2021. - Vol. 25. No. 3(158). - P. 290-299. – DOI 10.21285/1814-3520-2021-3-290-299.

3 Pasechnik, K. A. Numerical and experimental study on CFRP structure optimization for coefficient of thermal expansion / K. A. Pasechnik, I. V. Obvertkin, A. Y. Vlasov // *PNRPU Mechanics Bulletin*. – 2023. – No. 3. – P. 114-123. – DOI 10.15593/perm.mech/2023.3.10.

4 Chashchin, N. S. Optimization of the bore reaming process in hybrid stacks made of carbon fiber and metal alloys / N. S. Chashchin // *iPolytech Journal*. – 2022. – Vol. 26.No. 1. – P. 35-42. – DOI 10.21285/1814-3520-2022-1-35-42.

5 Raskutin, A.E. Technological Features of Mechanical Processing of Composite Materials in the Manufacturing of Structural Parts // A.E. Raskutin, A.V. Khrulkov, R.I. Girsh // *Proceedings of VIAM*. – 2016. – No. 9. URL: <https://dx.doi.org/10.18577/2307-6046-2016-0-9-12-12>.

6 Stress-deformable state of glass during waterjet cutting / G.M. Bazenov, G.T. Itybayeva, R.B. Kussainov [et al.] // *Science and Technology of Kazakhstan*. 2023. No. 3. – P. 93-101. DOI 10.48081/GOJT6833.

7 Altynbaev A.K. Electrical discharge methods for machining deep precision holes in aircraft engine parts / A.K. Altynbaev, V.A. Geikin // *Metalworking*. - 2003. - No. 6 (18). - P. 47-49.

8 Sabelnikov, B.N. Composite materials in construction: fiberglass and carbon fiber / B.N. Sabelnikov, A.V. Shleenko, N.M.O. Aliyev // *BST: Bulletin of construction equipment*. - 2025. - No. 9 (1093). - P. 56-58.

9 Petrov M.G. Influence of low temperatures and moisture on the strength properties of carbon fiber / M.G. Petrov, M.P. Lebedev, O.V. Startsev, M.M. Kopyrin // *Reports of the Russian Academy of Sciences. Chemistry, Materials Science*. - 2021. - Vol. 500. - No. 1. - Pp. 62-68.

10 Libenson M.N., Yakovlev E.B., Shandybina G.D. Interaction of Laser Radiation with Matter (Power Optics). Part II. Laser Heating and Destruction of Materials. Tutorial. General editor V.P. Veiko - St. Petersburg: NRU ITMO. -2014. - 181 p.

11 Chashchin, N. S. Optimization of the Bore Reaming Process in Hybrid Stacks Made of Carbon Fiber and Metal Alloys / N. S. Chashchin // *iPolytech Journal*. 2022. Vol. 26. No. 1. - Pp. 35-42. – DOI 10.21285/1814-3520-2022-1-35-42.

12 Boreysho A.S., Ivakin S.V. Lasers: device and operation: Textbook. – St. Petersburg: Lan Publishing House. – 2016. – 304 p.

13 Mazein P.G. Application of laser cutting machines: textbook / P.G. Mazein, M.R. Akhmetov, S.R. Saifutdinov // Chelyabinsk: Publishing center of SUSU. 2011. – 106 p.

14 Grigoryants A.G. Theoretical foundations of laser processing / A.G. Grigoryants, I.N. Shiganov, A.I. Misyurov // Edited by A.G. Grigoryants. Moscow: Publishing house of MSTU im. N.E. Bauman. – 2022. – 286 p.

15 Bogachkov, I. V. Identification of single-mode optical fiber types and determination of the parameters of their longitudinal strain / I. V. Bogachkov // T-Comm. – 2023. – Vol. 17. - No. 11. – P. 51-57. – DOI 10.36724/2072-8735-2023-17-11-51-57.

16 Rimshin, V. I. Strengthening of reinforced concrete structures by composite materials taking into consideration the carbonization of concrete / V. I. Rimshin, P. S. Truntov // Structural Mechanics of Engineering Constructions and Buildings. – 2023. – Vol. 19. - No. 2. – P. 178-185. – DOI 10.22363/1815-5235-2023-19-2-178-185.

17 Galinovsky A.L. New methods and technologies for processing carbon fiber reinforced plastics / A.L. Galinovsky, Jia Zhenyuan, S.N. Tsypysheva, K. A. Ternovskikh, S.A. Ryabenkova, S.A. Erokhin // Handbook. Engineering journal with supplement. – 2021. – No. 8. – P. 10-19.

18 Bogdanov A.V. Fiber technological lasers and their application [Electronic resource]: a textbook for universities // A.V. Bogdanov, Yu.V. Golubenko. 5th ed., reprinted. – St. Petersburg: Lan. – 2023. – 236 p.

19 Trifonov G.I. Surface Restoration of Metal Parts by Plasma Spraying of Powder / G.I. Trifonov, S. Yu. Zhachkin, I.N. Kravchenko // Russian Engineering Research. 2025. Vol. 45.No. 5. – P. 635-640.

20 Panov, D. I. Laser Processing of Gallium Oxide Crystals in the Preparation of Samples for Microelectronics / D. I. Panov, V. A. Spiridonov, O. S. Vasilev [et al.] // Reviews on Advanced Materials and Technologies. 2025. Vol. 7.No. 3. – P. 198-202. – DOI 10.17586/2687-0568-2025-7-3-198-202.

© Романов А. А., Трифонов Г. И., 2026



2.5.6 – технология машиностроения

**ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ
ОПРЕДЕЛЕНИЕ ВЛИЯНИЯ
ИЗМЕНЕНИЯ ЭФФЕКТИВНОЙ
ЭЛЕКТРОПРОВОДНОСТИ
ЭЛЕКТРОЛИТА И ВЫХОДА ПО ТОКУ
МЕТАЛЛА НА ЛОГАРИФМИЧЕСКИЙ
ИНДЕКС РАССЕИВАНИЯ
ПРИ ЭЛЕКТРОХИМИЧЕСКОЙ
РАЗМЕРНОЙ ОБРАБОТКЕ**

**EXPERIMENTAL DETERMINATION OF
THE IMPACT ON CHANGES
IN THE EFFECTIVE ELECTRICAL
CONDUCTIVITY OF THE ELECTROLYTE
AND THE METAL CURRENT
EFFICIENCY ON THE LOGARITHMIC
DISPERSION INDEX DURING
ELECTROCHEMICAL MACHINING**

Болдырев Александр Александрович,
к.т.н., доцент кафедры технологии машино-
строения, Воронежский государственный
технический университет, г. Воронеж,
e-mail: alexboldyrev@yandex.ru

Boldyrev Alexander Aleksandrovich,
candidate of technical sciences, associate professor of
the department of mechanical engineering technol-
ogy, Voronezh state technical university, Voronezh,
e-mail: alexboldyrev@yandex.ru

Григораш Владимир Васильевич,
к.т.н., доцент кафедры металлических и
деревянных конструкций, Воронежский
государственный технический университет,
г. Воронеж.

Grigorash Vladimir Vasilyevich,
candidate of technical sciences, associate professor of
the department of metal and wooden structures,
Voronezh state technical university, Voronezh.

Болдырев Александр Иванович,
д.т.н., профессор кафедры технологии маши-
ностроения, Воронежский государственный
технический университет, г. Воронеж.

Boldyrev Alexander Ivanovich,
doctor of technical sciences, professor of the de-
partment of mechanical engineering technology,
Voronezh state technical university, Voronezh.

Падурец Анна Александровна,
магистр кафедры технологии машиностро-
ения, Воронежский государственный техниче-
ский университет, г. Воронеж.

Padurets Anna Alexandrovna,
master's student of the department of mechanical
engineering technology, Voronezh state technical
university, Voronezh.

✉¹ **Перова Алла Владимировна,**
к.т.н., доцент кафедры технологии машино-
строения, Воронежский государственный
технический университет, г. Воронеж,
e-mail: pva7@mail.ru

✉¹ **Perova Alla Vladimirovna,**
candidate of technical sciences, associate professor of
the department of mechanical engineering technol-
ogy, Voronezh state technical university, Voronezh,
e-mail pva7@mail.ru

Аннотация. Статья посвящена изучению
вопросов электрохимической размерной
обработки. Показано, что при высокоско-
ростном анодном растворении никеля,
хрома и сплавов ХН78Т и ХН77ТЮРУ в
растворах NaCl, NH₄Cl, NaNO₃, NH₄NO₃,

Annotation. The article is devoted to studying is-
sues of electrochemical machining. It is shown
that during high-speed anodic dissolution
of nickel, chromium, and alloys
ХН78Т and ХН77ТЮРУ in solutions of
NaCl, NH₄Cl, NaNO₃, NH₄NO₃, NaClO₃, the

NaClO₃ основными факторами, определяющими логарифмический индекс рассеивания, являются изменение эффективной электропроводности электролита с изменением межэлектродного зазора и изменении выхода по току с плотностью тока.

main factors determining the logarithmic dispersion index are the change in the effective electrical conductivity of the electrolyte with the change in the interelectrode gap and the change in current efficiency with current density.

Ключевые слова: ЭЛЕКТРОХИМИЧЕСКАЯ РАЗМЕРНАЯ ОБРАБОТКА, ЛОГАРИФМИЧЕСКИЙ ИНДЕКС РАССЕЙВАНИЯ, ЭЛЕКТРОПРОВОДНОСТЬ ЭЛЕКТРОЛИТА, ВЫХОД ПО ТОКУ МЕТАЛЛА.

Keywords: ELECTROCHEMICAL MACHINING, LOGARITHMIC DISPERSION INDEX, ELECTROLYTE CONDUCTIVITY, METAL CURRENT EFFICIENCY.

¹ Автор для ведения переписки

1 Состояние вопроса исследования и актуальность работы

Развитие электрохимической размерной обработки (ЭХРО) вызвало необходимость более глубокого понимания причин и факторов, определяющих точность формообразования, которая в значительной степени зависит от электрохимических свойств пары металл – рабочая среда (электролит).

Одним из путей повышения точности может являться снижение рассеивающей способности электролита (РСЭ). Используемые в практике электроосаждения уравнения для оценки РСЭ (Хэринга – Блюма, Филда, Хитлея – Пэна) дают различные числовые значения, и, что более существенно, эти значения изменяются с изменением линейного соотношения L [1, 2]. В своих работах Д.-Т. Чин показал, что зависимость весового отношения M от линейного наилучшего образа описывается функцией вида [3]:

$$M = L^{1/A}. \quad (1)$$

где $A = \lg L / \lg M$ – логарифмический индекс рассеивания (ЛИР).

Учитывая, что

$$M = v_{p0}/v_p \quad \text{и} \quad L = \delta/\delta_0, \quad (2)$$

где $v_p = d\delta/dt$ – скорость растворения; t – время; δ – текущий межэлектродный зазор (МЭЗ), мм; v_{p0} и δ_0 – скорость растворения и МЭЗ в начальный момент времени.

Сравнение линейного [4] и ЛИР показало, что последний лучше согласуется с экспериментальными данными [5].

Определение РСЭ при ЭХРО осложняется быстрым изменением условий анодного растворения (величины зазора, скорости потока электролита и т.д.) Предложен простой способ измерения РСЭ в условиях высоких плотностей тока, характерных для ЭХРО, на основе регистрации кривых «зазор – время» и использовании ЛИР [3].

После ряда преобразований из формулы (1) получено

$$t = (L^n - 1)\delta_0/v_{p0}n, \quad (3)$$

где $n = \frac{1}{A} + 1$.

Из выражения (3) следует, что зависимость t от L^n линейна. Численное значение n может быть найдено методом проб и ошибок либо графическим дифференцированием кривой

$L - t$. Очевидно, что регистрация изменения МЭЗ во времени – простой и эффективный способ измерения РСЭ в условиях ЭХРО. Полученная таким образом информация может быть непосредственно использована для расчета электрода-инструмента для ЭХРО.

Настоящая работа посвящена выяснению причин, определяющих ЛИР – количественный критерий РСЭ при ЭХРО – в зависимости от условий электролиза: изменения эффективной электропроводности электролита и выхода по току металла в функции от плотности тока.

2 Материалы и методы

В качестве объектов исследования были выбраны никель и хром, являющиеся основными легирующими компонентами ряда жаропрочных сплавов, а также стали ХН78Т (ГОСТ 25054-81) и ХН77ТЮРУ (ГОСТ 23705-79). В качестве электролитов для ЭХРО использовались водные растворы хлористого натрия ($NaCl$), хлорида аммония (NH_4Cl), нитрата натрия ($NaNO_3$), нитрата аммония (NH_4NO_3), хлората натрия ($NaClO_3$), концентрации которых обеспечивали постоянную электропроводность $\kappa = 0,170 \text{ Ом}^{-1} \cdot \text{см}^{-1}$ при температуре $25 \pm 1^\circ \text{C}$.

Измерения проводились на экспериментальной установке, описанной в работах [6, 7] и изготовленной на Воронежском механическом заводе, на вращающемся дисковом электроде с изолированной боковой поверхностью, обтекаемом потоком электролита, при плотности тока $20-50 \text{ А/см}^2$. В отличие от работы [3] выход металлу по току η определялся гравиметрически при одновременной регистрации плотности тока.

Для выполнения предпосылок идеального процесса электрохимического формообразования (постоянства выхода по току металла, электропроводности электролита и величин электродных потенциалов) зависимость МЭЗ от времени для двух плоскопараллельных электродов определялась по зависимости [8, 9]

$$\delta = \sqrt{\delta_0^2 + (2\varepsilon\delta_0 j_0 t)/\gamma}, \quad (4)$$

где δ и δ_0 зазоры, мм; ε – электрохимический эквивалент металла, г/(А·час); γ – плотность металла г/мм³; j_0 – начальная плотность тока, А/мм²; t – время, час.

С учетом выражения (2) время обработки составляло

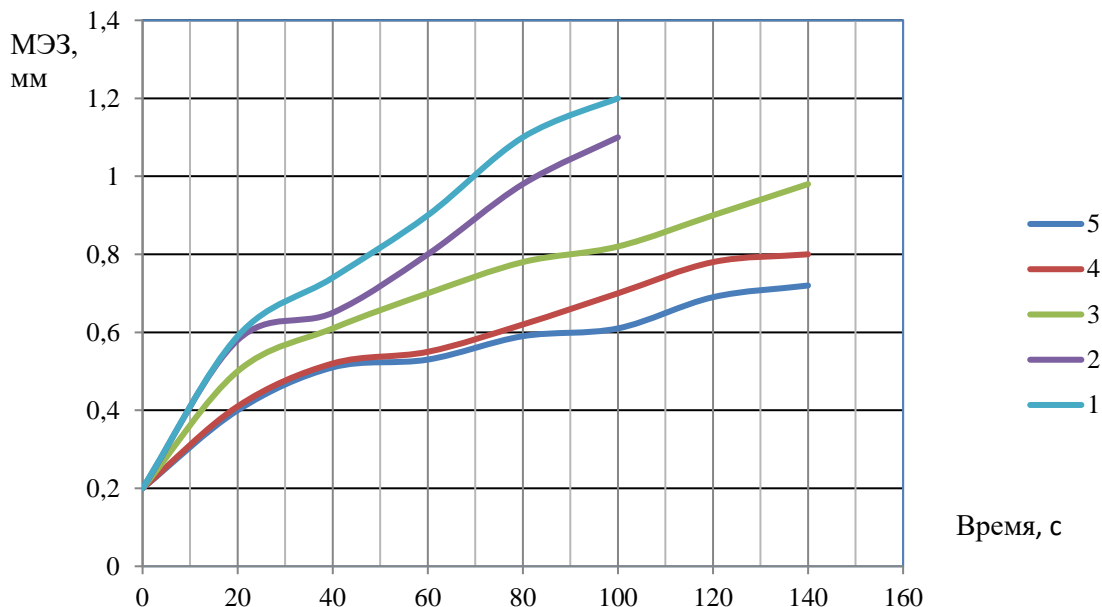
$$t = [\delta_0(L^2 - 1)]/2v_{p0}, \quad (5)$$

где $v_{p0} = \varepsilon j_0 / \gamma$.

Следовательно, для данного случая $A = 1/(n - 1) = 1$.

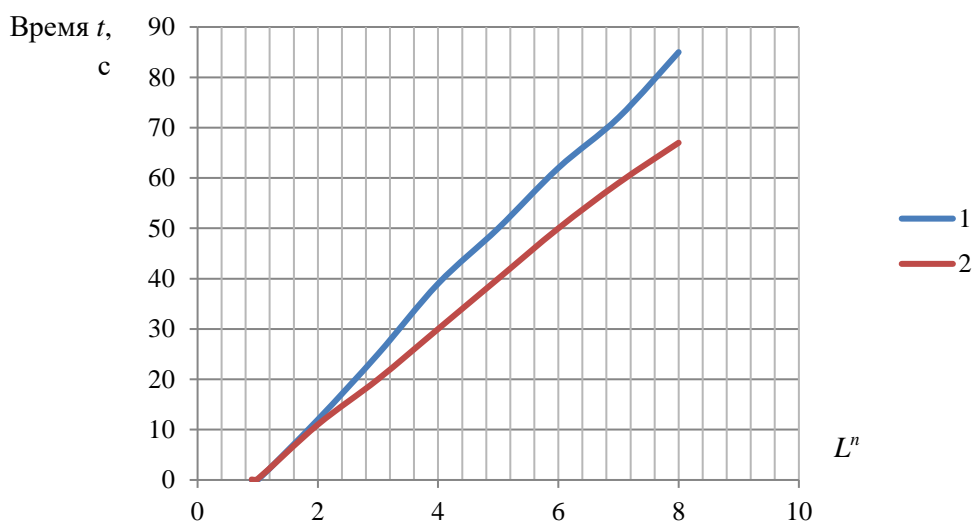
3 Результаты исследований

При растворении хрома ($U = 15 \text{ В}$, $\delta_0 = 0,3 \text{ мм}$, скорость течения электролита $W = 5,4 \text{ м/с}$) измеренные значения зазора превышают расчетные (рис. 1). Значения A , найденные для этих условий (рис. 2 и табл. 1 и 2), заметно отличаются от единицы, что обусловлено отклонениями реальных режимов от идеальных условий обработки. Причиной такого отклонения может быть изменение эффективной электропроводности электролита в процессе электролиза. Расчеты показывают, что разогрев электролита в МЭЗ за счет выделения джоулева тепла при заданной скорости протока весьма мал, и, следовательно, изменением электропроводности по этой причине можно пренебречь. Вероятно, основной причиной изменения электропроводности является переменное во времени газонаполнение в МЭЗ.



1-3 – никель; 4, 5 – хром;
 1, 2 – раствор NH_4Cl (90 г/л); 3, 5 – раствор NH_4NO_3 (150 г/л);
 2, 5 – расчетные значения по формуле (4); 1, 3, 4 – экспериментальные кривые,
 полученные при постоянной скорости течения электролита

Рисунок 1 – Изменение зазора от времени анодного растворения



1 – при постоянной скорости течения электролита ($n = 1,6$; $A = 1,6$);
 2 – при переменной скорости течения электролита ($n = 2,0$; $A = 1,0$)

Рисунок 2 – Расчетная зависимость $t - L^n$ для анодного растворения никеля
 в растворе NH_4Cl (90 г/л)

Во второй серии экспериментов по анодному растворению хрома скорость течения электролита в МЭЗ изменялась обратно пропорционально изменению величины зазора с целью поддержания постоянства электропроводности электролита ($W = 7,5$ м/с). Эффективная электропроводность при этом поддерживалась постоянной и равной $\kappa = 0,105 \text{ Ом}^{-1} \cdot \text{см}^{-1}$. В этом случае имелось хорошее согласование экспериментальных и расчетных данных, а величина A равнялась единице (табл. 1 и 2, рис. 1 и 2).

Таблица 1 – Значения логарифмического индекса рассеивания A и выхода металла по току η при постоянной скорости течения электролита

Металл	Параметр	$NaCl$ 150 г/л	NH_4Cl 90 г/л	$NaNO_3$ 330 г/л	NH_4NO_3 150 г/л	$NaClO_3$ 450 г/л
Хром	A	1,67	1,25	1,43	1,43	1,43
	η	1,02	1,01	1,02	0,99	1,01
Никель	A	1,43	1,67	1,25	0,50	1,43
	η	0,98	0,95	0,87-0,96	0,28-0,75	1,05
ХН78Т	A	1,43	1,43	1,54	1,67	1,43
	η	1,18	1,16	0,99	1,00	0,97
ХН77ТЮРУ	A	1,43	1,43	1,43	1,43	1,43
	η	1,07	1,10	1,05	1,03	1,01

Таблица 2 – Значения логарифмического индекса рассеивания A и выхода металла по току η при переменной скорости течения электролита

Металл	Параметр	$NaCl$ 150 г/л	NH_4Cl 90 г/л	$NaNO_3$ 330 г/л	NH_4NO_3 150 г/л
Хром	A	1,00	1,00	1,00	1,00
	η	1,04	1,00	1,01	1,01
Никель	A	1,00	1,00	1,25	1,00
	η	0,96	0,96	0,94	0,73
ХН78Т	A	1,00	1,00	1,00	1,00
	η	1,20	1,16	0,99	0,97
ХН77ТЮРУ	A	0,91	0,91	1,00	1,11
	η	1,07	1,11	1,03	1,03

Аналогичные измерения были проведены при анодном растворении никеля. В хлоридных растворах растворение никеля происходит с выходом по току η , равным 0,96 и не зависящим от плотности тока. Подобно хрому никель при поддержании постоянной эффективной электропроводности дает $A = 1$, а при постоянной скорости потока РСЭ возрастает. В пассивирующих электролитах (нитратных и хлоратных) растворение происходит в транспассивной области с одновременным выделением кислорода, а η возрастает с увеличением плотности тока. В растворе NH_4NO_3 (150 г/л) η изменялся от 0,28 до 0,75 при изменении плотности тока от 26 до 46 А/см² ($W = 5,4$ м/с). В этом случае $A = 0,5$. В растворе $NaNO_3$ (330 г/л) изменение η практически в том же интервале плотностей тока (23-49 А/см²) достаточно мало (0,87-0,96) и A снижается незначительно. При $U = 8$ В (в табл. 1 и 2 приведены данные, полученные только при $U = 15$ В) в интервале $j = 10-21$ А/см² происходит большее снижение A (до 0,8) вследствие более резкого выхода по току (0,44-0,70). Аналогичная картина наблюдается в растворах $NaClO_3$. При высоких плотностях тока вследствие постоянства η (1,05) в растворе $NaClO_3$ значение A больше (1,4).

Повышение η с ростом j объясняется анодно-анионной активацией [10-12]. Увеличение концентрации аниона (NO_3^- , ClO_3^-) облегчает анодно-анионную активацию и кривая $\eta - j$ сдвигается в сторону меньших плотностей тока при постоянной скорости течения электролита ([13], рис. 2). При повышении концентрации NH_4NO_3 до 300 г/л происходит увеличение η в том же интервале плотностей тока (25-47 А/см²). Выход металлу по току изменяется при этих плотностях тока от 0,78 до 0,95. Значения A в этом растворе увеличиваются до 1,25 ($A = 0,5$ при концентрации 150 г/л в том же растворе).

При переменной скорости протока в пассивирующих электролитах η остается приблизительно постоянным, а величина ЛИР близка к единице (табл. 2). Это может быть связано с изменением η при изменении скорости течения электролита [15]. В некоторых случаях скорость изменения η может превышать снижение плотности тока с увеличением МЭЗ, и РСЭ возрастает. Так, $A = 0,5$ при $W = \text{const}$ и $A = 1,0$ при $W \neq \text{const}$ для раствора NH_4NO_3 (150 г/л).

Изменение РСЭ различных электролитов при анодном растворении сплавов ХН78Т и ХН77ТЮРУ показало, что их поведение аналогично поведению хрома, η во всех случаях оста-

вался постоянным: в хлоридах – 1,17 для ХН78Т и 1,10 для ХН77ТЮРУ, а в пассивирующих электролитах – $\eta \approx 1,0$. Возможные причины этого рассмотрены в работе [14]. Очевидно, что величина РСЭ в этих условиях зависит от изменения эффективной электропроводности электролита.

В ряде работ [16, 17 и др.] способность пассивирующих электролитов обеспечивать высокую точность формообразования при ЭХРО связывается с формой поляризационной кривой. При высоких плотностях тока и малых МЭЗ, имеющих место при ЭХРО, форма поляризационной кривой, как правило, не оказывает существенного влияния на распределения тока [15]. Повышение точности формообразования при ЭХРО указанных выше металлов и сплавов в реальных условиях возможно посредством конструктивных и технологических приемов, например, обработка импульсным током.

4 Обсуждение и заключение

При заданных условиях электролиза и постоянной скорости течения электролита определяющее влияние на логарифмический индекс рассеивания оказывает изменение электропроводности электролита с увеличением межэлектродного зазора.

Основными факторами, определяющими изменение рассеивающей способности электролита при электрохимической размерной обработке, является зависимость выхода металла по току от плотности тока и изменение эффективной электропроводности электролита. Как следует из приведенных выше данных, при постоянстве выхода металла по току и электропроводности электролита анодное растворение хрома, сплавов ХН78Т и ХН77ТЮРУ, а также никеля в хлоридных растворах происходит в соответствии с закономерностями, описываемыми уравнением идеального процесса электрохимического формообразования.

Высокая точность обработки никеля может быть достигнута в растворах нитратов, однако при этом следует учитывать, что имеется оптимальная область рабочих условий, связанная с резким перегибом кривой выхода металла по току от плотности тока. Для достижения высокой точности в заданном интервале плотностей тока необходимы соответствующие концентрации электролита и гидродинамические условия.

Список литературы

- 1 Березин, Н.Б. Электроосаждение металлов и сплавов из водных растворов комплексных соединений: монография / Н.Б. Березин [и др.]. Казань: Издательство Казанского государственного технологического университета, 2006. – 276 с.
- 2 Hamburg Yu. D., Sungari D. Theory and Practice of Metal Electrodeposition. М.: Лаборатория знаний, 2020. – 441 с.
- 3 Chin D.-T., Wallace A. J. Jr. Electrochemical Machining: A Note on the Throwing Power of Electrolytes // J. Electrochem. Soc. 1991. 118. P. 831-839.
- 4 Chin D.-T. Algorithms Throwing Index for the Measurement of Throwing Powers // J. Electrochem. Soc. 1991. 118. P. 818-825.
- 5 Эршлер, А.Б. Гальваностатические методы в исследовании механизмов электрохимических реакций // Электросинтез и биоэлектрохимия. – 1995. – № 11. – С. 199-251.
- 6 Estimation of the process localization at the electrochemical machining by microsecond pulses of bipolar current / A.N. Zaitsev [and oth.] // Journal of Materials Processing Technology: Elsevier, Scotland, 2004. Vol.149/1-3. P.475-481.
- 7 Веневцев, А.Ю. Экспериментальная установка для электрохимического формообразования // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. – 2013. – № 9. – С. 49-52.
- 8 Теория электрических и физико-химических методов обработки. Обработка материалов с применением инструмента / В.П. Смоленцев, А.И. Болдырев, Е.В. Смоленцев, Г.П. Смоленцев, И.Т. Коптев. Воронеж: Воронежский государственный технический университет, 2008. – 248 с.
- 9 Зайцев, А.Н. Электрохимическая обработка. Теория, технология, оборудование. М. – Вологда: Инфра-Инженерия, 2024. – 663 с.
- 10 Давыдов А.Д., Козак Е. Высокоскоростное электрохимическое формообразование. М.: Наука, 1990. – 271 с.
- 11 Донцов, М.Г. Электрохимическая размерная обработка металлов и сплавов. Проблемы теории и практики: монография. Иваново: Ивановский государственный химико-технологический университет. – 2006. – 282 с.

12 Давыдов А.Д., Мирзоев Р.А. Анодные процессы электрохимической и химической обработки металлов: учебное пособие. Санкт-Петербург: Лань, 2022. – 440 с.

13 Влияние параметров потока электролита при электрохимической размерной обработке на качество формообразования отверстий в деталях ракетно-космической техники / А.И. Болдырев, А.А. Болдырев, В.Н. Сухоруков, И.Г. Стародубцев // Воронежский научно-технический вестник. – 2021. – Т. 3. – № 3 (37). – С. 3-10.

14 Силкин С.А., Петренко В.И., Дикусар А.И. Анодное растворение электролитических хромовых покрытий в электролитах для электрохимической размерной обработки. Скорость растворения и шероховатость поверхности // Электронная обработка материалов. – 2010. – № 1. – С. 4-11.

15 Landolt D. Throwing Power Measurements during High Rate Nickel Dissolution under Active and Transpassive Conditions // J. Electrochem. Soc. 1992. 119. P. 708-714.

16 Атанасянц А.Г. Анодное поведение металлов: учебное пособие. М.: Metallurgy, 1989. – 150 с.

17 An Investigation of the Difference between NaCl and NaClO₃ as Electrolytes in Electrochemical Machining / J.P. Hoare, M.A. Loboda, M.L. Millan, A.J.Jr. Wallace // J. Electrochem. Soc. 1989. 116. P. 119-131.

References

1 Berezin, N.B. Electrodeposition of Metals and Alloys from Aqueous Solutions of Complex Compounds: A Monograph / N.B. Berezin et al. Kazan: Kazan State Technological University Publishing House, 2006. – 276 p.

2 Hamburg Yu. D., Sungari D. Theory and Practice of Metal Electrodeposition. Moscow: Knowledge Laboratory, 2020. – 441 p.

3 Chin D.-T., Wallace A.J. Jr. Electrochemical Machining: Notes on the Throwing Power of Electrolytes // J. Electrochem. Soc. 1991. 118. pp. 831-839.

4 Chin D.-T. Throwing Index Algorithms for Measuring Throwing Power // Russ. 1991. 118. P. 818-825.

5 Ershler, A.B. Galvanostatic methods in conducting electrochemical action // Electrosynthesis and bioelectrochemistry. - 1995. - No. 11. - P. 199-251.

6 Evaluation of process localization during electrochemical processing with microsecond pulses of bipolar current / A.N. Zaitsev [et al.] // Journal of Materials Processing Technology: Elsevier, Scotland, 2004. Vol. 149/1-3. P. 475-481.

7 Venevtsev A.Yu. Experimental setup for electrochemical shaping // Bulletin of Tula State University. Technical sciences. - 2013. - No. 9. - P. 49-52.

8 Theory of electrical and physicochemical processing methods. Material Processing with the Use of Tools / V.P. Smolentsev, A.I. Boldyrev, E.V. Smolentsev, G.P. Smolentsev, I.T. Koptev. Voronezh: Voronezh State Technical University, 2008. – 248 p.

9 Zaitsev, A.N. Electrochemical Processing. Theory, Technology, Equipment. Moscow – Vologda: Infra-Engineering, 2024. – 663 p.

10 Davydov, A.D., Kozak, E. High-Speed Electrochemical Forming. Moscow: Nauka, 1990. – 271 p.

11 Dontsov, M.G. Electrochemical Dimensional Machining of Metals and Alloys. Problems of Theory and Practice: Monograph. Ivanovo: Ivanovo State University of Chemical Technology. – 2006. – 282 p.

12 Davydov A.D., Mirzoev R.A. Anodic processes of electrochemical and chemical processing of metals: a tutorial. St. Petersburg: Lan, 2022. – 440 p.

13 Study of electrolyte flow parameters during electrochemical dimensional machining on the quality of hole formation in rocket and space technology parts / A.I. Boldyrev, A.A. Boldyrev, V.N. Sukhorukov, I.G. Starodubtsev // Voronezh Scientific and Technical Bulletin. – 2021. – Vol. 3. – No. 3 (37). – P. 3-10.

14 Silkin S.A., Petrenko V.I., Dikusar A.I. Anodic dissolution of electrolytic chromium coatings in electrolytes for electrochemical machining. Dissolution rate and surface roughness // Electronic processing of materials. – 2010. – No. 1. – P. 4-11.

15 Landolt D. Measurement of Propelling Power during High-Speed Dissolution of Nickel under Active and Transpassive Conditions // J. Electrochem. Soc. 1992. 119. P. 708-714.

16 Atanasyants A.G. Anodic Behavior of Metals: A Tutorial. Moscow: Metallurgy, 1989. – 150 p.

17 A Study of the Difference between NaCl and NaClO₃ as Electrolytes in Electrochemical Machining / J.P. Hoare, M.A. Loboda, M.L. Millan, A.J. Jr. Wallace // J. Electrochem. Soc. 1989. 116. P. 119-131.

© Болдырев А. А., Григораш В. В., Болдырев А. И.,
Падурец А. А., Перова А. В., 2026

DOI: 10.34220/2311-8873-2026-32-44



УДК 621.9.06:004.45

UDC 621.9.06:004.45

2.5.6 – технология машиностроения

**МЕТОД РАСЧЕТА
ШИРИНЫ ОБРАБОТКИ
ДЛЯ ПЯТИКООРДИНАТНОГО
ФРЕЗЕРОВАНИЯ СФЕРИЧЕСКОЙ
ФРЕЗОЙ**

**METHOD FOR CALCULATING THE
WORKING WIDTH FOR FIVE-AXIS
MILLING WITH A SPHERICAL MILLING
CUTTER**

Колесов Андрей Васильевич,
магистр, кафедра технологии машиностроения, Липецкий государственный технический университет, г. Липецк, e-mail: stig8377@yandex.ru

Kolesov Andrey Vasilyevich,
master's degree, department of of machine-building technology, Lipetsk state technical university, Lipetsk, e-mail: smolentsev.rabota@gmail.com

✉¹ **Козлов Андрей Александрович**,
к.т.н., доцент кафедры технологии машиностроения, Липецкий государственный технический университет, г. Липецк, e-mail: soy4astnik@mail.ru

✉¹ **Kozlov Andrey Aleksandrovich**,
candidate of technical sciences, associate professor of the department of machine-building technology, Lipetsk state technical university, Lipetsk, e-mail: soy4astnik@mail.ru

Козлов Александр Михайлович,
д.т.н., профессор, заведующий кафедры технологии машиностроения, Липецкий государственный технический университет, г. Липецк, г. Воронеж, e-mail: kam-48@yandex.ru

Kozlov Alexander Mikhailovich,
doctor of technical sciences, professor, head of the department of technology of mechanical engineering, Lipetsk state technical university, Lipetsk, e-mail: kam-48@yandex.ru

Аннотация. В статье рассмотрена технология пятикоординатного фрезерования, которая применяется для обработки геометрически сложных поверхностей. В качестве основного технологического параметра процесса рассмотрена ширина фрезерования и определена её взаимосвязь с предельно допустимой погрешностью обработки. Расчет значения ширины обработки от допустимой погрешности и положения инструмента в системе координат позволит упростить процесс назначения режимов резания и алгоритм расчета оптимальной траектории движения фрезы при резании.

Annotation. The article discusses the technology of five-axis milling, which is used for processing geometrically complex surfaces. The milling width is considered as the main technological parameter of the process and its relationship with the maximum allowable processing error is determined. Calculating the value of the working width from the permissible error and the position of the tool in the coordinate system will simplify the process of assigning cutting modes and the algorithm for calculating the optimal trajectory of the milling cutter during cutting.

Ключевые слова: ПЯТИКООРДИНАТНОЕ ФРЕЗЕРОВАНИЕ, ШИРИНА ОБРАБОТКИ, ТРАЕКТОРИЯ ДВИЖЕНИЯ.

Keywords: FIVE-AXIS MILLING, WORKING WIDTH, MOVEMENT TRAJECTORY.

¹ Автор для ведения переписки

1 Состояние вопроса исследования и актуальность работы

В современном машиностроении механическая обработка стала одной из самых распространенных технологий производства. Её развитие позволило изготавливать детали сложной пространственной формы для удовлетворения растущих потребностей повышения точности и быстроходности машин. В частности, за последнее десятилетие активно применяются технологии трехосевого и пятиосевого фрезерования, в которых под осями подразумевают управляемые движения заготовки. В обоих методах производства главным формообразующим инструментом является фреза. Могут использоваться различные виды фрез: торцевые, концевые, конические или сферические. При трехосевом фрезеровании можно одновременно управлять осями x , y и z для получения желаемой геометрии. Как правило, системы трехосевого фрезерования имеют три линейные оси перемещения заготовки относительно инструмента, но ни одной оси вращения. В пятиосевом фрезеровании добавляются еще две оси (рис. 1), которые являются вращательными. Эти две оси определяют углы подъема (в плоскости, проходящей через ось инструмента и вектор подачи) и наклона (в плоскости, проходящей через ось инструмента перпендикулярно вектору подачи) инструмента. Они, как дополнительные две степени свободы, позволяют технологической системе быть более гибкой.

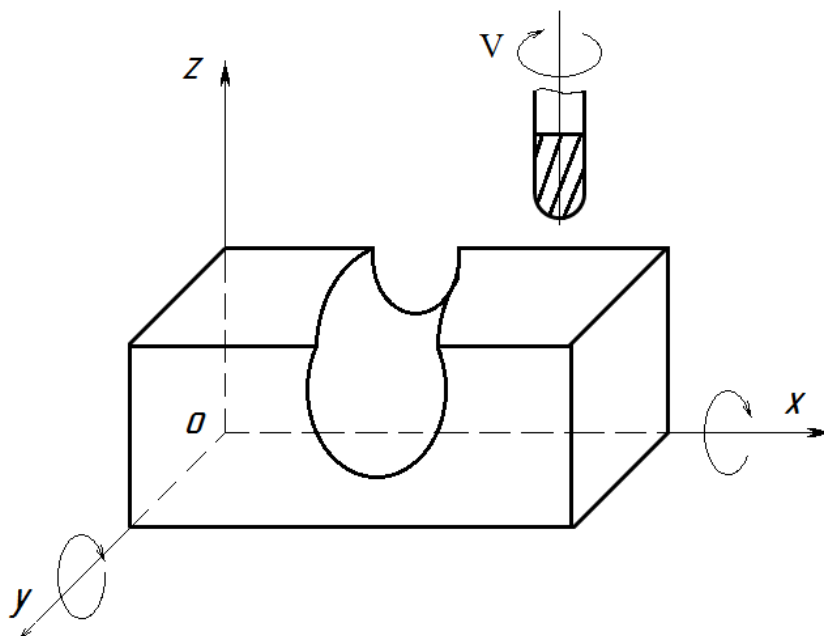


Рисунок 1 – Схема движений пятикоординатного фрезерного станка

Пятикоординатное фрезерование применяется во многих отраслях современной промышленности для изготовления штампов, пресс-форм, специальной оснастки, изделий для автомобильной и аэрокосмической промышленности. На первом этапе в такой технологической системе исследователи решали проблемы математического описания формы обрабатываемой поверхности [1-4]. Затем на первый план вышли вопросы силового взаимодействия инструмента и заготовки, которые обеспечивают требуемую точность обработанной поверхности [5-8] и снижение уровня вибраций [9, 10].

Поскольку обработка деталей сложных пространственных форм ведется на весьма дорогом оборудовании, в последнее время основное внимание уделяется вопросам повышения производительности, качества обработки, безотказности и, в целом, эффективности процесса [11, 12].

При пятикоординатном фрезеровании поверхности чаще всего для формирования сложного пространственного профиля применяются цилиндрические фрезы со сферическим концом. Особенностью таких фрез является то, что в центре сферы, на оси вращения, скорость

резания V равна нулю (рис. 1). Это приводит к тому, что при обработке «стенок» резание ведется в режиме фрезерования, а при обработке «дна» – в режиме сверления. При движении фрезы в направлении, перпендикулярном оси вращения, режущие кромки на ее оси будут не резать, а только пластически деформировать обрабатываемую поверхность, что значительно ухудшает шероховатость обработанной поверхности, вызывает повышенный износ фрезы.

Другой особенностью фрезерования сложных пространственных поверхностей является то, что, независимо от типа применяемого фрезерного инструмента, возможно возникновение дефекта формы обработанной поверхности (например, при фрезеровании штампов [6]). Это связано с тем, что форма инструмента никогда не совпадает с формой поверхности при резании по пяти координатам.

При этом, в зависимости от режимов обработки, следы от фрезы будут формировать пространственные отклонения поверхности и ее шероховатость.

2 Материалы и методы

На обработанной поверхности неизбежно будут образовываться неровности (выступы), остающимся между соседними проходами инструмента, которые выходят за пределы профиля расчетной поверхности. Контроль высоты этой неровности важен, так как минимальное значение этого параметра существенно сократит трудоемкость возможной дальнейшей обработки – шлифования и полирования обработанной поверхности для достижения требуемой шероховатости. В дальнейших расчетах максимальную высоту этой неровности обозначим как величину h . Затем, путем вычисления ширины обработки в текущей точке контакта фрезы с заготовкой, определим следующее соседнее смещение траектории инструмента. Это позволит составить уравнение эффективной траектории инструмента и упростит выбор режимов обработки за счет расчета ширины фрезерования через заданную допустимую величину h .

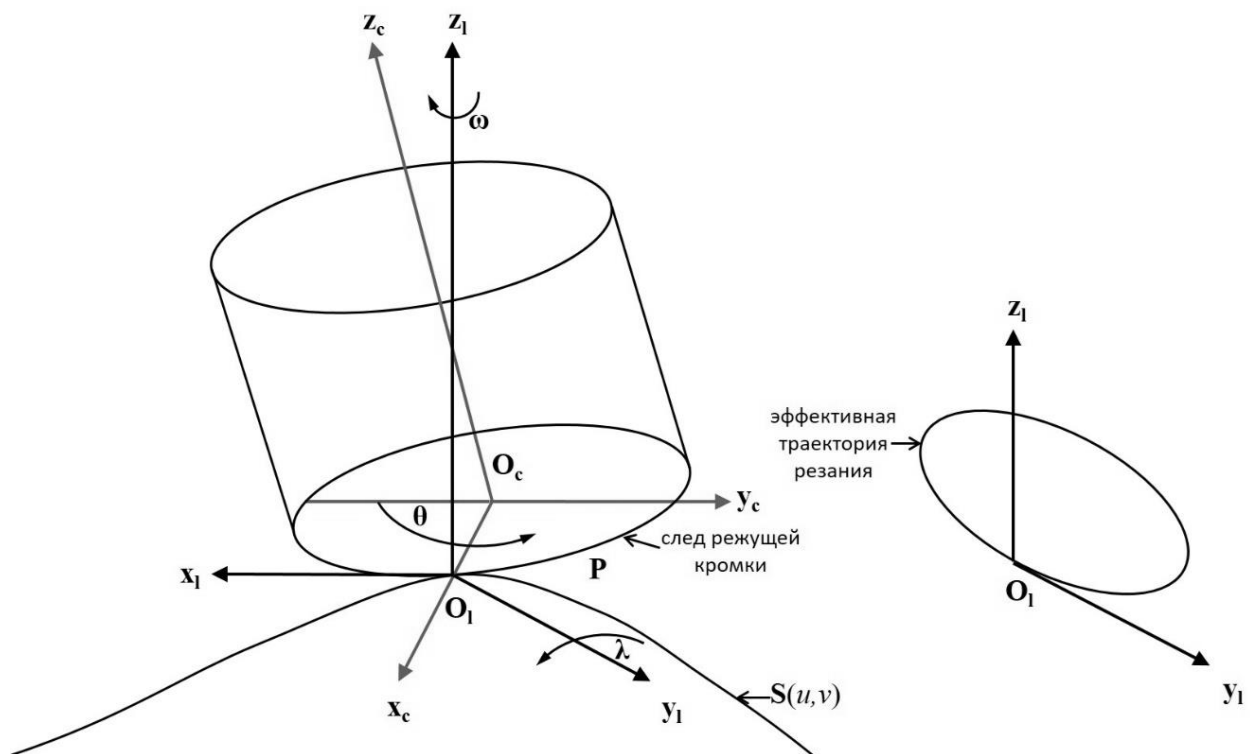


Рисунок 2 – Кинематическая схема процесса пятикоординатного фрезерования

Расчет начинаем с ввода локальной системы координат (O_1, x_1, y_1, z_1) в которой точка контакта режущей части инструмента с заготовкой обозначена O_1 (рис. 2), x_1 обозначает нор-

мализованную проекцию направления резания инструмента на касательную плоскость заготовки, z_1 обозначает единичный вектор нормали к обрабатываемой поверхности, а y_1 – вектор оси, относительно которой будет задаваться угол наклона фрезы, а координата по данной оси определяется как произведение $x_1 \cdot z_1$. Дополнительную систему координат (O_1, x_1, y_1, z_1) рассматриваем в совокупности с системой координат инструмента (O_c, x_c, y_c, z_c) . Для стабилизации процесса пятикоординатного фрезерования ось инструмента сначала поворачивают на угол наклона λ относительно вектора оси y_1 , затем на угол наклона ω вокруг вектора оси z_1 . Проецируемая нижняя кромка плоской фрезы радиуса r на плоскость y_1-z_1 становится эллипсом, который обозначим как эффективную траекторию резания [13]. Дальнейшее определение эффективной траектории инструмента основано на расчете координат точки P на нижней части режущей кромки фрезы в момент резания в нескольких системах координат. В системе координат фрезы (O_c, x_c, y_c, z_c) эта точка описывается выражением (рис. 2):

$$P_c = \begin{bmatrix} r \sin \theta \\ -r \cos \theta \\ 0 \end{bmatrix}, \quad (1)$$

где θ – угол от отрицательного вектора оси y до точки P в системе координат инструмента; r – радиус фрезы, мм.

Во введенной локальной системе координат рассматриваемая точка P будет описываться выражением:

$$P_c = \begin{bmatrix} -r(\cos \lambda \cos \omega (1 - \sin \theta) + \sin \omega \cos \theta) \\ r(\cos \lambda \sin \omega (1 - \sin \theta) + \cos \omega \cos \theta) \\ r \sin \lambda (1 - \sin \theta) \end{bmatrix}, \quad (2)$$

где λ – угол наклона оси инструмента относительно оси y в локальной системе координат град.; ω – угол наклона оси инструмента относительно оси z в локальной системе координат, град.

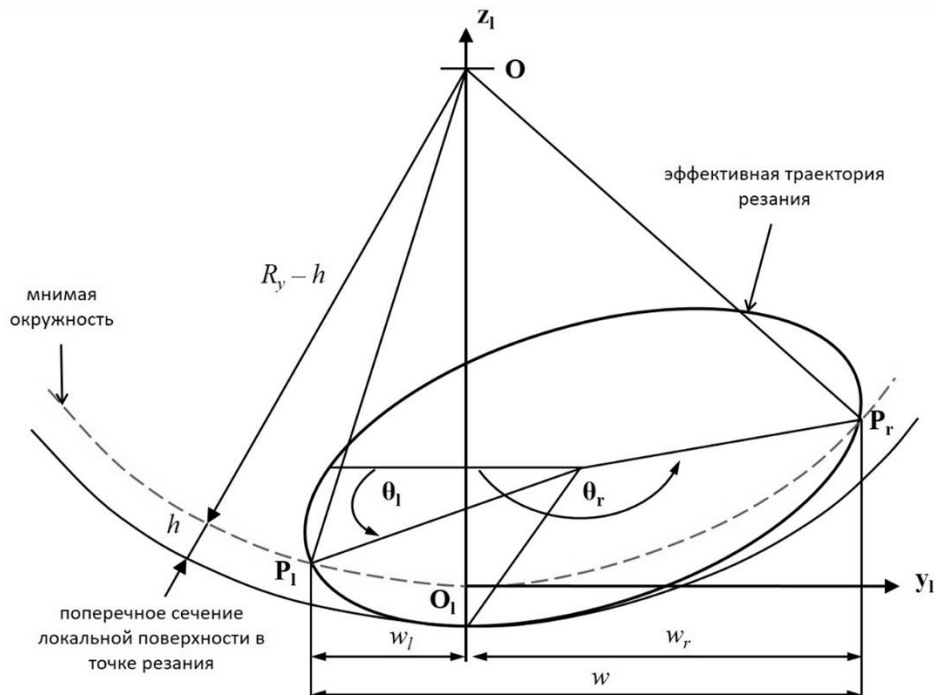


Рисунок 3 – Схема определения значения ширины обработки при пятикоординатном фрезеровании

Для оценки ширины зоны контакта инструмента с заготовкой при пятикоординатном фрезеровании поперечное сечение обработанной поверхности, перпендикулярное направлению резания инструмента x_1 , аппроксимируется дугой окружности [14], радиус которой R_y равен радиусу нормальной кривизны поверхности в направлении оси y_1 (рис. 3). Учитывая максимальную высоту следа h , максимальная погрешность обработанной поверхности представлена мнимой дугой окружности радиусом $R_y - h$ (рис. 3). Тогда ширина обработки вычисляется путем определения пересечений эффективной траектории резания с этой мнимой дугой окружности. Уравнение этой эффективной траектории находим через проецирование координат по выражению (2) на плоскость $y_1 - z_1$ (приравнивая к нулю координату x_1 точки P). При этом уравнение мнимой дуги окружности радиусом $R_y - h$ (рис. 3) будет иметь вид:

$$y_l^2 + (z_l - R_y)^2 = (R_y - h)^2, \quad (3)$$

где h – максимальная высота следа (неровности) обрабатываемой поверхности от предыдущего прохода инструмента, мм; R_y – радиус нормальной кривизны обрабатываемой поверхности в направлении оси y_1 локальной системы координат, мм; y_l, z_l – соответствующие координаты характерной точки режущей кромки инструмента ($x_1 = 0$).

Подставляя выражение (2) в уравнение (3), получим уравнение расчета эффективной траектории резания:

$$a_1 \sin^2 \theta + a_2 \sin \theta + a_3 \sin 2\theta - 2a_3 \cos \theta + a_4 = 0, \quad (4)$$

где a_1, a_2, a_3, a_4 – переменные введённые для упрощения математической записи уравнения, которые раскрываются в выражения:

$$a_1 = r^2(\cos^2 \lambda \sin^2 \omega + \sin^2 \lambda - \cos^2 \omega);$$

$$a_2 = -2r^2(\cos^2 \lambda \sin^2 \omega + \sin^2 \lambda) + 2rR_y \sin \lambda;$$

$$a_3 = 0,5r^2(\cos \lambda \sin 2\omega);$$

$$a_4 = r^2 \cos^2 \lambda \sin^2 \omega - 2rR_y \sin \lambda + r^2 + 2hR_y - h^2.$$

Для решения уравнения (4) рассмотрим частный случай с условием $\lambda = \pi/2$ и $\omega = 0$. Тогда уравнение (4) примет вид:

$$(-2r^2 + 2rR_y) \sin \theta + 2r^2 - 2rR_y + 2hR_y - h^2 = 0. \quad (5)$$

Преобразуя получаем:

$$\sin \theta = 1 - \frac{2hR_y - h^2}{2rR_y - 2r^2}. \quad (6)$$

Таким образом, согласно представленной расчётной схеме (рис. 3), можно определить ширину зоны контакта инструмента с заготовкой при пятикоординатном фрезеровании по выражению:

$$w = w_l + w_r = 2r \sqrt{\frac{2hR_y - h^2}{rR_y - r^2} - \left(\frac{2hR_y - h^2}{2rR_y - 2r^2}\right)^2}. \quad (7)$$

Так как на практике $|R_y|$ существенно больше значения h , то величинами h^2 , h^3 и h^4 в уравнении (6) можно пренебречь. Тогда итоговое уравнение примет вид:

$$w = \sqrt{\frac{8hrR_y}{R_y - r}}. \quad (8)$$

Для достижения оптимального положения фрезы, её ось необходимо повернуть на угол наклона λ относительно вектора оси y_1 , а затем на угол подъема ω относительно вектора оси z_1 [13]. Проецируемая нижняя кромка фрезы радиуса r на плоскость $y_1 - z_1$ становится эллипсом, который является оптимальной траекторией инструмента (рис. 3).

В процессе пятикоординатного фрезерования ориентация инструмента по углам λ и ω определяет эффективную траекторию резания. Причем угол λ определяется в первую очередь и, если его значение превышает возможности оборудования, вторым этапом определяется угол ω . При этом оптимальный радиус фрезы r_e рассчитывается выражением [12]:

$$r_e = r \sin^2 \lambda \cos^2 \omega \left(\frac{1 + \tan^2 \lambda \sin^2 \omega}{\sin^2 \lambda \cos^2 \omega + \tan^2 \lambda \sin^2 \omega} \right)^{\frac{3}{2}}, \quad (9)$$

где r – радиус фрезы, мм; λ – угол наклона оси инструмента относительно оси y в локальной системе координат, град.; ω – угол подъема оси инструмента относительно оси z в локальной системе координат.

После преобразования выражения (9) получим:

$$r_e = \frac{r \cos^2 \omega}{\sin \lambda}. \quad (10)$$

Чтобы сделать оптимальной траекторию инструмента, угол наклона оси фрезы λ необходимо выбрать так, чтобы r_e лучше всего соответствовало радиусу кривизны в заданной точке заготовки. Для выпуклых или плоских поверхностей заготовки его значение будет небольшим или равным нулю, при этом $\omega = 0$. Если поверхность невыпуклая, то необходимо рассчитать значение λ , иначе след от прохода фрезы негативно повлияет на качество поверхности. Предлагаемый метод расчета заключается в определении минимального значения угол наклона λ через проекции в плоскостях $x_1 - z_1$ и $y_1 - z_1$:

$$\lambda_{min} = \max(\lambda_x, \lambda_y). \quad (11)$$

Значение проекций определяем:

$$\lambda_x = \sin^{-1} \left(\frac{r}{R_x} \right),$$

$$\lambda_y = \sin^{-1} \left(\frac{r}{R_y} \right),$$

где R_x и R_y – радиус нормальной кривизны в направлениях x_1 и y_1 соответственно, мм.

Поперечное сечение поверхности аппроксимируется дугой окружности в плоскости $y_1 - z_1$, соответствующей соприкасающейся окружности радиуса R_y . Соприкасающаяся окружность представляет собой наилучшую аппроксимирующую кривую, имеющую постоянную кривизну.

3 Результаты исследований

Представленный выше метод расчета ширины обработки при пятикоординатном фрезеровании позволяет упростить процесс расчёта оптимальной траектории инструмента за счет аппроксимации дуги мнимой окружности вместо решения квадратных уравнений. Блок-схема работы алгоритма оптимизации представлена на рис. 4.

Представленные уравнения (3) и (6) позволяют вычислить кривую смещения, соответствующую максимально допустимой погрешности обработанной поверхности h , используя мнимую дугу окружности радиуса $R - h$ (рис. 3).

Для проверки полученных теоретических положений были проведены эксперименты, целью которых являлось сравнение фактической шероховатости обработанной поверхности до и после изменения углов наклона фрезы.

Эксперименты проводились на пятикоординатном фрезерном станке с ЧПУ Kondia NM 1060 на заготовке из алюминиевого сплава 7075-T6. Данный материал часто используется в аэрокосмических компонентах (крылья, фюзеляжи, лопасти и т.п.), гидравлическом оборудовании, машиностроительных изделиях, которые подвергаются серьезным эксплуатационным нагрузкам.

В качестве режущего инструмента в экспериментах использовалась концевая фреза диаметром 8 мм, углом наклона винтовой канавки 30° , числом зубьев 4, общей длиной 70 мм, длиной канавки 30 мм из быстрорежущей стали с покрытием TiAlN.

Режимы резания – подача на зуб 0,02 мм, частота вращения шпинделя 3000 мин^{-1} .

Измерение полученной шероховатости проводились на профилометре TalySurf 200.

Для исследования и оценки предлагаемого алгоритма провели серию экспериментов с оценкой шероховатости поверхности. Во время исследования одна и та же заготовка обрабатывалась с использованием различных углов наклона инструмента. Результаты стандартного подхода сравнивались с результатами оптимизированной технологии, при этом параметры резания были постоянными.

Эксперимент проводился в несколько этапов, на каждом из которых использовались разные значения углов наклона инструмента.

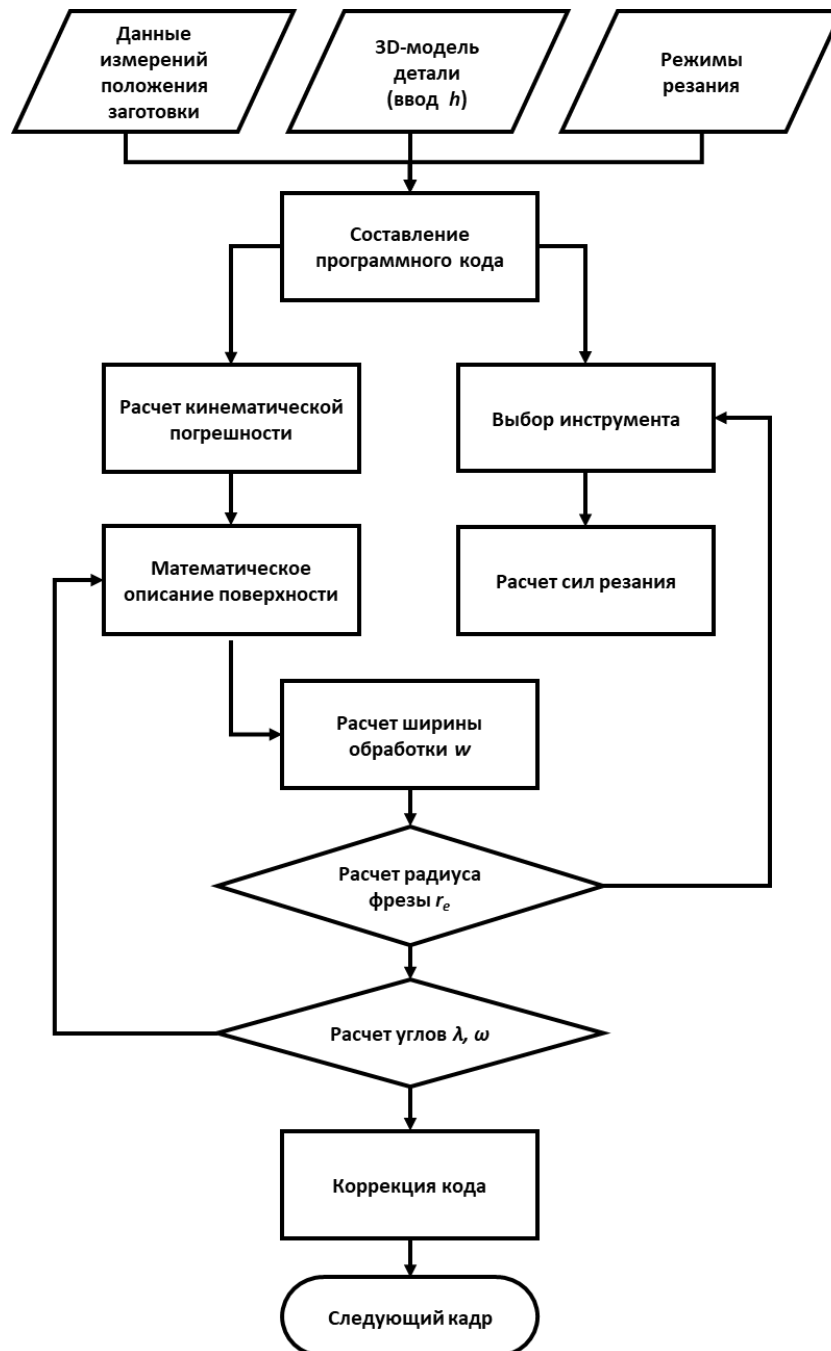


Рисунок 4 - Блок-схема работы алгоритма оптимизации

Для исследования и оценки предлагаемого алгоритма провели серию экспериментов с оценкой шероховатости поверхности. Во время исследования одна и та же заготовка обрабатывается с использованием различных алгоритмов. Результаты стандартного подхода сравнивались с результатами оптимизированной технологии, при этом параметры резания были одинаковы в каждом эксперименте.

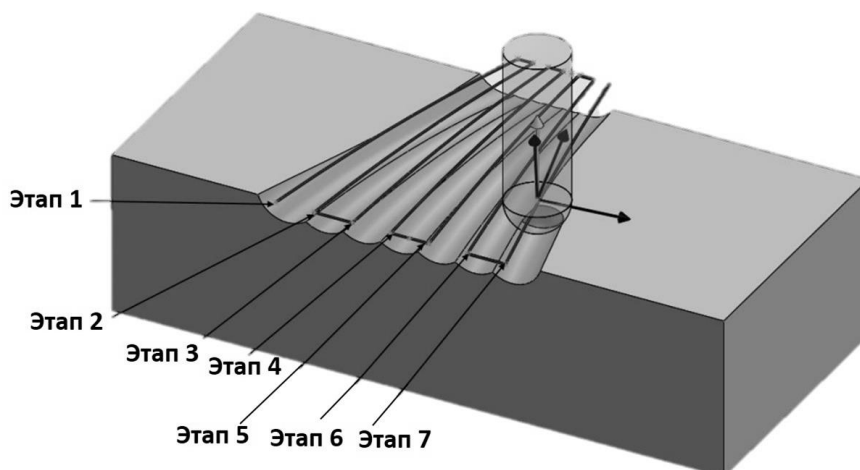


Рисунок 5 – Схема обработки при исследовании шероховатости

Эксперимент проводился в семь этапов, на каждом из которых использовались разные значения углов наклона инструмента (рис. 5). Все этапы сравнивались между собой с точки зрения качества поверхности, а также регистрировалась продолжительность обработки для каждого отдельного этапа.

На этапах 1 и 2 обработка велась по трем координатам, а траектория перемещения инструмента задавалась с помощью стандартного программного обеспечения ЧПУ по трем координатам и выполнялась без каких-либо изменений (рис. 6). Это испытание проводилось для создания поверхности, сравнение с которой помогает оценить эффективность других подходов к обработке, используемых в последующих испытаниях.

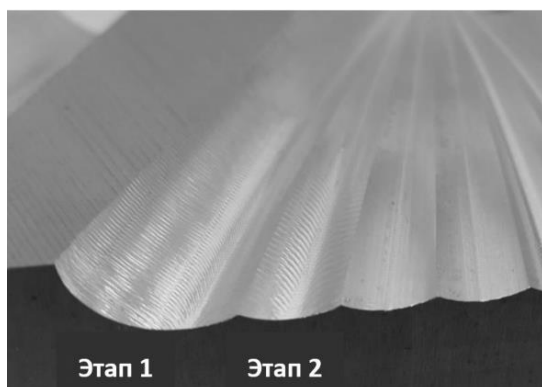


Рисунок 6 – Результаты первого и второго этапов эксперимента по исследованию шероховатости поверхности ($R_a = 1,85 \text{ мкм}$)

На этапах 3 и 4 обработка велась по пяти координатам, а углы подъема и наклона фрезы оставались постоянными и равными нулю. Основная цель заключалась в достижении стабильности процесса резания. Несмотря на это, на обработанных поверхностях наблюдаются значительные следы (рис. 7). Кроме того, поскольку углы подъема и наклона оставались равными 0° , кончик инструмента контактировал с вмятинами вдоль центра траектории инструмента, что также ухудшало качество конечной поверхности детали.

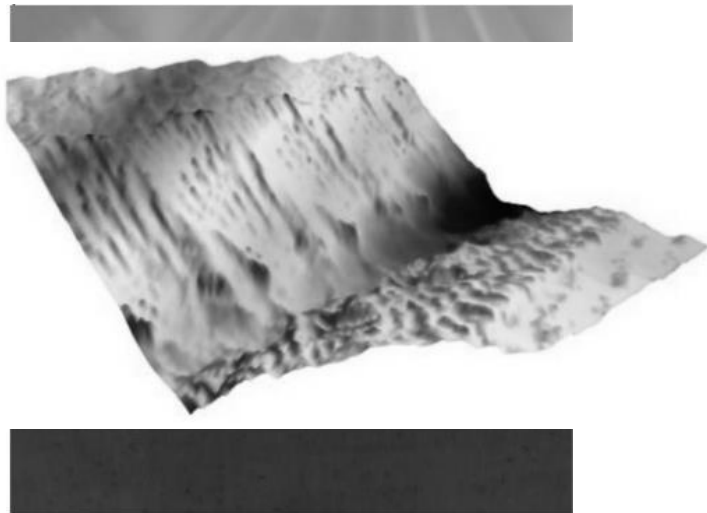


Рисунок 7 – Результаты третьего и четвертого этапов эксперимента по исследованию шероховатости поверхности ($R_a = 1,54$ мкм)

На этапах 5 и 6 обработка также велась по пяти координатам, но углы подъема и наклона фрезы были оптимизированы только для обеспечения заданного значения высоты неровности. Их отличие от других заключается в оптимизации траектории движения инструмента для получения стабильной операции резания. Для условий эксперимента процесс фрезерования следует выполнять при углах – подъема 10° и наклона 10° . Шероховатость поверхности значительно улучшилась (рис. 8), однако из-за постоянных углов подъема и наклона происходит разворот оси от оси вращения, что приводит к ухудшению качества поверхности в середине траектории инструмента.

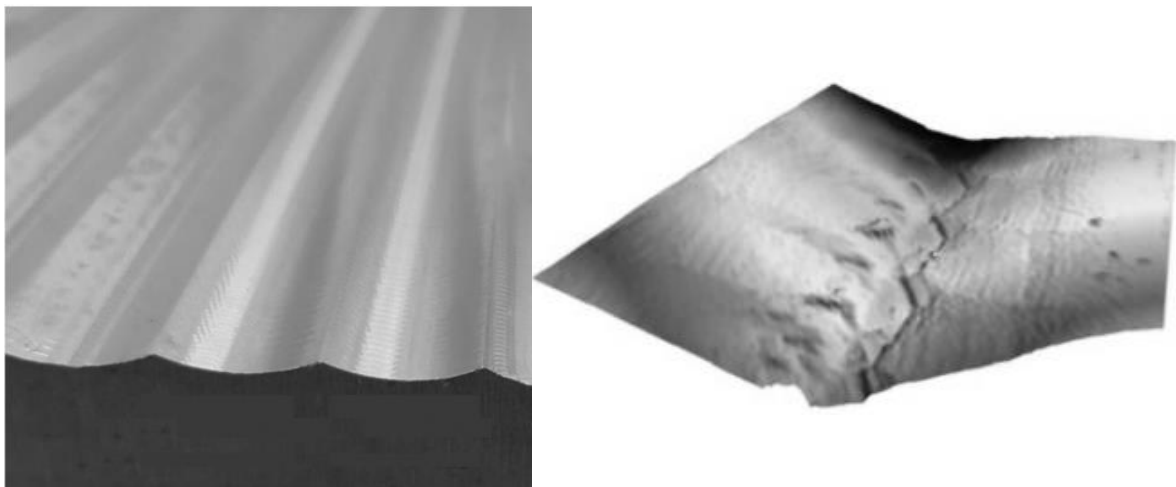


Рисунок 8 – Результаты пятого и шестого этапов эксперимента по исследованию шероховатости поверхности ($R_a = 0,59$ мкм)

На последнем этапе 7 обработка велась комбинированным способом, и он является результатом пятикоординатного фрезерования, оптимизированного с учетом ограничений стабильности и привода подачи по осям станка с ЧПУ. Вместо того, чтобы сохранять углы подъема и наклона постоянными, они изменяются в каждой точке траектории перемещения инструмента, чтобы получить стабильное резание и минимальное смещение оси вращения, что приведет к повышению эффективности процесса. В начале траектории угол наклона выбирается равным 20° и уменьшается до 10° . При этом угол подъема выбирают примерно равным 10° и уменьшают примерно до 3° .

Качество поверхности улучшилось, а время обработки сократилось за счет минимизации движений поворотной оси (рис. 9).

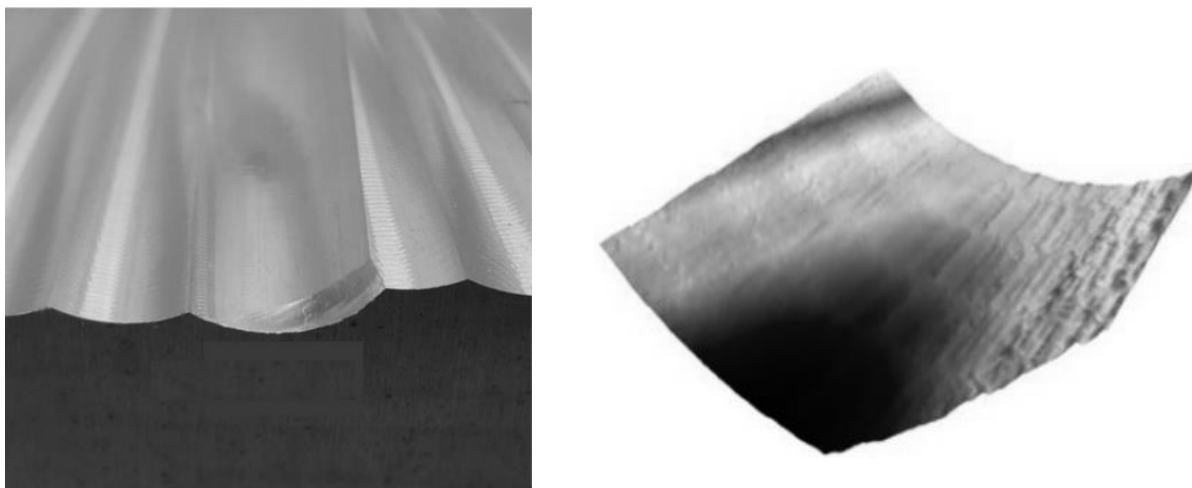


Рисунок 9 – Результаты седьмого этапа эксперимента по исследованию шероховатости поверхности ($Ra = 0,40$ мкм)

В последнем тесте в каждой точке траектории перемещения фрезы относительно заготовки назначается интервал возможных комбинаций углов опережения и наклона. Затем для каждой комбинации рассчитываются необходимые смещения осей путем перехода от G-кода к программе ЧПУ. Благодаря нахождению в стабильной (без вибраций) зоне и предотвращению неплавных смещений оси вращения, положение инструмента вдоль траектории оптимизируется с помощью предложенного алгоритма. Это приводит к более гладкой поверхности и сокращению времени обработки.

4 Обсуждение и заключение

В данной работе представлен подход к оптимизации технологии пятикоординатного фрезерования на основе построения эффективной траектории движения инструмента и заданной предельной величины неровности обработанной поверхности. Оптимизация движений поворотных осей позволяет компенсировать кинематические погрешности процесса, обеспечив плановость траектории движения инструмента при обработке поверхностей со сложными геометрическими формами. Это обеспечивает стабильность процесса, что подтверждено экспериментами и положительно влияет на качество поверхности детали.

Вычисление ширины обработки согласно уравнению (8) от заданного значения максимально допустимой погрешности позволяет упростить назначение режимов резания при пятикоординатном фрезеровании и улучшить качество обработанной поверхности, минимизировав трудоемкость финишных операций.

В предлагаемом алгоритме используются допустимые значения углов подъема и наклона фрезы, а также заданная величина высоты неровности h . В случае интеграции систем ЧПУ, после достижения допустимого порога алгоритм выбирает наиболее эффективное значение для выполнения и генерирует модифицированный G-код. А исходный G-код меняется за счет сглаживания движений поворотной оси, что приводит к более плавной работе станка с ЧПУ. Предложенный метод гарантирует, что движения оси непрерывны и не нарушают пределы ускорения и рывков каждой системы привода оси. Для некоторых траекторий продолжительность обработки может быть сокращена до 5-6 %, а качество поверхности значительно улучшается. Усовершенствованное движение обеспечивает более плавное движение, чем поверхность, обработанная обычным 5-осевым подходом.

Список литературы

- 1 Ižol P., Vrabel M., Maňková I. Comparison of Milling Strategies when Machining Freeform Surfaces. *Materials Science Forum*. 2016;862:18-25.
- 2 Hassanpour H., Shajari S., Rasti A., Sadeghi M.H. Investigation of Milling Strategies Effect on Microhardness of a Typical Curved Surface. *Modares Mechanical Engineering*. 2015;15(2):34-40.
- 3 Shajari S., Sadeghi M.H., Hassanpour H. The Influence of Tool Path Strategies on Cutting Force and Surface Texture during Ball End Milling of Low Curvature Convex Surfaces. *The Scientific World Journal*. 2014;2014:374526.
- 4 Xiurong Zhu, Yeu Wang. Process Analysis and Parameter Optimization of Five Axis NC Machine for Machining Complex Curved Surface Impellers. In: Proc. International Conference on Intelligent Transportation, Big Data & Smart City (ICITBS). New York: IEEE; 2019. P. 122-124.
- 5 Козлов, А.М. Параметрическое управление подачей при фрезеровании сложных поверхностей на станках с ЧПУ / А.М. Козлов, Г.Е. Малютин // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. Вып. 8. Ч. 1. Тула: Изд-во ТулГУ, 2017. - С. 59-64.
- 6 Kozlov, A. M. Performance Increase of Precision Volumetric Milling on NC Machines Based on Frame-Accurate Control / A. M. Kozlov, G.E. Malyutin, A.V. Handozhko // International Conference on Industrial Engineering, ICIE 2017 // Procedia Engineering 206 (2017) 1111-1119.
- 7 Matras A., Kowalczyk R. Analysis of Machining Accuracy during Free form Surface Milling Simulation for Different Milling Strategies. *Proceedings of the SPIE*. 2014;9290:1-7.
- 8 Zhu Z, Yan R, Peng F, et al. Parametric chip thickness model based cutting forces estimation considering cutter runout of five-axis general end milling. *Int J Machine Tools Manufacture*, 2016, 101: 35-51.
- 9 Campa F J, Lopez de Lacalle L N, Celaya A. Chatter avoidance in the milling of thin floors with bull-nose end mills: Model and stability diagrams. *Int J Machine Tools Manufacture*, 2011, 51: 43-53.
- 10 Budak E, Tunç L T, Alan S, et al. Prediction of workpiece dynamics and its effects on chatter stability in milling. *CIRP Ann*, 2012, 61: 339-342.
- 11 Гимадеев М.Р., Никитенко А.В., Беркун В.О. Влияние углов ориентации сферически-цилиндрического инструмента на шероховатость при обработке поверхностей сложного профиля. *Передовые инженерные исследования (Ростов-на-Дону)*. 2023;23(3):231-240.
- 12 Пономарев Б.Б., Нгуен С.Х. Оценка шероховатости при пятикоординатном чистовом фрезеровании поверхностей сфероцилиндрической фрезой. *Известия высших учебных заведений. Машиностроение*. 2020;(5(722)):21-31.
- 13 Fussell B.K., Jerard R.B., Hemmet J.G. Modeling of cutting geometry and forces for 5-axis sculptured surface machining // *Computer Aided Design*, 35. 2003. pp. 333–346.
- 14 Ozturk B., Lazoglu I., Erdim H. Machining of free-form surfaces // *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 46. 2006. pp. 736-746.

References

- 1 Izhol P., Vrabel M., Mankova I. Comparison of milling strategies for processing surfaces of arbitrary shape. *Materials Science Forum*, 2016;862:18-25.
- 2 Hassanpour H., Shajari S., Rusty A., Sadeghi M.H. Investigation of the effect of milling methods on the microhardness of a typical curved surface. *Modares Mechanical Engineering*. 2015;15(2):34-40.
- 3 Shajari S., Sadeghi M.H., Hassanpour H. The effect of the tool's trajectory on the cutting force and surface texture during end milling of convex surfaces of small curvature. *The Scientific World magazine*. 2014; 2014: 374526.
- 4 Xiurong Zhu, Yu Wang. Analysis of the technological process and optimization of the parameters of a five-axis CNC machine for machining impellers with a complex curved surface. In progress: Proc. International Conference on Intelligent Transport, Big Data and Smart City (ICITBS). New York: IEEE; 2019. pp. 122-124.
- 5 Kozlov, A.M. Parametric feed control for milling complex surfaces on CNC machines / A.M. Kozlov, G.E. Malyutin // *Proceedings of Tula State University. Technical sciences. Issue 8. Part 1*. Tula: TulaSU Publishing House, 2017. pp. 59-64.
- 6 Kozlov, A.M. Improving the productivity of precision volumetric milling on CNC machines based on Frame-Accurate Control / A.M. Kozlov, G.E. Malyutin, A.V. Khandozhko // *International Conference on Industrial Engineering, ICIE 2017 // Procedural Engineering 206 (2017) 1111-1119*.
- 7 Matras A., Kovalchik R. Analysis of machining accuracy in modeling milling of surfaces of arbitrary shape for various milling strategies. *Materials of SPIE*. 2014;9290:1-7.

8 Zhu C., Yan R., Peng F. and others . Estimation of cutting forces based on a parametric chip thickness model, taking into account the runout of the milling cutter during five-axis general end milling. *Int J Machine Tools Manufacture*, 2016, 101:35-51.

9 Campa F. J., Lopez de Lacalle L. N., Celaya A. Prevention of rattling when milling thin surfaces with round-head end mills: a model and stability schemes. *Int J. Production of machine tools*, 2011, 51: 43-53.

10 Budak E., Tunc L. T., Alan S. et al. Predicting the dynamics of the workpiece and its effect on vibration resistance during milling. *CIRP Ann*, 2012, 61:339-342.

11 Gimadeev M.R., Nikitenko A.V., Berkun V.O. Influence of orientation angles of spherical-cylindrical tools on roughness during surface treatment of complex profiles. *Advanced Engineering research (Rostov-on-Don)*. 2023;23(3):231-240.

12 Ponomarev B.B., Nguyen S.H. Roughness assessment during five-axis finishing milling of surfaces with a spherical cylindrical milling cutter. *News of higher educational institutions. Mechanical engineering*. 2020;(5(722)):21-31.

13 Fussell B.K., Gerard R.B., Hemmet J.G. Modeling of cutting geometry and forces for processing a 5-axis relief surface // *Computer-aided design*, 35. 2003. pp. 333-346.

14 Ozturk B., Lazoglu I., Erdim H. Surface treatment of arbitrary shape // *International Journal of Machine Tool Engineering and Production*, 46. 2006. pp. 736-746.

© Колесов А. В., Козлов А. А., Козлов А. М., 2026

DOI: 10.34220/2311-8873-2026-45-53



УДК 330.115

UDC 330.115

2.9.5 – эксплуатация автомобильного транспорта

**МЕТОДИКА РАСЧЕТНОЙ ОЦЕНКИ
ТЕХНИКО-ЭКОНОМИЧЕСКИХ
ОСОБЕННОСТЕЙ ПАССАЖИРСКИХ
ПЕРЕВОЗОК**

**THE METHODOLOGY OF THE
CALCULATED ASSESSMENT OF THE
TECHNICAL AND ECONOMIC
FEATURES OF PASSENGER
TRANSPORTATION**

Белокуров Сергей Владимирович,
д.т.н., профессор кафедры прикладной математики и механики, Воронежский государственный технический университет, г. Воронеж.

Belokurov Sergey Vladimirovich,
doctor of technical sciences, professor of the department of applied mathematics and mechanics, Voronezh state technical university, Voronezh.

Кононов Михаил Сергеевич,
студент Российской академии народного хозяйства и государственной службы при Президенте Российской Федерации, г. Москва.

Kononov Mikhail Sergeevich,
student, Russian Presidential academy of national economy and public administration, Moscow.

Панявина Екатерина Анатольевна,
к.э.н., доцент кафедры «Менеджмента и экономики предпринимательства, Воронежский государственный лесотехнический университет имени Г.Ф. Морозова, г. Воронеж.

Panyavina Ekaterina Anatolyevna,
candidate of economics, associate professor of the department "management and economics of entrepreneurship", Voronezh state forestry university named after G.F. Morozov, Voronezh.

Белокуров Владимир Петрович,
д.т.н., профессор кафедры «Организация перевозок и безопасность движения», Воронежский государственный лесотехнический университет имени Г.Ф. Морозова, г. Воронеж.

Belokurov Vladimir Petrovich,
doctor of technical sciences, professor of the department "Organization of transportation and traffic safety", Voronezh state forestry university named after G.F. Morozov, Voronezh.

Кorableв Руслан Александрович,
к.с.-х.н., доцент кафедры «Организация перевозок и безопасность движения», Воронежский государственный лесотехнический университет имени Г.Ф. Морозова, г. Воронеж.

Korablev Ruslan Aleksandrovich,
candidate of agricultural sciences, associate professor of the department "Organization of transportation and traffic safety", Voronezh state forestry university named after G.F. Morozov, Voronezh.

✉¹ **Бусарин Эдуард Николаевич,**
к.т.н., доцент кафедры «Организация перевозок и безопасность движения», Воронежский государственный лесотехнический университет имени Г.Ф. Морозова, г. Воронеж, e-mail: busarin.eduard@mail.ru

✉¹ **Busarin Eduard Nikolaevich,**
candidate of technical sciences, associate professor of the department "Organization of transportation and traffic safety", Voronezh state forestry university named after G.F. Morozov, Voronezh, e-mail: busarin.eduard@mail.ru

Голев Александр Дмитриевич,
к.т.н., доцент кафедры «Производство, ремонт и эксплуатация машин», Воронежский государственный лесотехнический университет имени Г.Ф. Морозова, г. Воронеж.

Golev Alexander Dmitrievich,
candidate of technical sciences, associate professor of the department "Production, repair and operation of machinery", Voronezh state forestry university named after G.F. Morozov, Voronezh.

Аннотация. В статье рассмотрена технико-экономическая методика оценки эффективности пассажирских автотранспортных перевозок, которая основана на количественных, качественных и экономических аспектах. Аналитически показана их взаимосвязь и отражено их влияние на эффективности организации перевозочного процесса на пассажирском автомобильном транспорте.

Annotation. The article examines a techno-economic methodology for evaluating the efficiency of passenger road transport operations, which is based on quantitative, qualitative, and economic aspects. Their interrelationship is analytically demonstrated, and their impact on the effectiveness of organizing the transport process in passenger road transport is reflected.

Ключевые слова: ПАССАЖИРСКИЙ АВТОТРАНСПОРТ, РЕГУЛЯРНОСТЬ ДВИЖЕНИЯ АВТОТРАНСПОРТА, КАЧЕСТВО АВТОПЕРЕВОЗОК, СЕБЕСТОИМОСТЬ АВТОПЕРЕВОЗОК, ОБЪЁМ АВТОТРАНСПОРТНОЙ РАБОТЫ.

Keywords: PASSENGER VEHICLES, REGULARITY OF MOTOR TRANSPORT, QUALITY OF ROAD TRANSPORTATION, COST OF TRANSPORTATION, VOLUME OF MOTOR TRANSPORT WORK.

¹ Автор для ведения переписки

1 Состояние вопроса исследования и актуальность работы

В настоящее время в городах происходит рост объёмов пассажирских автомобильных перевозок. Однако уровень предоставляемых услуг и качество перевозок остаются недостаточными. Это отражается коэффициентами наполнения пассажирского транспорта, их регулярностью движения на улично-дорожной сети городов, временем поездки пассажиров и безопасностью перевозочного, транспортного процесса. Себестоимость перевозочного процесса также увеличивается. Поэтому комплексная оценка технико-экономического процесса пассажирских автотранспортных перевозок является целесообразной и актуальной в области организации пассажирских и автотранспортных перевозок [1-3].

Разработка объективных мероприятий предполагает детальную технико-экономическую оценку пассажирских перевозок с выбором критериев деятельности перевозочного процесса по конечным результатам и взаимосвязи показателей между собой, их объективный учёт, анализ и т.д. Таким образом, целью работы автотранспортных пассажирских предприятий является полное удовлетворение потребностей пассажиров в перевозках при минимальных затратах. При этом чётко выделяются следующие три аспекта:

- количественный, характеризующий транспортной работой и производительностью пассажирского автотранспорта;
- качественный, характеризующий уровнем качества пассажирских перевозок;
- экономический, характеризующий величиной издержки при перевозках пассажиров на улично-дорожной сети (УДС) города [4, 1].

Очевидно, чтобы выполнить условие неконфликтности целей технической эксплуатации пассажирского автотранспорта, необходимо, в первую очередь, привести в соответствие цели автобусных перевозок и целей технической эксплуатации автомобилей, а именно, количественные и, наконец, экономические цели автобусных перевозок и также технической эксплуатации автомобилей.

2 Материалы и методы

Методика исследования включает обработку и анализ объективной информации и действующих на нее внешних факторов, включая и особенности работы, а также взаимодействие с вышестоящими органами и смежными организациями [4, 1]. Выполнение решения и анализ обратной связи соответствовала по критерию экономической эффективности за счет предлагаемого подхода совершенствования организации пассажирских перевозок автомобильным транспортом. Для этого цель работы автоперевозчиков на УДС городов может быть представлена в следующем виде:

$$\begin{aligned} Q &\geq Q_{\text{пл}} \\ W &\geq W_{\text{пл}} \\ K_{\text{ф}} &\geq K_{\text{н}} \\ Z_{\text{ат}} + Z_{\text{в}} &\leq Z_{\text{н}} \end{aligned} \quad (1)$$

где Q и W – соответственно фактический объём транспортной работы и производительности пассажирского автотранспорта, пасс.-км и пасс.-км/час; $Q_{\text{пл}}$ и $W_{\text{пл}}$ – соответственно плановый объём транспортной работы и производительности пассажирского автотранспорта, пасс.-км и пасс.-км/час; $K_{\text{ф}}$, $K_{\text{н}}$ – соответственно фактический полный коэффициент качества пассажирских перевозок и нормативный результирующий коэффициент качества перевозок, оба коэффициента учитывают коэффициенты наполняемости, регулярности движения, времени перевозки, безопасности перевозок и определяются произведением вышеперечисленных четырёх коэффициентов; $Z_{\text{ат}}$ – затраты на пассажирские перевозки, руб.; $Z_{\text{в}}$ – внетранспортные затраты, руб.; $Z_{\text{н}}$ – нормативное значение затрат на пассажирские перевозки.

Условие (1) выполнимо при соблюдении цели технической эксплуатации пассажирского автотранспорта (ТЭПА) и достижении целей у автоперевозчиков по обеспечению ими количественных, качественных и экономических показателей [3-5].

3 Результаты исследований

Определение нормативного параметра, характеризуемого эффективностью объёма перевозок в течение определённого планового периода времени каждым пассажирским автотранспортом может быть определено по выражению:

$$Q = D_{\text{к}} \cdot \lambda_{\text{в}} \cdot q_{\text{н}} \cdot \gamma_{\text{вм}} \cdot V_{\text{э}} \cdot (T_{\text{н}} - T_{\text{о}}), \quad (2)$$

где $D_{\text{к}}$ – календарные дни рассматриваемого периода; $\lambda_{\text{в}}$ – коэффициент выпуска пассажирского автотранспорта на линию; $q_{\text{н}}$ – номинальная пассажироместимость пассажирского транспорта, пасс.; $\gamma_{\text{вм}}$ – коэффициент использования пассажироместимости пассажирского автотранспорта; $V_{\text{э}}$ – средняя эксплуатационная скорость пассажирского автотранспорта, км/ч; $T_{\text{н}}$ – время в наряде на маршруте улично-дорожной сети, ч; $T_{\text{о}}$ – время, затраченное пассажирским автотранспортом при «нулевом» пробеге, ч.

Объём фактической транспортной работы пассажирским автотранспортом за соответствующий период определяется по следующей зависимости:

$$Q_{\text{ф}} = D_{\text{к}} \cdot \lambda_{\text{в}} \cdot q_{\text{н}} \cdot \gamma_{\text{вм}} \cdot V_{\text{э}} \cdot (T_{\text{н}} - T_{\text{о}} - t), \quad (3)$$

где t – средняя продолжительность потери рабочего времени при нахождении пассажирского автотранспорта в ТО, ремонте, отказах в пути по причине технической неисправности и т.д., ч.

Из зависимости (3) следует, что фактическая транспортная работа $Q_{\text{ф}}$ всегда меньше нормативной Q . Эту разницу определяет параметр t . Снижение фактической транспортной работы $Q_{\text{ф}}$ можно компенсировать выпуском на маршруты УДС дополнительного (резервного)

автотранспорта [7-9]. Уменьшить разницу между нормативной работой Q и фактической Q_f можно тремя способами:

- повышением коэффициента технической готовности пассажирского автотранспорта;
- увеличением количества пассажирского автотранспорта;
- увеличением первого и второго вариантов.

Предпочтительность вариантов целесообразно оценивать по экономическому критерию, при котором суммарные финансовые издержки от его реализации будут минимальные [10, 11].

Фактически отработанное на маршруте УДС время является одним из основных показателей количественного и качественного аспекта транспортного процесса при перевозке пассажиров. Качественный аспект перевозки пассажиров характеризуется комфортностью перевозки, временем затрачиваемым пассажиром на поездку и безопасностью перевозки. Комфортность оценивается соответственно коэффициентами относительного наполнения $K_\gamma(\gamma_n; \gamma_f)$ и регулярности движения пассажирского автотранспорта $K_p(P_{вып}; P_{пл})$, где γ_n и γ_f – соответственно нормативный и фактический коэффициенты наполнения в пассажирском автотранспорте; $P_{вып}$ и $P_{пл}$ – соответственно количество выполненных и плановых рейсов. Затраты времени на поездки пассажиров оцениваются коэффициентом $K_t(t_n; t_f)$, где t_n и t_f – соответственно нормативное и фактическое время, затрачиваемое на поездку. Безопасность же перевозки пассажиров оценивается коэффициентом динамического изменения уровня дорожно-транспортных происшествий B_o :

$$K_{б.д.} = \frac{1}{1 + 0.2B_o}, \quad (4)$$

где B_o – динамический показатель уровня ДТП на предприятии.

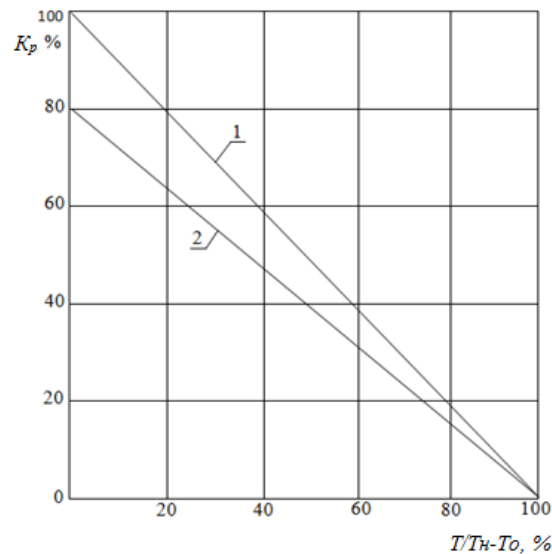
Общая оценка качества обслуживания пассажиров определяется коэффициентом качества обслуживания $K_{к.о.}$ равным:

$$K_{к.о.} = K_\gamma \cdot K_p \cdot K_t \cdot K_{б.д.} \quad (5)$$

Коэффициент $K_{к.о.}$ характеризует четырёхуровневую систему оценки качества перевозки пассажиров: образцовый ($K_{к.о.} \geq 0,96$); хороший ($K_{к.о.} = 0,65 \dots 0,96$); удовлетворительный ($K_{к.о.} = 0,38 \dots 0,65$); неудовлетворительный ($K_{к.о.} \leq 0,38$). Показатель $K_{к.о.}$ влияет на порядок выдачи и аннулирования лицензии на перевозочную деятельность пассажирским автотранспортом [12-14].

Одним из основных показателей качества обслуживания пассажиров является регулярность движения пассажирского автотранспорта, характеризуемая коэффициентом регулярности (K_p), который определяется как отношение фактически выполненных рейсов по расписанию движения по магистрали N_p^ϕ к их плановому количеству за тот же период времени N_p^π , рис. 1, то есть:

$$K_p = \frac{N_p^\phi}{N_p^\pi} = \frac{(T_n - T_o)_p^\phi}{(T_n - T_o)_p^\pi}$$



1 – линия теоретически возможной регулярности движения; 2 – линия фактической регулярности движения пассажирского транспорта; T_n – время в наряде, ч; T_o – время, затраченное автобусами при «нулевом» пробеге, ч.; t – величина потерь линейного времени, ч.

Рисунок 1 – Зависимость коэффициента регулярности движения K_p от потери рабочего времени t

Так как (K_p) позволяет практически постоянно оценивать продвижение автобуса по маршруту, а, следовательно, и качество перевозок, то лучшего измерителя, чем потеря линейного времени, трудно представить (рис. 1).

Коэффициент регулярности (K_p) дает ряд преимуществ:

- повышается объективность и достоверность планирования транспортной работы по выполнению рейсов на магистрали (N);
- определяется вклад инженерно-технической службы и службы эксплуатации в реализацию запланированного качества перевозок пассажиров;
- отражает влияние продолжительности отказа в обслуживании пассажиров на качество перевозок и позволяет оценить его более объективно по количеству выполненных рейсов;
- позволяет рассматривать потери линейного времени как критерий работоспособности автобусов на линии.

С учётом качества перевозок объём фактической транспортной работы за соответствующий период окончательно примет следующий вид:

$$Q_{\phi} = D_k \cdot \lambda_v \cdot q_n \cdot \gamma_{\text{вм}} \cdot V_3 \cdot (T_n - T_o - t) \cdot K_p \quad (6)$$

На регулярность движения пассажирского автотранспорта оказывает и их пробег с начала эксплуатации. Это влияние носит затухающий характер. Так, если при увеличении пробега с начала эксплуатации с 50 до 100 тыс. км регулярность движения снижается на 0,5 %, то при увеличении пробега с начала эксплуатации с 300 до 350 тыс. км регулярность движения снижается только на 0,1 %. При пробеге автобуса с начала эксплуатации 450 тыс. км и более значение коэффициента регулярности движения от «возраста» практически не зависит, т.е. становится стабильным [4, 1].

В формуле (6) выражение $V_3(T_n - T_o - t)K_p$ характеризует фактический пробег пассажирского автотранспорта. Так как каждый километр пробега пассажирского автотранспорта можно представить в стоимостном выражении, то отсюда следует вывод о тесной связи объёма транспортной работы Q_{ϕ} , регулярности движения K_p и себестоимости перевозок C . В этом случае затраты на перевозки за определённый плановый период с учётом Q_{ϕ} будут:

$$C_{\phi} = D_{\kappa} \cdot \lambda_{\text{в}} \cdot q_{\text{н}} \cdot \gamma_{\text{вм}} \cdot V_{\text{э}} \cdot (T_{\text{н}} - T_0 - t) \cdot K_{\text{р}} \cdot C_{\text{н}}, \quad (7)$$

где $C_{\text{н}}$ – норматив затрат на перевозку 1-го километра пробега, руб/км.

Затраты на перевозку пассажиров можно также выразить через объём транспортной работы C_{ϕ} .

$$C_{\phi} = \frac{Q_{\phi}}{q_{\text{н}} \cdot \gamma_{\text{вм}}} \cdot C_{\text{н}}, \quad (8)$$

а также и через регулярность движения $K_{\text{р}}$.

4 Обсуждение и заключение

Численное решение транспортной задачи не обязательно приводит к пониманию изменения во времени связей в математических моделях. В то же время оценка адекватности и полезности математической модели, а также характера её поведения зачастую бывает важнее результатов конкретного расчета.

Используемые в экономике достаточно простые математические модели обеспечивают быстрый анализ экономических ситуаций. Однако они хорошо работают лишь в периоды относительной стабильности развития экономики с существенно не изменяющейся технологией. Поэтому исследование подобных моделей позволяет изучать процессы самоорганизации, возникающие под воздействием различных возмущений.

Моделирование транспортных процессов, рассчитанных на долговременные периоды развития целесообразно рассматривать в динамическом программировании при использовании элементов прогнозирования, так как данные процессы являются стохастическими.

Полученные зависимости (2)-(8) являются взаимосвязанными и характеризуют количественную, качественную и экономическую составляющие [15].

С учётом вышеизложенного цель пассажирских автотранспортных перевозок может быть уточнена с учётом фактических и плановых коэффициентов технической готовности и потерь рабочего времени по техническим причинам (9):

$$\begin{aligned} Q &\geq Q_{\text{пл}} \\ \lambda_T &\geq \lambda_T^{\text{пл}} \\ t_T &\leq t_T^{\text{пл}} \\ K_{\phi} &\geq K_{\text{н}} \\ Z_{\text{ат}} + Z_{\text{в}} &\leq Z_{\text{н}} \end{aligned} \quad (9)$$

где λ_T и $\lambda_T^{\text{пл}}$ – соответственно фактический и плановый коэффициент технической готовности; t_T и $t_T^{\text{пл}}$ – соответственно фактические и плановые потери рабочего времени по техническим причинам, ч.

Существующие количественные показатели наиболее удачно описывают процессы сезонного летнего времени, пассажирских перевозок, от которых зависят затраты на перевозки, однако практическое их использование затруднено из-за сложности определения исходных данных.

Таким образом технико-экономическая оценка пассажирских автоперевозок предполагает выбор критериев оценки, которые должны отражать количественную (объём транспортной работы), качественную (регулярность движения пассажирского автотранспорта) и экономическую (затраты на перевозки пассажиров) стороны транспортного процесса. Критерии оценки должны быть обязательно связаны между собой (формулы (7)-(8)) и дополнять друг друга [16, 17].

Степень влияния рассмотренных количественных, качественных и экономических факторов на совершенствование организации городских пассажирских перевозок автомобильным транспортом необходимо объективно детально рассматривать в условиях работы городского пассажирского транспорта. При этом необходимо учитывать характеристики пассажирского автотранспорта, их вместимость и возраст, техническое состояние, условия эксплуатации на маршруте и т.д.

Список литературы

- 1 Белокуров, В.П., Мотузка Д.А., Белокуров С.В. Управление социально-экономической эффективностью // Автотранспортное предприятие. – №5. – 2011. – С. 47-49.
- 2 Белокуров В.П., Белокуров С.В. Оптимизация многоцелевых транспортных задач при использовании алгоритма анализа и отсева на итерациях поиска решений // Транспорт: наука, техника, управление. Научный информационный сборник. ВИНТИ РАН. – №6. – 2009. – С. 2-4.
- 3 Кузнецов, Е.С. Управление технической эксплуатацией автомобилей. – М.: Транспорт, 1990. – 272 с.
- 4 Ларичев, О.И. Теория и методы принятия решений – М.: Логос, 2000. – 296 с.
- 5 Белокуров В.П., Белокуров С.В., Скрыль С.В. Принятие решений для эффективного управления транспортными системами на основе ситуаций выбора // Транспорт: наука, техника, управление. Научный информационный сборник. ВИНТИ РАН. – №2. – 2010. – С. 6-10.
- 6 Петров А.И. Формирование результативности пассажирских автомобильных перевозок и условиях переменной внешней сред. Тюмень: ТюмГНГУ, 2009. – 152 с.
- 7 Петров В.В. Теория управления движением транспортных потоков в городах. Омск: Сибирский государственный автомобильно-дорожный университет (СибАди). – 2020. – 101с.
- 8 Сысоев А.С., Ляпин С.А., Галкин А.В. Интеллектуальные методы управления транспортными системами. 3-е изд. М.: Издательско-торговая корпорация «Дашков и К»; 2023. – 192 с.
- 9 Касаткин Ф.П., Коновалов С.И., Касаткин Э.Ф. Организация перевозочных услуг и безопасность транспортного процесса. – М.: Академический проект, 2004. – 352 с.
- 10 Лохов А. Совершенствование управления городским пассажирским транспортом // Автомобильный транспорт. – М.; 1994. – №6. – С. 10-13.
- 11 Моделирование экологически рационального выбора типа городского пассажирского транспорта // Мир транспорта и технических машин. – №2-1 (85). – 2024. – С. 3-7
- 12 Белокуров В.П., Е.А. Панявина, Э.Н. Бусарин, Р.А. Кораблёв. Экономико-математические модели рационального развития городских пассажирских перевозок // Мир транспорта и технологических машин. №3-1 (86). – 2024. – С. 35-41.
- 13 Belokurov, V., Belokurov S., Zolnikov, V. Modeling passenger transportation processes using vehicles of various forms of ownership // Transportation Research Procedia. 2018, 36, P. 44-49
- 14 Kaufmann A., Gupta M.M. Fuzzi mathematical models in engineering and management science. Amsterdam: North-Holland, 1998. – P. 195.
- 15 Gottlich S., Klar A. Model hierarchies and optimization for dynamic flows on networks // Modeling and optimization of flows on networks. Cetaro.: C.I.M.E., 2009 P. 150.
- 16 Belokurov S.V., Belokurov V.P., Zolnikov V.K., Cherkasov O.N. Methods of multi-criteria optimization in problems of simulation of trucking industry // Transportation research procedia. 2017. - №20. – P. 47-52.
- 17 Shen X., Yao X. Mathematical modeling and multiobjective evolutionary algorithms applied to dynamic flexible job shop scheduling problems // Information Sciences. – 2015. – Vol. 298. - P. 198-224.

References

- 1 Belokurov, V.P., Motuzka, D.A., Belokurov, S.V. “Managing Socio-Economic Efficiency.” Automobile Transport Enterprise, No. 5, 2011, pp. 47–49.
- 2 Belokurov, V.P., Belokurov, S.V. “Optimization of Multi-Objective Transport Problems Using an Analysis and Screening Algorithm at Solution Search Iterations.” Transport: Science, Technology, Management. Scientific Information Collection. VINITI RAS, No. 6, 2009, pp. 2–4.
- 3 Kuznetsov, E.S. “Managing Technical Operation of Vehicles.” Moscow: Transport, 1990, 272 p.
- 4 Larichev, O.I. Theory and Methods of Decision-Making. Moscow: Logos, 2000, 296 p.
- 5 Belokurov V.P., Belokurov S.V., Skryl S.V. Decision-making for efficient management of transport systems based on choice situations // Transport: science, technology, management. Scientific information collection. VINITI RAS. - No. 2. - 2010. - P. 6-10.
- 6 Petrov A.I. Formation of the Performance of Passenger Automobile Transportation and Conditions of a Variable External Environment. Tyumen: Tyumen State Oil and Gas University, 2009. – 152 p.
- 7 Petrov V.V. Theory of Traffic Flow Control in Cities. Omsk: Siberian State Automobile and Highway University (SibAdi). – 2020. – 101 p.
- 8 Sysoev A.S., Lyapin S.A., Galkin A.V. Intelligent Methods of Transport System Management. 3rd ed. Moscow: Dashkov i K Publishing and Trading Corporation; 2023. – 192 p.

9 Kasatkin F.P., Konovalov S.I., Kasatkin E.F. Organization of Transportation Services and Transport Process Safety. – Moscow: Academicheskyy Proekt, 2004. – 352 p.

10 Lokhov A. Improving the Management of Urban Passenger Transport // Automobile Transport. - Moscow; 1994. - No. 6. - Pp. 10-13.

11 Modeling an Environmentally Rational Choice of Urban Passenger Transport Type // The World of Transport and Technical Machines. - No. 2-1 (85). - 2024. - Pp. 3-7

12 Belokurov V.P., E.A. Panyavina, E.N. Busarin, R.A. Korablyov. Economic and Mathematical Models of Rational Development of Urban Passenger Transportation // The World of Transport and Technological Machines. No. 3-1 (86). - 2024. - Pp. 35-41.

13 Belokurov, V., Belokurov S., Zolnikov, V. Modeling Passenger Transportation Processes Using Vehicles of Various Forms of Ownership // Transportation Research Procedia. 2018, 36, pp. 44-49

14 Kaufmann A., Gupta M.M. Fuzzi mathematical models in engineering and management science. Amsterdam: North-Holland, 1998. – P. 195.

15 Gottlich S., Klar A. Model hierarchies and optimization for dynamic flows on networks // Modeling and optimization of flows on networks. Cetaro.: C.I.M.E., 2009 P. 150.

16 Belokurov S.V., Belokurov V.P., Zolnikov V.K., Cherkasov O.N. Methods of multi-criteria optimization in problems of simulation of trucking industry // Transportation research procedia. 2017. - No. 20. – P. 47-52.

17 Shen X., Yao X. Mathematical modeling and multiobjective evolutionary algorithms applied to dynamic flexible job shop scheduling problems // Information Sciences. – 2015. – Vol. 298. - P. 198-224.

© Белокуров С. В., Кононов М. С., Панявина Е. А.,
Белокуров В. П., Кораблев Р. А., Бусарин Э. Н., Голев А. Д., 2026

DOI: 10.34220/2311-8873-2026-53-61



УДК 629.1.025

UDC 629.1.025

2.9.5 – эксплуатация автомобильного транспорта

**ОЦЕНКА ЭФФЕКТИВНОСТИ
ЭКСПЛУАТАЦИИ И РЕМОНТА
АВТОМОБИЛЬНОГО ТРАНСПОРТА
НА ОСНОВЕ LCC-АНАЛИЗА
И УПРАВЛЕНИЯ ИЗНОСОМ**

**ASSESSMENT OF THE EFFICIENCY
OF OPERATION AND REPAIR
OF MOTOR VEHICLES BASED ON LCC
ANALYSIS AND WEAR MANAGEMENT**

✉¹ **Жайворонок Денис Александрович**,
к.т.н., доцент кафедры производства, ре-
монта и эксплуатации машин, Воронежский
государственный лесотехнический универ-
ситет имени Г.Ф. Морозова, г. Воронеж,
e-mail: dzhavoronok@bk.ru

✉¹ **Zhayvoronok Denis Alexandrovich**,
candidate of technical sciences, associate professor
of the department of production, repair and opera-
tion of machines, Voronezh state forestry univer-
sity named after G.F. Morozov, Voronezh, e-mail:
dzhavoronok@bk.ru

Иванников Валерий Александрович,
д.т.н., профессор кафедры производства, ре-
монта и эксплуатации машин, Воронежский
государственный лесотехнический универ-
ситет имени Г.Ф. Морозова, г. Воронеж.

Ivannikov Valery Aleksandrovich,
doctor of technical sciences, professor of the de-
partment of production, repair, and operation of
machines, Voronezh state forestry university
named after G.F. Morozov, Voronezh.

Шаталов Евгений Владимирович,
к.т.н., доцент кафедры организации перево-
зок и безопасности движения, Воронежский
государственный лесотехнический универ-
ситет имени Г.Ф. Морозова, г. Воронеж.

Shatalov Evgeny Vladimirovich,
candidate of technical sciences, associate professor
of the department of production, repair and opera-
tion of machines, Voronezh state forestry univer-
sity named after G.F. Morozov, Voronezh.

Черников Эдуард Анатольевич,
к.т.н., доцент кафедры промышленного транс-
порта, строительства и геодезии Воронежский
государственный лесотехнический универси-
тет имени Г.Ф. Морозова, г. Воронеж.

Chernikov Eduard Anatolyevich,
candidate of technical sciences, associate professor
at the department of industrial transport, construction,
and geodesy, Voronezh state forestry university
named after G.F. Morozov, Voronezh.

Маклакова Елена Альбертовна,
д.фил.н., профессор кафедры иностранных
языков, Воронежский государственный ле-
сотехнический университет имени Г.Ф. Мо-
розова, г. Воронеж.

Maklakova Elena Albertovna,
doctor of philology, professor of the department of
foreign languages, Voronezh state forestry univer-
sity named after G.F. Morozov, Voronezh.

Зеликов Владимир Анатольевич,
д.т.н., профессор кафедры организации пере-
возок и безопасности движения, Воронеж-
ский государственный лесотехнический уни-
верситет имени Г.Ф. Морозова, г. Воронеж.

Zelikov Vladimir Anatolyevich,
doctor of technical sciences, professor of the or-
ganization of transportation and traffic safety, Vo-
ronezh state forestry university named after G.F.
Morozov, Voronezh.

Аннотация. В статье проведён комплексный анализ современного состояния и трансформации системы технической эксплуатации и ремонта (ТЭР) автомобильного транспорта. На основе методологии управления стоимостью жизненного цикла (LCC) и анализа специфики российского автопарка разработана система количественных показателей для оценки эффективности. Практическое применение модели продемонстрировано на примерах расчёта целесообразности ремонта, оценки износа и экономической эффективности предиктивного обслуживания. Результаты подтверждают, что переход к управлению на основе данных является ключевым фактором снижения затрат и повышения надёжности в условиях стареющего парка транспортных средств.

Ключевые слова: ТЕХНИЧЕСКАЯ ЭКСПЛУАТАЦИЯ, РЕМОНТ АВТОМОБИЛЕЙ, СТОИМОСТЬ ЖИЗНЕННОГО ЦИКЛА (LCC), ПРЕДИКТИВНОЕ ОБСЛУЖИВАНИЕ, УПРАВЛЕНИЕ АВТОПАРКОМ, ПОКАЗАТЕЛИ ЭФФЕКТИВНОСТИ (KPI).

Annotation. The article provides a comprehensive analysis of the current state and transformation of the system of technical operation and repair of motor transport. Based on the methodology of life cycle cost management (LCC) and analysis of the specifics of the Russian fleet, a system of quantitative indicators has been developed to assess efficiency. The practical application of the model is demonstrated by examples of calculating the feasibility of repairs, assessing wear and cost-effectiveness of predictive maintenance. The results confirm that the transition to data-driven management is a key factor in reducing costs and improving reliability in an aging fleet of vehicles.

Keywords: TECHNICAL OPERATION, CAR REPAIR, COST OF LIFE CYCLE (LCC), PREVENTIVE MAINTENANCE, FLEET MANAGEMENT, PERFORMANCE INDICATORS (KPI).

¹ Автор для ведения переписки

1 Состояние вопроса исследования и актуальность работы

Автомобильный транспорт сохраняет лидирующие позиции в логистике и пассажирских перевозках, оставаясь критически важным для экономики России и мира в целом. Его доля в мировом пассажирообороте превышает 70 %, а ключевыми преимуществами являются гибкость, универсальность и способность обеспечивать доставку «от двери до двери».

Система технической эксплуатации и ремонта (ТЭР) автомобильного транспорта исторически формировалась как ответ на необходимость поддержания растущего парка машин в работоспособном состоянии. В России эта система развивается в условиях специфической структуры автопарка, для которой характерен высокий средний возраст транспортных средств. По данным Росстата на конец 2023 года в России было зарегистрировано 52,8 млн легковых автомобилей, из которых более 60 % старше 10 лет [1]. Этот фактор оказывает определяющее влияние на объем и характер спроса на услуги ТЭР, делая рынок ремонта и обслуживания критически важной отраслью экономики.

Основным фактором, определяющим специфику российского рынка ТЭР, является возрастная структура парка (табл. 1).

Как видно из табл. 1, основной объем рынка услуг ТЭР формируют автомобили старше 10 лет (более 60 % парка), для которых характерен не столько план, сколько аварийный и подерживающий ремонт. Это создает высокую нагрузку на логистику запчастей и требует от сервисов гибкости [2, 3].

Таблица 1 – Возрастные группы легковых автомобилей РФ

Возрастная группа (лет)	Количество автомобилей, млн. ед. (оценка)	Доля от общего парка, %	Характерный спрос на услуги ТЭР
До 5 лет	8,5	16	Плановое ТО у дилера, гарантийные случаи, минимальный ремонт
От 5 до 10 лет	12,2	23	Постгарантийное обслуживание у дилеров и независимых СТО, первые серьезные замены расходников (ремни ГРМ, подвеска)
От 10 до 15 лет	16,9	32	Активный ремонт: замена деталей ходовой, топливной системы, электропроводки. Высокий спрос на неоригинальные запчасти
Старше 15 лет	15,2	29	Поддерживающий ремонт, поиск б/у запчастей, восстановление агрегатов. Высокий риск отказов
ИТОГО	52,8	100	

Диаграмма, представленная на рис. 1, наглядно демонстрирует, что автомобили в возрасте от 10 до 15 лет являются самой многочисленной группой (32 % парка, или 16,9 млн ед.), формирующей устойчивый спрос на капитальный и восстановительный ремонт.

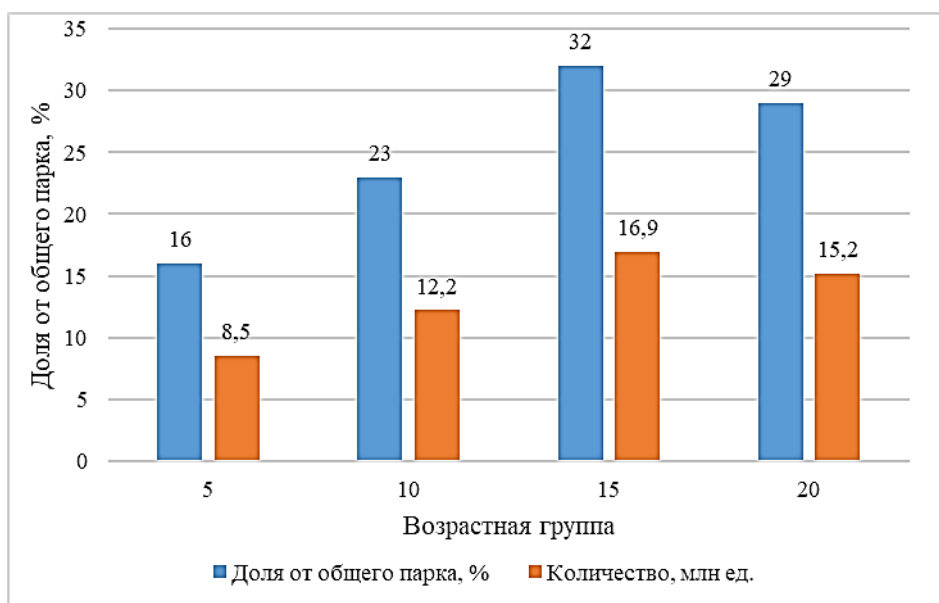


Рисунок 1 – Распределение парка легковых автомобилей России в зависимости от возраста на конец 2023 года

В сумме с группой старше 15 лет (29 %, или 15,2 млн. ед.) автомобили в возрасте от 10 до 15 лет составляют более 60 % всего парка – это свыше 32 миллионов автомобилей, постоянно нуждающихся в услугах по замене изношенных узлов, восстановлению агрегатов и сложной диагностике. Именно этот сегмент создает высокую нагрузку на логистику запчастей (как оригинальных, так и аналогов) и требует от сервисов исключительной гибкости и широкой номенклатуры выполняемых работ [4].

Таким образом, автомобильный парк России характеризуется не прогрессирующим, а скачкообразным ростом затрат на обслуживание и ремонт. По данным исследований на третий год эксплуатации расходы на ТО могут увеличиваться в четыре раза. Это напрямую формирует спрос не на плановое обслуживание, а на аварийный и поддерживающий ремонт, создавая высокую нагрузку на сервисную инфраструктуру и логистику запчастей.

В условиях экономической нестабильности и роста цен на запчасти, усугубленного процессами импортозамещения и логистическими сбоями, на первый план для всех категорий владельцев выходит системное управление стоимостью жизненного цикла (Life Cycle Cost (LCC)) автомобиля.

Одновременно с этим наблюдается технологический разрыв – автомобиль трансформируется в сложную мехатронную систему, в то время как методы диагностики многих критически важных для безопасности узлов (например, шаровых опор, стоек стабилизатора) часто остаются примитивными и основаны на субъективной оценке мастера. Это повышает риски дорожно-транспортных происшествий по причине технической неисправности.

Основой классической системы ТЭР был регламент, предписывающий выполнение конкретных операций технического обслуживания через фиксированные промежутки пробега или времени. Однако для стареющего парка такой подход часто оказывается неэффективным, так как износ индивидуален и зависит от условий эксплуатации, качества обслуживания в прошлом.

Современный этап характеризуется смещением фокуса с регламента на фактическое состояние. Этот переход стал возможен благодаря развитию систем бортовой и стендовой диагностики, а также внедрению предиктивных (прогнозных) технологий. На смену диагностике «по факту отказа» приходит прогнозирование. Его инструментами являются телематика (внедряемая, в первую очередь, в коммерческом транспорте и новых легковых автомобилях премиум-сегмента), анализ рабочих жидкостей и виброакустическая диагностика. Это позволяет планировать ремонты и избегать внезапных отказов, что критически важно для старого парка.

Таким образом, актуальность работы обусловлена необходимостью разработки и внедрения современных, экономически обоснованных методов управления ТЭР, которые позволят:

- перейти от стратегии реагирования на отказы к предиктивному планированию;
- объективно оценивать целесообразность капитальных вложений в ремонт стареющей техники;
- повысить безопасность эксплуатации через внедрение количественных методов оценки технического состояния.

2 Материалы и методы

Для достижения поставленных целей была применена система взаимосвязанных аналитических моделей и показателей. Методологическую основу составили принципы управления стоимостью жизненного цикла LCC, методы оценки технического износа и сравнительного анализа экономической эффективности различных стратегий обслуживания [5].

Модель LCC используется для обоснования фундаментальных управленческих решений: отремонтировать существующее транспортное средство или заменить его. Чистая приведенная стоимость владения рассчитывается по формуле:

$$LLC = C_{\text{пр}} + \sum_{t=1}^N \frac{C_{\text{э}}(t) + C_{\text{ТОиР}}(t) + C_{\text{ф}}(t)}{(1 + d)^t},$$

где $C_{\text{п}}$ – капитальные затраты на приобретение, руб.; $C_{\text{э}}(t)$ – ежегодные переменные эксплуатационные затраты (топливо, ГСМ, шины), руб.; $C_{\text{ТОиР}}(t)$ – ежегодные затраты на ТО и ремонт, являющиеся функцией возраста и пробега, руб.; $C_{\text{ф}}(t)$ – фиксированные затраты (налоги, страховка, административные расходы), руб.; d – ставка дисконтирования; t – год эксплуатации (от 1 до N).

Для окончательного выбора в пользу будущего ремонта или замены рассчитывается срок окупаемости (Payback Period (PBP)) инвестиций в капитальный ремонт:

$$PBP = \frac{C_{\text{рем}}}{\Delta C_{\text{ТОиР}} L_{\text{ср.год}}},$$

где $C_{\text{рем}}$ – стоимость единовременного капитального ремонта или восстановления, руб.; $\Delta C_{\text{ТОиР}}$ – разница в удельных затратах на ТО и Р после ремонта, руб.; $L_{\text{ср.год}}$ – среднегодовой пробег, км.

Для перехода от календарного возраста к объективной оценке технического состояния используется модель, основанная на выработанном ресурсе. Удельный физический износ узла рассчитывается по адаптированной методике:

$$I_{\text{ф}} = I_{\text{ост}} + (I_{\text{пр}} - I_{\text{ост}}) \frac{P_{\text{факт}}}{P_{\text{пр}}},$$

где $I_{\text{ф}}$ – расчетный физический износ, %; $I_{\text{ост}}$ – остаточный износ после предыдущего ремонта (принимается равным 20 %); $I_{\text{пр}}$ – предельный износ, требующий капремонта (70-80 %); $P_{\text{факт}}$ – фактический пробег с последнего ремонта, км; $P_{\text{пр}}$ – установленный межремонтный ресурс агрегата, км.

На основе этой модели прогнозируется остаточный ресурс:

$$P_{\text{ост}} = P_{\text{пр}} - P_{\text{факт}},$$

что является основой для предиктивного планирования.

Экономическое обоснование внедрения систем углубленной диагностики (телематика, анализ масел, вибродиагностика) проводится через сравнение сценариев:

$$\Delta_{\text{предикт}} = C_{\text{авар}} - (C_{\text{план}} + C_{\text{диаг}}),$$

где $C_{\text{авар}}$ – стоимость ликвидации аварийного отказа (ремонт + простой + возможные сопутствующие повреждения), руб.; $C_{\text{план}}$ – стоимость плановой предупредительной замены узла, руб.; $C_{\text{диаг}}$ – приведенные затраты на диагностику, руб..

Положительное значение $\Delta_{\text{предикт}}$ доказывает экономическую целесообразность предиктивной стратегии.

Для контроля результатов применяются операционные показатели эффективности (Key Performance Indicator (KPI)), рекомендованные для управления автопарком.

3 Результаты исследований

Применение разработанного методического аппарата к условиям российского автопарка позволило получить следующие количественные результаты [6]. Для автомобиля возрастом 12 лет с пробегом 600000 км рассматривался капитальный ремонт двигателя стоимостью $C_{\text{рем}} = 400000$ руб. Прогнозируемые удельные затраты на ТО и Р после ремонта оценивались в 18 руб./км, тогда как для аналогичного нового автомобиля – 11 руб./км. При годовом пробеге 50 000 км срок окупаемости ремонта составил:

$$PBP = 400\,000 / ((18 - 11) \cdot 50\,000) \approx 1,14 \text{ года.}$$

Вывод: если планируемый период дальнейшей эксплуатации превышает 1,14 года, капитальный ремонт экономически оправдан. В противном случае целесообразнее рассмотреть вариант списания и замены.

Для двигателя, отремонтированного 170 тыс. км назад при межремонтном ресурсе 250 тыс. км, физический износ был оценён как:

$$I_{\phi} = 20 + (75 - 20) \cdot (170\,000 / 250\,000) \approx 57,4 \%$$

Прогнозный остаточный ресурс до предельного износа:

$$P_{\text{ост}} = 250\,000 - 170\,000 = 80\,000 \text{ км.}$$

Данный расчёт позволяет запланировать замену или очередной ремонт агрегата на период до выработки остаточного ресурса, исключив внезапный отказ [7].

Расчёт для узла турбокомпрессора показал, что предотвращение одного аварийного отказа даёт экономический эффект:

$$\Delta_{\text{предикт}} = 300\,000 (C_{\text{авар}}) - (120\,000 \cdot (C_{\text{план}}) + 5\,000 \cdot (C_{\text{диаг}})) = 175\,000 \text{ руб.}$$

Для автопарка из 50 единиц техники, где прогнозируется 5-7 подобных отказов в год, совокупная годовая экономия может превышать 1 млн. рублей.

Внедрение цифровых систем мониторинга и агрегатно-узлового метода ремонта позволило добиться значимых изменений в *KPI* управления автопарком, что наглядно отражено в табл. 1 и на рис. 2.

Таблица 2 – Динамика ключевых показателей эффективности *KPI* автопарка после оптимизации системы ТЭР

Ключевой показатель эффективности (<i>KPI</i>)	До оптимизации	После внедрения предиктивной модели	Экономический/операционный эффект
Коэффициент технической готовности ($K_{\text{тг}}$)	0,93	0,96	Снижение времени простоя, увеличение доступного парка
Удельные затраты на ТОиР ($U_{\text{ТОиР}}$), руб./км	4,20	3,75	Прямая экономия на эксплуатационных расходах
Среднее время простоя на ремонт, дней/год	14	8	Сокращение потерь от простоев на 43 %
Доля аварийных ремонтов в общем объёме ТОиР	35 %	15 %	Снижение непредвиденных затрат и рисков

Для построения графика, иллюстрирующего разницу между стратегиями, были использованы смоделированные данные, основанные на реальных принципах экономики ТОиР и показателях эффективности из отраслевых примеров [8].

Таблица 3 – Показатели эффективности реактивной и предиктивной стратегий

Месяц эксплуатации	Реактивная стратегия, руб.	Предиктивная стратегия, руб.
0	0	0
3	50000	300000
6	100000	400000
9	800000 (аварийный ремонт)	520000
12	850000	650000
15	900000	800000
18	1700000 (второй аварийный ремонт)	950000

Как видно из табл. 3 в предиктивной модели изначально требуются инвестиции в систему мониторинга (например, 250–300 тыс. руб.), поэтому начальные затраты выше. Однако в долгосрочной перспективе расходы растут плавно и предсказуемо. В реактивной модели начальные затраты минимальны, но каждый аварийный отказ приводит к резкому скачку расходов из-за стоимости срочного ремонта и значительных простоев [9].

Сравнительная динамика совокупных годовых затрат на ТО и Р при реактивной и предиктивной стратегии обслуживания представлена на рис. 2.

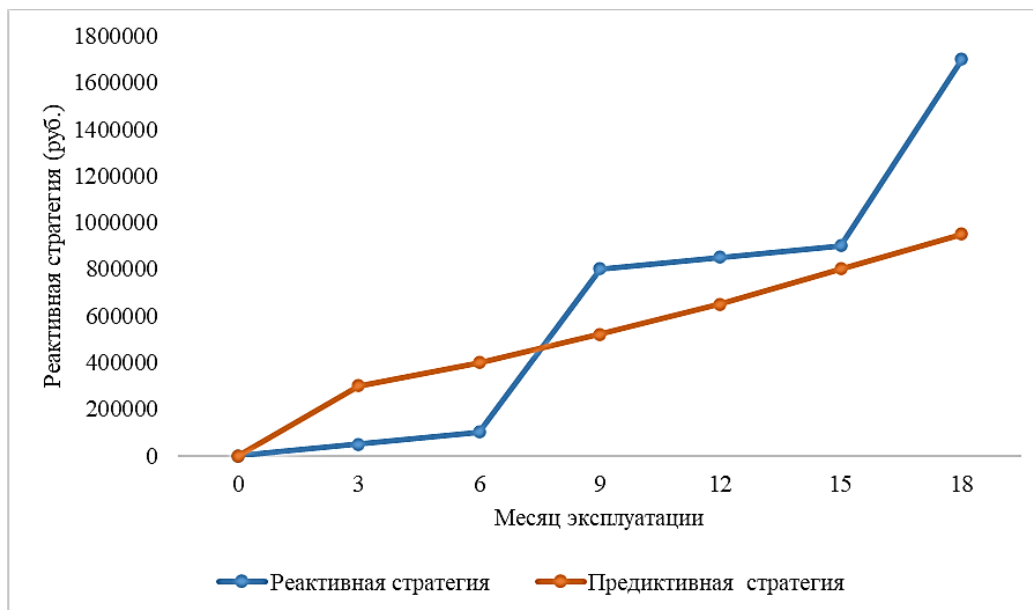


Рисунок 2 – Сравнительная динамика совокупных годовых затрат на ТО и Р

График наглядно демонстрирует как предиктивная стратегия сглаживает пики непредвиденных затрат, характерные для реактивного подхода, обеспечивая более прогнозируемый и управляемый бюджет на обслуживание [10].

4 Обсуждение и заключение

Проведённое исследование подтверждает, что основным драйвером развития сферы ТЭР в России является необходимость адаптации передовых управленческих и технологических практик к реалиям стареющего парка. Предложенная система количественных показателей и моделей (*LCC*, оценка износа, *KPI*) предоставляет практический инструментарий для:

- принятия стратегических финансовых решений о ремонте или замене единиц техники;
- оперативного планирования ресурсоёмких работ на основе прогноза остаточного ресурса;
- объективной оценки эффективности как отдельных ремонтных вмешательств, так и работы сервисной инфраструктуры в целом [11].

Дальнейшее развитие связано с глубокой цифровизацией процессов: интеграцией данных телематики, диагностических систем и управленческого учёта в единые аналитические платформы (*BI*-системы). Это позволит перейти от анализа отдельных случаев к оптимизации жизненного цикла всего автопарка на основе больших данных и искусственного интеллекта.

Список литературы

1 Современные системы и технологии на транспорте: проблемы и перспективы: Материалы Международной научно-практической конференции, посвященной 95-летию ВГЛТУ им. Г.Ф. Морозова, Воронеж, 24–25 апреля 2025 года. – Воронеж: Воронежский государственный лесотехнический университет им. Г.Ф. Морозова, 2025. – 296 с. – ISBN 978-5-7994-1172-5. – DOI 10.58168/MSTT2025. – EDN PCMGFE.

2 Вопросы реализации междисциплинарных связей и актуализации информации преподаваемых дисциплин на примере мониторинга подвижных объектов автотранспортной инфраструктуры / Д. А. Жайворонок, В. А. Иванников, С. В. Дорохин [и др.] // Инновации и передовые технологии в развитии транспортных систем : Материалы Всероссийской научно-практической конференции, Воронеж, 15 января 2025 года. – Воронеж: Министерство науки и высшего образования РФ, Воронежский государственный лесотехнический университет им. Г.Ф. Морозова, 2025. – С. 10-14. – DOI 10.58168/IATDTS2025_10-14. – EDN PPGNKO.

3 Статистка и анализ ДТП с участием женщин-водителей / А. В. Шурупова, И. А. Кондратенко, Н. И. Злобина [и др.] // Современные системы и технологии на транспорте: проблемы и перспективы : Материалы Международной научно-практической конференции, посвященной 95-летию ВГЛТУ им. Г.Ф. Морозова, Воронеж, 24–25 апреля 2025 года. – Воронеж: Воронежский государственный лесотехнический университет им. Г.Ф. Морозова, 2025. – С. 152-155. – DOI 10.58168/MSTT2025_152-155. – EDN DRBEFP.

4 Features of radio communication organization in lugging areas / D. Zhaivoronok, A. Novikov, I. Terehina, F. Shakina // BIO Web of Conferences. – 2024. – Vol. 145. – P. 04020. – DOI 10.1051/bioconf/202414504020. – EDN JHZYQC.

5 Посметьев, В. И. Актуальность промышленного получения высококачественной хвои на основе использования мобильных транспортных средств / В. И. Посметьев, Д. А. Жайворонок // Проблемы эксплуатации автомобильного транспорта и пути их решения на основе перспективных технологий и научно-технических решений : материалы Всероссийской научно-технической конференции, Воронеж, 06–07 октября 2022 года. – Воронеж: Воронежский государственный лесотехнический университет им. Г.Ф. Морозова, 2022. – С. 15-19. – DOI 10.58168/PRTOW2022_15-19. – EDN RMZQRD.

6 Дорохин, С. В. Организации радиосвязи с удаленными подвижными наземными объектами / С. В. Дорохин, В. А. Иванников, Д. А. Жайворонок // Моделирование, оптимизация и информационные технологии. – 2024. – Т. 12, № 4(47). – DOI 10.26102/2310-6018/2024.47.4.028. – EDN DHXOLK.

7 Иванников, В. А. Особенности транспортировки древесной зелени в природно-производственных условиях республики Саха (Якутия) / В. А. Иванников, Д. А. Жайворонок, Ф. А. Шакина // Транспортные системы и дорожная инфраструктура Крайнего Севера : Сборник материалов IV Всероссийского форума, Якутск, 28–29 марта 2024 года. – Якутск: Издательский дом СВФУ, 2024. – С. 193-197. – EDN EUKOZO.

8 Транспорт в России. 2023 : статистический сборник. – Москва : Росстат, 2023. – 117 с. – Текст : электронный // Федеральная служба государственной статистики : [официальный сайт]. – URL: <https://rosstat.gov.ru/folder/23455> (дата обращения: 05.12.2025).

9 Кузнецов, Е. С. Управление технической эксплуатацией автомобильного парка в условиях цифровой трансформации / Е. С. Кузнецов, А. В. Фёдоров // Транспорт: наука, техника, управление. – 2021. – № 5. – С. 23–29.

10 Методические рекомендации по оценке стоимости автотранспортных средств (ВДМ-7-2012). – 2-е изд., испр. и доп. – Москва : Российское общество оценщиков, 2012. – 140 с.

11 Туревский, И. С. Интеллектуальные системы диагностирования автомобилей: теория и практика / И. С. Туревский. – Москва : Инфра-Инженерия, 2020. – 312 с. : ил. – ISBN 978-5-9729-0584-3.

References

1 Modern systems and technologies in transport: problems and prospects : Proceedings of the International Scientific and Practical Conference dedicated to the 95th anniversary of the VGLTU named after G.F. Morozov, Voronezh, April 24-25, 2025. Voronezh: Voronezh State Forestry Engineering University named after G.F. Morozov, 2025. 296 p. ISBN 978-5-7994-1172-5. - DOI 10.58168/MSTT2025. – EDN PCMGFE.

2 Issues of implementation of interdisciplinary connections and updating information of taught disciplines on the example of monitoring mobile objects of motor transport infrastructure / D. A. Zhayvoronok, V. A. Ivannikov, S. V. Dorokhin [et al.] // Innovations and advanced technologies in the development of transport systems : Proceedings of the All-Russian Scientific and Practical Conference, Voronezh, January 15 In 2025. Voronezh: Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation, Voronezh State Forestry Engineering University named after G.F. Morozov, 2025. pp. 10-14. – DOI 10.58168/IATDTS2025_10-14. – EDN PPGNKO.

3 Statistics and analysis of accidents involving women drivers / A.V. Shurupova, I. A. Kondratenko, N. I. Zlobina [et al.] // Modern systems and technologies in transport: problems and prospects : Proceedings of the International Scientific and Practical Conference dedicated to the 95th anniversary of the VGLTU named after G.F. Morozov, Voronezh, April 24-25, 2025. Voronezh: Voronezh State Forestry Engineering University named after G.F. Morozov, 2025. pp. 152-155. – DOI 10.58168/MSTT2025_152-155. – EDN DRBEFP.

4 Features of radio communication organization in lugging areas / D. Zhaivoronok, A. Novikov, I. Terehina, F. Shakina // BIO Web of Conferences. – 2024. – Vol. 145. – P. 04020. – DOI 10.1051/bioconf/202414504020. – EDN JHZYQC.

5 Posmetyev, V. I. The relevance of industrial production of high-quality needles based on the use of mobile vehicles / V. I. Posmetyev, D. A. Zhayvoronok // Problems of operation of motor transport and ways to solve them based on promising technologies and scientific and technical solutions : proceedings of the All-Russian Scientific and Technical Conference, Voronezh, October 06-07 In 2022. Voronezh: Voronezh State Forestry Engineering University named after G.F. Morozov, 2022. pp. 15-19. - DOI 10.58168/PRTOW2022_15-19. – EDN RMZQRD.

6 Dorokhin, S. V. Organization of radio communication with remote mobile terrestrial objects / S. V. Dorokhin, V. A. Ivannikov, D. A. Zhayvoronok // Modeling, optimization and information technologies. – 2024. – Vol. 12, No. 4(47). – DOI 10.26102/2310-6018/2024.47.4.028 . – EDN DHXOLK.

7 Ivannikov V. A., Zhayvoronok D. A., Shakina F. A. Features of transportation of tree greens in the natural and industrial conditions of the Republic of Sakha (Yakutia) // Transport systems and road infrastructure of the Far North : Collection of materials of the IV All-Russian Forum, Yakutsk, March 28-29, 2024. Yakutsk: NEFU Publishing House, 2024, pp. 193-197, EDN EUKOZO.

8 Transport in Russia. 2023 : statistical collection. – Moscow : Rosstat, 2023. - 117 p. – Text : electronic // Federal State Statistics Service : [official website]. – URL: <https://rosstat.gov.ru/folder/23455> (date of reference: 05.12.2025).

9 Kuznetsov, E. S. Management of technical operation of the automobile fleet in the context of digital transformation / E. S. Kuznetsov, A.V. Fedorov // Transport: science, technology, management. – 2021. – No. 5. – pp. 23-29.

10 Methodological recommendations for estimating the cost of motor vehicles (VDM-7-2012). – 2nd ed., ispr. and add. – Moscow : Russian Society of Appraisers, 2012. – 140 p.

11 Turevsky, I. S. Intelligent car diagnostic systems: theory and practice / I. S. Turevsky. – Moscow : Infra-Engineering, 2020. – 312 p. : ill. – ISBN 978-5-9729-0584-3.

© Жайворонок Д. А., Иванников В. А., Шаталов Е. В.,
Черников Э. А., Маклакова Е. А., Зеликов В. А., 2026

DOI: 10.34220/2311-8873-2026-62-73



УДК 629.07

UDC 629.07

2.9.5 – эксплуатация автомобильного транспорта

К ВОПРОСУ ОЦЕНКИ УПРАВЛЯЕМОСТИ ТРАНСПОРТНЫХ СРЕДСТВ С БОРТОВЫМ СПОСОБОМ ПОВОРОТА

Куклина Ирина Геннадьевна,

к.т.н., доцент, доцент кафедры строительных и дорожных машин, Нижегородский государственный технический университет, г. Нижний Новгород, e-mail: istkuklina@rambler.ru

Левшунув Лев Сергеевич,

к.т.н., доцент, доцент кафедры строительных и дорожных машин, Нижегородский государственный технический университет, г. Нижний Новгород, e-mail: wlev.lev@yandex.ru

✉¹ **Молев Михаил Юрьевич,**

студент, Нижегородский государственный технический университет, г. Нижний Новгород, e-mail: molev.michail@yandex.ru

Федоренко Александр Викторович,

старший преподаватель кафедры «Автомобили и тракторы», Нижегородский государственный технический университет, г. Нижний Новгород, e-mail: alex.fedorenko.tech@yandex.ru

Аннотация. В статье представлены результаты анализа оценок управляемости автомобилей с бортовым способом поворота. Описаны основные методы проверки, показаны их основные достоинства и недостатки. Предложена методика оценки влияния конструктивных параметров автомобиля на его управляемость. Разработана математическая модель управляющего воздействия на транспортное средство, для его движения по траектории, соответствующей требованиям Глобальных Технических Правил № 8 для автомобилей, оснащённых механизмом поворота управляемых колёс. Предложена

ON THE ISSUE OF ASSESSING THE CONTROLLABILITY OF VEHICLES WITH AN ON-BOARD TURN METHOD

Kuklina Irina Gennadijevna,

candidate of technical sciences, associate professor, associate professor of the department of construction and road machinery, Nizhny Novgorod state technical university, Nizhny Novgorod, e-mail: istkuklina@rambler.ru

Levshunov Lev Sergeevich,

candidate of technical sciences, associate professor, associate professor of the department of construction and road machinery, Nizhny Novgorod state technical university, Nizhny Novgorod, e-mail: wlev.lev@yandex.ru

✉¹ **Molev Mishail Yurievich,**

student, Nizhny Novgorod state technical university, Nizhny Novgorod, e-mail: molev.michail@yandex.ru

Fedorenko Aleksandr Viktorovich,

senior lecturer, department of Automobiles and tractors, Nizhny Novgorod state technical university, Nizhny Novgorod, e-mail: alex.fedorenko.tech@yandex.ru

Annotation. The article presents the results of an analysis of assessments of the controllability of vehicles with an on-board turn method. The main verification methods are described, their main advantages and disadvantages are shown. A methodology is proposed for assessing the influence of the vehicle's structural parameters on its controllability. A mathematical model of the control action on a vehicle has been developed for its movement along a trajectory that meets the requirements of Global Technical Regulations No. 8 for vehicles equipped with a steering wheel rotation mechanism. A method is proposed for experimentally verifying the obtained results of

методика экспериментальной проверки получаемых результатов управляемости и устойчивости движения по заданной траектории, на основании тех же контролируемых параметров, что и для автомобилей с управляемыми колёсами: общая величина смещения транспортного средства и величина боковой скорости при завершении манёвра. Полученные результаты позволяют наметить наиболее эффективные пути повышения управляемости и устойчивости движения транспортных средств с бортовым способом поворота.

Ключевые слова: УПРАВЛЯЕМОСТЬ ТРАНСПОРТНЫХ СРЕДСТВ, БОРТОВОЙ ПОВОРОТ, МЕТОДЫ ИСПЫТАНИЙ, МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ.

controllability and stability of movement along a given trajectory, based on the same controlled parameters as for vehicles with controlled wheels: the total amount of vehicle displacement and the amount of lateral velocity at the end of the maneuver. The results obtained allow us to identify the most effective ways to improve the controllability and stability of vehicles with an on-board turn method.

Keywords: VEHICLE HANDLING, VEHICLES WITH AN ON-BOARD TURN METHOD, TEST METHODS, MATHEMATICAL MODELING.

¹ Автор для ведения переписки

1 Состояние вопроса исследования и актуальность работы

Одним из результатов развития беспилотных транспортных средств явилось увеличение количества машин, оснащённых бортовым способом поворота, это связано с более простым способом реализации управления, большей компактностью и обеспечением возможности движения с малыми радиусами поворота. На рис. 1 и 2 показаны примеры таких машин, спроектированных и изготовленных в последнее время.



Рисунок 1 – Примеры современных беспилотных транспортных средств, оснащённых бортовой системой поворота

Отсутствие поворота управляемых колёс у машин описываемого типа делают невозможным применение стандартных методик оценки качества управления, применяемых для большинства обычных транспортных средств. То есть под управляемостью машин с бортовым поворотом следует понимать не способность транспортного средства точно следовать углу поворота управляемых колёс [1], а совокупность качеств, обеспечивающих лёгкое и быстрое изменение направления движения. Поэтому в научной литературе для техники данного вида используют такие определения как: «поворотливость» – способность изменять направление движения и двигаться по заданной траектории с различными радиусами кривизны или «устой-

чивость на курсе», то есть способность машины выдерживать заданное направление прямолинейного движения [2]. В ряде работ [3, 4] предлагалось оценивать управляемость машин по отношению между фактической и теоретической скоростями поворота, однако дальнейшие исследования [4] показали, что описанный критерий не может быть применим при прямолинейном движении (при теоретической скорости поворота, равной нулю), а также при неустановившемся движении в повороте. Поэтому авторами [4] для оценки управляемости автомобиля с бортовым способом поворота предложено использовать такой показатель как «величина угла увода транспортного средства с теоретической траектории». Также критерием управляемости специального транспортного средства можно принять среднюю скорость движения при перемещении по траектории, связанной с постоянным изменением направления движения, однако, в работе [5] было показано, что данный параметр в большей степени характеризует удельную мощность исследуемой техники, а не качество процесса управления.



Рисунок 2 – Примеры управляемых вездеходных транспортных средств особо малого класса

Прямое применение методик оценки управляемости транспортных средств, оснащённых бортовыми системами поворота, описанных в стандартах, применяемых для оценки свойств обычных автомобилей, показывает, что управляемость таких машин значительно хуже [6]. Причём более худшие результаты показываются на тестах, в которых требуется изменение направления поворота, таких как в тестах типа «переставка», а при выполнении манёвров «поворот» результаты движения машин с бортовым поворотом очень близки к нормируемым значениям. В работе [7] были проведены исследования, в которых проводилась оценка соответствия исследуемой техники на соответствие требованиям ГОСТ Р 50943-2011 «Снегоболотоходы. Технические требования и методы испытаний». При этом оценивались такие показатели как «усилие на руле», «стабилизация рулевого управления», «рывок руля» (только для оценки курсовой устойчивости транспортного средства). В данной работе было отмечено, что: бортовой способ поворота, накладывает ограничения на методику проведения испытаний, а также требует корректировки предельно-допустимых параметров управляемости на скоростях. Указанные обстоятельства позволяют сделать однозначный вывод о том, что для оценки управляемости машин с бортовым способом поворота необходимо применение специфического критерия.

В работе [2] научной новизной заявлен критерий оценки управляемости в виде частной производной угловой скорости поворота по изменению управляющего воздействия – поворота штурвала. Кривизна вычисляется как отношение угловой скорости корпуса относительно вертикальной оси, проходящей через центр тяжести машины, к линейной скорости центра тяжести машины, направленной вдоль продольной оси. Интересно рассматривают управляемость в фундаментальной механике [8]. Согласно этим работам, система считается управляемой, если в исследуемый момент времени существуют управляющее воздействие, которое может перевести систему из начального состояния в любое заданное состояние. Скорость этого перевода и позволяет сравнить управляемость двух транспортных средств. Подобный подход реализуется в работе [9], в которой приводится определение, согласно которому управляемостью называют

«возможность управляемого перехода из одного режима с установившимся движением в другой». При этом управляемым криволинейным движением следует считать возможность управляемого перехода из одного режима с установившимся движением в другой. Если движение осуществляется независимо от управляющих воздействий, либо реакция машины на управляющее воздействие неопределенна, то такое движение называют неуправляемым.

Отдельным показателем управляемости является показатель фазовой напряжённости управляемых воздействий, представляющий собой отставание управляющих воздействий по фазе по отношению к выбранной траектории [5]. Для обычных автомобилей данный показатель принято называть длительностью переходного процесса.

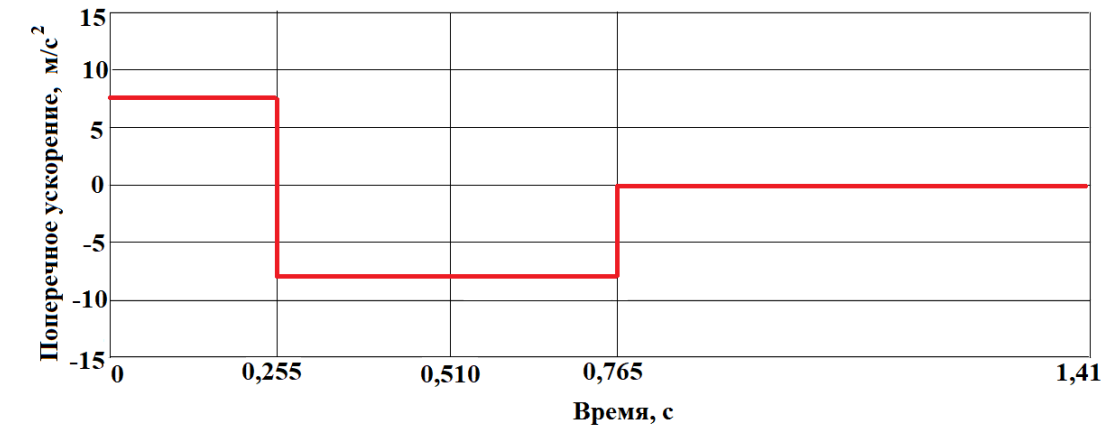
В работах [10, 11] было отмечено, что для оценки управляемости колёсного транспортного средства без учёта квалификации водителя необходимо применять автоматическое воздействие на рулевое управление. Таким образом, исходя из вышесказанного следует сделать вывод о том, что оценка управляемости колёсных транспортных средств с бортовым поворотом может быть выполнена с использованием заранее заданного управляющего воздействия $w(t)$, при котором должно осуществляться движение по траектории $y(t)$, а сравнение различных конструкций может быть оценено величиной отклонения от идеальной траектории $x(t) = y(t) - y_n(t)$, где $y_n(t)$ – математическое описание идеализированной траектории. Тогда искомая величина управляемости, как функция скорости перехода системы из одного состояния системы в другое, может быть представлена в виде производной по времени функции $y_n(t)$. Дополнительными условиями проверки управляемости должна быть длительность переходного процесса при изменении направления движения и отсутствие влияния мощности двигателя. Из всех существующих методов проверки управляемости для описанных целей будет подходить только движение по усечённой траектории (испытания на соответствие требований Глобальных Технических Правил № 8), так как оно происходит на постоянной скорости и мощность двигателя не влияет на изменение траектории, необходимо учитывать, что при испытании данного типа происходит изменение направления движения, что позволяет оценить не только поворачиваемость транспортного средства, но и задержку при изменении направления движения, которая в теории регулирования носит название «длительность переходного процесса».

2 Материалы и методы

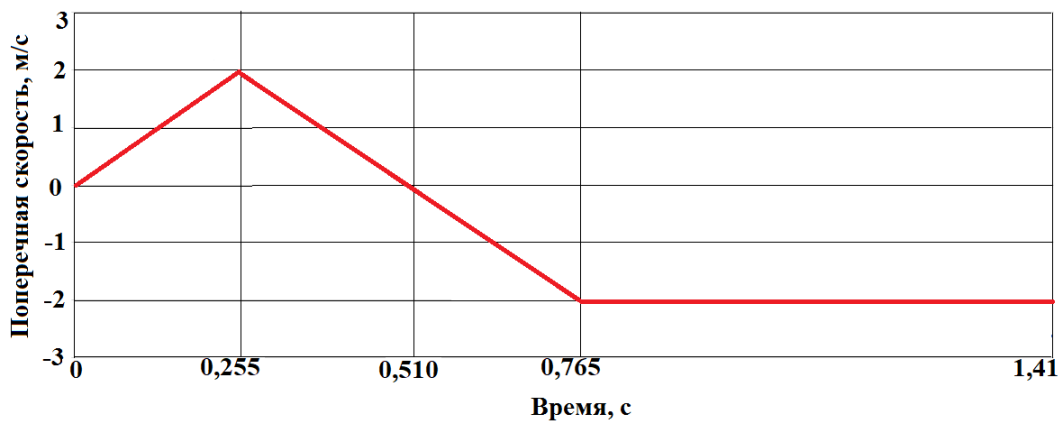
Исходя из положений, описанных в предыдущем разделе, задача оценки управляемости транспортного средства с бортовым поворотом может быть определена исходя из отклонения текущего положения транспортного средства, от заданного. Так как, величина отклонения, допустимая для транспортного средства должна быть достаточно малой величиной, то для её математического описания допустима линеаризация значений отклонений, то есть разложение функции отклонения $\theta(y)$ в ряд Тейлора в окрестности задаваемой траектории движения. Так как линеаризация отклонений подразумевает наличие только первой производной по отклонению искомая функция примет вид:

$$\theta(y^II, x) = \theta(y^II) + Hx, \quad \text{где } H = \frac{\partial \theta(y^II)}{\partial y^II},$$

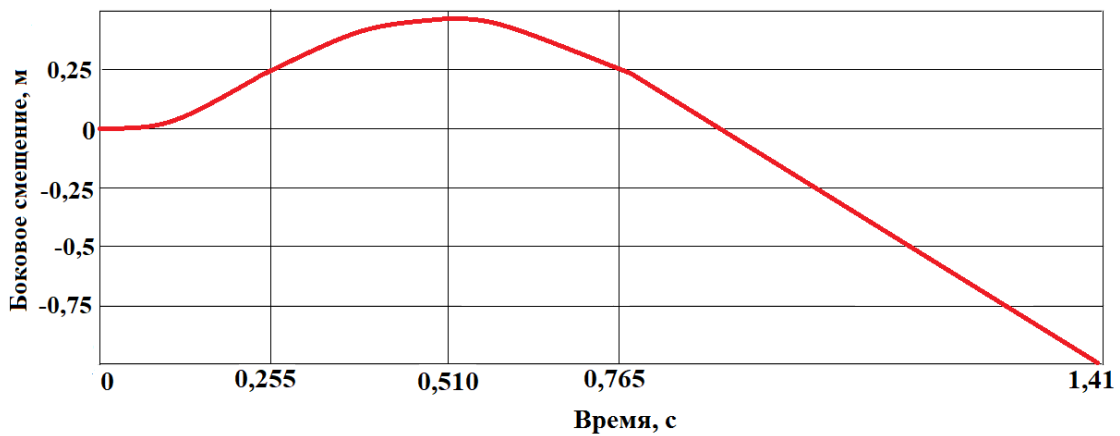
что подтверждает возможность оценки управляемости объекта по величине отклонения от заданной траектории как с практической, так и с математической точки зрения. Согласно Глобальных Технических Правил ООН № 8 [12] величина x (в качестве величины отклонения принято суммарное боковое смещение автомобиля) находится как двойной интеграл от бокового ускорения автомобиля. При этом боковое ускорение не должно приводить к опрокидыванию транспортного средства, с учётом того, что большинство машин указанного типа комплектуются колёсами высокой проходимости большого радиуса, что приводит к значительному увеличению высоты центра тяжести. Определим предельное значение данного параметра.



а)



б)



в)

Рисунок 3 – Зависимости изменения бокового ускорения (а), боковой скорости (б) и бокового перемещения (в) от времени при испытании транспортного средства с бортовым поворотом на управляемость

При этом, чтобы обеспечить точность исследования, заданную в Глобальных Технических Правилах ООН № 8, при снижении величины бокового ускорения в два раза необходимо увеличить время бокового смещения автомобиля на величину равную по сравнению со стандартными методами испытаний.

Ключевой особенностью представленных зависимостей является отсутствие в них взаимосвязи с линейной скоростью движения, которая может быть выбрана исходя из конструктивных особенностей испытуемой техники. Поэтому предложенная методика позволяет сравнивать между собой управляемость различной техники с бортовым способом поворота. После назначения скорости движения при испытаниях можно найти такие параметры движения, как радиус поворота, равный v^2/a_Y и относительное изменение скорости вращения колёс левого и правого бортов $\Psi = a_Y B/v^2$. Изменение последнего показателя от времени показано на рис. 3.

На рис. 4 приведены значения изменения скоростей вращения колёс каждого из бортов, обеспечивающих постоянную скорость движения, а на рис. 5 показано изменение угла отклонения положения кузова испытуемого объекта относительно прямолинейного движения, рассчитанного из условия:

$$R = \frac{v dt}{d\alpha} \rightarrow d\alpha = \frac{v}{R} dt = a_Y \frac{v}{v^2} dt = \frac{a_Y}{v} dt,$$

$$\alpha = \int d\alpha = \int \frac{v}{R} dt = \int a_Y \frac{v}{v^2} dt = \int \frac{a_Y}{v} dt. \quad (1)$$

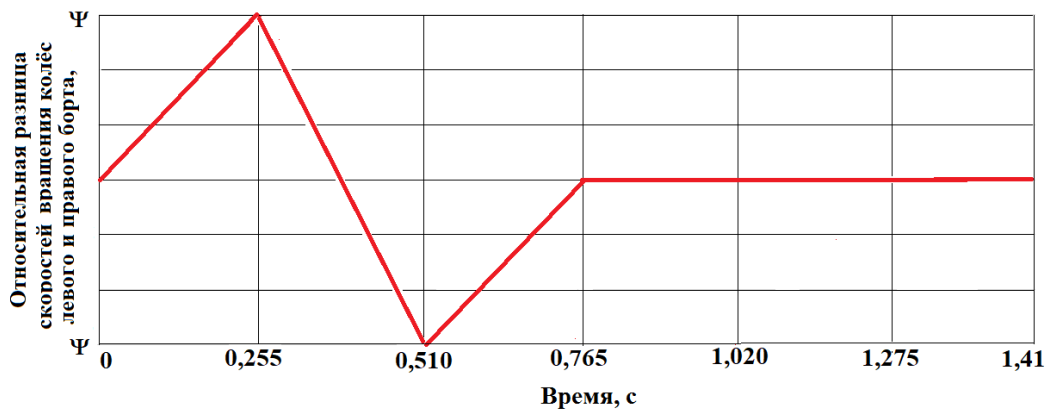


Рисунок 4 – Закон управляющего воздействия на колёса транспортного средства с бортовой системой поворота для оценки его управляемости

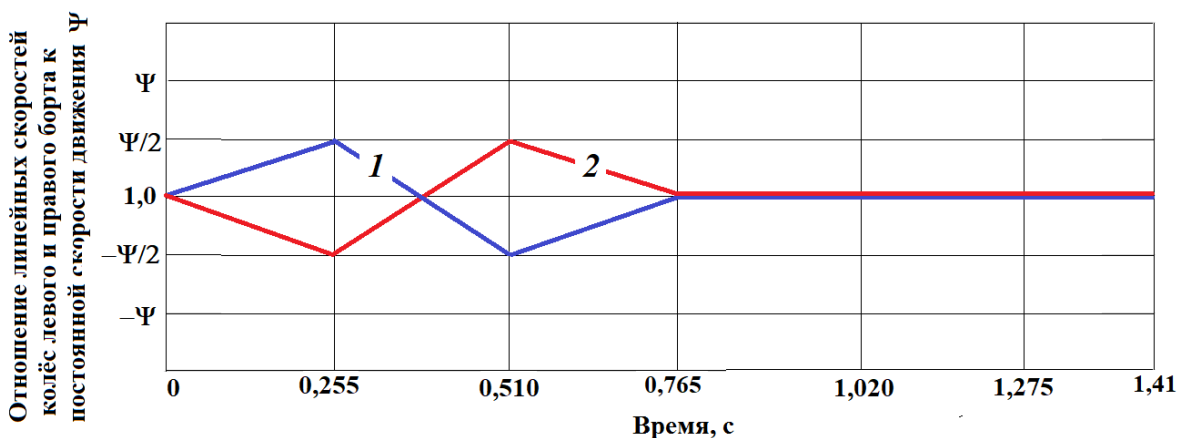


Рисунок 5 – Пример закона управляющего воздействия на колёса правого (1) и левого (2) бортов транспортного средства при проведении испытания на управляемость с поддержанием постоянной линейной скорости

3 Результаты исследований

Следует отметить, что реализация предложенной схемы может быть выполнена только на машинах с индивидуальным приводом на колёса. Наиболее же распространённые конструкции осуществляют поворот путём снижения скорости вращения колёс одного борта. Такой способ поворота приводит к уменьшению скорости движения машин. Пример закона управляющего воздействия на колёса правого (1) и левого (2) бортов транспортного средства при проведении испытания на управляемость с изменением линейной скорости показан на рис. 6.

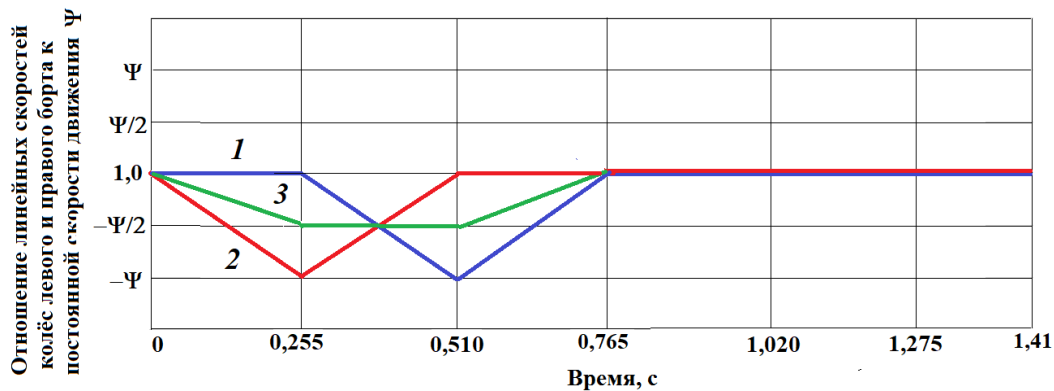


Рисунок 6 – Пример закона управляющего воздействия на колёса правого (1) и левого (2) бортов транспортного средства при проведении испытания на управляемость при движении с торможением бортов. Скорость движения центра масс транспортного средства будет меняться по закону (3) постоянной линейной скорости

Тогда, на втором участке траектории движения средства с бортовым способом поворота при движении с заданным радиусом боковое ускорение будет меньше на величину равную $a_{\Psi}/a_{Y0} = v^2/v_0^2 = \Psi^2/4 = 14B^2/v^4$.

Тогда с учётом того, что изменение продольной скорости на первом и третьем участке (см. рис 5.) подчиняется линейному закону, а на втором и четвёртом остается постоянным, то изменение ускорения на первом и третьем участке примет вид:

$$a_Y = \frac{14,0 \cdot 7 \cdot B^2}{\left(v - \Psi \frac{t}{0,255}\right)^4} = \frac{98 \cdot B^2}{\left(v - \Psi \frac{t}{0,255}\right)^4}. \quad (2)$$

Общий вид зависимости изменения бокового ускорения движения машины с бортовым способом поворота примет вид, показанный на рис. 7.

Интегрируя уравнение (2) по времени, найдём скорость бокового смещения автомобиля:

$$v_Y = \int a dt = \frac{98 \cdot B^2}{\left(v - \Psi \frac{t}{0,255}\right)^4} = \frac{\frac{98}{-3 \cdot \frac{0,255}{\Psi}} \cdot B^2}{\left(v - \Psi \frac{t}{0,255}\right)^3} = \frac{128B^2\Psi}{\left(v - \Psi \frac{t}{0,255}\right)^3}. \quad (3)$$

Полученная зависимость изменения боковой скорости при повороте с торможением одного из бортов показана на рис. 8.

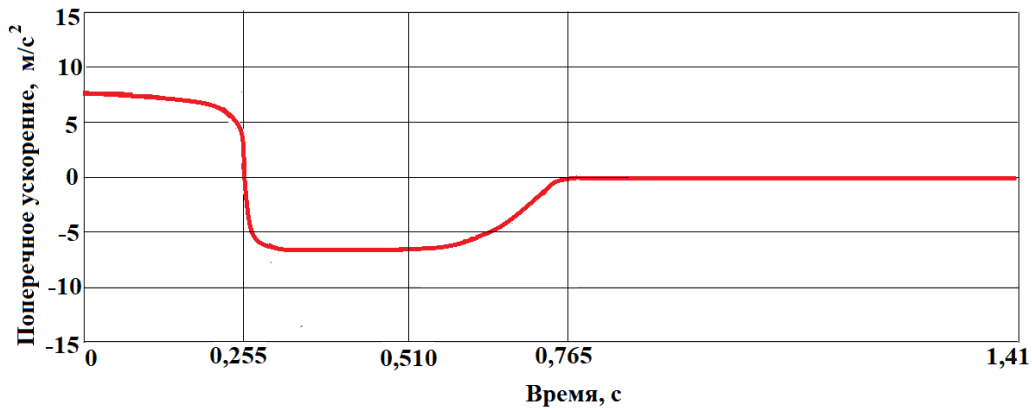


Рисунок 7 – Зависимости изменения бокового ускорения от времени при испытании транспортного средства с бортовым поворотом на управляемость при условии движения с непостоянной скоростью, обусловленной торможением одного борта относительно другого

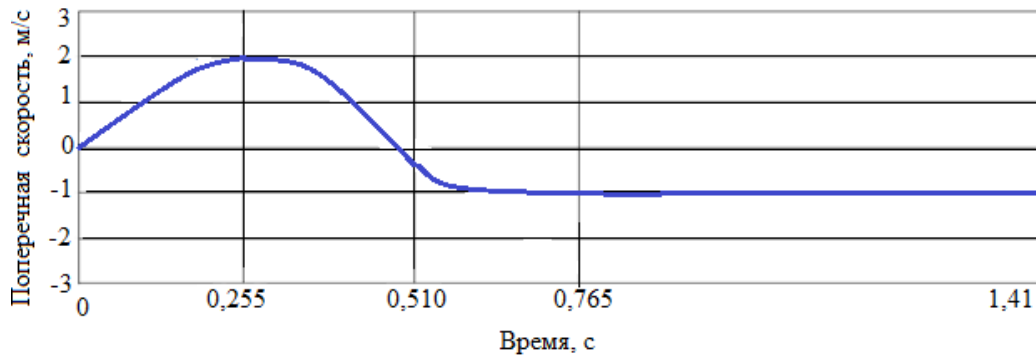


Рисунок 8 – Зависимости изменения боковой скорости перемещения транспортного средства от времени при испытании транспортного средства с бортовым поворотом на управляемость при условии движения с непостоянной скоростью, обусловленной торможением одного борта относительно другого

Сравнительный анализ траекторий движения транспортных средств с бортовым поворотом на управляемость при условии движения с постоянной и непостоянной скоростью, показан на рис. 9.

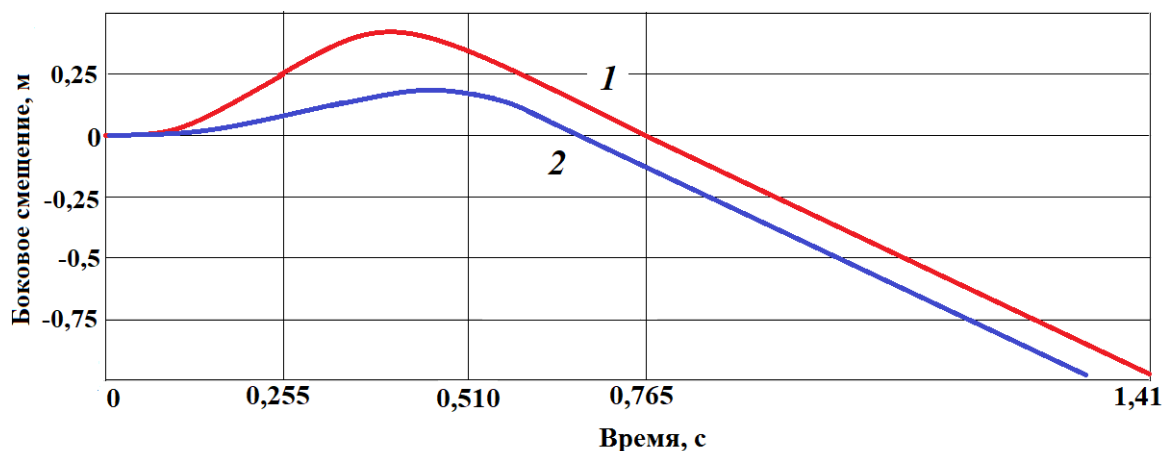


Рисунок 9 – Зависимости изменения бокового перемещения транспортного средства от времени при испытании транспортного средства с бортовым поворотом на управляемость при условии движения как с постоянной (1) так и непостоянной (2) скоростями

Таким образом, для оценки управляемости транспортно-технологических машин и комплексов, поворот которых осуществляется за счёт разницы в скоростях движения движителей левого и правого борта предлагается использовать испытание, аналогичное применяемому для оценки управляемости автомобилей с управляемыми колёсами и называемому «движение по усечённой синусоиде». Так же, как и в базовом методе оценки управляемости объекта испытания предлагается оценивать по такому показателю как величина отклонения от идеализированной траектории движения. При этом управляющее воздействие на объект будет задаваться не как угол и скорость поворота управляемых колёс, а как разница в скоростях движения движителей левого и правого борта. Изменение данного параметра во времени показано на рис. 5. Так как рассматриваемая техника является специфической и в общем виде не предназначена для движения по дорогам общего пользования, то для каждого образца будет своя скорость движения, что не позволяет применять какое-либо постоянное значение скорости движения испытываемых машин. Поэтому испытания следует проводить на той скорости движения, на которую рассчитан объект исследования. При этом управляемость будет оцениваться по величине бокового смещения. Единый характер движения в боковом направлении обеспечивается реализацией одинакового характера изменения бокового ускорения во времени, показанного на рис. 6, что приводит к тому, что и скорости бокового смещения и их величины теоретически у всех машин исследуемого класса будут одинаковы, что и позволит оценить управляемость как разницу в боковом смещении при одинаковых управляющих воздействиях у разных транспортно-технологических машин.

4 Обсуждение и заключение

Разработанный алгоритм оценки управляемости транспортных средств с бортовым способом поворота позволяет оценивать управляемость специальных транспортно-технологических машин на единых методологических принципах с машинами, поворот которых осуществляется за счёт управляемых колёс. При этом предложенная методика может быть использована для оценки машин разных классов, имеющих различную эксплуатационную скорость движения. Применение данной методики позволяет научно-обоснованно оценивать влияние вносимых изменений в конструкцию машин на управляемость как на этапе проектирования, так и на этапе доводочных испытаний.

Список литературы

- 1 Гинцбург Л.Л. Методы оценки управляемости автомобиля на поворотах / Л.Л. Гинцбург, М.А. Носенков // Автомобильная промышленность. – 1971, № 2. – С. 14 – 17.
- 2 Кондаков, С. В. Повышение подвижности быстроходной гусеничной машины путем автоматизации системы управления криволинейным движением / С. В. Кондаков // Министерство образования и науки Российской Федерации; Федеральное агентство по образованию; Южно-Уральский государственный университет Кафедра «Специальные и дорожно-строительные машины». – Челябинск: Издательский центр ЮУрГУ, 2009. – 110 с.
- 3 Наумов, В.Н. Алгоритм предотвращения неуправляемого движения гусеничных роботов / В.Н. Наумов, К.Ю. Машков, А.А. Пехтерев, В.И. Рубцов // Известия ЮФУ. Технические науки. – 2017. – № 1(186). – С. 29-42.
- 4 Стадухин, А.А. Метод определения границ управляемого движения гусеничной машины / А.А. Стадухин, В.Б. Холоденко, Н.А. Мокрецов // Труды НГТУ им. Р.Е. Алексеева. – 2022. – №2. – С. 115-126.
- 5 Исследование динамики управляемого движения быстроходных гусеничных машин / В. Б. Держанский, И. А. Жебелев, И. А. Тараторкин [и др.] // Вестник Московского государственного технического университета им. Н.Э. Баумана. Серия Машиностроение. – 2008. – № 3(72). – С. 86-99.
- 6 Чернышев Н.В. Комплексная система управления поворотом боевой колёсной машины 8×8: диссертация ... кандидата технических наук: 05.05.03 /; [Место защиты: Моск. гос. техн. ун-т им. Н.Э. Баумана]. – Москва, 2009. – 118 с.: ил.

7 Федоренко, А. В. Испытания по определению параметров управляемости легкого колесного снегоболотохода с бортовым способом поворота / А. В. Федоренко, К. Я. Лелиовский // Труды НГТУ им. Р.Е. Алексеева. – 2023. – № 2(141). – С. 89-96.

8 Александров, В. В. Лекции по механике управляемых систем: учебное пособие для студентов высших учебных заведений, обучающихся по специальности "010701 Фундаментальная математика и механика" / В. В. Александров, С. С. Лемак, Н. А. Парусников - М.: – Москва : Московский гос. ун-т им. М. В. Ломоносова. – 2020. – 165 с.

9 Бекетов С.А. Теория управляемого движения гусеничных машин / С.А. Бекетов. – М.: Издательство МГТУ им. Н. Э. Баумана. – 2017. – 125 с.

10 Катанаев, Н. Т. Системные оценки управляемости колесных машин / Н. Т. Катанаев // Известия МГТУ МАМИ. – 2012. – Т. 1, № 1(13). – С. 34-41.

11 Катанаев, Н. Т. Системные и несистемные оценки управляемости автомобиля / Н. Т. Катанаев, А. В. Лепешкин // Известия МГТУ МАМИ. – 2015. – Т. 1, № 1(23). – С. 112-116.

12 Аналитическое сравнение показателей управляемости автомобилей при выполнении манёвров «Переставка» и «Движение по усечённой траектории» / Ю. И. Молев, М. Г. Червастов, С. В. Лазаревич, А. В. Ерофеева // Воронежский научно-технический Вестник. – 2025. – Т. 1, № 1(51). – С. 114-124.

13 Разработка многоосного вездеходного транспортного средства особо легкого класса с гидрообъемной трансмиссией / В. С. Макаров, А. М. Беляев, Д. М. Беляев [и др.] // Беспилотные транспортные средства: проблемы и перспективы : сборник материалов 94 международной научно-технической конференции Ассоциации автомобильных инженеров, Нижний Новгород: Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева, 2016. – С. 162-167.

14 Гончаров, К. О. Экспериментальные исследования многоосной колесной машины / К. О. Гончаров, В. С. Макаров, В. В. Беляков // Наука и образование: научное издание МГТУ им. Н.Э. Баумана. – 2011. – № 2. – С. 10.

15 Kurkin, A. Autonomous Robotic System for Coastal Monitoring / A. Kurkin, E. Pelinovsky, D. Tyugin, A. Giniyatullin, O. Kurkina, V. Belyakov, V. Makarov, D. Zeziulin, K. Kuznetsov // Twelfth international conference on the Mediterranean coastal environment (MEDCOAST 15). – 2015. – Vols 1 and 2. –P. 933-943.

16 Тарарыкин, А. М. Перспективный облик и основные характеристики пожарного автомобиля первой помощи на базовом шасси вездехода - амфибии / А. М. Тарарыкин, А. В. Калач // Техносферная безопасность. – 2022. – № 1(34). – С. 59-65.

References

1 Ginzburg, L.L. Methods for Assessing Vehicle Controllability on Corners. Ginzburg, M.A. Nosenkov. Automotive Industry. 1971, no. 2, pp. 14–17.

2 Kondakov, S.V. Increasing the Mobility of a High-Speed Tracked Vehicle by Automating the Curved Motion Control System. Kondakov, S.V. Ministry of Education and Science of the Russian Federation; Federal Education Agency; South Ural State University, Department of Specialized and Road-Construction Machinery. Chelyabinsk: SUSU Publishing Center, 2009. 110 p.

3 Naumov, V.N. Algorithm for Preventing Uncontrolled Motion of Tracked Robots. Rubtsov // SFedU News. Technical Sciences. – 2017. – No. 1(186). – P. 29-42.

4 Stadukhin, A. A. Method for Determining the Boundaries of Controlled Motion of a Tracked Vehicle / A. A. Stadukhin, V. B. Kholodenko, N. A. Mokretsov // Proceedings of R. E. Alekseev NSTU. – 2022. – No. 2. – P. 115-126.

5 Study of the Dynamics of Controlled Motion of High-Speed Tracked Vehicles / V. B. Derzhansky, I. A. Zhebelev, I. A. Taratorkin [et al.] // Bulletin of the N. E. Bauman Moscow State Technical University. Series: Mechanical Engineering. – 2008. – No. 3(72). – P. 86-99.

6 Chernyshev N. V. Integrated control system for the rotation of an 8x8 combat wheeled vehicle: dissertation ... candidate of technical sciences: 05.05.03 /; [Place of protection: Moscow state technical university named after N.E. Bauman]. - Moscow, 2009. - 118 p.: ill.

7 Fedorenko, A. V. Tests to determine the controllability parameters of a light wheeled snow and swamp-going vehicle with side turning / A. V. Fedorenko, K. Ya. Leliovsky // Proceedings of NSTU named after R.E. Alekseev. - 2023. - No. 2 (141). - P. 89-96.

8 Aleksandrov, V. V. Lectures on the Mechanics of Controlled Systems: a textbook for students of higher educational institutions studying in the specialty "010701 Fundamental Mathematics and Mechanics" / V. V. Aleksandrov, S. S. Lemak, N. A. Parusnikov - M.: Moscow: Lomonosov Moscow State University. - 2020. - 165 p.

9 Beketov, S. A. Theory of Controlled Motion of Tracked Vehicles / S. A. Beketov. - M.: Bauman Moscow State Technical University Publishing House. - 2017. - 125 p.

10 Katanaev, N. T. Systematic Assessments of Wheeled Vehicle Controllability / N. T. Katanaev // Bulletin of Moscow State Technical University "MAMI". – 2012. – Vol. 1, No. 1(13). – P. 34-41.

11 Katanaev, N. T. Systematic and Non-Systematic Assessments of Vehicle Controllability / N. T. Katanaev, A. V. Lepeshkin // Bulletin of Moscow State Technical University "MAMI". – 2015. – Vol. 1, No. 1(23). – P. 112-116.

12 Analytical Comparison of Vehicle Controllability Indicators When Performing the "Rearrangement" and "Movement along a Truncated Trajectory" Maneuvers / Yu. I. Molev, M. G. Cherevastov, S. V. Lazarevich, A. V. Erofeeva // Voronezh Scientific and Technical Bulletin. – 2025. – Vol. 1, No. 1(51). – P. 114-124.

13 Development of a multi-axle all-terrain vehicle of an especially light class with a hydrostatic transmission / V. S. Makarov, A. M. Belyaev, D. M. Belyaev [et al.] // Unmanned vehicles: problems and prospects: collection of materials of the 94th international scientific and technical conference of the Association of Automotive Engineers, Nizhny Novgorod: R.E. Alekseev Nizhny Novgorod State Technical University, 2016. - P. 162-167.

14 Goncharov, K. O. Experimental studies of a multi-axle wheeled vehicle / K. O. Goncharov, V. S. Makarov, V. V. Belyakov // Science and education: scientific publication of Bauman Moscow State Technical University. – 2011. – № 2. – P. 10.

15 Kurkin, A. Autonomous Robotic System for Coastal Monitoring / A. Kurkin, E. Pelinovsky, D. Tyugin, A. Giniyatullin, O. Kurkina, V. Belyakov, V. Makarov, D. Zeziulin, K. Kuznetsov // Twelfth international conference on the Mediterranean coastal environment (MEDCOAST 15). – 2015. – Vols 1 and 2. –P. 933-943.

16 Tararykin, A. M. Promising appearance and main characteristics of a first-aid fire truck on the basic chassis of an amphibious all-terrain vehicle / A. M. Tararykin, A. V. Kalach // Technosphere safety. – 2022. – № 1(34). – P. 59-65.

© Куikliна И. Г., Левшунов Л. С., Молев М. Ю., Федоренко А. В., 2026

DOI: 10.34220/2311-8873-2026-74-82



УДК 656.13: 656.14

UDC 656.13: 656.14

2.9.5 – эксплуатация автомобильного транспорта

ВЛИЯНИЕ РЕГИОНАЛЬНЫХ ОСОБЕННОСТЕЙ НА ПОВЫШЕНИЕ БЕЗОПАСНОСТИ ПЕШЕХОДОВ

Макарова Ирина Викторовна,

д.т.н., проф. кафедры сервиса транспортных систем, ФГАОУ ВО «Набережночелнинский (институт) филиал КФУ», г. Набережные Челны.

✉¹ **Габсалихова Лариса Мухаматзакиевна,** к.т.н., доцент кафедры сервиса транспортных систем, ФГАОУ ВО «Набережночелнинский (институт) филиал КФУ», г. Набережные Челны, e-mail: muhametdinoval@mail.ru

Имомназаров Сарвар Ковилжонович, доцент кафедры транспортной инженерии, Наманганский государственный технический университет, г. Наманган.

Махмудов Авазбек Акрамжон Угли, преподаватель кафедры транспортной инженерии, Наманганский государственный технический университет, г. Наманган.

Аннотация. Проблема безопасности пешеходов остается одной из самых острых в мире. Согласно исследованиям ученых и экспертов в области безопасности дорожного движения зачастую риски на дорогах создают люди (как водители, так и пешеходы). Поэтому необходимо снизить влияние человеческого фактора. Для реализации такого подхода создаются все более интеллектуальные транспортные средства и дорожная инфраструктура, а также разрабатываются меры по защите пешеходов с помощью средств пассивной безопасности. Нами разработан классификатор пешеходов по разным признакам (возраст, паттерн поведения, усугубляющие факторы). Актуальность обозначенной проблемы возрастает по мере

THE IMPACT OF REGIONAL PECULIARITIES ON IMPROVING PEDESTRIAN SAFETY

Makarova Irina Viktorovna,

doctor of technical sciences, prof. of the department of transport systems service, Naberezhnye Chelny Institute (branch) Kazan (Volga Region) Federal University, Naberezhnye Chelny.

✉¹ **Gabsalikhova Larisa Mukhamatzakiyevna,** candidate of technical sciences, associate professor of the department of transport systems service, Naberezhnye Chelny Institute (branch) Kazan (Volga Region) Federal University, Naberezhnye Chelny, e-mail: muhametdinoval@mail.ru

Imomnazarov Sarvar Koviljonovich, associate professor of the department of transport engineering, Namangan state technical university, Namangan.

Makhmudov Avazbek Akramzhon Ugli, lecturer of department of transport engineering, Namangan state technical university, Namangan.

Annotation. Pedestrian safety remains one of the most pressing issues in the world. According to research by road safety scientists and experts, road hazards are often created by people (both drivers and pedestrians). Therefore, it is essential to reduce the impact of the human factor. To implement this approach, increasingly intelligent vehicles and road infrastructure are being developed, as are measures to protect pedestrians through passive safety. We have developed a pedestrian classifier based on various characteristics (age, behavior pattern, aggravating factors). The relevance of this problem is increasing with the advent of autonomous vehicles and smart cities. Therefore, we propose using a modified Haddon matrix to organize pedestrian safety measures.

появления автономных транспортных средств и умных городов. Поэтому для упорядочения мер по обеспечению безопасности пешеходов мы предлагаем использовать модифицированную матрицу Хэддона.

Ключевые слова: БЕЗОПАСНОСТЬ ПЕШЕХОДОВ, ТРАНСПОРТ, УМНЫЙ ГОРОД, МОДИФИЦИРОВАННАЯ МАТРИЦА ХЭДДОНА.

Keywords: PEDESTRIAN SAFETY, TRANSPORTATION, SMART CITY, MODIFIED HADDON MATRIX.

¹ Автор для ведения переписки

1 Состояние вопроса исследования и актуальность работы

Учитывая переход к новой мобильности, который включает применение «здоровых» видов перемещений, таких как ходьба и применение средств индивидуальной мобильности (СИМ), а также развитие общественного транспорта, города становятся более человекоцентричными за счет снижения негативного влияния автомобилей на человека, в том числе с точки зрения безопасности. Для этого разрабатываются программы микромобильности (аренда самокатов и велосипедов), создаются условия для безопасного и комфортного передвижения всех участников дорожного движения, включая маломобильных граждан.

В то же время, ориентация на создание человекоцентричных систем в рамках перехода к индустрии 5.0 требует создания безопасных условий для наименее защищенных участников дорожного движения. Вызывает озабоченность высокий риск травмирования и гибели детей и молодых людей. Чтобы обеспечить безопасность городской среды стоит задача к 2030 году снизить смертность на дорогах на 50 %.

Применение различных методов решения задач безопасности на дорогах обусловлено разнообразием причин роста числа дорожно-транспортных происшествий (ДТП), а также многочисленностью вариантов последствий, вызванных разным факторами. Методы можно разделить на технические решения (например, активная и пассивная безопасность), инфраструктурные проекты (светофорное регулирование, пешеходные надземные и подземные переходы). Кроме того, используют организационные методы (например, «умные» решения), сокращающие число конфликтов между участниками движения.

Концепция новой мобильности связана с переходом к более «здоровым» формам, таким как пешая ходьба или применение средств индивидуальной мобильности (СИМ) вместо личного автомобиля, что может привести к изменению процентного состава участников дорожного движения: росту доли пешеходов и велосипедистов, что, в свою очередь, обострит проблему их безопасности. В свою очередь, рост доли СИМ в транспортном потоке создает проблемы с безопасностью как для самих пассажиров СИМ (со стороны транспортных средств), так и для пешеходов, попадающих под колеса СИМ. Эта тенденция более характерна для больших городов и мегаполисов с более высоким темпом жизни, а также для южных городов.

В статье предлагаются меры рационального управления, способствующие повышению безопасности пешеходов и владельцев СИМ.

1.1 Состояние проблемы: влияние поведения пешеходов разных стран на риск аварий

Поскольку поведение пешеходов может зависеть от разных факторов и меняться в разных ситуациях, то необходимо понимание, какие из факторов могут повлиять на принятие решений и каким образом можно на это воздействовать [1]. В статье [2] авторами предложен

метод, который объединяет обнаружение и отслеживание пешеходов для извлечения информации о них в реальном времени для выявления ненормального поведения на дороге, такого как вторжение, падение и насилие.

Для определения направления движения пешехода авторы [3] предлагают систему распознавания на основе сверточных нейронных сетей. Безопасность пешеходов зависит от множества факторов, включающих характеристики потока, скорость движения, условия окружающей среды и усугубляющих факторов [4], таких как использование мобильных телефонов, наушников, приводящих к несчастным случаям [5], при этом большее внимание уделялось использованию мобильного телефона водителями [6].

Чтобы обезопасить пешеходов, исследователи разных стран создают специальные предупреждающие приложения [7], напоминающие о необходимости следить за окружающей обстановкой при ходьбе, особенно при использовании мобильного телефона. Система на основе Bluetooth-маяка [8] визуальным и/или звуковым сигналом предупреждает пешеходов при приближении к потенциально опасному перекрестку.

Поскольку наиболее уязвимы на дорогах дети и пожилые пешеходы, то эти проблемы рассмотрены в разных исследованиях. Системы контроля детей взрослыми в разных странах различаются, то темы безопасности дорожного движения детей и школьников актуальны [9]. Исследование показало, что дети, которые контролируются взрослыми (родителями или воспитателями) ведут себя более адекватно.

В статье [10] создано приложение для помощи во время прогулок на улице людям с нарушениями зрения, число которых, например, в Японии растет. Авторами исследования предлагается использовать изображения, полученные с помощью MY VISION и глубокого обучения. Аналогичную проблему решали авторы [11]. Они предложили приложение для слабовидящих, которое помогает увидеть препятствия и свободные места, а также идентифицировать дорожные знаки и помочь при переходе дороги. Для потребителей с нарушениями зрения [12] создана носимая вспомогательная система на основе искусственного интеллекта (ИИ), для безопасного перехода обозначенных пешеходных переходов или переходов типа «зебра».

По мере роста парка автономных транспортных средств, обостряется вопрос о взаимодействии между транспортными средствами (следующим определенным алгоритмам движения) и пешеходами, которые могут вести себя непредсказуемо. В статье [13] авторы выделили такие группы пешеходов как: игнорирующие правила (рискованный тип), следующие правилам (стабильный тип) и строго следующие правилам (осторожный тип). Для этих целей применялся метод кластеризации k -средних.

2 Материалы и методы

В этом разделе мы опишем те методы, которые можно применить для повышения безопасности пешеходов, упорядочив их с помощью матрицы Хэддона, а затем в разделе 4 приведем основные положения по повышению безопасности пешеходов, применив модифицированную матрицу Хэддона, актуальную для современных условий. Как было указано выше, непредсказуемость поведения людей часто создает проблемы, особенно в тех случаях, когда нет четких запретов на те или иные действия. В некоторых исследованиях были выделены типы пешеходов, но поскольку эти классификации были ограниченными, на первом этапе классифицировали пешеходов по нескольким признакам, поскольку такая классификация дает возможность более точной настройки умного светофора, что актуально в современных условиях [14].

2.1 Характеристики групп пешеходов и влияние разных факторов на их поведение

Как показал анализ литературных исследований, наиболее уязвимы на дорогах дети и пожилые люди. При этом усугубляющими факторами как для водителей, так и для пешеходов является состояние алкогольного и наркотического опьянения. Практика показывает, что значительная доля пешеходов, пострадавших в ДТП, находились под воздействием алкоголя или

наркотических веществ. Превышение скорости транспортного средства также зачастую приводит к наездам на пешеходов с тяжкими последствиями (тяжелые травмы и смерть). Опасными факторами являются плохие погодные условия и темное время суток. Риск получения травм или гибели в результате ДТП наиболее вероятен для мужчин-пешеходов, особенно в возрасте 15-29 лет. Дети находятся в группе риска зачастую из-за незнания правил дорожного движения, отсутствия контроля со стороны взрослых и физиологических особенностей (низкий рост). Риски для пожилых людей связаны с нарушениями здоровья [15].

Как показывает практика работы организаций по управлению движением и спасательных служб, аварии с участием пешеходов можно предотвращать. На это направлены усилия как ученых, так и специалистов, отвечающих за безопасность на дорогах. Поскольку риски для пешеходов связаны не только с человеческим фактором, но и с техническими решениями, то и меры предотвращения несчастных случаев можно разделить на организационные и технические. К первой группе относятся различные мероприятия, связанные с обучением правилам поведения на дорогах, создание систем помощи пешеходам, а также введение системы штрафов для нарушителей. Для обеспечения максимальной безопасности пешеходов разрабатывают специальные документы, регламентирующие взаимодействие участников дорожного движения. Кроме того, создаются службы экстренной помощи для спасения жизней пешеходов в случае аварий. Разработка специальных программных средств как для пешеходов, так и для управления транспортными средствами и инфраструктурой с использованием современных методов также способствует безопасности на дорогах.

2.2 Разработка системы для управления безопасностью

Как следует из анализа особенностей организации и безопасности движения, транспортная система характеризуется значительным числом параметров и находится под воздействием большого числа внешних воздействий. Поэтому при анализе ее состояния и разработке мер по управлению необходим многофакторный анализ. В основе такого анализа для того, чтобы он был корректным, лежит мониторинг состояния дорожного движения, позволяющий получить реальные данные о системе. Для того, чтобы выбрать наиболее рациональное и адекватное решение, необходимо упорядочить современные методы статистического анализа и применяемые решения, а затем выработать рекомендации и оценить их эффективность с тем, чтобы при необходимости выполнять корректировку на основе обратной связи. Новизна предлагаемого нами подхода состоит в том, что мы предлагаем модифицированную матрицу Хэддона для упорядочения мероприятий по исключению человеческого фактора, а затем использовать методы и средства интеллектуального анализа данных [16] для поиска оптимальных решений и их применения в аналогичных ситуациях.

При этом мы учитывали тот факт, что существует множество хорошо зарекомендовавших себя решений отдельных проблем в области безопасности движения, которые при совместном использовании могут привести к синергетическому эффекту, поэтому их можно было бы обобщить в единой системе. Кроме того, использование общей информационной базы позволит оценить выбранный вариант как с точки зрения безопасности, экологичности и экономичности, так и с точки зрения влияния на социум. Такой подход является наиболее рациональным.

3 Результаты исследований

3.1 Классификация и интеллектуальный анализ поведения пешеходов

Поскольку травмы и гибель пешеходов на дорогах являются проблемой во всем мире, несмотря на многочисленные меры и усилия, необходима не только разработка локальных решений, но и многосторонний анализ проблемы, чтобы выработать комплексное решение, опираясь на глубокую аналитику с учетом региональных особенностей в области организации и безопасности движения.

Как видно из многочисленных исследований, самым непредсказуемым является человеческий фактор, поэтому первым шагом стала разработка классификатора пешеходов (см. рис.1).

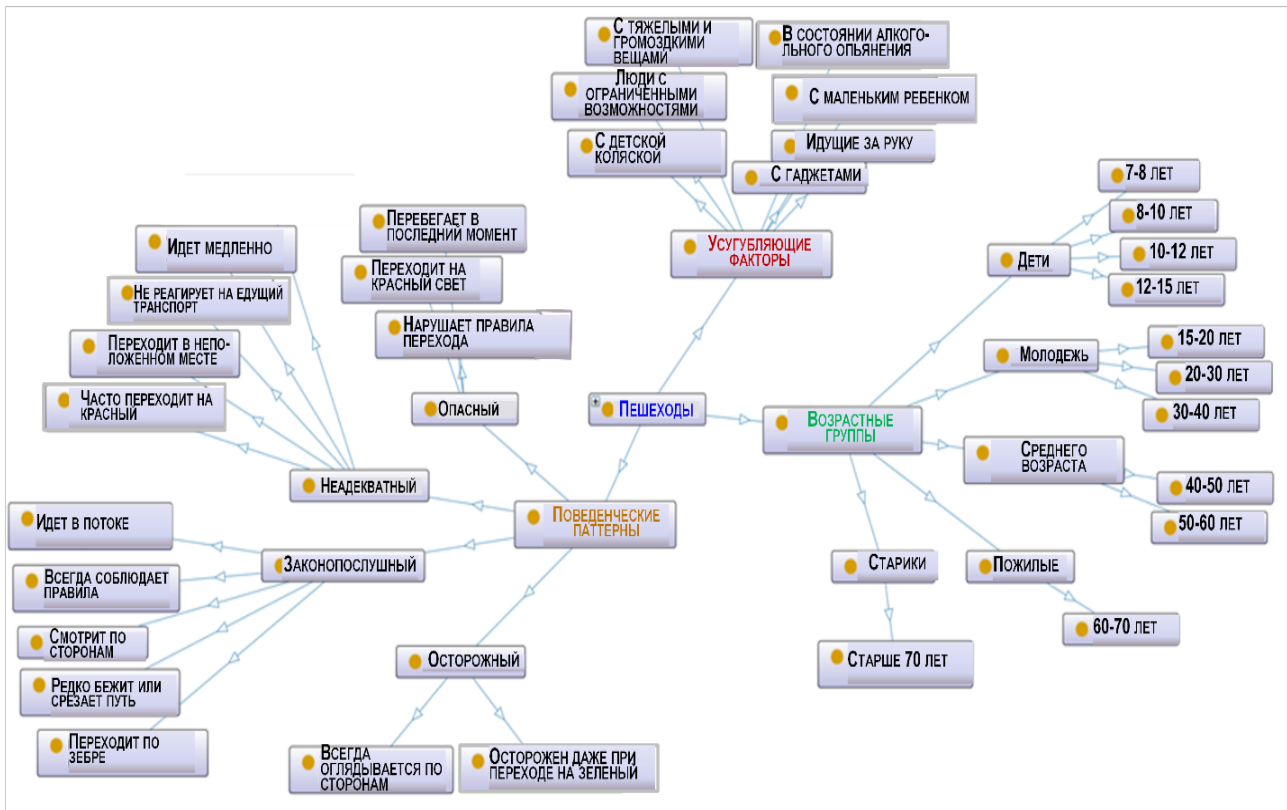


Рисунок 1 – Классификация пешеходов

Как видно из предыдущего обзора, практически все авторы отмечают такой признак, как возраст, непосредственно влияющий на скорость движения через дорогу. Человеческий фактор также сильно влияет на вероятность аварийной ситуации, то есть риск ДТП часто определяют паттерны поведения. Помимо этого, мы выделили усугубляющие факторы, которые могут повлиять как на вероятность ДТП, так и на тяжесть последствий.

Повысить время перехода дороги могут усугубляющие факторы (как объективные, так и субъективные), поэтому несмотря на то, что есть специальные регламенты, в которых скорость перехода указана в зависимости от возраста пешехода, при вычислении продолжительности пешеходной фазы светофора обычно вводят поправочный коэффициент.

Кроме того, время, необходимое для перехода дороги, зависит от числа пешеходов, которые стоят у светофора и собираются перейти дорогу. Таким образом, параметры пешеходного потока определяют длительность зеленой фазы для безопасного перехода. Для разработки классификатора мы использовали Protégé – бесплатную платформу с открытым исходным кодом, которая предоставляет набор инструментов для создания моделей на основе знаний с онтологиями.

Как известно, во многих случаях изменение инфраструктуры приводит к улучшению дорожной ситуации. Однако зачастую это не дает должного эффекта, особенно в случае пожилых людей и пешеходов-детей. И если в учебное время года многие страны предпринимают меры по управлению безопасностью детей во время пути в школу и из школы (безопасный школьный маршрут), то во время школьных каникул ситуация обостряется, поскольку дети часто оказываются на улице без присмотра взрослых. Пожилые люди также нуждаются в пристальном внимании, в особенности, вблизи медицинских центров, поскольку состояние их здоровья может негативно сказаться во время движения.

3.2 Модифицированная матрица Хэддона

Чтобы создать эффективную систему обеспечения безопасности пешеходов, необходимо выявить по имеющимся реальным данным наиболее значимые факторы, упорядочить их и затем выработать мероприятия, которые помогут избежать рисков ситуаций, реализовать их и проводить мониторинг для определения эффективности с тем, чтобы в случае необходимости принять корректирующие решения.

В этом смысле методика, реализованная с помощью Матрицы Хэддона, является примером системного подхода, позволяющего выявить факторы риска и разработать мероприятия по предотвращению и снижению вредных последствий дорожно-транспортного травматизма для создания эффективной системы управления на основе обратной связи. Работа Уильяма Хэддона [17], опубликованная в 1972 г., представляет возможность моделировать динамическую систему с помощью матрицы, названной впоследствии именем ученого, при этом такой подход применяется в разных областях от здравоохранения до промышленных систем (то есть в сферах, связанных с возможностью травматизма). В сфере транспортной безопасности предложенный Хэддоном подход применяется для лучшего понимания факторов, связанных с характеристиками водителя, транспортного средства и дорожной инфраструктуры, влияющих на вероятность ДТП и тяжесть их последствий для участников. Подход оказался весьма плодотворным аналитическим инструментом и стал широко применяться в здравоохранении [18]. Этот метод имеет преимущества перед другими методами в том плане, что он наиболее эффективен и целесообразен для организации профилактической работы, то есть предотвращения ДТП, именно поэтому на его основе были разработаны стратегии по сокращению частоты несчастных случаев [19] во многих странах, в том числе в России [20]. Дорожно-транспортный травматизм рассматривается с разных точек зрения, предлагаются разные методы и модели, однако нет единой теории, поэтому требуется тщательное изучение всех факторов, которые влияют на вероятность ДТП. Исходя из этого, можно считать матрицу Хэддона надёжным инструментом в исследованиях и профилактике дорожно-транспортного травматизма, поскольку позволяет упорядочить не только причины ДТП, но и выработать мероприятия по смягчению их последствий.

Исследования У. Хэддона, проанализировавшего три основных этапа «до» аварии, «во время» аварии и «после» аварии, то есть во время ликвидации последствий, предлагают модель для анализа основных факторов, влияющих на безопасность и здоровье людей, участвующих в дорожном движении. Поскольку большинство аварий происходит с участием транспортных средств, то и значительная часть проводимых исследований рассматривалась с точки зрения вины водителя автомобиля. Однако, как показывают исследования роли пешехода, как участника дорожного движения, зачастую именно неадекватное поведение пешехода может стать причиной ДТП. Однако, законодательствами разных стран не предусмотрено наказание пешехода в случае нарушения им правил дорожного движения. Мы полагаем, что в ближайшее время положение может усугубиться в связи с появлением на дорогах городов автономных транспортных средств. Поэтому разрабатываются специальные средства «умной инфраструктуры», как и приложения для пешеходов, чтобы обезопасить последних и сделать коммуникацию между ними и автономными автомобилями более комфортной. Так, например, в статье [21] описывается опыт Таиланда в направлении методологии обеспечения безопасности дорожного движения (БДД) с использованием системы POLIS (Police Information System), на основе которой формируются статистические сводки, выявляются места концентрации ДТП, выполняется пространственный анализ с помощью геоинформационных технологий. Кроме того, осмотр мест происшествия выполняется с помощью беспилотных летательных аппаратов (БПЛА), поэтому цифровые методы фиксации и моделирования не только расширяют арсенал технических средств полиции, но и позволяют построить модель ДТП в динамике, выводя причинно-следственные связи на новый уровень. Поскольку подобные разработки связаны с применением информационных технологий (ИТ-решения) и искусственного интеллекта (ИИ), они могут быть подвергнуты специфическим рискам, поэтому к ним должны применяться особые меры во время тех же трех фаз, как и ко всем компонентам системы дорожного движения.

Для реализации этого нами была предложена модифицированная матрица Хэддона, включающая новый фактор, обозначенный как информационные технологии (ИТ) / искусственный интеллект (ИИ) (рис. 2).

ФАЗА →	До ДТП	Во время ДТП	После ДТП
Человеческий (водители, велосипедисты, пешеходы и т.п.)	<input type="checkbox"/> Работа с нарушителями; <input type="checkbox"/> Учет предыдущего опыта; <input type="checkbox"/> Ужесточение штрафов; <input type="checkbox"/> Контроль и предотвращение правонарушений	<input type="checkbox"/> Системы пассивной безопасности (ограждения, "островки безопасности" и тротуары)	<input type="checkbox"/> Экстренное реагирование; <input type="checkbox"/> Контроль поведения виновника ДТП <input type="checkbox"/> Выявление «злых» нарушителей и работа с ними;
Транспортный	Интеллектуальные транспортные системы: <input type="checkbox"/> Контроль усталости водителя; <input type="checkbox"/> ADAS; <input type="checkbox"/> Контроль технического состояния ТС	<input type="checkbox"/> Защита от удара (активный капот, внешние подушки безопасности, мягкие бамперы и покатые формы кузова)	<input type="checkbox"/> Средства первой помощи; <input type="checkbox"/> Кнопка оповещения о ДТП (ЭРА-ГЛОНАСС);
Окружающая среда (инфраструктура и т.п.)	<input type="checkbox"/> Геометрия дороги, состояние дорожного полотна; <input type="checkbox"/> Обеспечение видимости; <input type="checkbox"/> Пешеходная инфраструктура; <input type="checkbox"/> Пешеходные переходы	<input type="checkbox"/> Системы обнаружения и оповещения пешехода; <input type="checkbox"/> Системы подсветки и звукового оповещения	<input type="checkbox"/> Реконструкция ДТП; <input type="checkbox"/> Оповещение участников движения о ДТП; <input type="checkbox"/> Выявление мест концентрации ДТП
ИТ и коммуникации	<input type="checkbox"/> Выявление ИТ-угроз <input type="checkbox"/> Совершенствование информационной политики <input type="checkbox"/> Разработка средств усиления защиты от кибератак	<input type="checkbox"/> Идентификация рисков и ИТ-угроз <input type="checkbox"/> Блокировка ИТ-угроз <input type="checkbox"/> Отражение кибер-атак	<input type="checkbox"/> Устранение повреждений и последствий вмешательства <input type="checkbox"/> Лечение от вирусов <input type="checkbox"/> Устранение ИТ-угроз
ФАКТОРЫ	Предотвращение ДТП	Снижение тяжести последствий ДТП	Ликвидация последствий ДТП

Рисунок 2 – Модифицированная Матрица Хэддона

Помимо этого, мы делаем акцент на роли пешеходов как участников дорожного движения. После реализации мероприятий, записанных в матрице, необходим повторный анализ статистических данных, затем сравнение их значений с предыдущим периодом, после этого, оценка эффективности предложенных решений, и, при необходимости, их корректировка в матрице Хэддона.

Преимущество такой системы в возможности прогнозирования потенциальных рисков, что позволяет не только избежать неадекватных решений, но и предотвратить рискованные ситуации в соответствии с разными измерениями: экологическими, социальными, управленческими и экономическими.

4 Обсуждение и заключение

В условиях перехода к человекоцентричным системам забота о безопасности пешеходов выходит на первый план. Ситуация станет более критичной, когда мы будем жить в умных городах с умными транспортными средствами и умной инфраструктурой, где роль человеческого фактора в силу непредсказуемости поведения может привести к серьезным сбоям и даже техногенным катастрофам. В настоящее время есть целый ряд направлений исследований по созданию более безопасной и устойчивой транспортной системы городов, в том числе для комфорта пешеходов, как участников дорожного движения. Применение описанных в статье мер может стать первым шагом к созданию безопасной городской среды.

Сбалансированный подход, учитывающий как технологические возможности, так и человеческое поведение, действительно может стать основой для создания безопасных, устойчивых и комфортных городов будущего.

Список литературы

- 1 Ezzati Amini, R.; Katrakazas, C.; Antoniou, C. Negotiation and Decision-Making for a Pedestrian Roadway Crossing: A Literature Review. *Sustainability* 2019, 11, 6713.
- 2 Kim, D.; Kim, H.; Mok, Y.; Paik, J. Real-Time Surveillance System for Analyzing Abnormal Behavior of Pedestrians. *Appl. Sci.* 2021, 11, 6153.
- 3 S. Deokar and S. Khandekar, "Identification Of Pedestrian Movement And Classification Using Deep Learning For Advanced Driver Assistance System," 2022 International Conference on Augmented Intelligence and Sustainable Systems (ICAISS), Trichy, India, 2022, pp. 374-381.
- 4 Giannoulaki, M.; Christoforou, Z. Pedestrian Walking Speed Analysis: A Systematic Review. *Sustainability* 2024, 16, 4813.
- 5 Sajewicz, J.; Dziuba-Słonina, A. Texting on a Smartphone While Walking Affects Gait Parameters. *Int. J. Environ. Res. Public Health* 2023, 20, 4590.
- 6 Mikusova, M.; Wachnicka, J.; Zukowska, J. Research on the Use of Mobile Devices and Headphones on Pedestrian Crossings—Pilot Case Study from Slovakia. *Safety* 2021, 7, 17.
- 7 A. Marrapu, "Utilizing Technology to Prevent Distracted Walking," 2024 IEEE Integrated STEM Education Conference (ISEC), Princeton, NJ, USA, 2024, pp. 1-7.
- 8 R. Hasan, M. A. Hoque, Y. Karim, R. Griffin, D. C. Schwebel and R. Hasan, "Someone to Watch Over You: Using Bluetooth Beacons for Alerting Distracted Pedestrians," in *IEEE Internet of Things Journal*, vol. 9, no. 22, pp. 23017-23030, 15 Nov.15, 2022.
- 9 M. Gogola and J. Ondruš, "Road safety perspective of small children," 2020 XII International Science-Technical Conference AUTOMOTIVE SAFETY, Kielce, Poland, 2020, pp. 1-5.
- 10 Y. Koike and Y. Tanjo, "Development of a Navigation System Using MY VISION for Visually Impaired People – A Method to Guide the Direction of Travel," 2024 IEEE International Conference on Systems, Man, and Cybernetics (SMC), Kuching, Malaysia, 2024, pp. 3275-3280.
- 11 S. Caldera, V. Madushika, S. Herath, S. Alwis, S. Thelijjagoda and J. Krishara, "VisionPal: Visual Assistant System for the Visually Impaired People," 2023 International Conference on Innovative Computing, Intelligent Communication and Smart Electrical Systems (ICES), Chennai, India, 2023, pp. 1-8.
- 12 W. -J. Chang, L. -B. Chen, C. -Y. Sie and C. -H. Yang, "An Artificial Intelligence Edge Computing-Based Assistive System for Visually Impaired Pedestrian Safety at Zebra Crossings," in *IEEE Transactions on Consumer Electronics*, vol. 67, no. 1, pp. 3-11, Feb. 2021.
- 13 Y. Li, H. Zhou, S. Fu and W. Wang, "Risky Behavior of Pedestrians Crossing the Street in front of New Energy Vehicles," 2023 7th International Conference on Transportation Information and Safety (ICTIS), Xi'an, China, 2023, pp. 1230-1235.
- 14 Simulation modeling in improving pedestrians' safety at non-signalized crosswalks / I. Makarova, R. Khabibullin, V. Mavrin, E. Belyaev // *Transport Problems*. – 2016. – Vol. 11, No. 4. – P. 139-150.
- 15 Makarova, I. V. Children's safety on roads: Development of the method to choose the school route / I. V. Makarova, K. A. Shubenkova, G. A. Parsin // *Proceedings of the International Forum KAZAN DIGITAL WEEK - 2020*.
- 16 Improving safety on the crosswalks with the use of fuzzy logic / I. Makarova, K. Shubenkova, V. Mavrin, P. Buyvol // *Transport Problems*. – 2018. – Vol. 13, No. 1. – P. 97-109.
- 17 Haddon J. W. The changing approach to the epidemiology, prevention and amelioration of trauma: the transition to approaches etiologically rather than descriptively. *America J. of Public Health*. 1968; 58:1431-1438.
- 18 Фаттахов Тимур Асфанович Дорожно-транспортный травматизм в России и его факторы // Социальные аспекты здоровья населения. – 2015. – №4. – С. 1-17 URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/dorozhno-transportnyu-travmatizm-v-rossii-i-ego-factory> (дата обращения: 13.12.2025).
- 19 Черкесов В.В., Ганенко С.Р. Использование матрицы Хеддона при оказании первой помощи при ДТП Пожарная и техносферная безопасность: проблемы и пути совершенствования. – 2021. – № 2 (9). – С. 379-383.
- 20 К вопросу о методологии обеспечения безопасности дорожного движения в Российской // Федерации Сборник «Дороги и мосты». – Вып. 36-2/2016. – С.193-221
- 21 Васюков В.Ф., Дамирчиев Э.И. Расследование преступлений в сфере дорожного движения: криминалистические подходы и аналитические инструменты (на примере Таиланда) // *Безопасность дорожного движения*. – 2025. – № 3. – С. 54–62.

References

- 1 Ezzati Amini, R.; Katrakazas, C.; Antoniou, C. Negotiation and Decision-Making for a Pedestrian Roadway Crossing: A Literature Review. *Sustainability* 2019, 11, 6713.
- 2 Kim, D.; Kim, H.; Mok, Y.; Paik, J. Real-Time Surveillance System for Analyzing Ab-normal Behavior of Pedestrians. *Appl. Sci.* 2021, 11, 6153.
- 3 S. Deokar and S. Khandekar, "Identification Of Pedestrian Movement And Classification Using Deep Learning For Advanced Driver Assistance System," 2022 International Conference on Augmented Intelligence and Sustainable Systems (ICAISS), Trichy, India, 2022, pp. 374-381.
- 4 Giannoulaki, M.; Christoforou, Z. Pedestrian Walking Speed Analysis: A Systematic Re-view. *Sustainability* 2024, 16, 4813.
- 5 Sajewicz, J.; Dziuba-Słonina, A. Texting on a Smartphone While Walking Affects Gait Parameters. *Int. J. Environ. Res. Public Health* 2023, 20, 4590.
- 6 Mikusova, M.; Wachnicka, J.; Zukowska, J. Research on the Use of Mobile Devices and Headphones on Pedestrian Crossings—Pilot Case Study from Slovakia. *Safety* 2021, 7, 17.
- 7 A. Marrapu, "Utilizing Technology to Prevent Distracted Walking," 2024 IEEE Integrated STEM Education Conference (ISEC), Princeton, NJ, USA, 2024, pp. 1-7.
- 8 R. Hasan, M. A. Hoque, Y. Karim, R. Griffin, D. C. Schwebel and R. Hasan, "Someone to Watch Over You: Using Bluetooth Beacons for Alerting Distracted Pedestrians," in *IEEE Inter-net of Things Journal*, vol. 9, no. 22, pp. 23017-23030, 15 Nov.15, 2022.
- 9 M. Gogola and J. Ondruš, "Road safety perspective of small children," 2020 XII International Science-Technical Conference AUTOMOTIVE SAFETY, Kielce, Poland, 2020, pp. 1-5.
- 10 Y. Koike and Y. Tanjo, "Development of a Navigation System Using MY VISION for Visually Impaired People – A Method to Guide the Direction of Travel," 2024 IEEE International Conference on Systems, Man, and Cybernetics (SMC), Kuching, Malaysia, 2024, pp. 3275-3280.
- 11 S. Caldera, V. Madushika, S. Herath, S. Alwis, S. Thelijjagoda and J. Krishara, "Vision-Pal: Visual Assistant System for the Visually Impaired People," 2023 International Conference on Innovative Computing, Intelligent Communication and Smart Electrical Systems (ICSSES), Chennai, India, 2023, pp. 1-8.
- 12 W. -J. Chang, L. -B. Chen, C. -Y. Sie and C. -H. Yang, "An Artificial Intelligence Edge Computing-Based Assistive System for Visually Impaired Pedestrian Safety at Zebra Crossings," in *IEEE Transactions on Consumer Electronics*, vol. 67, no. 1, pp. 3-11, Feb. 2021.
- 13 Y. Li, H. Zhou, S. Fu and W. Wang, "Risky Behavior of Pedestrians Crossing the Street in front of New Energy Vehicles," 2023 7th International Conference on Transportation Information and Safety (ICTIS), Xi'an, China, 2023, pp. 1230-1235.
- 14 Simulation modeling in improving pedestrians' safety at non-signalized crosswalks / I. Makarova, R. Khabibullin, V. Mavrin, E. Belyaev // *Transport Problems*. – 2016. – Vol. 11, No. 4. – P. 139-150.
- 15 Makarova, I. V. Children's safety on roads: Development of the method to choose the school route / I. V. Makarova, K. A. Shubenkova, G. A. Parsin // *Proceedings of the International Forum KAZAN DIGITAL WEEK - 2020*.
- 16 Improving safety on the crosswalks with the use of fuzzy logic / I. Makarova, K. Shu-benkova, V. Mavrin, P. Buyvol // *Transport Problems*. – 2018. – Vol. 13, No. 1. – P. 97-109.
- 17 Haddon J. W. The changing approach to the epidemiology, prevention and amelioration of trauma: the transition to approaches etiologically rather than descriptively. *America J. of Public Health*. 1968; 58:1431–1438.
- 18 Fattakhov Timur Asfanovich Road traffic injuries in Russia and its factors // *Social aspects of population health*. - 2015. - No. 4. - Pp. 1-17 URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/dorozhno-transportnyy-travmatizm-v-rossii-i-ego-factory> (date of access: 13.12.2025).
- 19 Cherkesov V.V., Ganenko S.R. Using the Haddon matrix in providing first aid in case of an accident Fire and technosphere safety: problems and ways of improvement. - 2021. - No. 2 (9). - Pp. 379-383.
- 20 On the methodology of ensuring road safety in the Russian // *Federation Collection "Roads and Bridges"*. – Issue 36-2/2016. – P.193-221
- 21 Vasyukov V.F., Damirchiev E.I. Investigation of crimes in the field of road traffic: forensic approaches and analytical tools (on the example of Thailand) // *Road Safety*. – 2025. – No. 3. – P. 54–62.

DOI: 10.34220/2311-8873-2026-83-90



УДК 665.76: 543.06

UDC 665.76: 543.06

2.9.5 – эксплуатация автомобильного транспорта

**ИССЛЕДОВАНИЕ
РАБОТОСПОСОБНОСТИ
МОТОРНОГО МАСЛА,
ПРИМЕНЯЕМОГО В СИЛОВЫХ
АГРЕГАТАХ ТРАНСПОРТНО-
ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ МАШИН**

**STUDY OF THE PERFORMANCE
CAPABILITY OF MOTOR OIL USED
IN POWER UNITS OF TRANSPORT-
TECHNOLOGICAL MACHINES**

Барыкин Алексей Юрьевич,
к.т.н., доцент кафедры автомобилей,
ФГАОУ ВО «Набережночелнинский (ин-
ститут) филиал КФУ», г. Набережные
Челны, e-mail: AJBarykin@kpfu.ru

Barykin Alexey Yuryevich,
candidate of technical sciences, associate professor
of the department of automobiles, Naberezhnye
Chelny Institute (branch) Kazan (Volga Region)
Federal University, Naberezhnye Chelny,
e-mail: AJBarykin@kpfu.ru

✉¹ **Мухаметдинов Эдуард
Мухаматзакиевич,**
к.т.н., доцент кафедры сервиса транспортных
систем, ФГАОУ ВО «Набережночелнинский
(институт) филиал КФУ», г. Набережные
Челны, e-mail: EMMuhametdinov@kpfu.ru

✉¹ **Mukhametdinov Eduard
Mukhamatzakievich,**
candidate of technical sciences, associate professor
of the department of transport systems service, Na-
berezhnye Chelny Institute (branch) Kazan (Volga
Region) Federal University, Naberezhnye Chelny,
e-mail: EMMuhametdinov@kpfu.ru

Нигметзянова Венера Марсовна,
к.п.н., доцент кафедры автомобилей,
ФГАОУ ВО «Набережночелнинский (ин-
ститут) филиал КФУ», г. Набережные
Челны, e-mail: VMNigmatzyanova@kpfu.ru

Nigmatzyanova Venera Marsovna,
candidate of pedagogical sciences, associate pro-
fessor of the department of automobiles, Naberezh-
nye Chelny Institute (branch) Kazan (Volga Re-
gion) Federal University, Naberezhnye Chelny,
e-mail: VMNigmatzyanova@kpfu.ru

Россова Надежда Константиновна,
студент 3 курса, ФГАОУ ВО «Набережночел-
нинский (институт) филиал КФУ», г. Набе-
режные Челны, e-mail: NaKRossova@kpfu.ru

Rossova Nadezhda Konstantinovna,
3rd year student, Naberezhnye Chelny Institute
(branch) Kazan (Volga Region) Federal University,
Naberezhnye Chelny, e-mail: NaKRossova@kpfu.ru

Горшков Александр Леонидович,
студент 3 курса, ФГАОУ ВО «Набережночел-
нинский (институт) филиал КФУ», г. Набе-
режные Челны, e-mail: AILGorshkov@kpfu.ru

Gorshkov Alexander Leonidovich,
3rd year student, Naberezhnye Chelny Institute
(branch) Kazan (Volga Region) Federal Universi-ty,
Naberezhnye Chelny, e-mail: AILGorshkov@kpfu.ru

Аннотация. В статье изучены вопросы обес-
печения необходимого ресурса моторного
масла, применяемого в двигателях транс-
портно-технологических машин. По данным
анализа результатов дорожных испытаний

Annotation. The article examines the issues of
ensuring the necessary resource of engine oil used
in engines of transport and technological ma-
chines. Based on the analysis of the results of road
tests, conclusions were drawn about the change in

сделаны выводы об изменении параметров свойств моторного масла в процессе эксплуатации. Установлена необходимость учёта условий эксплуатации и режимов нагружения двигателя на работоспособность моторного масла в заданных пределах.

Ключевые слова: ТРАНСПОРТНО-ТЕХНОЛОГИЧЕСКАЯ МАШИНА, СИЛОВОЙ АГРЕГАТ, МОТОРНОЕ МАСЛО, КИНЕМАТИЧЕСКАЯ ВЯЗКОСТЬ, КИСЛОТНОЕ ЧИСЛО, ЩЕЛОЧНОЕ ЧИСЛО, ТОПЛИВО.

the parameters of the properties of engine oil during operation. It is established that it is necessary to take into account the operating conditions and loading modes of the engine for the performance of engine oil within the specified limits.

Keywords: TRANSPORT AND TECHNOLOGICAL MACHINE, POWER UNIT, ENGINE OIL, KINEMATIC VISCOSITY, ACID NUMBER, BASE NUMBER, FUEL.

¹ Автор для ведения переписки

1 Состояние вопроса исследования и актуальность работы

Эффективная работа двигателя внутреннего сгорания в значительной степени зависит от условий смазывания пар трения и соответствия параметров применяемого моторного масла условиям нагружения деталей. Режим смазывания определяется типом и конструктивными особенностями применяемой системы смазки, параметрами теплового процесса двигателя и нагрузочными факторами, действующими на детали. В процессе циркуляции в системе и взаимодействия с парами трения моторное масло претерпевает изменение своего состава и ряда физико-химических свойств [1]. Оно подвержено как химическому воздействию различных веществ – продуктов горения топлива в условиях высоких температур и давления, так и механическому смешиванию с различными посторонними компонентами – топливом, охлаждающей жидкостью, продуктами износа деталей двигателя. По мере наработки происходит ухудшение смазочных свойств масла, приводящее к дополнительным потерям на трение в механизмах двигателя и ускорению износа деталей [2].

Интенсивность описанных процессов зависит от многих разнородных факторов [3], поэтому для достоверной оценки значимости влияния того или иного показателя необходимо рассматривать рабочий процесс моторного масла как основу естественно-технической системы, подуровнями которой являются механизмы двигателя, системы смазки и охлаждения, само моторное масло и окружающая среда. Связи данной системы должны быть изучены для выявления их весомости и получения количественных зависимостей, определяющих степень влияния на работоспособность в заданных пределах.

Одним из наиболее важных параметров моторного масла является его кинематическая вязкость, влияющая на рабочий процесс пар трения и зависящая от ряда факторов. Необходимо принимать во внимание интенсивность процессов изменения состава масла, причиной которых являются различные загрязнения, а также изменение химического и фракционного состава в процессе эксплуатации. Загрязнения масла вызваны попаданием топлива, воды, охлаждающей жидкости, продуктов горения (сажи, нагара) [4, 5]. Изменение состава масла объясняется его окислением под действием активных компонентов рабочей смеси двигателя и неравномерным испарением фракций, различных по плотности и другим свойствам.

Стабильность моторного масла определяется также динамикой значений важных контрольных параметров:

– щелочного числа, связанного с наличием и состоянием моющих и диспергирующих присадок;

– кислотного числа, указывающего на активность окислительных процессов и степень загрязнения продуктами горения.

Моторное масло, претерпевающее описанные изменения своего состава в процессе эксплуатации, в различной степени реагирует и на воздействие внешних факторов, прежде всего, на изменение рабочей температуры. Соответственно изменяются и условия смазки деталей, что может стать причиной отклонений от рациональных режимов работы. При этом оказывается определённое влияние на ход процессов горения топливно-воздушной смеси, что приводит к изменению состава отработанных газов [6]. Соответственно, может оказаться различным и влияние загрязнения моторного масла продуктами горения. В работах [7, 8] подтверждена важность обеспечения рационального диапазона температур моторного масла для нормальной работы двигателя в сложных условиях. Кроме того, изменение кинематической вязкости моторного масла влияет на его демпфирующую способность и может способствовать динамическому нагружению деталей двигателя и трансмиссии [9].

2 Материалы и методы

На основании анализа рабочего процесса смазочной системы двигателя предложена методика изучения динамики эксплуатационных свойств моторного масла в процессе работы. На первом этапе проводится оценка уровня изменений контрольных параметров масла при определённой рабочей температуре, устанавливаемой при нормальном рабочем состоянии механизмов и систем двигателя. Данное исследование проводится для наиболее характерных условий эксплуатации транспортно-технологических машин с целью выявления параметров, заметно отклоняющихся от рационального диапазона значений. На втором этапе рассматривается состояние моторного масла при эксплуатации в сложных условиях, например при воздействии низких температур и подвижности атмосферного воздуха на систему смазки и силовой агрегат в целом [10, 11].

В процессе изучения свойств моторного масла были проведены дорожные испытания следующих транспортно-технологических машин: экскаватора HITACHI ZX330LC-5G с двигателем Isuzu 6HK1 и фронтального погрузчика XCMG ZL50G с двигателем WEIHAI WD615.67G3-31A. Объектом исследования являлось всесезонное универсальное полусинтетическое моторное масло, соответствующее классам SAE 10W-40, API CI-4, ACEA E4/E7. Данное масло предназначено для высоконагруженных дизельных двигателей строительной и карьерной техники, работающей в тяжелых условиях эксплуатации. Испытываемые образцы машин применялись на строительных работах в осенне-зимний период в условиях умеренно континентального климата Республики Татарстан. Температура окружающего воздуха во время испытаний изменялась в диапазоне $-24... +50$ °C. Пробы масла отбирались после заданной наработки двигателя (более 300 ч), с последующим техническим обслуживанием и заменой масла.

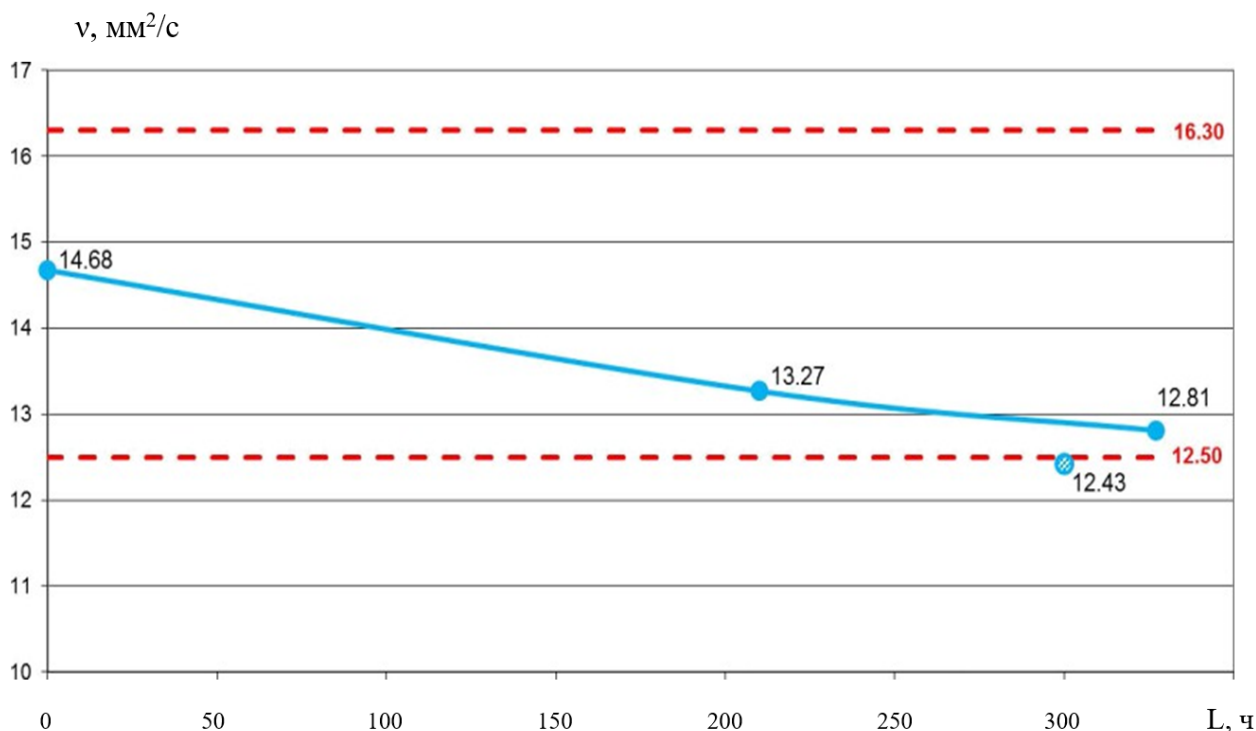
Оценка степени динамики кинематической вязкости моторного масла проводилась с учётом рекомендуемого диапазона значений для класса SAE 40 – $12,5...16,3$ Н/мм² при рабочей температуре 100 °C.

3 Результаты исследований

На рис. 1 показана зависимость кинематической вязкости моторного масла от наработки двигателя гусеничного экскаватора HITACHI ZX330LC-5G (сплошная линия) и крайние значения рекомендуемого диапазона изменения вязкости (штриховые линии). Отдельной точкой показано значение кинематической вязкости моторного масла предыдущей заливки. Установлено снижение кинематической вязкости по мере наработки, не выходящее за пределы рекомендуемого диапазона.

На рис. 2 показана зависимость кинематической вязкости моторного масла от наработки двигателя фронтального погрузчика XCMG ZL50G (сплошная линия) и крайние значения рекомендуемого диапазона изменения вязкости (штриховые линии). Отдельной точкой также показано значение кинематической вязкости масла предыдущей заливки. Установлено снижение кинематической вязкости по мере наработки, которое приводит к отклонению от

рекомендуемого диапазона значений при наработке более 200 ч. Минимальное значение кинематической вязкости в исследуемом диапазоне составило 11,43 мм²/с, что соответствует показателям моторного масла класса SAE 30.

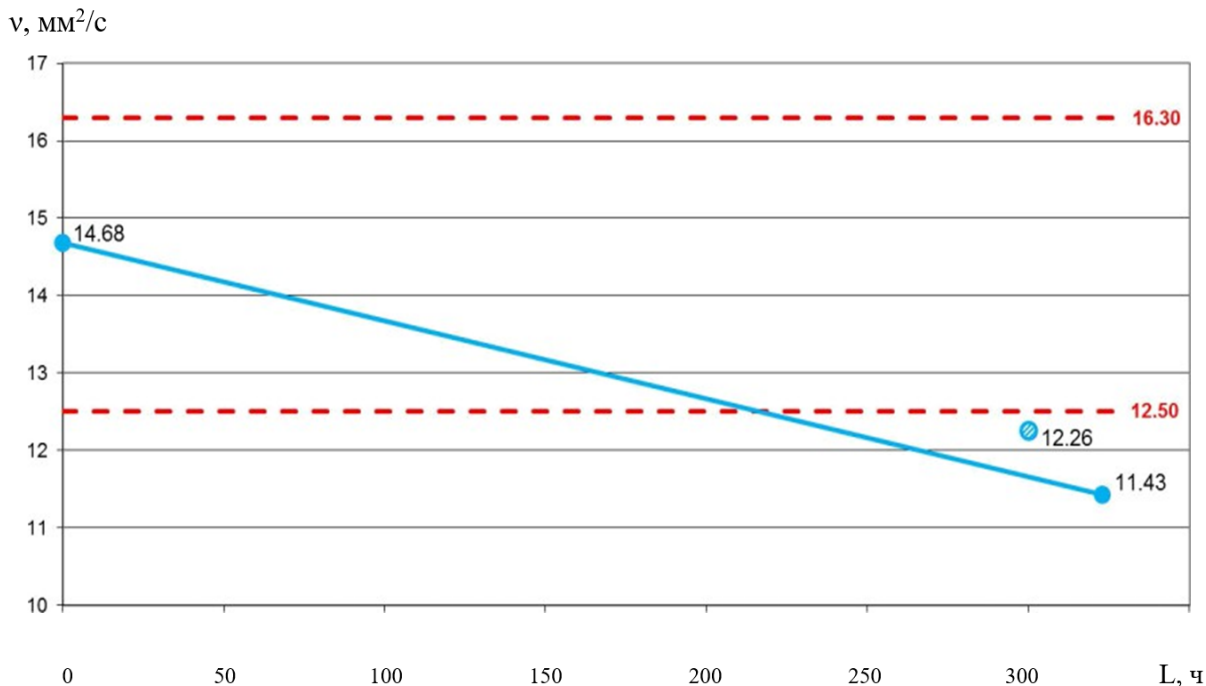


сплошная линия – кинематическая вязкость моторного масла от наработки двигателя;
штриховые линии – крайние значения рекомендуемого диапазона изменения кинематической вязкости.

Рисунок 1 – Динамика кинематической вязкости моторного масла гусеничного экскаватора HITACHI ZX330LC-5G

Анализ состава моторного масла позволил установить причину несоответствия кинематической вязкости. Падение вязкости было вызвано загрязнением масла дизельным топливом в процессе эксплуатации, относительное содержание которого составило 0,9 % при наработке 323 ч и максимальном допустимом уровне загрязнения 1,5 %. Для моторного масла гусеничного экскаватора HITACHI ZX330LC-5G загрязнение масла дизельным топливом в процессе эксплуатации составило 0,5 % при наработке 327 ч.

В процессе испытаний проводился контроль значений щелочного и кислотного чисел. Определение щелочного числа проводилось по методу ASTM D 4739, который является наиболее подходящим для применяемого полнозольного моторного масла. Исследование показало стабильное снижение щелочного числа при наработке масла. При начальном значении щелочного числа свежего масла 11,24 мг КОН/г были получены величины 10,61 мг КОН/г при наработке 327 ч для гусеничного экскаватора HITACHI ZX330LC-5G и 9,29 мг КОН/г при наработке 323 ч для фронтального погрузчика XCMG ZL50G. Кислотное число при начальном значении для свежего масла 1,72 мг КОН/г возросло до 2,59 мг КОН/г при наработке 327 ч для гусеничного экскаватора HITACHI ZX330LC-5G и 2,40 мг КОН/г при наработке 323 ч для фронтального погрузчика XCMG ZL50G.



сплошная линия – кинематическая вязкость моторного масла от наработки двигателя;
 штриховые линии – крайние значения рекомендуемого диапазона изменения кинематической вязкости.

Рисунок 2 – Динамика кинематической вязкости моторного масла фронтального погрузчика XCMG ZL50G

По результатам исследования, исходя из заметного превышения значений щелочного числа над кислотным, можно сделать вывод о сохранении моющих и диспергирующих свойств моторного масла в межсервисный период. Изменение кислотного числа, указывающее на интенсивность химических процессов, происходило в приемлемом диапазоне значений и не достигало максимального уровня, который для данного типа масла составляет 4,22 мг КОН/г.

Эффективная защищенность двигателей от попадания внешних загрязнений является определяющим фактором интенсивности износа пар трения и скорости деградации масла.

В качестве предельных норм концентрации элементов загрязнений приняты:

- топливо – 1,5 % и выше;
- сажа – 1,4 % и выше;
- Si (кремний) – повышение относительно показателя свежего масла на 15 ppm и более;
- K (калий) – повышение относительно показателя свежего масла на 20 ppm и более;
- Na (натрий) – повышение относительно показателя свежего масла на 20 ppm и более.

В пробах подконтрольного масла из ДВС обеих задействованных в мониторинге машин в течение всего периода наблюдений не отмечено значительного накопления количества элементов загрязнений (Si, K, Na, топливо, сажа), их значения определены на минимальных уровнях с существенным запасом до браковочных пределов и приведены в табл. 1.

Таблица 1 – Содержание элементов загрязнений

Место отбора	Наработка, км	Содержание элементов загрязнения, ppm		
		Si	K	Na
HITACHI ZL330LC- 5G	210	1	0	0
	327	2	2	2
XCMG ZL50G	300	5	0	0
	323	2	2	0
Предельно-допустимые значения показателей		17	20	20

В финальной пробе погрузчика содержание топлива составило 0,9 %. Значение показателя находится в диапазоне допустимых значений, однако такой уровень накопления оказал негативное влияние на вязкостные свойства масла. Рекомендация провести диагностику топливной системы ДВС транспортного средства.

В пробах подконтрольного масла проводился анализ содержания *Fe* (железо), *Cr* (хром), *Sn* (олово), *Al* (алюминий), *Cu* (медь) и *Pb* (свинец) приведены в табл. 2.

Таблица 2 – Содержание металлов-маркеров износа

Место отбора	Наработка, км	Содержание металлов-маркеров износа, ppm					
		<i>Fe</i>	<i>Cr</i>	<i>Sn</i>	<i>Al</i>	<i>Cu</i>	<i>Pb</i>
HITACHI ZL330LC-5G	210	2	0	1	0	0	0
	327	3	0	0	0	0	0
XCMG ZL50G	300	7	1	0	0	0	0
	323	9	0	0	0	0	1
Предельно-допустимые значения показателей		75	5	5	10	30	30

Во всех пробах подконтрольного масла определено очень низкое накопление металлов-маркеров износа. Фактические концентрации элементов *Cr* (хром), *Sn* (олово), *Al* (алюминий), *Cu* (медь) и *Pb* (свинец) находятся на уровне нулевых и около нулевых значений. Содержание *Fe* (железо) определено на минимальном уровне со значительным запасом до предельной границы зоны.

Объем моторного масла в системе смазки для исследуемых типов транспортно-технологических машин сохранялся в период наработки на необходимом уровне и долив масла не производился, что позволяет сделать вывод о нормальном техническом состоянии силовых агрегатов и не учитывать влияние угара масла.

4 Обсуждение и заключение

Проведённое исследование динамики свойств моторного масла позволило установить ряд системных связей между параметрами физико-химических процессов, происходящих при наработке силового агрегата в пределах межсервисного интервала и в заданном диапазоне рабочих температур. Дальнейшая работа в предложенном направлении может быть посвящена изучению динамики свойств масел при эксплуатации в сложных дорожных и природно-климатических условиях, приводящих к нарушениям процесса смазки, ускоренному износу, угару масла.

По результатам выполненной научной работы можно сделать следующие выводы:

- кинематическая вязкость моторного масла в процессе эксплуатации меняется, причем уровень изменения может существенно зависеть от сторонних факторов, в частности, от уровня загрязнения топливом;
- эффективность моторного масла в межсервисный период зависит от интенсивности физико-химических процессов, которые следует контролировать по соотношению и динамике щелочного и кислотного чисел;
- отклонение от рациональных значений рабочих температур моторного масла, происходящее вследствие влияния внешних факторов, может оказать негативное влияние на эффективность работы смазочной системы.

Список литературы

- 1 Суховерхов, В. Д. Моторное масло для тяжелонагруженной дизельной техники / В. Д. Суховерхов, В. В. Юдина, З. С. Яворская. – Текст: непосредственный // Химия и технология топлив и масел. – 2008. – № 3 (547). – С. 26-28.
- 2 Кулаков, А. Т. Диагностирование двигателя по количественным и качественным параметрам масла / А. Т. Кулаков, Д. И. Нуретдинов, Ф. Л. Назаров. – Текст: непосредственный // Проблемы экономичности и эксплуатации автотракторной техники: материалы Национальной научно-технической конференции с международным участием им. В. В. Михайлова. – Вып. 33. – Саратов: Амирит, 2020. – С. 78-82.
- 3 Назаров, Ф. Л. Резервы снижения затрат на эксплуатацию автомобиля / Ф. Л. Назаров, Р. Ф. Калимуллин. – Текст: непосредственный // Прогрессивные технологии в транспортных системах: материалы XVIII Международной научно-практической конференции, 15-17 ноября 2023 г., Оренбург. – Оренбург: ОГУ, 2023. – С. 293-301.
- 4 Корнеев, С. В. Загрязнение моторных масел при зимней эксплуатации автомобилей / С. В. Корнеев, С. В. Пашукевич, В. Д. Бакулина, Н. Г. Певнев. – Текст: непосредственный // Вестник Сибирского государственного автомобильно-дорожного университета. – 2022. – Т. 19. – № 5(87). – С. 680-691.
- 5 Лаушкин, А. В. Количественная оценка попадания воды в моторное масло из атмосферного воздуха при эксплуатации автомобиля / А. В. Лаушкин, А. А. Хазиев. – Текст: непосредственный // Автотранспортное предприятие. – 2015. – № 7. – С. 40-42.
- 6 Фахруллин, И. Р. Исследование снижения вредных выбросов в условиях низких температур / И. Р. Фахруллин, А. А. Гафиятуллин, Д. И. Нуретдинов. – Текст: непосредственный // Проблемы экономичности и эксплуатации автотракторной техники: материалы Национальной научно-технической конференции с международным участием им. В. В. Михайлова. – Вып. 33. – Саратов: Амирит, 2020. – С. 92-95.
- 7 Калимуллин, Р. Ф. Эффективность предпускового подогрева автомобильного двигателя / Р. Ф. Калимуллин. – Текст: непосредственный // Вестник Сибирской автомобильно-дорожной академии. – 2015. – № 1. – С. 11-17.
- 8 Курдин, П. Г. Современные проблемы эксплуатации автомобилей в условиях низких температур независимо от климатической зоны / П. Г. Курдин, Ю. К. Филипов, В. А. Токарев. – Текст: непосредственный // Энергосбережение. Наука и образование: сборник докладов Международной конференции. – Набережные Челны: Издательско-полиграфический центр Набережночелнинского института К(П)ФУ, 2017. – С. 405-417.
- 9 Барыкин, А. Ю. Исследование влияния динамических нагрузок в механизмах силового агрегата на долговечность деталей трансмиссии / А. Ю. Барыкин, Э. М. Мухаметдинов, С. Г. Костин, С. А. Павлов. – Текст: непосредственный // Грузовик. – 2024. – № 5. – С. 21-24.
- 10 Павлов, С. А. Поддержание технического состояния механизмов дизельного двигателя при эксплуатации в зимнее время / С. А. Павлов, П. Г. Курдин. – Текст: непосредственный // Логистика и транспорт: факторы стратегического развития региона: материалы Международной научно-практической конференции. – Махачкала: Дагестанский государственный аграрный университет им. М. М. Джамбулатова, 2024. – С. 45-48.
- 11 Барыкин, А. Ю. Применение автотранспортных средств в условиях экстремальных природных факторов / А. Ю. Барыкин, Р. Х. Тахавиев. – Текст: непосредственный // Проблемы формирования единого пространства экономического и социального развития стран СНГ (СНГ-2021): материалы ежегодной Международной научно-практической конференции. В 2-х томах. Том 1. Отв. редакторы О. М. Барбаков, Ю. А. Зобнин. – Тюмень: ТИУ, 2021. – С. 61-65.

References

- 1 Sukhoverkhov, V. D. Motor Oil for Heavy-Duty Diesel Equipment / V. D. Sukhoverkhov, V. V. Yudina, Z. S. Yavorskaya. – Text: direct // Chemistry and Technology of Fuels and Oils. – 2008. – No. 3 (547). – Pp. 26-28.
- 2 Kulakov, A. T. Engine Diagnostics Based on Quantitative and Qualitative Oil Parameters / A. T. Kulakov, D. I. Nuretdinov, F. L. Nazarov. – Text: direct // Problems of Efficiency and Operation of Automotive and Tractor Equipment: Proceedings of the National Scientific and Technical Conference with International Participation named after V. V. Mikhailov. – Issue 33. – Saratov: Amirit, 2020. – Pp. 78-82.
- 3 Nazarov, F. L. Reserves for reducing vehicle operating costs / F. L. Nazarov, R. F. Kalimullin. – Text: direct // Progressive technologies in transport systems: materials of the XVIII International scientific and practical conference, November 15-17, 2023, Orenburg. – Orenburg: OSU, 2023. – Pp. 293-301.

4 Korneev, S. V. Contamination of motor oils during winter operation of cars / S. V. Korneev, S. V. Pashukevich, V. D. Bakulina, N. G. Pevnev. - Text: direct // Bulletin of the Siberian State Automobile and Highway University. - 2022. - Vol. 19. - No. 5 (87). - Pp. 680-691.

5 Laushkin, A. V. Quantitative assessment of water ingress into engine oil from atmospheric air during vehicle operation / A. V. Laushkin, A. A. Khaziev. - Text: direct // Motor transport enterprise. - 2015. - No. 7. - Pp. 40-42.

6 Fakhrullin, I. R. Study of reducing harmful emissions at low temperatures / I. R. Fakhrullin, A. A. Gafiyatullin, D. I. Nuretdinov. - Text: direct // Problems of efficiency and operation of automotive and tractor equipment: Proceedings of the National Scientific and Technical Conference with international participation named after V. V. Mikhailov. - Issue. 33. - Saratov: Amirit, 2020. - Pp. 92-95.

7 Kalimullin, R. F. Efficiency of pre-start heating of an automobile engine / R. F. Kalimullin. - Text: direct // Bulletin of the Siberian Automobile and Road Academy. - 2015. - No. 1. - P. 11-17.

8 Kurdin, P. G. Modern problems of vehicle operation in low-temperature conditions regardless of the climatic zone / P. G. Kurdin, Yu. K. Filippov, V. A. Tokarev. - Text: direct // Energy Saving. Science and Education: Collection of Papers of the International Conference. - Naberezhnye Chelny: Publishing and Printing Center of the Naberezhnye Chelny Institute of K(P)FU, 2017. - Pp. 405-417.

9 Barykin, A. Yu. Study of the influence of dynamic loads in powertrain mechanisms on the durability of transmission components / A. Yu. Barykin, E. M. Mukhametdinov, S. G. Kostin, S. A. Pavlov. - Text: direct // Truck. - 2024. - No. 5. - Pp. 21-24.

10 Pavlov, S. A. Maintaining the technical condition of diesel engine mechanisms during operation in winter / S. A. Pavlov, P. G. Kurdin. - Text: direct // Logistics and transport: factors of strategic development of the region: materials of the International scientific and practical conference. - Makhachkala: Dagestan State Agrarian University named after M. M. Dzhambulatov, 2024. - Pp. 45-48.

11 Barykin, A. Yu. Use of motor vehicles in conditions of extreme natural factors / A. Yu. Barykin, R. Kh. Takhaviyev. - Text: direct // Problems of forming a single space for economic and social development of the CIS countries (CIS-2021): materials of the annual International scientific and practical conference. In 2 volumes. Volume 1. Editors-in-chief O. M. Barbakov, Yu. A. Zobnin. - Tyumen: TIU, 2021. - P. 61-65.

© Барыкин А. Ю., Мухаметдинов Э. М., Нигметзянова В. М.,
Россова Н. К., Горшков А. Л., 2026



2.9.5 – эксплуатация автомобильного транспорта

**ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ
ПРИНЯТИЯ РЕШЕНИЙ
В ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОЙ СИСТЕМЕ
ТРАНСПОРТА ОБЩЕГО
ПОЛЬЗОВАНИЯ**

**THEORETICAL BASIS OF
DECISION-MAKING IN INTELLIGENT
PUBLIC TRANSPORT SYSTEMS**

✉¹ **Гринченко Александр Викторович**,
к.т.н., доцент кафедры управления авто-
транспортом, Липецкий государственный
технический университет, г. Липецк,
e-mail: grinchav@mail.ru

✉¹ **Grinchenko Alexander Viktorovich**,
candidate of technical sciences, associate profes-
sor, department of motor transport management,
Lipetsk state technical university, Lipetsk,
e-mail: grinchav@mail.ru

Клявин Владимир Эрнстович,
д.т.н., главный научный сотрудник отдела
научно-исследовательских разработок, АО
«СтройИнвестПроект», г. Москва,
e-mail: vllk@list.ru

Klyavin Vladimir Ernstovich,
doctor of technical sciences, chief researcher, re-
search and development department, JSC «StroyIn-
vestProekt», Moscow, e-mail: vllk@list.ru

Ризаева Юлия Николаевна,
д.т.н., профессор кафедры информационных
технологий, Финансовый университет при
Правительстве Российской Федерации,
г. Москва, e-mail: rizaeva@mirea.ru

Rizaeva Yulia Nikolaevna,
doctor of technical sciences, professor of the de-
partment of industrial programming, MIREA -
Russian technological university, Moscow,
e-mail: rizaeva@mirea.ru

Аннотация. Статья посвящена разработке теоретических основ и концептуальной модели принятия решений в интеллектуальной системе транспорта общего пользования. Рассмотрены актуальные проблемы управления городским пассажирским транспортом в условиях динамичной и неопределённой среды. Предложена целостная модель, интегрирующая сбор и анализ больших данных, генерацию оперативных и стратегических управленческих решений с учётом интересов пассажиров, перевозчиков и города в целом. Формализована целевая функция, позволяющая оценивать эффективность принимаемых управленческих решений в интеллектуальной системе транспорта общего пользования. Особое внимание уделено детализации роли интеллектуального центра поддержки принятия решений (ИЦППР), машинного обу-

Annotation. This article explores the development of a theoretical framework and conceptual model for decision-making in an intelligent public transportation system. It examines current challenges in managing urban passenger transport in a dynamic and uncertain environment. A comprehensive model is proposed that integrates the collection and analysis of big data and the generation of operational and strategic management decisions, taking into account the interests of passengers, carriers, and the city as a whole. A formalized objective function allows for assessing the effectiveness of management decisions in an intelligent public transportation system. Particular attention is paid to detailing the role of the intelligent decision support center (IDSC), machine learning, and the division into operational and strategic management loops. The technological, methodological, organizational,

чения и разделению на оперативный и стратегический контуры управления. Обозначены технологические, методологические, организационные и нормативно-правовые вызовы, связанные с практической реализацией модели.

and regulatory challenges associated with the practical implementation of the model are outlined.

Ключевые слова: ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНАЯ ТРАНСПОРТНАЯ СИСТЕМА, ТРАНСПОРТ ОБЩЕГО ПОЛЬЗОВАНИЯ, ПРИНЯТИЕ РЕШЕНИЙ, КОНЦЕПТУАЛЬНАЯ МОДЕЛЬ.

Keywords: INTELLIGENT TRANSPORTATION SYSTEM, PUBLIC TRANSPORT, DECISION MAKING, CONCEPTUAL MODEL.

¹ Автор для ведения переписки

1 Состояние вопроса исследования и актуальность работы

Современные мегаполисы и крупные городские агломерации сталкиваются с комплексом взаимосвязанных проблем, такими как транспортные заторы, рост экологической нагрузки, неэффективное использование городского пространства и снижение эффективности функционирования городского транспорта общего пользования (ГТОП). В этих условиях традиционные подходы к управлению транспортом в целом и ГТОП в частности, основанные на жестких, заранее запрограммированных алгоритмах и разрозненных данных, достигли предела своей эффективности. Решение данной проблемы возможно в результате внедрения в городах интеллектуальных транспортных систем (ИТС) [1, 2], одной из подсистем которых является интеллектуальная система транспорта общего пользования (ИСТОП) [3, 4]. В работе [5] отмечается, что ИТС без сомнений «обладают большим потенциалом, так как опираются на бурно развивающиеся информационные, телекоммуникационные, авиационные, космические и другие высокие технологии». Ключевая задача внедрения ИТС – переход от разрозненного, реактивного управления транспортными потоками, ГТОП и инфраструктурой к созданию интегрированной, проактивной и пользователь-ориентированной экосистемы, которая в реальном времени синхронизирует спрос (потребности пассажиров и грузоотправителей) с предложением (возможности ГТОП и инфраструктуры) [6]. При этом, как указывается в работе [7], главными задачами разработки и внедрения ИСТОП являются:

- «– рост качества принятия управленческих решений...;
- рост уровня ... транспортной безопасности в области транспортного комплекса;
- информирование субъектов транспортного рынка о состоянии транспортной отрасли, необходимого для решения стратегических и оперативных управленческих решений».

Решение этих задач, как указывается в работе [8], предполагает создание «интеллектуальных платформ, объединяющих весь городской транспорт в единую систему – общественный и личный, школьные автобусы, каршеринг, такси, эвакуаторы, технику коммунальных и дорожных служб, систему управления светофорами, парковочное пространство и т. д.». Следует отметить, что часть интересов взаимодействующих участников транспортного процесса может совпадать, а другая часть – вступать в противоречие [9].

Однако действующие стандарты в области ИТС в минимальной степени затрагивают проблемы ГТОП. Так в п. 6.5.1 стандарта [10, с.12], который определяет первичные сервисы и области применения и которые могут быть предложены пользователям ИТС, предполагается «применение функциональных возможностей ИТС в эксплуатации, планировании и управлении общественным транспортом. ... Сервисы включают в себя:

- мониторинг бортовых систем транспортного средства общественного транспорта;
- отслеживание перемещений парка общественного транспорта;
- службу расписания общественного транспорта;
- диспетчерскую службу общественного транспорта;
- службу планирования общественного транспорта».

В стандарте же [11, с.4] (п. 4.3.3), устанавливающим требования к физической и функциональной архитектурам ИТС, указано, что автоматизированная система управления маршрутизированным транспортом ГТОП «...должна реализовывать функции:

- обеспечение безопасности пассажиров наземного пассажирского транспорта;
- оптимизация расписания для общественного городского транспорта с целью гармонизации пассажиропотока».

В настоящее время в ряде городов России используется программный комплекс автоматизации основных функций управления системой городского пассажирского транспорта «Pikas» (разработчик программного обеспечения – литовская компания Merakas). Опыт внедрения в г. Ростов-на-Дону показывает, что компьютерная программная система «Pikas» позволяет эффективно решать следующие задачи [12]:

- формирование и оптимизация единой маршрутной сети общественного транспорта;
- моделирование различных ситуаций на транспортной сети;
- планирование вариантов работы пассажирского подвижного состава с расчетом основных показателей работы различных видов городского транспорта с выбором оптимального варианта;
- составление и анализ вариантов транспортного обслуживания потребителей при планировании изменения маршрутной сети;
- составление и оперативное корректирование расписания движения транспортных средств в режиме онлайн;
- онлайн мониторинг работы городского пассажирского транспорта;
- осуществление диспетчерского управления городским общественным транспортом;
- учет и анализ работы всего подвижного состава по каждому маршруту, и др.

Полностью отечественная ИТС под названием «ЕПУТС» (Единая платформа управления транспортной системой), построенная по принципам модульной архитектуры, в модуле управления движением общественного транспорта предусматривает расчёт стоимости выполненной транспортной работы и размера штрафных санкций за нарушение условий контрактов, обеспечивает отображение на ГИС-подложке маршрутов ГТОП и текущего местоположения транспортных средств ГТОП, предоставление новых сервисов жителям, повышение уровня их информированности о работе ГТОП: расписание, прогноз прибытия, построение оптимальных маршрутов передвижения и т.д. [13].

Функционирование ИСТОП сопряжено с необходимостью непрерывного анализа огромных массивов неструктурированных данных (пассажиропотоков, GPS-координат подвижного состава, дорожной ситуации) в условиях неопределенности и динамически меняющейся среды. Центральным звеном, определяющим эффективность функционирования всей системы, является механизм принятия управленческих решений. Именно он трансформирует полученные данные в оперативные и стратегические управляющие воздействия: корректировку расписаний, перенаправление транспортных средств с маршрута на маршрут, формирование рекомендаций пассажирам, изменение трассы маршрута и др.

Целью данной статьи является рассмотрение теоретических основ и разработка концептуальной модели принятия решений в ИСТОП. В вопросах управления ГТОП необходимо учитывать интересы трех сторон: пассажиров, перевозчиков и населения города в целом в лице департамента городского транспорта.

2 Материалы и методы

Вопросам информационного обеспечения в механизме принятия управленческих решений отводится первостепенное значение, так как именно полнота и своевременность информации делает их обоснованными и эффективными.

Наиболее важной информацией являются данные по пассажиропотокам. Требования к их сбору, оборудованию для сбора и анализу установлены в ГОСТ Р 54723—2019, определя-

ющим назначением, состав и характеристики решаемых задач подсистемы анализа пассажиропотоков [14]. Из задач по анализу статистики маршрутных данных пассажиропотоков можно выделить необходимые для принятия управляющих решений [14]:

- расчет требуемого количества подвижного состава на маршруте по периодам суток для обеспечения заданного качества перевозки пассажиров с заданным максимальным процентом наполнения салона;
- расчет перераспределения подвижного состава между маршрутами для обеспечения перевозки наивысшего качества при неизменном количестве подвижного состава в предприятиях-перевозчиках, в том числе в оперативном режиме;
- анализ качества пассажирских перевозок на маршруте на основе соответствующих показателей транспортной работы;
- расчет наполнения салона в режиме реального времени для обеспечения информационных сервисов для пассажиров, а также использование оперативной информации о наполнении салона в задачах оперативного управления.

Данные по пассажиропотокам не только влияют на определение режимов работы ГТОП, но и позволяют формировать структуру парка общественного транспорта. В работе [15] представлена методика определения оптимальной структуры парка подвижного состава городского пассажирского транспорта, при которой достигаются максимально возможные параметры качества транспортного обслуживания, а в работе [16] эта методика дополнена учётом взаимного влияния маршрутов. В работе [17] решена задача автоматизации модели выбора оптимального подвижного состава в условиях обслуживания конкретного маршрута.

Одним из наиболее актуальных вопросов обеспечения информационных сервисов для пассажиров является информирование о времени прибытия пассажирского транспортного средства на остановку. Этой проблеме уделяется повышенное внимание. Предлагаются различные методы расчёта параметров движения общественного транспорта (в первую очередь прогноза прибытия на остановку) на маршруте, такие как:

- модель адаптивной композиции элементарных алгоритмов прогнозирования [18];
- алгоритм прогнозирования, основанный на использовании метода цепей Маркова [19];
- алгоритм прогнозирования времени прибытия транспортных средств на остановочные пункты, использующий плановую скорость движения на участках маршрутной сети по данным спутникового мониторинга [20];
- моделирование и предиктивный анализ процесса движения общественного транспорта по городским автомагистралям с учетом транспортной загруженности участков дорог в различные периоды времени [21] и др.

Учитывая разнообразие средств прогнозирования параметров движения общественного транспорта, имеющих свои преимущества и недостатки, интерес представляет предложенное в работе [22] решение задачи выбора алгоритма машинного обучения и его применения для прогнозирования времени в пути и времени прибытия на остановку транспортного средства, позволяющего проводить сравнительную оценку различных методов и алгоритмов прогнозирования, определяя их применимость в зависимости от загруженности улично-дорожной сети, погодных условий, наличия дорожных инцидентов и т.п.

Принятые управляющие решения требуют качественной оценки для понимания уровня их эффективности для учёта в дальнейшей работе. Для общей оценки эффективности отдельного маршрута ГТОП в работе [23] предложена методика, реализуемая через маршрутный индекс эффективности (МИЭ). Подход основан на трёх фундаментальных измерениях: транспортно-операционном, социально-территориальном и конкурентном, которые отвечают на ключевые вопросы: «Как работает маршрут?», «Кому и где он нужен?», «Почему пассажир выбирает именно этот маршрут, а не личный транспорт?». Методика расчета комплексного показателя качества пассажирских перевозок, основанная на методах экспертных оценок и математическом аппарате тео-

рии нечётких множеств, позволяет учесть мнение всех сторон, группы сторон или отдельной стороны по любому необходимому перечню вопросов [24]. Это даёт возможность определять наиболее эффективные мероприятия по повышению качества пассажирских перевозок.

Несмотря на значительный интерес к теме ИТС в научных источниках недостаточно систематизированных исследований, посвященных именно теоретическим основам принятия решений в ИТС. Существующие работы часто фокусируются на частных алгоритмах (оптимизации, прогнозировании) или технологических аспектах (сенсоры, связь), оставляя без должного внимания фундаментальные основы и принципы принятия управленческих решений.

3 Результаты исследований

Цели функционирования ГТОП устанавливаются и корректируются департаментом городского транспорта с учетом интересов пассажиров и перевозчиков. Эти цели можно разделить на несколько ключевых категорий: социальные, экономические, экологические и градостроительные.

Социальные цели являются приоритетными, к ним можно отнести:

– обеспечение доступной мобильности для всех групп населения, т.е. предоставление возможности перемещаться по городу независимо от возраста, дохода, состояния здоровья или наличия личного автомобиля;

– предотвращение социальной изоляции, обеспечение связи периферийных районов с центральными, доступ к местам работы, образования, здравоохранения, культуры;

– снижение количества дорожно-транспортных происшествий на транспорте общего пользования;

– повышение комфорта и качества обслуживания пассажиров и др.

К экономическим целям относятся:

– снижение транспортных издержек для населения, перевозчиков и города в целом;

– повышение эффективности городской экономики: снижение потерь времени в пробках, что снижает транспортную усталость и повышает производительность труда населения города.

К экологическим целям относятся:

– снижение негативного воздействия транспорта на окружающую среду: сокращение выбросов вредных веществ в атмосферу в расчете на одного перевезенного пассажира;

– уменьшение шумового и других видов вредных воздействий.

К градостроительным целям относятся:

– освобождение городского пространства в результате сокращения потребности в парковках и многополосных магистралях, возможность развития пешеходных зон и общественных пространств;

– повышение связанности городских районов и создание полицентричной структуры города.

Целью функционирования ГТОП является достижение максимального суммарного экономического эффекта для всех участников транспортного процесса в результате принимаемых управленческих решений, что можно выразить в виде целевой функции:

$$F = \Delta_{\text{пас}} + \Delta_{\text{пер}} + \Delta_{\text{нас}} \rightarrow \max, \quad (1)$$

где $\Delta_{\text{пас}}$, $\Delta_{\text{пер}}$, $\Delta_{\text{нас}}$ – экономический эффект от функционирования ГТОП соответственно для пассажиров, перевозчиков и населения города в целом, руб.

Экономический эффект для пассажиров можно выразить следующим образом:

$$\Delta_{\text{пас}} = \Delta T \cdot C_{\text{п-ч}} \cdot Q_1 + \Delta П \cdot Q_2 + \Delta Z_{\text{пр}} \cdot Q_3, \quad (2)$$

где ΔT – сокращение времени поездки на ГТОП, ч; $C_{п-ч}$ – стоимостная оценка пассажиро-часа, руб.; $\Delta П$ – повышение производительности труда пассажира вследствие повышения комфортабельности поездки на ГТОП, руб.; $\Delta Z_{пр}$ – сокращение затрат на проезд на ГТОП, руб.; Q_1, Q_2, Q_3 – количество перевезенных пассажиров за определенный период, для которых соответственно сократилось время, повысилась комфортабельность и снизилась стоимость поездки, пас.

Экономический эффект для перевозчиков:

$$\Delta_{пер} = \Delta Z_{экс} - E_n \cdot K_B + \Delta D_{пер}, \quad (3)$$

где $\Delta Z_{экс}$ – сокращение затрат на оказание пассажирских услуг, руб.; E_n – нормативный коэффициент сравнительной экономической эффективности капитальных вложений; K_B – стоимость капитальных вложений в повышение качества и эффективности оказания пассажирских услуг, руб.; $\Delta D_{пер}$ – повышение дохода в результате проведенных мероприятий, руб.

Экономический эффект в результате принимаемых управленческих решений для населения города в целом:

$$\Delta_{нас} = \Delta U_э + \Delta U_{дтп} + \Delta D_б, \quad (4)$$

где $\Delta U_э$ – сокращение эколого-экономического ущерба, руб.; $\Delta U_{дтп}$ – сокращение экономического ущерба от последствий дорожно-транспортных происшествий, руб.; $\Delta D_б$ – сокращение дотаций и субсидий из муниципального бюджета, руб.

Схема концептуальной модели принятия решений в ИСТОП представлена на рис. 1.

Целеполагание предполагает разработку оценочных критериев соответствия работы ГТОП и принимаемых управленческих решений поставленным целям. В процессе функционирования ГТОП происходит постоянный мониторинг его работы. По результатам мониторинга анализируется текущая ситуация на ГТОП. Если фактические показатели работы ГТОП не соответствуют установленным критериям, текущая ситуация идентифицируется как проблемная, требующая решения.

Для решения проблемы ИЦППР собирает необходимые данные в автоматическом режиме с помощью средств телематики, мобильных приложений, датчиков и других технических устройств, установленных в транспортных средствах, остановочных пунктах и других элементах улично-дорожной сети. Например, к таким данным относятся наполняемость подвижного состава ГТОП в разные периоды времени, направления и объемы передвижений различных групп населения города, время движения ГТОП между конечными станциями маршрута, степень использования платных парковок для личных автомобилей и др.

Полученные актуальные данные анализируются и пополняют базу данных ИЦППР. Для генерации управленческих решений также используется необходимая информация за прошлые периоды времени, извлекаемая из базы данных. Далее ИЦППР разрабатывает как оперативные, так и стратегические предложения для решения возникшей проблемы.

Целью оперативных решений является реагирование на текущую ситуацию для поддержания эффективности и надежности пассажирских перевозок. Результатом будет корректировка работы существующей системы ГТОП в режиме реального времени в рамках установленных стратегических целей. Например, корректировка интервалов движения, перенаправление подвижного состава с маршрута на маршрут, изменение трассы маршрута, динамическое предоставление приоритета для подвижного состава ГТОП на перекрестках, актуальная информация на табло остановок и в приложениях пользователей и др.

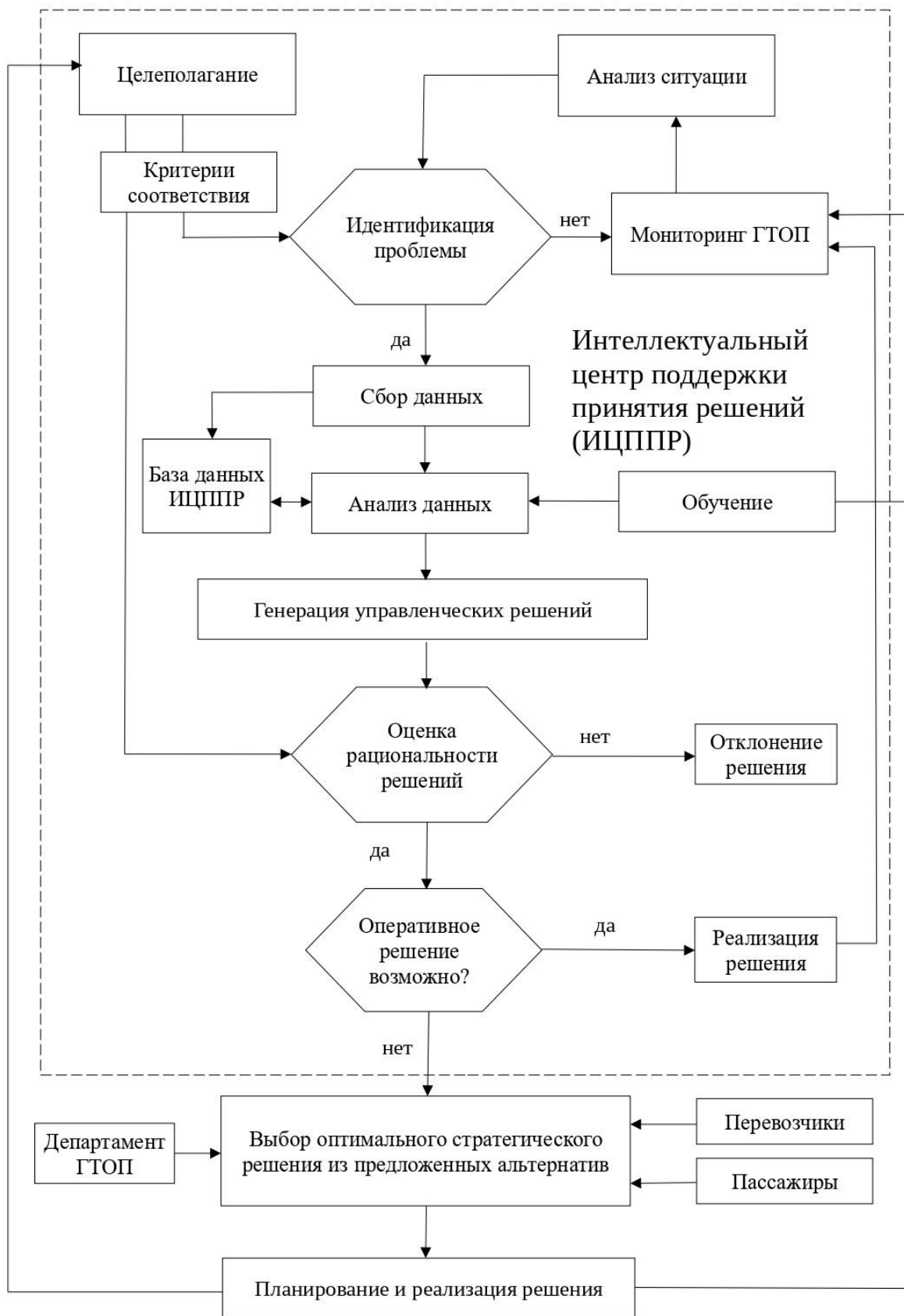


Рисунок 1 – Схема концептуальной модели принятия решений в ИСТОП

Целью стратегических решений является эффективное развитие ГТОП и повышение качества пассажирских услуг в перспективе. Результатом может быть изменение архитектуры системы ГТОП, тарифной политики, конфигурации улично-дорожной и маршрутной сети. Например, внедрение выделенных полос для ГТОП, строительство новых транспортно-пересадочных узлов, закупка транспортных средств определенного типа (электробусы, автобусы большой/средней вместимости), решение о субсидировании определенных категорий пассажиров или маршрутов и др.

Реализация рациональных оперативных решений возможна автоматически, без участия диспетчера. Совокупность рациональных стратегических решений поступает на рассмотрение департамента городского транспорта. Окончательное решение из предложенных ИЦППР альтернатив принимается с учетом интересов перевозчиков и пассажиров.

Принятые к реализации управленческие решения анализируются ИЦППР и пополняют его базу данных. Таким образом происходит машинное обучение интеллектуального центра. Также ИЦППР выполняет мониторинг реализации управленческих решений на ГТОП и при необходимости корректируются цели и задачи функционирования ГТОП.

4 Обсуждение и заключение

Предложенная концептуальная модель принятия решений в ИСТОП представляет собой целостный подход к управлению городским пассажирским транспортом в условиях динамичной и неопределённой среды. Модель интегрирует ключевые аспекты функционирования ГТОП: от сбора и анализа больших данных до генерации оперативных и стратегических управляющих воздействий, учитывающих интересы всех участников транспортного процесса – пассажиров, перевозчиков и города в целом.

Формализация целевой функции (1), определяющей цель функционирования ГТОП, позволяет перейти от локальной оптимизации отдельных параметров (например, интервалов движения, наполняемости подвижного состава) к системной оценке эффективности управленческих решений на основе стоимостного подхода в денежном выражении. Разделение общего экономического эффекта на составляющие для пассажиров (2), перевозчиков (3) и населения (4) даёт возможность находить баланс между возможно противоречивыми интересами участников транспортного процесса.

Представленная схема работы ИЦППР отражает циклический и адаптивный характер управления. Важным элементом модели является интеграция машинного обучения, позволяющая системе накапливать опыт, повышать точность прогнозов и качество генерируемых решений. Разделение на оперативный и стратегический контур управления обеспечивает как оперативную реакцию на текущие изменения (пробки, пассажиропоток), так и планомерное развитие ГТОП в долгосрочной перспективе.

В то время как существующие системы, такие как «Pikas» или отечественная «ЕПУТС», фокусируются в основном на автоматизации конкретных функций (мониторинг, диспетчеризация, составление расписаний), разработанная модель задаёт архитектурный каркас для создания действительно интеллектуальной системы, способной к самообучению и комплексной оптимизации.

Однако успешная реализация подобной модели на практике потребует решения ряда вопросов:

1. Технологических: создания надёжной и масштабируемой ИТ-инфраструктуры для сбора, передачи и обработки огромных массивов гетерогенных данных в реальном времени.
2. Методологических: дальнейшей детализации предлагаемых экономико-математических моделей, применения механизмов взвешивания и оценки оптимальности принимаемых решений.

3. Организационных: формирования чётких регламентов взаимодействия между интеллектуальной системой (ИЦППР) и персоналом (диспетчерами, работниками департамента транспорта), определения границ автоматического принятия решений.

4. Нормативно-правовых: адаптации и развития стандартов в области ИТС с акцентом на функционирование ГТОП.

Представленная модель служит теоретическим фундаментом для проектирования и внедрения интеллектуальных систем управления транспортом общего пользования. Её практическая реализация позволит существенно повысить эффективность, надёжность и качество транспортного обслуживания пассажиров, способствуя решению ключевых проблем современных городов: заторов, экологической нагрузки и доступной мобильности.

Список литературы

1 Бажина, М.А. Интеллектуальные транспортные системы – основа de lege ferenda транспортной системы Российской Федерации. *Journal of Digital Technologies and Law*. 2023;1(3):630-649. DOI: 10.21202/jdtl.2023.27.

2 Гребенкина С. А., Гребенкина И. А. Интеллектуальные транспортные системы в разрезе национальных интересов РФ: новые вызовы и угрозы // *Вестник Кемеровского государственного университета*. Серия: Политические, социологические и экономические науки. – 2022. – №. 4. – С. 444-450. DOI: 10.21603/2500-3372-2022-7-4-444-450.

3 Гринченко, А.В. Концепция интеллектуальной системы поддержки принятия решений при управлении внутриобластными пассажирскими перевозками // *Мир транспорта и технологических машин*. – 2025. – №1-2(88). – С. 108-113. DOI: 10.33979/2073-7432-2025-1-2(88)-108-113.

4 Гринченко, А.В. Концептуальная модель интеллектуальной системы транспорта общего пользования / А.В. Гринченко, Ю.Н. Ризаева, В.Э. Клявин, А.М. Шмырин // *Мир транспорта и технологических машин*. – 2025. – № 4(91). – С. 97-103. DOI: 10.33979/2073-7432-2025-4(91)-97-103.

5 Грабауров, В.А. Интеллектуальная транспортная система как инновационная концепция развития транспорта / В. А. Грабауров // *Наука и техника*. – 2014. – № 1. – С. 63-69.

6 Гринченко, А.В. Концептуальная модель межрегионального модуля интеллектуальной системы транспорта общего пользования // *Вестник Липецкого государственного технического университета*. – 2025. – №4 (61). – С. 23-30. DOI: 10.53015/30343275_2025_4_23.

7 Поначугин А. В., Соколов В. А. Актуальные проблемы разработки и внедрения автоматизированной системы управления на городском пассажирском транспорте // *Научные ведомости*. – 2018. – №2. – Том 45. – С. 353-362.

8 Кузяшев, А.Н. Концепция умного городского транспорта / А. Н. Кузяшев, А. А. Черных // *Экономика и бизнес: теория и практика*. – 2020. – № 12-2(70). – С. 58-62. DOI 10.24411/2411-0450-2020-11072.

9 Гузенко А.В., Вальчук Е.С. Формирование современных систем управления городским пассажирским транспортом на принципах логистики // *Вестник РГЭУ РИНХ*. – 2015. №3 (51). – С. 30-35.

10 ГОСТ Р ИСО 14813-1-2011 Интеллектуальные транспортные системы. Схема построения архитектуры интеллектуальных транспортных систем. Часть 1. Сервисные домены в области интеллектуальных транспортных систем, сервисные группы и сервисы. – М: Стандартинформ, 2011. – 32 с.

11 ГОСТ Р 56294-2014 Интеллектуальные транспортные системы. Требования к функциональной и физической архитектурам интеллектуальных транспортных систем. – М: Стандартинформ, 2015. – 12 с.

12 Зырянов, В.В. Повышение эффективности управления городским пассажирским транспортом Ростова-на-Дону / В. В. Зырянов, Е. Ю. Семчугова, А. А. Литвина // *Вестник Саратовского государственного технического университета*. – 2013. – Т.2, – № 2(71). – С. 347-351.

13 Мировой и российский опыт применения интеллектуальных транспортных систем / С. В. Егоров, П. В. Шационок, А. И. Ерпылева, Д. И. Жарков // *Транспортное дело России*. –2022. – № 2. – С. 130-136. DOI 10.52375/20728689_2022_2_130.

14 ГОСТ Р 54723-2019 Глобальная навигационная спутниковая система. Система управления городским пассажирским транспортом комплексная. Назначение, состав и характеристики решаемых задач подсистемы анализа пассажиропотоков. – М: Стандартинформ, 2020. –24 с.

15 Фадеев А.И., Фомин Е.В. Методика решения задачи определения оптимальной структуры парка подвижного состава городского пассажирского транспорта общего пользования // Вестник Иркутского государственного технического университета. – 2018. – Т. 22. – № 1. – С. 218–227. DOI: 10.21285/1814-3520-2018-1-218-227.

16 Фадеев А.И., Фомин Е.В. Определение оптимальной структуры парка подвижного состава городского пассажирского транспорта общего пользования с учетом взаимного влияния маршрутов // Вестник Иркутского государственного технического университета. – 2018. – Т. 22. – № 8. – С. 189–198. DOI: 10.21285/1814-3520-2018-8-189-198.

17 Повышение эффективности функционирования транспортной сети городского пассажирского транспорта путем применения автоматизации модели выбора оптимального подвижного состава / В. Е. Гозбенко, М. Н. Крипак, О. А. Лебедева, С. К. Каргапольцев // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. – 2017. – № 2(54). – С. 203–208.

18 Агафонов А. А. Алгоритм оценки времени прибытия общественного транспорта с использованием адаптивной композиции элементарных прогнозов / А. А. Агафонов, В. В. Мясников // Компьютерная оптика. – 2014. – Т. 38, № 2. – С. 356–368. DOI 10.18287/0134-2452-2014-38-2-356-368.

19 Тянь Ю., Рахмангулов А.Н., Муравьев Д.С., Ван С. Алгоритм прогнозирования моментов времени прибытия городских пассажирских автобусов на основе Марковских цепей // Современные проблемы транспортного комплекса России. 2018. Т.8. №2. С. 29–38

20 Agafonov, A. A. Forecasting of the motion parameters of city transport by satellite monitoring data / A. A. Agafonov, A. V. Sergeev, A. V. Chernov // Computer Optics. 2012. Vol. 36, No. 3. P. 453–458.

21 Финогеев, А. А. Предиктивное моделирование и расчет времени движения общественного транспорта / А. А. Финогеев, Р. С. Майоров, М. В. Деев // Современные наукоемкие технологии. – 2024. – № 5-1. – С. 89–95. DOI 10.17513/snt.40010.

22 Климова Д. С. Прогнозирование времени в пути и времени прибытия на остановку транспортного средства // Проблемы науки. – 2019. – № 1(37). – С. 36–38.

23 Котов Р. А., Дорохин С. В. Разработка маршрутного индекса эффективности городского общественного транспорта на основе трёхмерной оценки // Воронежский научно-технический вестник. – 2025. – №. 4. – С. 73–79. DOI: 10.34220/2311-8873-2025-73-79

24 Assessing the Quality of Route Vehicle Passenger Transportation / V. Klyavin, A. Grinchenko, Y. Rizaeva [et al.] // Proceedings - 2020 2nd International Conference on Control Systems, Mathematical Modeling, Automation and Energy Efficiency, SUMMA 2020 : 2, Virtual, Lipetsk, 10–13 ноября 2020 года. Vol. 2nd International Conference. – Virtual, Lipetsk, 2020. – P. 772–776. – DOI 10.1109/SUMMA50634.2020.9280773.

References

1 Bazhina, M.A. Intelligent transport systems – the foundation of the transport system of the Russian Federation. Journal of Digital Technologies and Law. 2023;1(3):630–649. DOI: 10.21202/jdtl.2023.27.

2 Grebenkina, S.A., Grebenkina, I.A. Intelligent transport systems in the context of national interests of the Russian Federation: new challenges and threats // Bulletin of Kemerovo State University. Series: Political, sociological and economic sciences. – 2022. – No. 4. – P. 444–450. DOI: 10.21603/2500-3372-2022-7-4-444-450.

3 Grinchenko, A.V. The concept of an intelligent decision support system for managing intraregional passenger transportation // The world of transport and technological machines. - 2025. - No. 1-2 (88). - P. 108–113. DOI: 10.33979/2073-7432-2025-1-2 (88) -108-113.

4 Grinchenko, A.V. Conceptual model of an intelligent public transport system / A.V. Grinchenko, Yu.N. Rizaeva, V.E. Klyavin, A.M. Shmyrin // The world of transport and technological machines. - 2025. - No. 4 (91). - P. 97–103. DOI: 10.33979/2073-7432-2025-4 (91) -97-103.

5 Grabaurov, V.A. Intelligent transport system as an innovative concept for transport development / V.A. Grabaurov // Science and Technology. - 2014. - No. 1. - P. 63–69.

6 Grinchenko, A.V. Conceptual model of the interregional module of the intelligent public transport system // Bulletin of Lipetsk State Technical University. - 2025. - No. 4 (61). - P. 23–30. DOI: 10.53015/30343275_2025_4_23.

7 Ponachugin A.V., Sokolov V.A. Actual problems of development and implementation of an automated control system in urban passenger transport // Scientific Vedomosti. - 2018. - No. 2. – Vol. 45. – P. 353–362.

8 Kuzyashev, A.N. The concept of smart urban transport / A. N. Kuzyashev, A. A. Chernykh // Economy and business: theory and practice. – 2020. – No. 12-2 (70). – P. 58–62. DOI 10.24411/2411-0450-2020-11072.

- 9 Guzenko A.V., Valchuk E.S. Formation of modern urban passenger transport management systems based on logistics principles // Bulletin of the RSUE RINH. – 2015. No. 3 (51). – P. 30-35.
- 10 GOST R ISO 14813-1-2011 Intelligent transport systems. Intelligent transport system architecture framework. Part 1. Intelligent transport system service domains, service groups, and services. Moscow: Standartinform, 2011, 32 p.
- 11 GOST R 56294-2014 Intelligent transport systems. Requirements for the functional and physical architectures of intelligent transport systems. Moscow: Standartinform, 2015, 12 p.
- 12 Zyryanov, V.V. Improving the efficiency of urban passenger transport management in Rostov-on-Don / V. V. Zyryanov, E. Yu. Semchugova, A. A. Litvina // Bulletin of the Saratov State Technical University. 2013, Vol. 2, No. 2(71). – P. 347-351.
- 13 Global and Russian experience in applying intelligent transport systems / S. V. Egorov, P. V. Shatsionok, A. I. Erpyleva, D. I. Zharkov // Transport Business of Russia. –2022. – No. 2. – P. 130-136. DOI 10.52375/20728689_2022_2_130.
- 14 GOST R 54723-2019 Global navigation satellite system. Integrated urban passenger transport management system. Purpose, composition, and characteristics of the tasks to be solved by the passenger flow analysis subsystem. – M: Standartinform, 2020. –24 p.
- 15 Fadeev A.I., Fomin E.V. Methodology for solving the problem of determining the optimal structure of the rolling stock fleet of urban public passenger transport // Bulletin of the Irkutsk State Technical University. - 2018. - Vol. 22. - No. 1. - P. 218-227. DOI: 10.21285/1814-3520-2018-1-218-227.
- 16 Fadeev A.I., Fomin E.V. Determination of the optimal structure of the rolling stock fleet of urban public passenger transport taking into account the mutual influence of routes // Bulletin of the Irkutsk State Technical University. - 2018. - Vol. 22. - No. 8. - P. 189-198. DOI: 10.21285/1814-3520-2018-8-189-198.
- 17 Improving the Efficiency of the Urban Passenger Transport Network by Automating the Optimal Rolling Stock Selection Model / V. E. Gozbenko, M. N. Kripak, O. A. Lebedeva, S. K. Kargapol'tsev // Modern Technologies. Systems Analysis. Modeling. - 2017. - No. 2 (54). - P. 203-208.
- 18 A. Agafonov. Algorithm for Estimating the Arrival Time of Public Transport Using an Adaptive Composition of Elementary Forecasts / A. A. Agafonov, V. V. Myasnikov // Computer Optics. - 2014. - Vol. 38, No. 2. - P. 356-368. DOI 10.18287/0134-2452-2014-38-2-356-368.
- 19 Tian Yu., Rakhmangulov A.N., Muravyov D.S., Wang S. Algorithm for forecasting arrival times of urban passenger buses based on Markov chains // Modern problems of the transport complex of Russia. 2018. Vol. 8. No. 2. Pp. 29-38
- 20 Agafonov, A. A. Forecasting of the motion parameters of city transport by satellite monitoring data / A. A. Agafonov, A. V. Sergeev, A. V. Chernov // Computer Optics. 2012. Vol. 36, No. 3. Pp. 453-458.
- 21 Finogeev, A. A. Predictive modeling and calculation of public transport travel time / A. A. Finogeev, R. S. Mayorov, M. V. Deev // Modern science-intensive technologies. – 2024. – No. 5-1. – P. 89-95. DOI 10.17513/snt.40010.
- 22 Klimova D. S. Forecasting travel time and arrival time at a vehicle stop // Problemy nauki. – 2019. – No. 1(37). – P. 36-38.
- 23 Kotov R. A., Dorokhin S. V. Development of a route index of urban public transport efficiency based on a three-dimensional assessment // Voronezh Scientific and Technical Bulletin. – 2025. – No. 4. – P. 73-79. DOI: 10.34220/2311-8873-2025-73-79
- 24 Assessing the Quality of Route Vehicle Passenger Transportation / V. Klyavin, A. Grinchenko, Y. Rizaeva [et al.] // Proceedings - 2020 2nd International Conference on Control Systems, Mathematical Modeling, Automation and Energy Efficiency, SUMMA 2020: 2, Virtual, Lipetsk, November 10–13, 2020. Vol. 2nd International Conference. – Virtual, Lipetsk, 2020. – P. 772-776. – DOI 10.1109/SUMMA50634.2020.9280773.

DOI: 10.34220/2311-8873-2026-102-113



УДК 656.025

UDC 656.025

2.9.5 – эксплуатация автомобильного транспорта

**СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ
ЛОГИСТИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ
ВЫВОЗА ОТХОДОВ ПОСРЕДСТВОМ
ИМИТАЦИОННОГО
МОДЕЛИРОВАНИЯ**

**ENHANCING WASTE DISPOSAL
LOGISTICS PROCESSES VIA
SIMULATION MODELING**

✉¹ **Маврин Вадим Геннадьевич**,
к.т.н., доцент кафедры сервиса транспортных систем, Набережночелнинский институт (филиал) Казанского (Приволжского) федерального университета, г. Набережные Челны, e-mail: vadim_mmite@rambler.ru

✉¹ **Mavrin Vadim Gennadievich**,
candidate of technical sciences, associate professor of the service of transport systems department, Naberezhnye Chelny institute (branch) Kazan (Volga Region) Federal University, Naberezhnye Chelny, e-mail: vadim_mmite@rambler.ru

Макарова Ирина Викторовна,
д.т.н., профессор, заведующий кафедрой сервиса транспортных систем, Набережночелнинский институт (филиал) Казанского (Приволжского) федерального университета, г. Набережные Челны, e-mail: kamivm@mail.ru

Makarova Irina Viktorovna,
doctor of technical sciences, professor, head of the service of transport systems department, Naberezhnye Chelny Institute (branch) Kazan (Volga Region) Federal University, Naberezhnye Chelny, e-mail: kamivm@mail.ru

Зайнутдинова Айгель Рафисовна,
магистрант, Набережночелнинский институт (филиал) Казанского (Приволжского) федерального университета, г. Набережные Челны, e-mail: aigelka14@gmail.com

Zainutdinova Aigel Rafisovna,
master's student, Naberezhnye Chelny Institute (branch) Kazan (Volga Region) Federal University, Naberezhnye Chelny, e-mail: aigelka14@gmail.com

Аннотация. Статья посвящена разработке имитационной модели процесса транспортировки отходов с целью повышения эффективности и экологичности системы обращения с отходами. В работе представлен анализ современных подходов к организации логистических операций, включая применение интеллектуальных технологий, обратной логистики и принципов циркулярной экономики. На основе программной среды AnyLogic разработана модульная имитационная модель, учитывающая гетерогенность транспортных потоков, различные категории отходов и стратегии управления. Проведён оптимизационный эксперимент, позволивший определить оптимальное количество специализированного автотранспорта и снизить затраты на транспортировку

Annotation. This article is devoted to the development of a simulation model for waste transportation aimed at improving the efficiency and environmental sustainability of the waste management system. The work presents an analysis of modern approaches to organizing logistics operations, including the application of intelligent technologies, reverse logistics, and circular economy principles. A modular simulation model, developed using the AnyLogic software environment, accounts for the heterogeneity of transport flows, various waste categories, and management strategies. An optimization experiment was conducted, which allowed for determining the optimal number of specialized vehicles and reducing transportation costs by 40.64%. The results of the study demonstrate the potential of simulation modeling as a decision-support tool for enhancing the sustainability and economic efficiency of waste management systems.

на 40,64 %. Результаты исследования демонстрируют потенциал имитационного моделирования как инструмента поддержки принятия решений для повышения устойчивости и экономической эффективности систем обращения с отходами.

Ключевые слова: УПРАВЛЕНИЕ ОТХОДАМИ, ИМИТАЦИОННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ, ОПТИМИЗАЦИЯ АВТОПАРКА, ЭКОЛОГИЧЕСКАЯ И ЭКОНОМИЧЕСКАЯ ЭФФЕКТИВНОСТЬ.

Keywords: WASTE MANAGEMENT, SIMULATION, FLEET OPTIMIZATION, ECONOMIC AND ENVIRONMENTAL EFFICIENCY.

¹ Автор для ведения переписки

1 Состояние вопроса исследования и актуальность работы

Человечество на протяжении всей своей истории неизменно испытывает проблему загрязнения природной среды. Хотя технологический прогресс способствует повышению уровня комфорта и качества жизни, этот быстрый рост имеет обратную сторону – ухудшение экологической обстановки планеты. В результате экономического, технического и технологического развития ухудшается качество здоровья человека.

Современная мировая экономика, включая российскую, базируется преимущественно на ресурсозатратной модели хозяйствования, что ведет к росту затрат и падению эффективности производства. Регулярные финансовые, политические и вооруженные конфликты зачастую обусловлены именно такими экономическими особенностями. Кроме того, развитие мировой экономики связано с процессами урбанизации, что сопровождается негативным воздействием на окружающую среду и приводит к изменению климата. Стремительное увеличение численности городских жителей создает ситуации, когда городская экосистема уже неспособна удовлетворять основные физиологические и социальные нужды человека. По этой причине концепция перехода к экологически устойчивым принципам управления («зеленая экономика»), обеспечивающим благосостояние без ущерба экологии и социальной справедливости, приобретает особую значимость. Альтернативных путей поддержания устойчивого существования урбанизированных регионов пока не выявлено.

Одним из факторов ухудшения состояния окружающей среды является рост образования отходов и негативные для окружающей среды способы их утилизации. Формирование эффективной и устойчивой системы обращения с отходами производства и потребления является одной из ключевых глобальных проблем XXI века и приоритетной задачей государственной политики Российской Федерации. В условиях стремительной урбанизации, роста промышленного производства и уровня потребления объемы образующихся отходов неуклонно возрастают, создавая беспрецедентную антропогенную нагрузку на окружающую среду и неся значительные экономические и социальные издержки. В России, несмотря на реализацию реформы отрасли обращения с отходами и принятие ключевых нормативных актов (ФЗ № 89 «Об отходах производства и потребления», ФЗ № 7 «Об охране окружающей среды», национальный проект «Экологическое благополучие»), проблема обостряется [1-3]. Значительная часть отходов по-прежнему размещается на полигонах и свалках, не вовлекается во вторичный оборот, а существующие инфраструктурные объекты зачастую работают неэффективно.

Транспортно-логистическая составляющая является центральным, системообразующим элементом всей цепи управления отходами. Именно она обеспечивает физическое перемещение материальных потоков отходов между звеньями системы (источники образования,

пункты сбора/накопления, сортировочные станции, объекты переработки/утилизации, полигоны), определяя тем самым скорость, стоимость, экологичность и в конечном итоге – результативность всего процесса обращения с отходами. Эффективная логистическая система обращения с отходами способствует уменьшению негативного воздействия на окружающую среду, сокращению объемов захоронения отходов, повышению эффективности системы транспортировки отходов и рациональному использованию ресурсов.

Исторически обращение с отходами строилось на линейной модели («создать – использовать – захоронить») с акцентом на транспортировку к местам захоронения [4]. Современная научная парадигма смещается в сторону дифференцированного обращения с отходами и принципов циркулярной экономики. Это кардинально меняет требования к транспортно-логистической системе: она должна обеспечивать не просто «вывоз», а управление материальными потоками с целью их максимального вовлечения во вторичный оборот. Ключевым элементом становится обратная логистика – процесс планирования, реализации и контроля эффективного потока продукции, сырья и информации от точки потребления к точке происхождения с целью извлечения добавленной стоимости или обеспечения правильной утилизации.

Несмотря на очевидные преимущества использования обратной логистики существуют барьеры, препятствующие переходу традиционной экономики к циркулярной. По мнению авторов исследования [5] основными барьерами являются: отсутствие ответственности и инициативы со стороны руководства и собственников компаний-производителей продукции, высокие затраты на организацию и реализацию обратной логистики, низкая эффективность государственной политики в области переработки отходов, отсутствие адекватного программного обеспечения для организации процессов обратной логистики, неопределенность спроса из-за опасений потребителей приобретать восстановленную или переработанную продукцию. В статье предложены рекомендации по устранению данных барьеров, что, по мнению авторов, может создать условия для устойчивого развития за счет улучшения обратной логистики.

Сейчас основное внимание уделяется сокращению негативных последствий для общества и оптимизации логистической системы [6]. Важнейшими аспектами устойчивого роста выступают соблюдение строгих экологических норм, охрана природы, рациональное потребление природных богатств и преодоление экологических барьеров. Так, в статье [7] изучаются взаимосвязи между качеством услуг устойчивой обратной логистики, определяемым с помощью подхода «тройной нижней линии», и результатами для клиентов, а также качеством взаимоотношений. Кроме того, предлагается использовать операционный риск в качестве важной опосредующей переменной для предотвращения задержек или неэффективности в реализации и повышения удовлетворенности клиентов. Отмечено также, что значительное влияние на эффективность обратной логистики оказывает показатель устойчивости автотранспорта, используемого для транспортировки отходов.

Реализация целей государственной политики, ориентированной на охрану окружающей среды путем восприятия отходов как ресурса для вторичной переработки, способного приносить дополнительную прибыль, на деле продвигается недостаточно быстро. По мнению автора статьи [8], для решения проблемы в экономике страны необходимо создать отдельную отрасль по переработке компонентов, извлекаемых из состава отходов, для использования их в качестве вторичных ресурсов, сформировать правовую основу этой отрасли, а также изменить целевые ориентиры в национальном проекте «Экологическое благополучие».

Рассматривая проблему загрязнения окружающей среды, специалисты указывают на промышленный симбиоз как эффективный метод снижения отрицательного воздействия. Промышленный симбиоз представляет собой реализацию принципов циклической экономики, при которой отходы одной отрасли становятся сырьем для другой. Исследование [9], посвященное данному вопросу, описывает структуру экосистемы обращения с отходами, включающую взаимосвязанные элементы: группу заинтересованных лиц и механизмы управления, формируемые в ходе взаимодействия основных участников процесса.

Эффективная организация системы обращения с отходами и мониторинг объектов управления отходами для обеспечения соответствия законодательству – крайне сложные процессы. В исследовании [10] отмечается, что для решения данных задач целесообразно применять интеллектуальные технологии мониторинга и управления, разработанных на базе интеллектуальной аналитической программной платформы. В статье [11] объективность оценки объектов инфраструктуры управления отходами предлагается повысить за счет разработки модели и метода информационных технологий для анализа ряда показателей этих объектов на основе использования пространственно-распределенных данных. А в исследовании [12] представлена система мониторинга загрязнения урбанизированных территорий в режиме реального времени с использованием технологии для измерения расстояния от источников образования отходов до места их утилизации и датчиков для определения вместимости мусорных контейнеров. Интегрируя данные датчиков и сетевую связь, система поддерживает принятие обоснованных решений для оптимизации логистики сбора отходов, способствуя созданию более чистых и устойчивых городов.

Обращение с отходами – это комплексный подход, который включает процессы сбора, накопления, транспортировки, обработки, утилизацию и размещения (захоронения) отходов. Совершенствование каждого процесса в итоге приводит к общему повышению эффективности системы обращения с отходами. Одним из направлений повышения эффективности является совершенствование процесса транспортировки отходов. Так, в исследовании [13] разработан комплексный подход, позволяющий улучшить процедуру погрузки отходов с целью предотвращения отказов погрузочного оборудования, а также повысить эффективность процесса принятия решений в чрезвычайных ситуациях. Для этого предлагается использовать разработанную авторами математическую модель для корректировки функциональных связей между изменениями характеристик гидромассы в зависимости от веса предстоящей нагрузки во время работы специализированного транспортного средства в процессе взвешивания.

Оптимизация транспортных маршрутов и создание централизованных логистических узлов – ключевой элемент логистики в сфере обращения с отходами [14]. Учитывая неопределенность в объеме отходов и воздействие на окружающую среду их транспортировки в статье [15] представлены модели оптимизации маршрутов движения мусоровозов как для сухих, так и для влажных отходов. Цель исследования состояла в минимизации общих затрат, углеродного следа и вторичного загрязнения.

Применение методов искусственного интеллекта и машинного обучения может оказать положительное влияние на оптимизацию стратегий управления отходами, направленных на повышение экономической эффективности и снижение воздействия на окружающую среду. В исследовании [16] были применены различные методы машинного обучения, такие как модели регрессии, алгоритмы классификации, машины опорных векторов, случайный лес, экстремальный градиентный бустинг и алгоритмы оптимизации, включая линейное программирование. В отличие от других исследований, в данном исследовании была достигнута 85 % точность моделей прогнозной аналитики для прогнозирования тенденций образования отходов, что в основном объясняется интеграцией более разнообразных наборов данных, включая социально-экономические факторы.

Одним из оптимальных по цели и затратам решений для совершенствования любых логистических операций является разработка системы поддержки принятия решений, в которой имитационная модель является интеллектуальным ядром. Так, в статье [17] представлена разработка имитационной модели логистических операций, выполнен эксперимент для оптимизации параметров модели и рассчитана эффективность разработок.

В последние годы совершенствование облачных вычислений и мобильных вычислительных технологий привело к появлению приложений, предоставляющих информацию о транспортных средствах. Например, они могут предоставлять населению активные оповещения и уведомления о времени прибытия мусоровоза. В исследовании [18] разработан и реали-

зован метод прогнозирования времени прибытия мусоровозов в системе управления автопарком с точностью 81,45 %. Данное приложение предоставляет доступ любым желающим к информации о местоположении мусоровозов, местоположении пунктов сбора и прогнозируемом времени прибытия мусоровозов.

Имитационные модели как важные инструменты для сценарного анализа могут помочь организациям в принятии решений и реализации политики управления твердыми отходами. Поскольку планирование управления твердыми отходами включает в себя различные взаимосвязанные компоненты, понимание динамического характера их взаимодействия позволяет моделировать поведение между всеми процессами и участниками [19]. Так, в статье [20] представлена имитационная модель системной динамики для управления твердыми коммунальными отходами, которая обеспечивает всесторонний обзор задействованных ресурсов, мест назначения отходов и структуры затрат. Основным вкладом модели заключается в предоставлении инструмента финансового планирования, позволяющего проводить сценарный анализ для поддержки стратегических или тактических решений, таких как расширение мощностей, инвестиции в повышение эффективности работы и тому подобное.

Таким образом, проведенный анализ состояния вопроса позволяет констатировать, что, несмотря на значительное количество разработок в области совершенствования системы обращения с отходами, в частности, их сбора и вывоза, существующие решения зачастую носят фрагментарный характер, ориентированы на отдельные аспекты проблемы и, в некоторых случаях, не применимы в условиях Российской Федерации из-за своей специфики. Это определяет актуальность настоящего исследования, целью которого является разработка совершенствования процесса транспортировки отходов для повышения эффективности и устойчивости системы обращения с отходами.

2 Материалы и методы

Действующие транспортно-логистические схемы в сфере обращения с отходами зачастую характеризуются низкой оптимизацией маршрутов, нерациональным использованием подвижного состава, высокими издержками, значительными экологическими рисками и неспособностью адекватно реагировать на изменение объемов и структуры отходов. Оптимальным по соотношению цены и результата решением может стать создание системы поддержки принятия решений на базе имитационной модели, выполняющей роль интеллектуального ядра (рис. 1). В качестве инструментальной среды для разработки этой модели выбран российский программный продукт AnyLogic, позволяющий совмещать дискретно-событийный, агентный и системно-динамический подходы.

Модуль сбора и интеграции данных агрегирует информацию об отходах и их источниках, парке автотранспорта, используемого для перевозки отходов и инфраструктуре (местоположение полигонов, сортировочных станций, перерабатывающих заводов, пропускная способность).

Интеллектуальное ядро (имитационная модель) реализует логику процессов генерации отходов, системы обращения с ними, заказа транспорта, погрузки-разгрузки и движения по маршрутам. Модуль оптимизации на основе данных, сгенерированных моделью, и заданных критериев находит оптимальные параметры системы.

База данных системы поддержки принятия решений служит репозиторием для хранения оптимальных решений различных проблем. Её использование позволяет значительно сократить время на выработку и принятие необходимых мер. В условиях повторяющихся ситуаций система обеспечивает оперативный подбор оптимального алгоритма действий. Если же ситуация имеет существенные отличия, в базу данных вносятся корректировки, что обеспечивает её постоянное развитие и актуальность.



Рисунок 1 – Концептуальная модель системы поддержки принятия решений

На основе рекомендаций системы (эффективных решений, выданных системой поддержки принятия решений), уполномоченные лица принимают оптимальные решения.

Система построена на основе модульной архитектуры, что подразумевает ее структурирование в виде набора слабосвязанных, функционально независимых компонентов (модулей). Каждый такой модуль отвечает за конкретную задачу, обладает собственной логикой работы и стандартизированным интерфейсом для интеграции с другими частями системы. Такой подход обеспечивает гибкость сопровождения: система может быть легко модифицирована, а её функциональность расширена за счет добавления новых модулей.

Анализ проводился на примере двух источников образования отходов (производственных линий, цехов или предприятий). Образовавшиеся отходы подвергаются первичной обработке с целью возможности транспортировки на сортировочную станцию. Далее утилизируемые отходы транспортируются на мусороперерабатывающие (или мусоросжигательные) заводы. Неутилизируемые отходы отправляются на полигоны для захоронения.

Транспортирование отходов осуществляется региональными или федеральными экологическими операторами либо привлеченными подрядными организациями в строгом соответствии с требованиями ст. 16 Федерального закона № 89-ФЗ «Об отходах производства и потребления» [1], регламентирующими конструктивные особенности специализированных транспортных средств. Специфика агрегатного состояния, класс опасности и физико-химические характеристики отходов, образованных после их сортировки, обуславливают необходимость дифференцированного подхода к выбору подвижного состава. Структурная схема модели представлена на рис. 2.

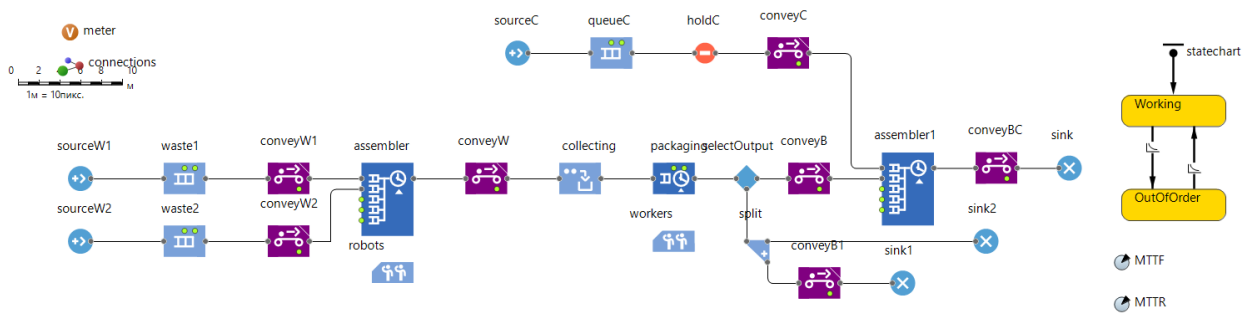


Рисунок 2 – Структура имитационной модели

Верхняя совокупность блоков моделирует генерацию и движение специализированного автотранспорта, используемого для транспортировки отходов. Другая цепочка блоков моделирует логику образования отходов и обращения с ними.

В модели используются следующие типы блоков:

1. Тип Source (sourceC, sourceW1, sourceW2) генерирует автотранспортные средства (АТС) для перевозки отходов, отходы первого и второго источников образования;
2. Тип Queue (queueC, waste1, waste2) генерирует площади (стоянки) для ожидания АТС и площадки временного хранения отходов;
3. Тип Hold (holdC) блокирует выезд АТС из стоянки при отсутствии необходимости транспортировки отходов;
4. Тип Convey (conveyC, conveyW1, conveyW2, convey, conveyB, conveyB1, conveyBC) моделирует движение АТС и транспортировку отходов;
5. Тип Assembler (assembler, assembler1) моделирует операции по обработке и сортировке отходов;
6. Тип Batch (collecting) и тип Service (packaging) моделируют процесс погрузки отходов на АТС;
7. Тип SelectOutput и Split разделяют потоки отходов (утилизируемые отходы транспортируются на переработку/сжигание, не утилизируемые – на полигоны);
8. Тип Sink – конечные блоки для уничтожения агентов (АТС и отходов);
9. Диаграмма состояний (statechart) моделирует работу оборудования и рабочих на объектах обработки и сортировки отходов.

Ключевые входные параметры и переменные модели:

1. Потоки отходов задавались детерминировано (по графику) и стохастически (на основе эмпирических распределений). Учитывалось разделение на утилизируемые и не утилизируемые типы отходов.
2. Парк специализированного транспорта: моделировалось четыре типа мусоровозов с различной вместимостью, назначением (видом перевозимых отходов) и стоимостью эксплуатации.
3. Логистическая сеть включала координаты источников, пункта обработки и сортировочной станции. На данном этапе исследования расстояния и время в пути задавались абстрактно, без привязки к реальной системе.
4. Стратегии управления: реализованы две стратегии вывоза: по расписанию и по событию (при достижении критического уровня накопления для промышленных отходов).

Оптимизационный эксперимент был направлен на подбор количественного и качественного состава парка. Целевой функцией была выбрана минимизация суммарных логистических издержек, включающие прямые транспортные затраты (такие как топливо, амортизация, зарплата), издержки за простой техники или переполнение контейнеров, условную стоимость экологического ущерба.

3 Результаты исследований

Для мониторинга и последующего анализа статистических параметров в структуру модели интегрированы специализированные блоки накопления данных. Визуализация функционирования модели в трехмерном пространстве представлена на рис. 3. Разнотипность парка используемой спецтехники обуславливает вариативность технико-эксплуатационных характеристик и, как следствие, дифференциацию затрат на содержание и эксплуатацию автотранспорта. Кроме того, разные виды отходов требуют применение различных стратегий управления логистическими процессами. Так, транспортировка одних категорий отходов осуществляется детерминировано – по мере достижения критического объема накопления, в то время как логистика других видов реализуется на основе установленного регламента (расписания), который задается лицом, принимающим решения, посредством блока «Schedule» (рис. 4).

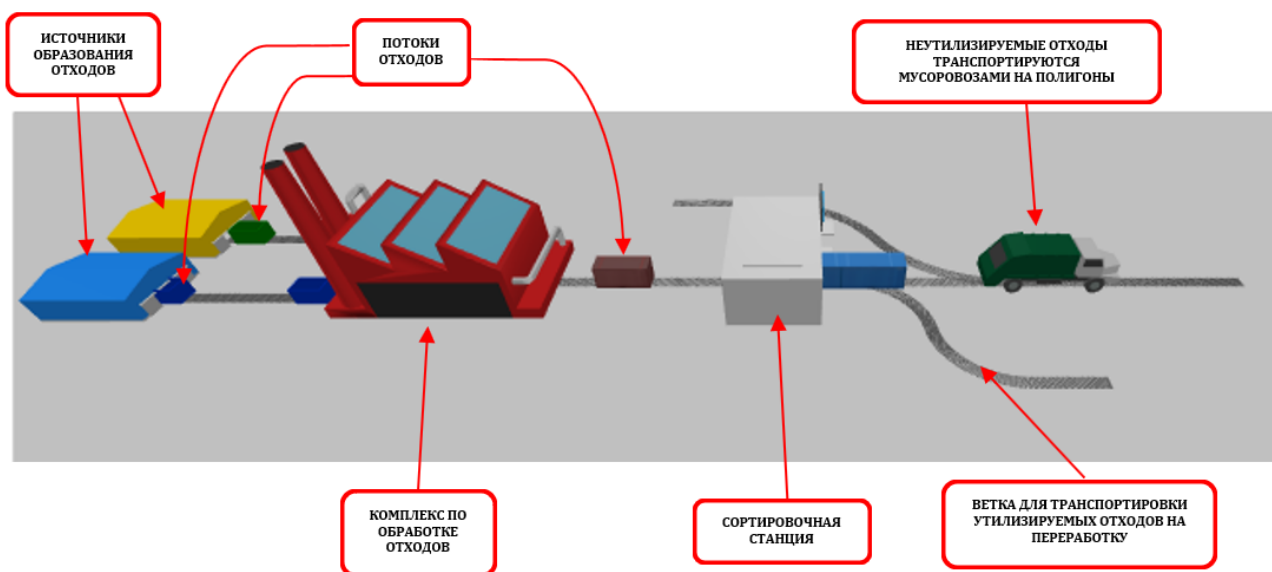


Рисунок 3 – Визуализация выполнения модели

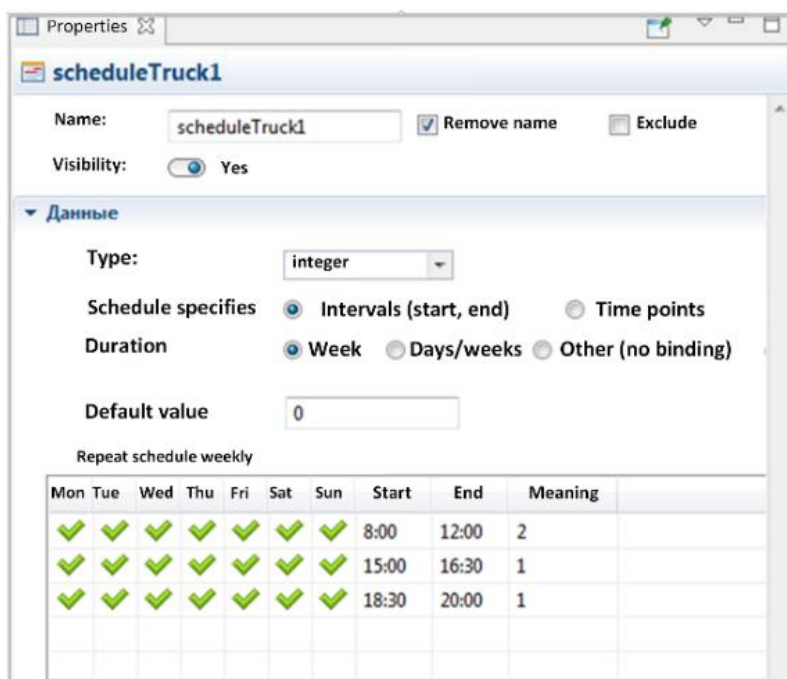


Рисунок 4 – Установление расписания прибытия специализированного автотранспорта

Нами была выдвинута гипотеза о том, что количество и качество используемого специализированного автотранспорта оказывают существенное влияние на эффективность процесса обращения с отходами. Для подтверждения гипотезы был разработан оптимизационный эксперимент, результат выполнения которого представлен на рис. 5.

Waste management - Optimization



Рисунок 5 – Результаты выполнения оптимизационного эксперимента на модели

Эксперимент по оптимизации проводился с использованием встроенного в AnyLogic оптимизатора OptQuest со следующим критерием остановки: отсутствие улучшения целевой функции в течение 50 последовательных итераций.

Для каждой конфигурации автопарка моделирование проводилось в течение 30 независимых повторений с использованием различных случайных начальных значений для стохастического образования отходов.

В оптимизационном эксперименте количество транспортных средств каждого типа варьировалось в следующих диапазонах:

- Транспортные средства типа А (8 м³) (Type of vehicle 1) – минимум 0, максимум 5;
- Транспортные средства типа В (12 м³) (Type of vehicle 2) – минимум 0, максимум 5;
- Транспортные средства типа С (16 м³) (Type of vehicle 3) – минимум 0, максимум 5;
- Транспортное средство типа D (21 м³) (Type of vehicle 4) – минимум 0, максимум 5.

На рисунке 5 показана сходимость процесса оптимизации (по оси абсцисс – номер эксперимента, по оси ординат – значение целевой функции). Значение целевой функции (общая стоимость логистики) быстро снижалось в течение первых 7 итераций, затем наблюдалось постепенное улучшение, стабилизировавшееся после 16 итераций.

Результаты эксперимента следующие оптимальные значения переменных:

- Количество транспортных средств типа А — 2;
- Количество транспортных средств типа В — 5;
- Количество транспортных средств типа С — 1;
- Количество транспортных средств типа D — 1.

4 Обсуждение и заключение

Полученные результаты подтверждают выдвинутую гипотезу о том, что количественный и качественный состав специализированного автотранспорта, управляемый на основе данных имитационной модели, оказывает решающее влияние на экономическую и экологическую эффективность системы обращения с отходами.

Предложенная в работе имитационная модель учитывает требования к гетерогенности транспортных потоков и позволяет эффективно решать задачу оптимизации парка специализированного автотранспорта. Модель обеспечивает определение количественного состава каждого вида специализированного автотранспорта, необходимого для минимизации логистических издержек в зависимости от характеристик и объемов образующихся отходов.

Имитационная модель позволяет подобрать оптимальные параметры, изменив текущий вариант использования специализированных автотранспортных средств в лучшую сторону. В качестве целевой функцией была выбрана минимизация затрат на транспортировку отходов.

Результат выполнения эксперимента на модели показал, что расчётный объем затрат на транспортировку отходов при использовании оптимального числа автотранспортных средств может быть снижен относительно базового варианта на 40,64 %.

Таким образом, данное исследование показало, что имитационное моделирование является мощным и эффективным инструментом для получения обоснованных решений, которые позволяют значительно улучшить процессы транспортировки отходов и, как следствие, повысить устойчивость системы обращения с отходами организаций с точки зрения её воздействия на окружающую среду. В итоге это должно привести к повышению эффективности деятельности, что в свою очередь улучшит показатели деятельности организаций в целом.

Данное исследование было посвящено комплексному изучению проблем развития транспортно-логистической системы обращения с отходами, в том числе транспортировки промышленных отходов автомобильным транспортом с учетом экологических факторов. В работе рассматривались теоретические и практические аспекты организации безопасной перевозки отходов, была разработана имитационная модель транспортировки отходов, предложены эффективные методы повышения эффективности транспортных процессов. Исследование направлено на решение актуальной проблемы обеспечения экологической безопасности и повышения экономической эффективности при растущих объемах промышленных отходов в современных условиях.

Цель работы – исследование системы формирования устойчивой транспортно-логистической системы обращения с отходами путем оптимизации процессов транспортировки промышленных отходов автомобильным транспортом с учётом экономической эффективности – достигнута.

Несмотря на положительные результаты, исследование имеет следующие ограничения:

1. Модель предполагает стабильность входных данных, в то время как в реальности могут возникать форс-мажорные обстоятельства (поломки техники, закрытие дорог).
2. Затраты на внедрение и сопровождение самой системы поддержки принятия решений требуют отдельного экономического обоснования.

Исследование может быть продолжено в направлении разработки моделей по оптимизации территориального размещения комплексов по обработке, сортировке, переработке и размещению отходов, а также моделей по оптимизации маршрутов доставки отходов до этих комплексов от мест образования отходов.

Благодарность

Работа выполнена за счет гранта, предоставленного Академией наук Республики Татарстан образовательным организациям высшего образования, научным и иным организациям на поддержку планов развития кадрового потенциала в части стимулирования их научных и научно-педагогических работников к защите докторских диссертаций и выполнению научно-исследовательских работ (Соглашение от 22.12.2025 № 12/2025-ПД-КФУ).

Список литературы

- 1 Федеральный закон от 24 июня 1998 г. N 89-ФЗ "Об отходах производства и потребления" (с изменениями и дополнениями) [Текст] . - М. : [Издат.-АО "Кодекс"], 2025. – 133 с.
- 2 Федеральный закон от 10 января 2022 г. N 7-ФЗ " Об охране окружающей среды" (с изменениями) [Текст] . - М. : [Издат.-АО "Кодекс"], 2025. – 197 с.
- 3 Указ Президента РФ от 07.05.2024 N 309 "О национальных целях развития Российской Федерации на период до 2030 года и на перспективу до 2036 года" [Текст] . – М. : [Издат.-Официальный интернет-портал правовой информации], 2024. – 13 с.
- 4 Bhattacharyya, S. Risk Modeling Framework for Strategic and Operational Intervention to Enhance the Effectiveness of a Closed-Loop Supply Chain [Электронный ресурс] / S. Bhattacharyya, S. Sarkar, B.D. Sarkar, R. Manatkar // IEEE Trans. Eng. Manag. – 2023. – № 71. – С. 7015–7028.
- 5 Sonar, H. Navigating barriers to reverse logistics adoption in circular economy: An integrated approach for sustainable development / H. Sonar, B. D. Sarkar, P. Joshi, N. Ghag, V. Choubey, S. Jagtap // Sustainable Operations and Computers. – 2024. – Vol. 5. – С. 64–78.
- 6 Ren, R. A Systematic Literature Review of Green and Sustainable Logistics: Bibliometric Analysis, Research Trend and Knowledge Taxonomy / R. Ren, W. Hu, J. Dong, B. Sun, Y. Chen, Z. Chen // Int. J. Environ. Res. Public Health. – 2020. – Vol. 17, № 1. – С. 1-25.
- 7 Agarwal, M.M. A Framework for Adopting a Sustainable Reverse Logistics Service Quality for Reverse Logistics Service Providers: A Systematic Literature Review / M. M. Agarwal, P. K. Agrawal, S. K. Sharma, R. K. Singh // Sustainability. – 2023. – Vol. 15, № 3. – С. 1-16.
- 8 Мусинова, Н.Н. Актуальные проблемы в сфере обращения с твёрдыми коммунальными отходами / Н.Н. Мусинова // Вестник Алтайской академии экономики и права. –2025. –№ 2-2. – С. 233-238.
- 9 Горохова, А.Е. Модель экосистемы обращения с отходами в Российской Федерации / А. Е. Горохова, Н. Ю. Титова, Э. Ю. Чудаев // Фундаментальные исследования. – 2021. – № 12. – С. 105-111.
- 10 Брюханов, А.Ю. Информационная система для мониторинга и управления органическими отходами животноводства / А. Ю. Брюханов, Е. В. Шалавина, Харри Хухта, Э. В. Васильев // АгроЭко-Инженерия. – 2021. – № 4 (109). – С. 94-105.
- 11 Danshyana, S. Information technology for analysis of waste management objects infrastructure / S. Danshyana, A. Nechausov, S. Andrieiev, V. Cheranovskiy // Radioelectronic and Computer Systems. – 2022. – № 2. – P. 97-107.
- 12 Pires, L. M. IoT-Enabled Real-Time Monitoring of Urban Garbage Levels Using Time-of-Flight Sensing Technology / L. M. Pires, J. Figueiredo, R. Martins, J. Martins // Sensors. – 2025. – Vol. 25, № 7. – С. 1-31.
- 13 Lobov, N. Improving the process of transport of solid municipal waste by automobile transport / N. Lobov, D. Maltsev, E. Genson // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. – 2019. – Vol. 632. – С. 1-6.
- 14 Янковский, Д. И. Мировой опыт логистики в сфере обращения с отходами в условиях экономики замкнутого цикла / Д. И. Янковский // Известия СПбГЭУ. – 2024. – № 4 (148). – С. 187-192.
- 15 Cui, J. Research on optimization of waste sorting and transportation network in smart cities based on garbage volume prediction / J. Cui, Y. Yan, L. Jiang et al. // Discover Computing. – 2025. – Vol. 28. – С. 28-50.
- 16 Alsabt, R. Optimizing waste management strategies through artificial intelligence and machine learning - An economic and environmental impact study / R. Alsabt, W. Alkhaldi, Y. A. Adenle, H. M. Alshuwaikhat // Cleaner Waste Systems. – 2024. – Vol. 8. – С. 1-12.
- 17 Макарова, И. В. Совершенствование логистических операций путем разработки имитационных моделей / И. В. Макарова, В. Г. Маврин, А. Д. Бойко, Л. М. Габсалихова // Воронежский научно-технический вестник. – 2025. – Т. 2, № 2 (52). – С. 46-59.
- 18 Chen, C.-H. The Design and Implementation of a Garbage Truck Fleet Management System / C.-H. Chen, Y.-T. Yang, C.-S. Chang, C.-M. Hsieh, T.-S. Kuan, K.-R. Lo // The South African Journal of Industrial Engineering. – 2016. – Vol. 27, № 1. – P. 32-46.
- 19 Guo, H. System dynamics-based evaluation of interventions to promote appropriate waste disposal behaviors in low-income urban areas: A Baltimore case study / H. Guo, B. F. Hobbs, M. E. Lasater, C. L. Parker, P. J. Winch // Waste Management. – 2016. – Vol. 56. – P. 547-560.
- 20 Pinha, A. A system dynamics modelling approach for municipal solid waste management and financial analysis [Электронный ресурс] / A. Pinha, J. Sagawa // Journal of Cleaner Production. – 2020. – Vol. 269. – Режим доступа: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0959652620323970>.

References

- 1 Federal Law No. 89-FZ of June 24, 1998 "On Production and Consumption Waste" (as amended) [Text]. – Moscow : Kodeks, 2025. – 133 p.
- 2 Federal Law No. 7-FZ of January 10, 2022 "On Environmental Protection" (as amended) [Text]. – Moscow : Kodeks, 2025. – 197 p.
- 3 Decree of the President of the Russian Federation No. 309 of May 07, 2024 "On National Development Goals of the Russian Federation for the Period up to 2030 and for the Future up to 2036" [Text]. – Moscow : Official Internet Portal of Legal Information, 2024. – 13 p.
- 4 Bhattacharyya, S. Risk Modeling Framework for Strategic and Operational Intervention to Enhance the Effectiveness of a Closed-Loop Supply Chain [Electronic resource] / S. Bhattacharyya, S. Sarkar, B.D. Sarkar, R. Manatkar // IEEE Trans. Eng. Manag. – 2023. – Vol. 71. – P. 7015–7028.
- 5 Sonar, H. Navigating barriers to reverse logistics adoption in circular economy: An integrated approach for sustainable development / H. Sonar, B. D. Sarkar, P. Joshi, N. Ghag, V. Choubey, S. Jagtap // Sustainable Operations and Computers. – 2024. – Vol. 5. – P. 64–78.
- 6 Ren, R. A Systematic Literature Review of Green and Sustainable Logistics: Bibliometric Analysis, Research Trend and Knowledge Taxonomy / R. Ren, W. Hu, J. Dong, B. Sun, Y. Chen, Z. Chen // Int. J. Environ. Res. Public Health. – 2020. – Vol. 17, No. 1. – P. 1-25.
- 7 Agarwal, M.M. A Framework for Adopting a Sustainable Reverse Logistics Service Quality for Reverse Logistics Service Providers: A Systematic Literature Review / M. M. Agarwal, P. K. Agrawal, S. K. Sharma, R. K. Singh // Sustainability. – 2023. – Vol. 15, No. 3. – P. 1-16.
- 8 Musinova, N.N. Current Problems in the Field of Municipal Solid Waste Management / N.N. Musinova // Bulletin of the Altai Academy of Economics and Law. – 2025. – No. 2-2. – P. 233-238.
- 9 Gorokhova, A.E. Ecosystem Model of Waste Management in the Russian Federation / A. E. Gorokhova, N. Yu. Titova, E. Yu. Chudaev // Fundamental Research. – 2021. – No. 12. – P. 105-111.
- 10 Bryukhanov, A.Yu. Information System for Monitoring and Management of Organic Livestock Waste / A. Yu. Bryukhanov, E. V. Shalavina, Harry Huhhta, E. V. Vasiliev // AgroEcoEngineering. – 2021. – No. 4 (109). – P. 94-105.
- 11 Danshyna, S. Information technology for analysis of waste management objects infrastructure / S. Danshyna, A. Nechausov, S. Andrieiev, V. Cheranovskiy // Radioelectronic and Computer Systems. – 2022. – No. 2. – P. 97-107.
- 12 Pires, L. M. IoT-Enabled Real-Time Monitoring of Urban Garbage Levels Using Time-of-Flight Sensing Technology / L. M. Pires, J. Figueiredo, R. Martins, J. Martins // Sensors. – 2025. – Vol. 25, No. 7. – P. 1-31.
- 13 Lobov, N. Improving the process of transport of solid municipal waste by automobile transport / N. Lobov, D. Maltsev, E. Genson // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. – 2019. – Vol. 632. – P. 1-6.
- 14 Yankovskiy, D. I. World Experience of Logistics in the Field of Waste Management in the Conditions of Circular Economy / D. I. Yankovskiy // Bulletin of Saint Petersburg State University of Economics. – 2024. – No. 4 (148). – P. 187-192.
- 15 Cui, J. Research on optimization of waste sorting and transportation network in smart cities based on garbage volume prediction / J. Cui, Y. Yan, L. Jiang et al. // Discover Computing. – 2025. – Vol. 28. – P. 28-50.
- 16 Alsabt, R. Optimizing waste management strategies through artificial intelligence and machine learning - An economic and environmental impact study / R. Alsabt, W. Alkhaldi, Y. A. Adenle, H. M. Alshuwaikhat // Cleaner Waste Systems. – 2024. – Vol. 8. – P. 1-12.
- 17 Makarova, I. V. Improvement of logistics operations through the development of simulation models / I. V. Makarova, V. G. Mavrin, A. D. Boyko, L. M. Gabsalikhova // Voronezh Scientific and Technical Bulletin. – 2025. – Vol. 2, No. 2 (52). – P. 46-59.
- 18 Chen, C.-H. The Design and Implementation of a Garbage Truck Fleet Management System / C.-H. Chen, Y.-T. Yang, C.-S. Chang, C.-M. Hsieh, T.-S. Kuan, K.-R. Lo // The South African Journal of Industrial Engineering. – 2016. – Vol. 27, No. 1. – P. 32-46.
- 19 Guo, H. System dynamics-based evaluation of interventions to promote appropriate waste disposal behaviors in low-income urban areas: A Baltimore case study / H. Guo, B. F. Hobbs, M. E. Lasater, C. L. Parker, P. J. Winch // Waste Management. – 2016. – Vol. 56. – P. 547-560.
- 20 Pinha, A. A system dynamics modelling approach for municipal solid waste management and financial analysis [Electronic resource] / A. Pinha, J. Sagawa // Journal of Cleaner Production. – 2020. – Vol. 269. – URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0959652620323970> (accessed: 14.01.2026).



УДК 656.1

UDC 656.1

2.9.5 – эксплуатация автомобильного транспорта

УПРАВЛЕНИЕ ПРОЦЕССАМИ ПЕРЕВОЗКИ ПАССАЖИРОВ ПО ДАННЫМ ПАРАМЕТРОВ ТРАНСПОРТНОГО ПОТОКА

MANAGEMENT OF PASSENGER TRANSPORTATION PROCESSES BASED ON TRANSPORT FLOW PARAMETERS

Семкин Александр Николаевич, к.т.н., генеральный директор ЗАО «Группа компаний «Навигатор», г. Орел, e-mail: nvg@nvg-group.ru

Semkin Aleksandr Nikolayevich, candidate of technical sciences, NAVIGATOR Group of Companies, CJSC (GK NAVIGATOR, CJSC), Orel, e-mail: nvg@nvg-group.ru

✉¹ **Бодров Андрей Сергеевич**, к.т.н., эксперт Ассоциации по развитию цифровых технологий транспорта «Цифровая Эра Транспорта», г. Москва, e-mail: bodrov57@gmail.com

✉¹ **Bodrov Andrei Sergeevich**, candidate of technical sciences, expert of the Digital Era of Transport Association for the Development of Digital Transport Technologies, Moscow, e-mail: bodrov57@gmail.com

Аннотация. Широкое внедрение интеллектуальных транспортных систем в нашей стране способствует появлению новых методов управления транспортной инфраструктурой, в том числе и городским пассажирским транспортом общего пользования. В статье приводятся сведения о разработке алгоритма управления процессами перевозки пассажиров на основании параметров транспортного потока. Приведены теоретические основы разработки алгоритма управления, а также результаты его тестирования.

Annotation. The widespread introduction of intelligent transport systems in our country is contributing to the development of new methods for managing transport infrastructure, including public passenger transport. This article provides information on the development of an algorithm for managing passenger transportation processes based on traffic flow parameters. It also includes theoretical foundations for developing the algorithm and the results of its testing.

Ключевые слова: ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫЕ ТРАНСПОРТНЫЕ СИСТЕМЫ, ГОРОДСКОЙ ПАССАЖИРСКИЙ ТРАНСПОРТ, ТРАНСПОРТНЫЕ ПОТОКИ.

Keywords: INTELLIGENT TRANSPORT SYSTEMS, URBAN PASSENGER TRANSPORT, TRANSPORT FLOWS.

¹ Автор для ведения переписки

1 Состояние вопроса исследования и актуальность работы

Повышению эффективности эксплуатации городского пассажирского транспорта общего пользования (ГПТОП) посвящено множество научных трудов как отечественных, так и зарубежных исследователей [1-3]. Основой управления процессами перевозки пассажиров ГПТОП является метод ситуационного управления, приведенный в работах В.М. Курганова [4], который указывает, что основой для ситуационного управления перевозкой пассажиров

является исходная информация о параметрах функционирования ГПТОП. Ранее для получения исходной информации о параметрах функционирования ГПТОП требовалось проведение обширных и трудоемких натурных обследований [5]. Однако с широким внедрением интеллектуальных транспортных систем (ИТС) процесс получения исходной информации о режимах функционирования ГПТОП стал более автоматизированным и оперативным.

Так, в рамках цифровизации управления ГПТОП, В. М. Власов разработал концептуальные основы диспетчеризации пассажирского транспорта посредством спутниковой навигации [6]. Также в ГПТОП нашли широкое применение автоматизированные системы учёта пассажиропотоков [7] и технологии искусственного интеллекта [8].

В соответствии с распоряжением Министерства транспорта РФ № АК-95-р [9] ИТС в нашей стране реализуются в основном в границах городских агломераций. Причем наиболее пристальное внимание уделяется развитию инструментальных подсистем мониторинга и управления дорожным движением. Особый интерес для оптимизации расписания движения ГПТОП имеет инструментальная подсистема мониторинга параметров транспортного потока (ПМПТП).

Поэтому целью исследований является разработка алгоритма управления процессами перевозки пассажиров на основе параметров транспортного потока (ТП). Для достижения цели исследования необходимо решить следующие задачи:

- разработать алгоритм управления процессами перевозки пассажиров на основе параметров ТП;
- провести тестирование разработанного алгоритма.

2 Материалы и методы

В основе разрабатываемого алгоритма лежит общеизвестная методика определения времени оборотного рейса [10], которое включает в себя время движения и время отстоя на конечных остановочных пунктах (ОП). В нашем случае наибольший интерес с точки зрения управления процессами перевозки пассажиров представляет время движения ГПТОП на маршруте, которое определяется по формуле:

$$t_p = t_{дв} + t_{ос} + t_{пер} + t_{сл} + t_{вын}, \quad (1)$$

где $t_{дв}$ – время, затрачиваемое непосредственно на движение, мин; $t_{ос}$ – время, затрачиваемое на стоянки на ОП, мин; $t_{пер}$ – задержки ГПТОП на перекрестках, мин; $t_{сл}$ – случайные задержки, мин; $t_{вын}$ – вынужденный простой ГПТОП перед ОП, мин.

ПМПТП предназначена для определения скорости ТП при помощи детекторов транспорта. Исходя из назначения этой инструментальной подсистемы, можно сделать вывод о том, что для определения времени прохождения ГПТОП участка маршрута необходимо получение данных от ПМПТП о текущей скорости движения ТП (если ГПТОП движется в общем ТП) или текущей скорости ГПТОП (если имеются выделенные полосы движения для ГПТОП). Необходимо отметить, что в соответствии с требованиями [11] ПМПТП определяет среднюю скорость ТП.

Средняя скорость прохождения перегона ГПТОП определяется по формуле:

$$\bar{V}_s = \frac{\sum_{i=1}^n (m_i \times l_i \times V_i)}{\sum_{i=1}^n (m_i \times l_i)}, \quad (2)$$

где l_i – протяженность i -го участка дороги, км; m_i – количество полос движения в одном направлении i -го участка дороги, ед.; V_i – текущая скорость ГПТОП, км/ч.

Тогда среднее время прохождения перегона составит:

$$\bar{t}_{пер} = \frac{l_i}{\bar{V}_s}. \quad (3)$$

Данный метод не позволяет определять интервалы движения, т.к. детекторы транспорта не осуществляют выявление конкретных транспортных средств, а производят мониторинг всего ТП.

Кроме определения времени движения ГПТОП на перегонах маршрута для нахождения времени оборотного рейса необходимо знать время стоянки ГПТОП на j -ом ОП, которое определяется по формуле:

$$t_{j\text{ см.п}} = t_{j\text{ откр}} + t_{j\text{ закр}} + t_{j\text{ пас}} \times N_j + t_{j\text{ зад}}, \quad (4)$$

где $t_{j\text{ откр}}$ – время открытия двери ГПТОП, с; $t_{j\text{ закр}}$ – время закрытия двери ГПТОП, с; $t_{j\text{ пас}}$ – время посадки или высадки одного пассажира ГПТОП, с; N_j – количество пассажиров, чел; $t_{j\text{ зад}}$ – время задержки между высадкой и посадкой пассажиров, с.

В работе [12] определено, что время для входа и выхода пассажира можно принимать равным 1,5 с, т. е. $t_{\text{пас}}=1,5$ с. Время открытия и закрытия дверей также примерно равны и составляют 1,8 с, т. е. $t_{\text{откр}}=t_{\text{закр}}=1,8$ с. А время задержки между высадкой и посадкой составляет $t_{\text{зад}}=2$ с.

Время отстоя ГПТОП на конечных ОП должно быть не менее 5 % от общей линейной продолжительности работы водителя.

На основании приведенных данных выражение для определения времени оборотного рейса примет следующий вид:

$$T_{об}^{мл} = \sum_{i=1}^n \frac{l_i}{\bar{V}_s} + \sum_{j=1}^k (t_{j\text{ откр}} + t_{j\text{ закр}} + t_{j\text{ пас}} \times N_j + t_{j\text{ зад}}) + t_o. \quad (5)$$

где t_o – время отстоя ПС после выполнения рейса, с; k – число ОП на маршруте, ед.

Тогда численность единиц ГПТОП на маршруте определяется по формуле:

$$A_M = \frac{T_{об} \times 60}{I} = \frac{2 \times L_M}{V_{\text{Э}} \times I} = \frac{2 \times L_M \times Q_{ij\text{max}}}{V_{\text{Э}} \times q_{\text{расч}} \frac{Q_{ij\text{max}}}{T_{об} \times q_{\text{расч}}}}, \quad (6)$$

где $Q_{ij\text{max}}$ – максимальный пассажиропоток на участке маршрута, пасс./ч; I – интервал движения ГПТОП, ч; $T_{об}$ – время оборотного рейса, ч; L_M – протяженность маршрута, км; $V_{\text{Э}}$ – эксплуатационная скорость ПС, км/ч; $q_{\text{расч}}$ – расчётная вместимость единицы ГПТОП, пасс.

Маршрутная сеть городских агломераций представляет собой совокупность маршрутов движения ГПТОП. В связи с этим возникает вероятность прохождения различных маршрутов через один и тот же ОП. Данный фактор, оказывает влияние на составление маршрутного расписания для ГПТОП, имеющих общие ОП. В данном случае, интервалы движения ГПТОП на совмещенных участках должны равны между собой или быть кратны наименьшему интервалу движения:

$$\begin{aligned} I_1 &= I_2 = I_n, \\ I_n &= K \times I_{\text{min}}, \end{aligned} \quad (7)$$

где $I_1, I_2, I_n, I_{\text{min}}$ – интервалы движения на маршруте, мин.; K – коэффициент кратности, целое положительное число.

Соответственно, разность времени оборотных рейсов должна быть равна наименьшему интервалу или быть ему кратной:

$$T_{об} = (2t_{p1} + t_{o1}) - (2t_{p2} + t_{o2}) = K \cdot I_{min}, \quad (8)$$

где t_{p1} , t_{p2} – продолжительность рейса на согласуемых маршрутах, мин.; t_{o1} , t_{o2} – продолжительность отстоя ПС после выполнения рейса на согласуемых маршрутах, мин.

Для соблюдения приведенных в выражениях (7) и (8) требований в предложенном алгоритме предусмотрена проверка оптимальности по коэффициенту кратности интервалов движения по следующей формуле:

$$K = \frac{(2t_{p1} + t_{o1}) - (2t_{p2} + t_{o2})}{I_{min}}. \quad (9)$$

Наряду с ПМПТП, алгоритм предусматривает получение информации ещё от двух инструментальных подсистем:

- подсистемы мониторинга перемещения ГПТОП (ПМППОТ), предоставляющей информацию о маршруте движения и нахождении на маршруте ГПТОП;
- подсистемы управления маршрутами ГПТОП (ПУМОТ), предоставляющую информацию о пассажиропотоках на маршруте.

3 Результаты исследований

На основании проведенных теоретических исследований был разработан алгоритм управления процессами перевозки пассажиров на основании параметров ТП (рис. 1), в котором также предусмотрено выявление режима функционирования ИТС, основанное на определении отклонения текущего уровня обслуживания дорожного движения (ДД) от среднестатистических значений (уровни А...D) [11]. Обработка данных, полученных от ПМПТП, ПУМОТ и ПМППОТ, производится на уровне интеграционной платформы ИТС (ИП ИТС) Орловской городской агломерации (ОГА).

В качестве методики тестирования предложенного алгоритма применялось сравнение значений времени прохождения участка маршрута ГПТОП, определяемое при помощи предложенного алгоритма, а также методом натурального обследования.

Проведение эксперимента производилось на участке улично-дорожной сети (УДС) ОГА: г. Орел, ул. Приборостроительная.

Определение времени прохождения перегона при помощи предложенного алгоритма производилось в следующей последовательности:

- определялась скорость ТП на перегоне при помощи детектора транспорта «Смарт-роад TMS.13-T25»;
- определялось время прохождения перегона по формуле (3).

Получение исходной информации о параметрах ТП и дальнейшая обработка полученных данных производилась при помощи специализированного программного обеспечения «Навигатор ИТС» и «Навигатор С2020», на уровне ИП ИТС Орловской городской агломерации.

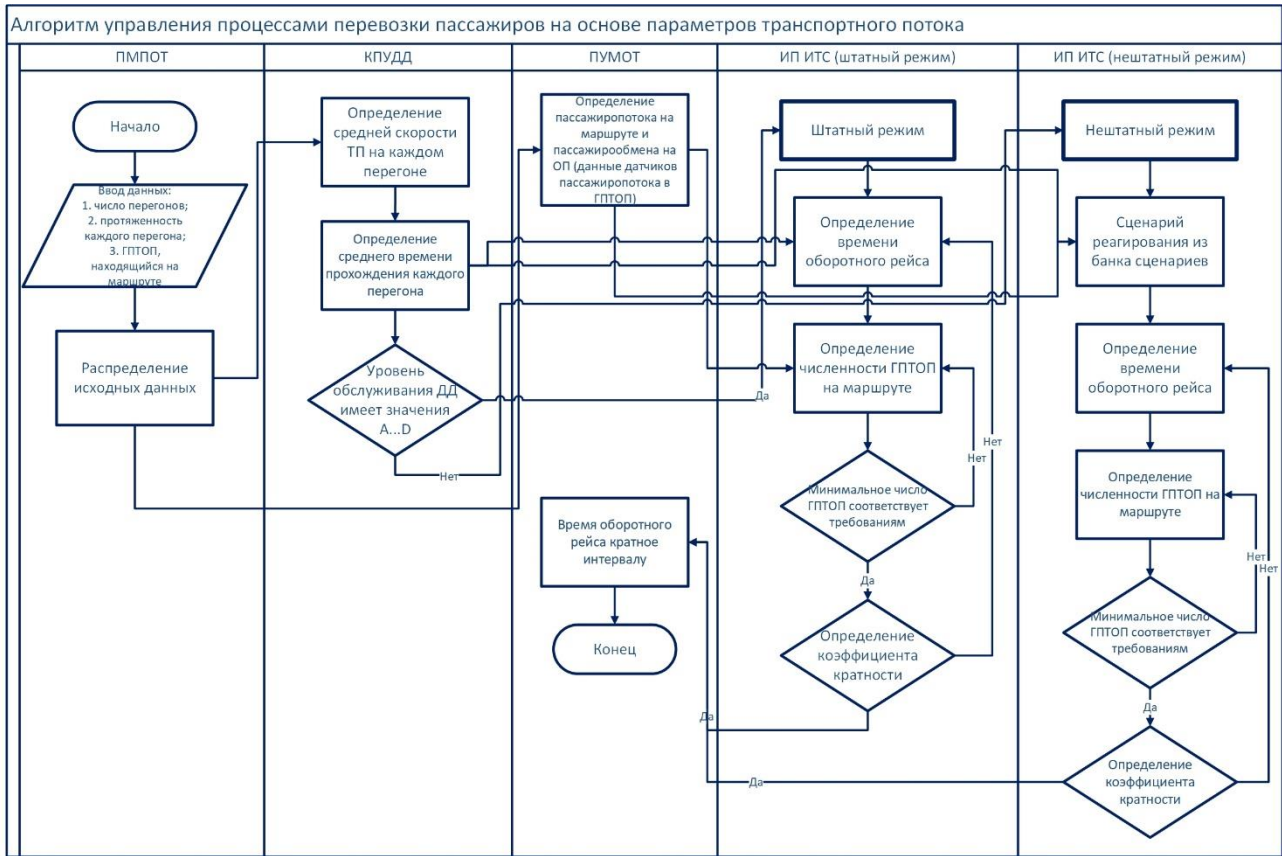


Рисунок 1 – Алгоритм управления процессами перевозки пассажиров на основании параметров ТП

Исследования параметров ТП производилось по нескольким временным периодам (рис. 2-9).

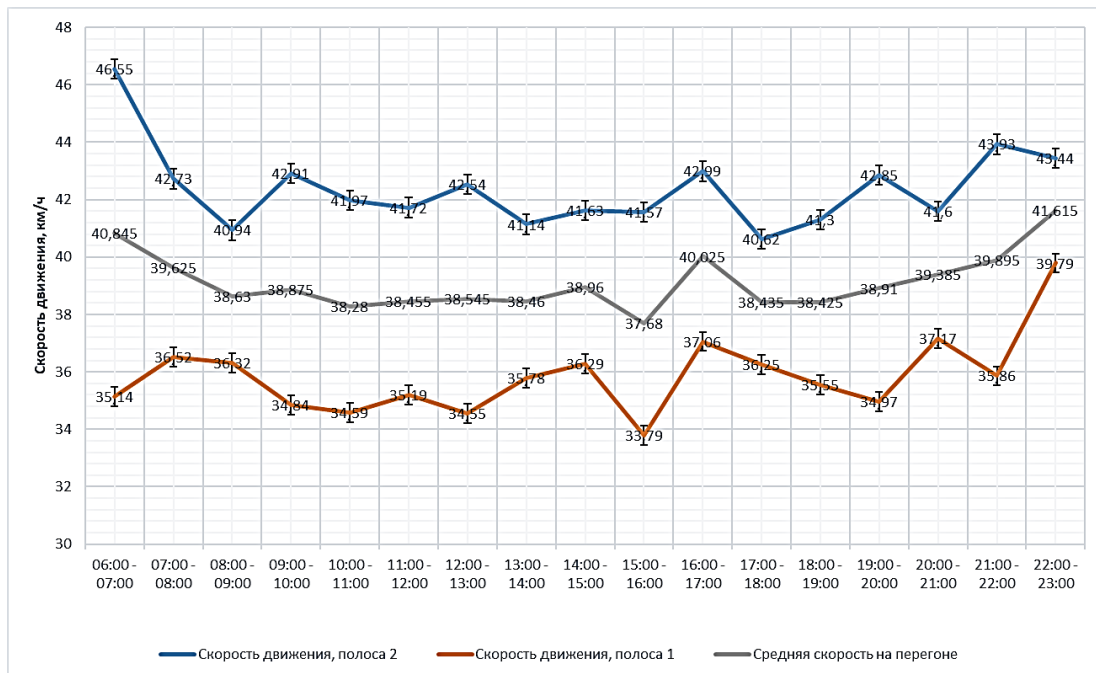


Рисунок 2 – Исследование скорости ТП на ул. Приборостроительная УДС ОГА 22.03.2024г. (будний день)

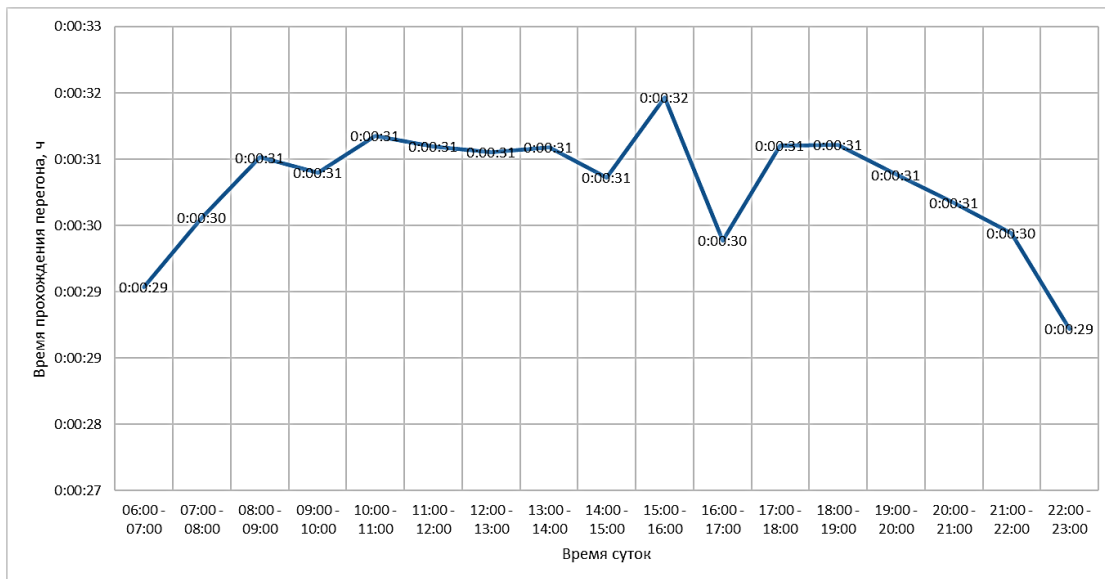


Рисунок 3 – Время прохождения перегона ул. Приборостроительная УДС ОГА 22.03.2024г. (будний день), определенное по формуле (3)

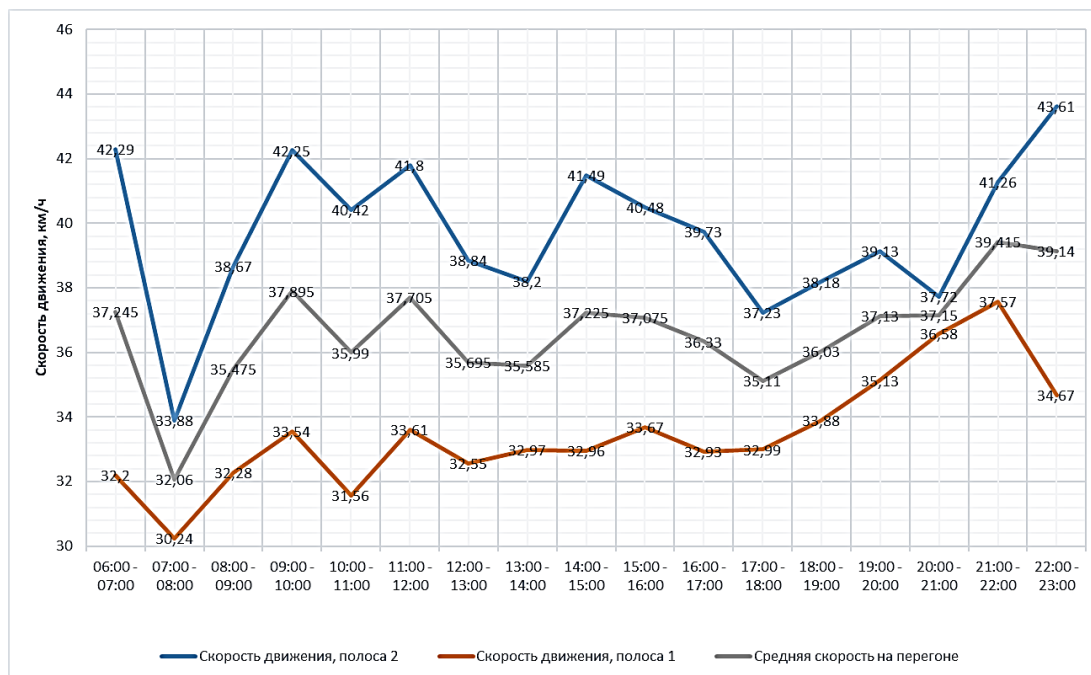


Рисунок 4 – Исследование скорости ТП на ул. Приборостроительная УДС ОГА 26.03.2024г. (будний день)

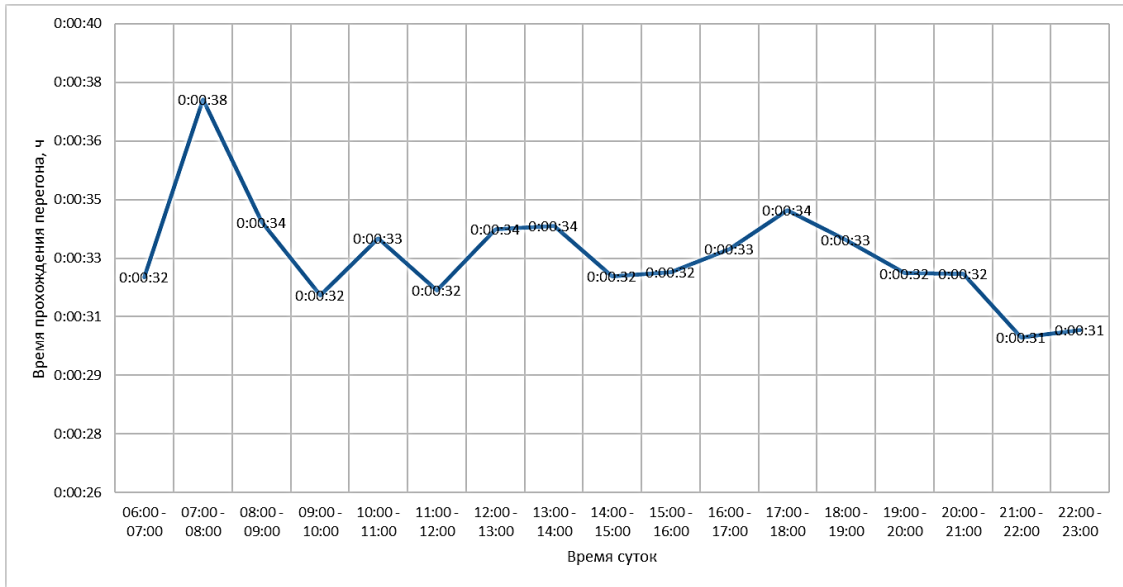


Рисунок 5 – Время прохождения перегона ул. Приборостроительная УДС ОГА 26.03.2024г. (будний день), определенное по формуле (3)

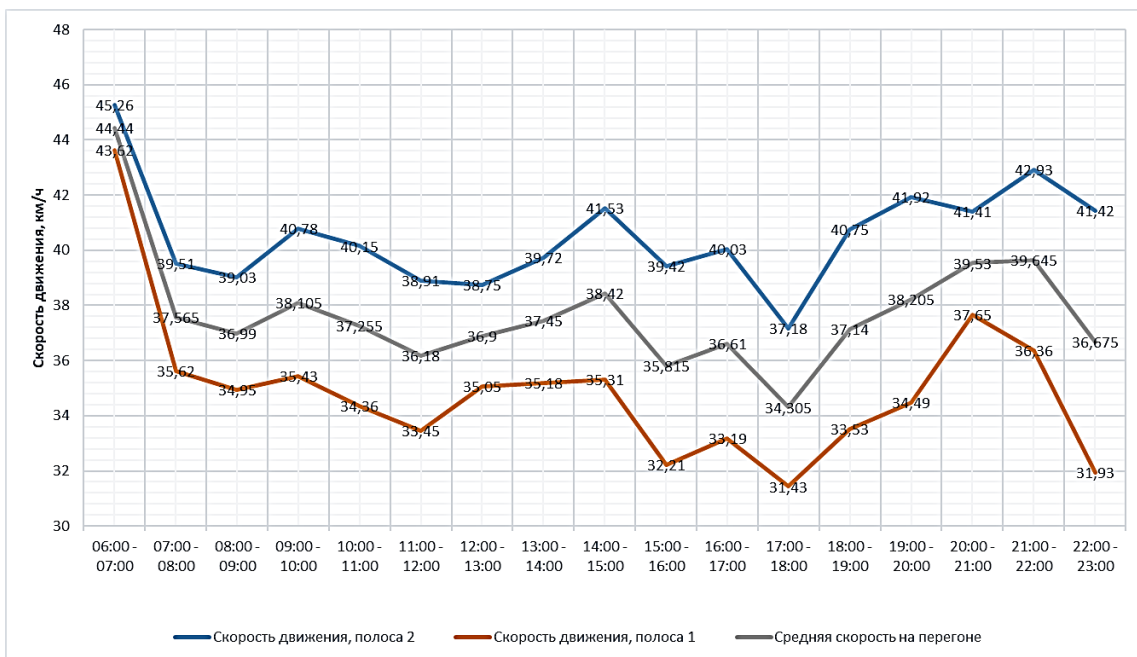


Рисунок 6 – Исследование скорости ТП на ул. Приборостроительная УДС ОГА 10.04.2024г. (будний день)

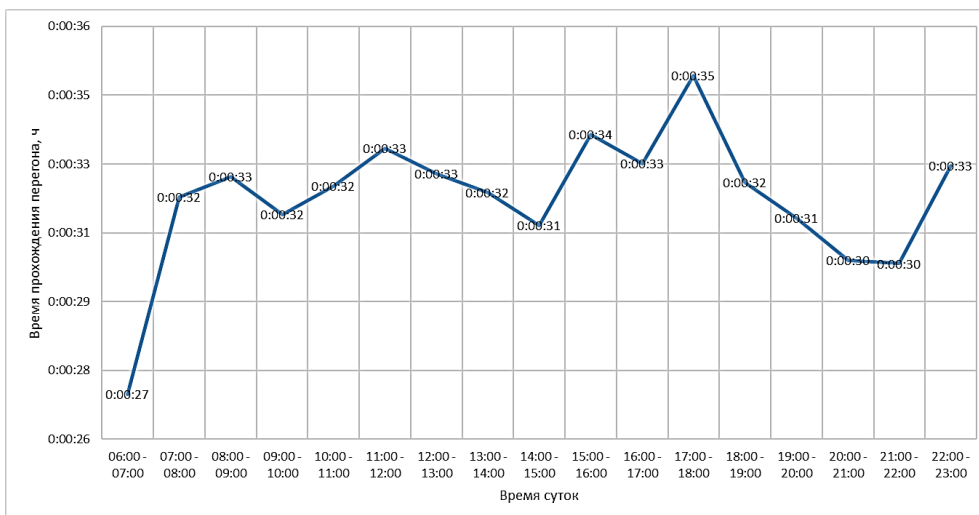


Рисунок 7 – Время прохождения перегона ул. Приборостроительная УДС ОГА 10.04.2024г. (будний день), определенное по формуле (3)

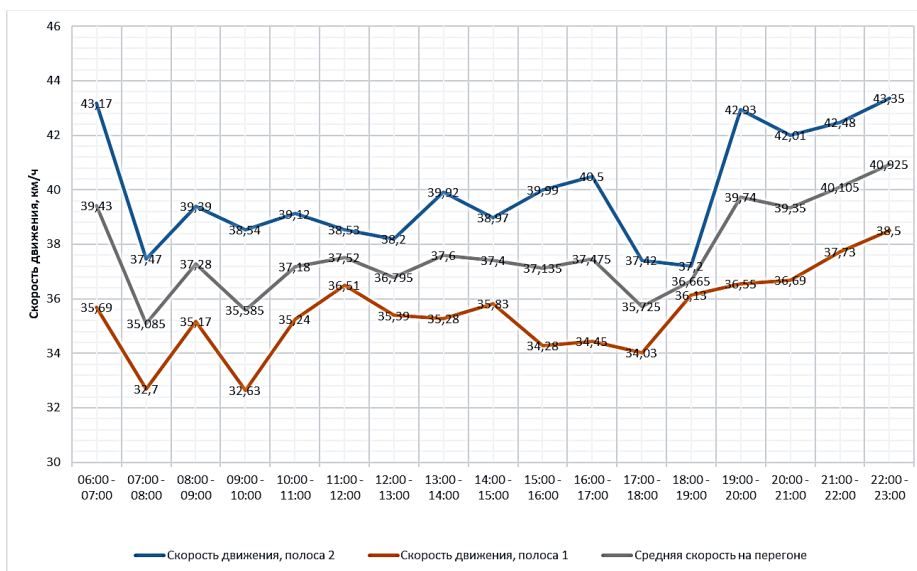


Рисунок 8 – Исследование скорости ТП на ул. Приборостроительная УДС ОГА 02.05.2024г. (выходной день)

Определение времени прохождения перегона методом натурного обследования осуществлялось на вершинах графа анализируемого перегона, в которых производился замер фактического времени отправления ГПТОП от начальной вершины графа и времени прибытия в конечную вершину анализируемого перегона.

На основании полученных экспериментальных данных определялось время прохождения перегона посредством заполнения табл. 1.

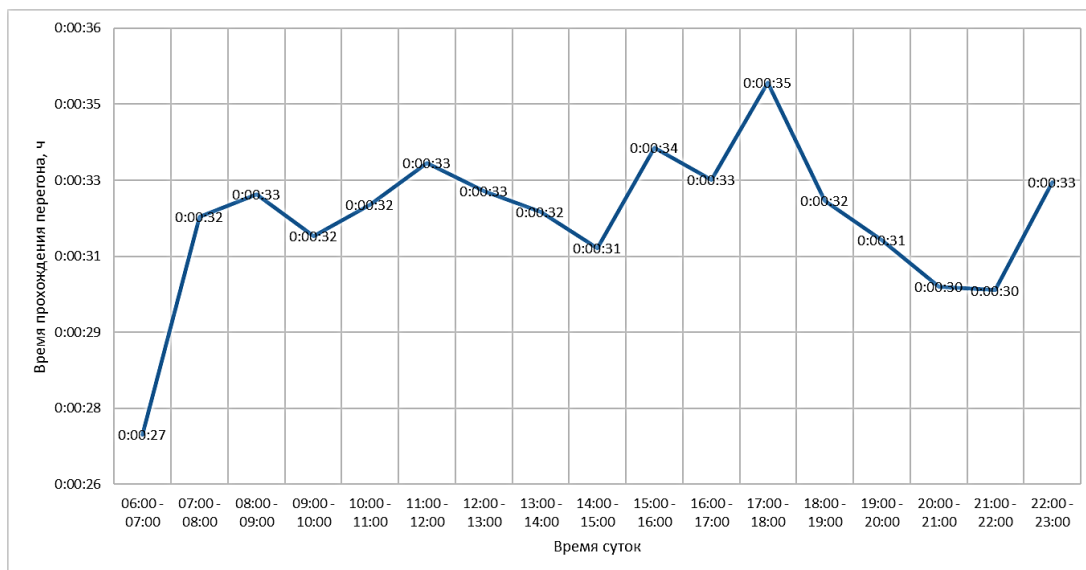


Рисунок 9 – Время прохождения перегона ул. Приборостроительная УДС ОГА 02.05.2024г. (выходной день), определенное по формуле (3)

Таблица 1 – Пример определения времени прохождения перегона ГПТОП

Время суток	ГРЗ ПС	Номер маршрута	Время отправления от начальной точки перегона, ч	Время прибытия на конечную точку перегона, ч	Время прохождения перегона, ч	Среднее время прохождения перегона, ч
06:00 - 07:00	C703HK	47	06:03:26	6:03:55	0:00:29	0:00:30
	C526MP	47	06:10:16	6:10:50	0:00:34	
	K083XA	47	06:15:47	6:16:10	0:00:23	
	Y582HA	47	06:22:44	6:23:12	0:00:28	
	AA400	60	06:27:37	6:28:12	0:00:35	
	K687XB	25	06:49:45	6:50:18	0:00:33	
	E256AK	22	06:55:44	6:56:14	0:00:30	
	C486PK	47	06:56:44	6:57:17	0:00:33	
C705KE	60	06:57:45	6:58:12	0:00:27		

В завершении исследования, значения времени прохождения перегона, полученные методом натурального обследования и при помощи разработанного алгоритма, сравнивались между собой (рисунки 10-13).

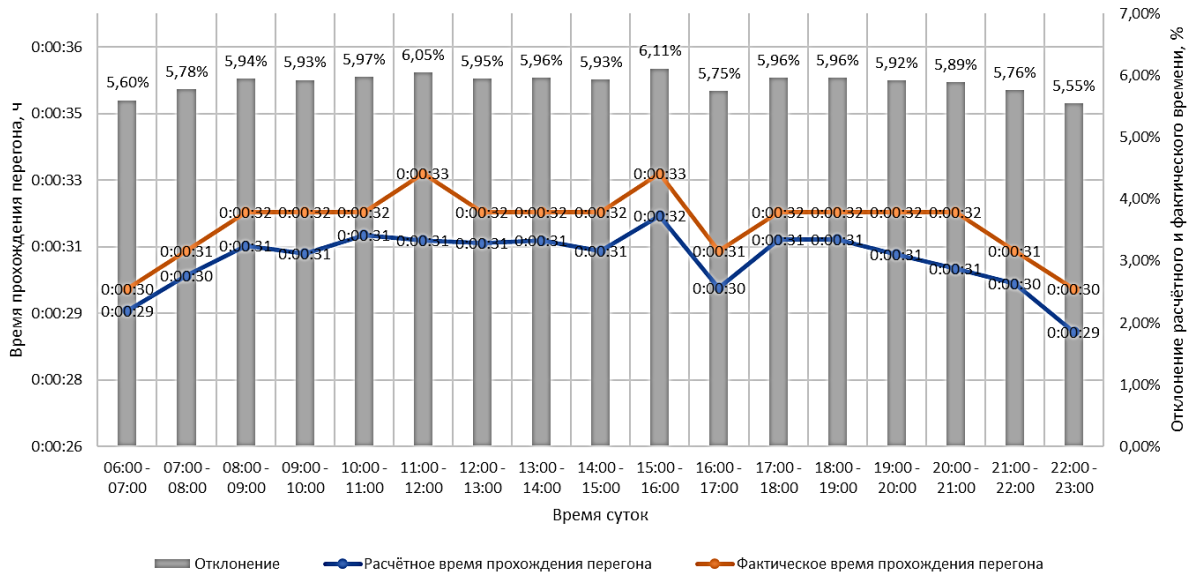


Рисунок 10 – Результаты сравнения данных, полученных при помощи разработанного алгоритма управления процессами перевозки пассажиров на основе параметров состояния ТП ОГА 22.03.2024г. (будний день)

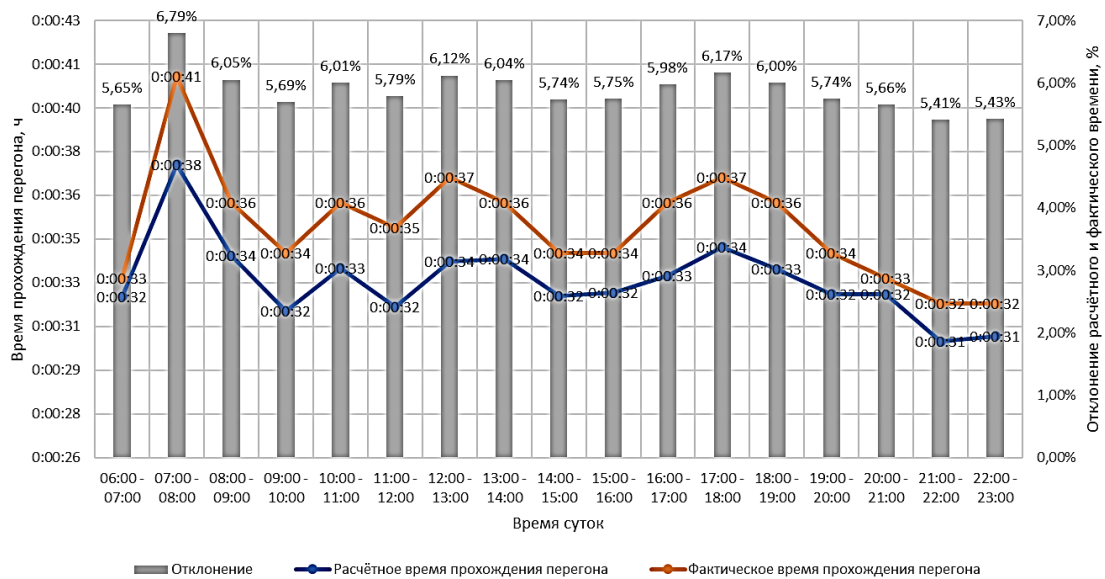


Рисунок 11 – Результаты сравнения данных, полученных при помощи разработанного алгоритма управления процессами перевозки пассажиров на основе параметров состояния ТП ОГА 26.03.2024г. (будний день)

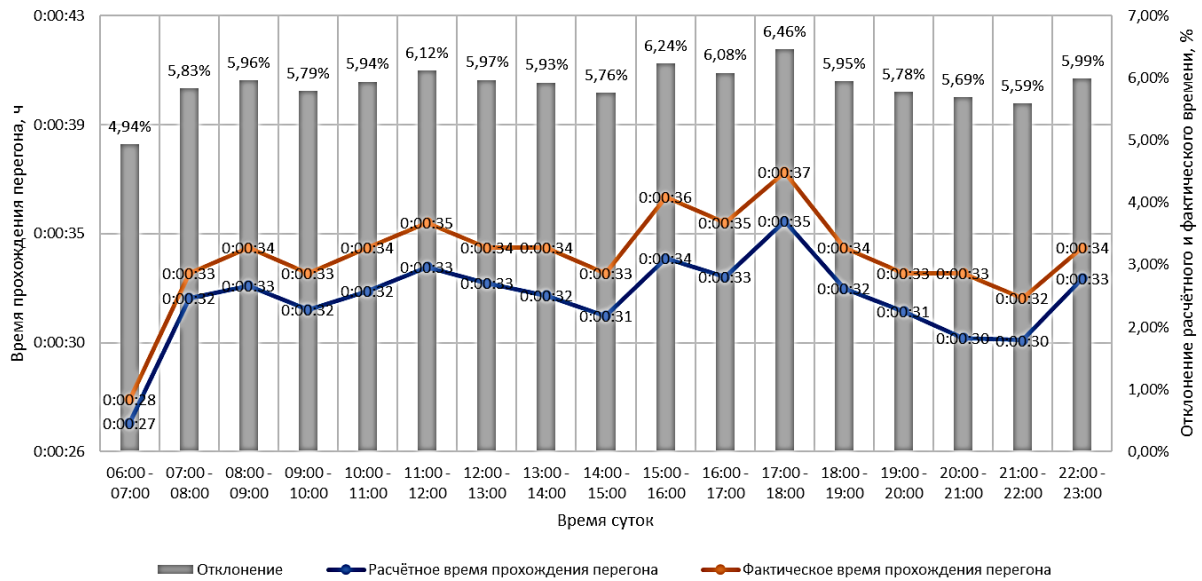


Рисунок 12 – Результаты сравнения данных, полученных при помощи разработанного алгоритма управления процессами перевозки пассажиров на основе параметров состояния ТП ОГА 10.04.2024г. (будний день)

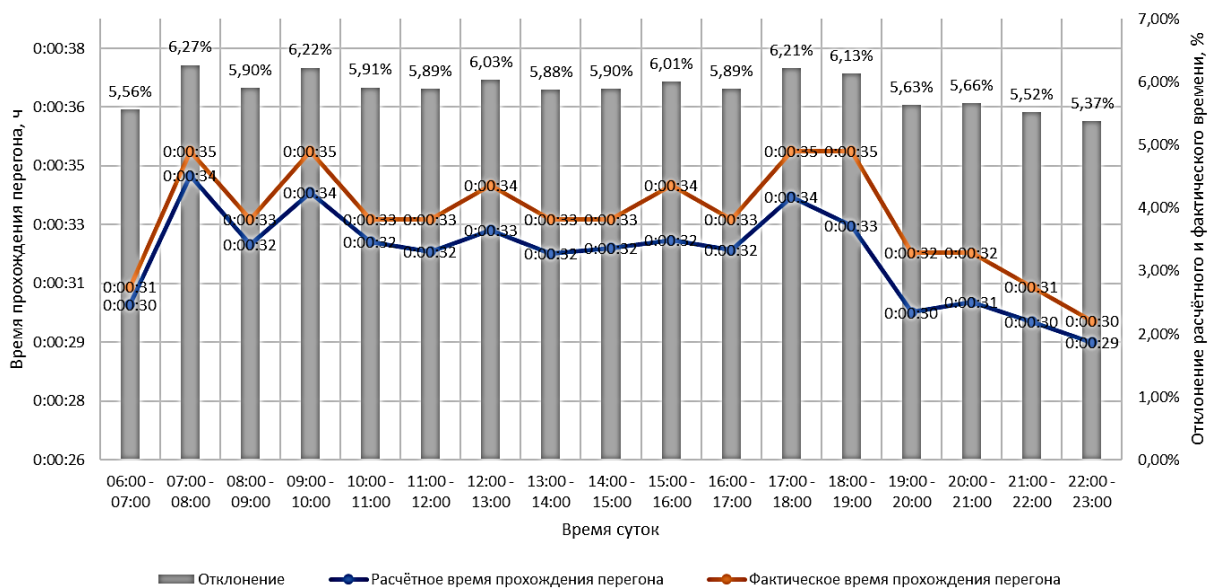


Рисунок 13 – Результаты сравнения данных, полученных при помощи разработанного алгоритма управления процессами перевозки пассажиров на основе параметров состояния ТП ОГА 02.05.2024г. (выходной день)

Проведенные сравнения значений времени прохождения перегона ул. Приборостроительная, полученные при помощи предложенного алгоритма и натурных исследований, подтвердили достоверность предложенного алгоритма управления процессами перевозки пассажиров на основе параметров ТП.

4 Обсуждение и заключение

В процессе проведения исследования были решены следующие задачи:

– разработан алгоритм управления процессами перевозки пассажиров на основе параметров ТП, позволяющий производить диспетчерское управление ГПТОП, основываясь на определении времени оборотного рейса, а также определять режим функционирования ИТС городской агломерации;

– проведено тестирование разработанного алгоритма, посредством сравнительного анализа значений времени прохождения перегона маршрутной сети ГПТОП, полученных при помощи разработанного алгоритма и методом натурального обследования.

Предложенный алгоритм управления процессами перевозки пассажиров может быть реализован в различных городских агломерациях нашей страны, в которых имеются подсистемы мониторинга параметров ТП. Данный алгоритм может быть использован также для формирования маршрутного расписания ГПТОП на этапах создания новых и корректировки существующих маршрутов движения ГПТОП.

Список литературы

1 Корягин, М.Е. Равновесные модели системы городского пассажирского транспорта в условиях конфликта интересов [Текст] / М.Е. Корягин. – Новосибирск: Наука, 2011. – 140 с.

2 Скиркоцкий, С.В. Городской наземный маршрутизированный транспорт: решения по организации перевозок: [монография] / С.В. Скиркоцкий, В.Н. Седюкевич. – Гомель: БелГТУ, 2019. – 174 с.

3 Теоретические основы пассажирских межмуниципальных автомобильных перевозок [Электронный ресурс]: монография / Н.Н. Якунин [и др.]; М-во науки и высш. образования Рос. Федерации, Федер. гос. бюджет. образоват. учреждение высш. образования «Оренбург. гос. ун-т». - Оренбург: ОГУ. – 2020. – 196 с- Загл. с тит. экрана.

4 Курганов, В. М. Управление автомобильными перевозками на основе ситуационного подхода: дис. докт. техн. наук. М., 2004. – 334 с.

5 Методические рекомендации по разработке Документа планирования регулярных перевозок пассажиров и багажа по муниципальным и межмуниципальным маршрутам автомобильным транспортом и городским наземным электрическим транспортом / Минтранс Российской Федерации – 2020. – 59 с.

6 Власов, В.М. Транспортная телематика в дорожной отрасли: учеб. пособие / В.М. Власов, Д.Б. Ефименко, В.Н. Богумил. – М.: МАДИ, 2013. – 80 с.

7 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.

8 Тихомиров, П.В. Прогнозирование городских логистических систем пассажирских перевозок на основе искусственных нейронных сетей [Текст] / П.В. Тихомиров, В. В. Камынин, В.В. Сиваков, С.С. Сеницын, М.А. Процкая. – Брянск: ООО «Новый проект», 2019. – 158 с.

9 Об утверждении Методических рекомендаций 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-р // <https://www.consultant.ru>.

10 Гудков, В.А. Пассажирские автомобильные перевозки [Текст] / В. А. Гудков [и др.] ; В. А. Гудков, Л. Б. Миротин, А. В. Вельможин, С. А. Ширяев. - М. : Горячая линия - Телеком, 2006. – 448 с.

11 Распоряжение Минтранса России от 27 декабря 2022 г. № АК-337-р «Об утверждении методических рекомендаций по проведению мониторинга дорожного движения». [электронный источник] – режим доступа: <https://www.garant.ru/products/ipo/prime/doc/406101059/>.

12 Самойлович Т.Н. Длительность операций при стоянке маршрутных пассажирских транспортных средств для высадки и посадки пассажиров // Наука и техника. 2013. – №3. – С. 1-8. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/dlitelnost-operatsiy-pri-stoyanke-marshrutnyh-passazhirskih-transportnyh-sredstv-dlya-vysadki-i-posadki-passazhirov> (дата обращения: 03.12.2025).

References

1 Koryagin, M.E. Equilibrium Models of the Urban Passenger Transport System in Conditions of Conflicting Interests [Text] / M.E. Koryagin. - Novosibirsk: Nauka, 2011. - 140 p.

2 Skirkovsky, S.V. Urban Ground Routed Transport: Solutions for Organizing Transportation: [monograph] / S.V. Skirkovsky, V.N. Sedyukevich. - Gomel: BelSTU, 2019. - 174 p.

3 Theoretical Foundations of Inter-Municipal Passenger Automobile Transportation [Electronic resource]: monograph / N.N. Yakunin [et al.]; Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation, Federal State Budget Educational Institution of Higher Education "Orenburg State University". - Orenburg: OSU. – 2020. – 196 p.- Title from screen title.

4 Kurganov, V. M. "Automotive Transportation Management Based on a Situational Approach": Dis. Doctor of Engineering Sciences. Moscow, 2004. – 334 p.

5 Methodological Recommendations for the Development of a Planning Document for Regular Transportation of Passengers and Baggage on Municipal and Intermunicipal Routes by Road and Urban Ground Electric Transport / Ministry of Transport of the Russian Federation – 2020. – 59 p.

6 Vlasov, V. M. "Transport Telematics in the Road Industry: Textbook" / V. M. Vlasov, D. B. Efimenko, V. N. Bogumil. – Moscow: MADI, 2013. – 80 p.

7 Lebedeva, O. A. Improving the methods of monitoring passenger flows on the routes of urban general passenger transport: specialty 05.22.10 "Operation of road transport": abstract of a 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.

8 Tikhomirov, P. V. Forecasting of urban logistics systems of passenger transportation based on artificial neural networks [Text] / P. V. Tikhomirov, V. V. Kamynin, V. V. Sivakov, S. S. Sinitsyn, M. A. Protskaya. – Bryansk: ООО Novy Proekt, 2019. – 158 p.

9 On approval of the Methodological recommendations for the development of applications (including local projects for the creation and modernization of intelligent transport systems) of constituent entities of the Russian Federation for receiving subsidies from the federal budget by the budgets of constituent entities of the Russian Federation for the purpose of implementing the event "Intelligent transport systems have been implemented that provide for the automation of traffic management processes in urban agglomerations, including cities with a population of over 300 thousand people" within the framework of the federal project "System-wide measures for the development of the road infrastructure" of the state program of the Russian Federation "Development of the transport system": order of the Ministry of Transport of the Russian Federation dated April 27, 2024 No. АК-95-р // <https://www.consultant.ru>.

10 Gudkov, V.A. Passenger automobile transportation [Text] / V.A. Gudkov [et al.]; V. A. Gudkov, L. B. Mirotin, A. V. Velmozhin, S. A. Shiryaev. - M.: Goryachaya Liniya - Telecom, 2006. - 448 p.

11 Order of the Ministry of Transport of Russia dated December 27, 2022 No. АК-337-р "On approval of methodological recommendations for conducting road traffic monitoring". [electronic source] - access mode: <https://www.garant.ru/products/ipo/prime/doc/406101059/>.

12 Samoylovich T. N. Duration of operations during parking of route passenger vehicles for disembarking and boarding passengers // Science and Technology. 2013. - No. 3. - P. 1-8. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/dlitelnost-operatsiy-pri-stoyanke-marshrutnyh-passazhirskih-transportnyh-sredstv-dlya-vysadki-i-posadki-passazhirov> (date of access: 03.12.2025).



УДК 656.13

UDC 656.13

2.9.5 – эксплуатация автомобильного транспорта

АНАЛИЗ МЕТОДОВ ОРГАНИЗАЦИИ ЛЕВОПОВОРОТНОГО ДВИЖЕНИЯ НА РЕГУЛИРУЕМЫХ ПЕРЕКРЕСТКАХ: СРАВНИТЕЛЬНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ И ОЦЕНКА ЗАДЕРЖЕК

ANALYSIS OF LEFT-TURN TRAFFIC ORGANIZATION METHODS AT SIGNALIZED INTERSECTIONS: COMPARATIVE MODELING AND DELAY ASSESSMENT

✉¹ **Лихачев Дмитрий Валерьевич**, к.т.н., доцент кафедры «Организация перевозок и безопасность движения», доцент, Воронежский государственный лесотехнический университет имени Г.Ф. Морозова, г. Воронеж, e-mail: lihachev_dv@mail.ru

✉¹ **Likhachev Dmitry Valerievich**, candidate of technical sciences, associate professor, department of transportation organization and traffic safety, associate professor, Voronezh state forestry university named after G.F. Morozov, Voronezh, e-mail: lihachev_dv@mail.ru

Дорохин Сергей Владимирович, д.т.н., декан автомобильного факультета, профессор кафедры «Автомобилей и сервиса», доцент, Воронежский государственный лесотехнический университет имени Г.Ф. Морозова, г. Воронеж.

Dorokhin Sergey Vladimirovich, doctor of technical sciences, dean of the faculty of automobile engineering, professor of the department of automobiles and service, associate professor, Voronezh state forestry university named after G.F. Morozov, Voronezh.

Артемов Александр Юрьевич, к.т.н., доцент кафедры «Организация перевозок и безопасность движения», Воронежский государственный лесотехнический университет имени Г.Ф. Морозова, г. Воронеж.

Artemov Alexander Yuryevich, candidate of technical sciences, associate professor, department of transportation organization and traffic safety, Voronezh state forestry university named after G.F. Morozov, Voronezh.

Кораблев Руслан Александрович, к.с.-х.н., доцент кафедры «Организация перевозок и безопасность движения», Воронежский государственный лесотехнический университет имени Г.Ф. Морозова, г. Воронеж.

Korablyov Ruslan Aleksandrovich, candidate of agricultural sciences, associate professor of the department "Organization of transportation and traffic safety", Voronezh state forestry university named after G.F. Morozov, Voronezh.

Паринов Николай Николаевич, студент 4 курса специальности 23.05.01 Наземные транспортно-технологические средства, Воронежский государственный лесотехнический университет имени Г.Ф. Морозова, г. Воронеж.

Parinov Nikolay Nikolaevich, 4th-year student, specializing in 23.05.01 Ground transport and technological vehicles, Voronezh state forestry university named after G.F. Morozov, Voronezh.

Аннотация. В статье исследованы методы организации левоповоротного движения на городских перекрестках. На основе микроскопического моделирования в среде Aimsun проведен сравнительный анализ трех схем с оценкой транспортных задержек. Выявлены недостатки эмпирического подхода к выбору методов и обоснована необходимость использования имитационного моделирования для оптимизации решений.

Ключевые слова: ЛЕВОПОВОРОТНОЕ ДВИЖЕНИЕ, РЕГУЛИРУЕМЫЕ ПЕРЕКРЕСТКИ, ТРАНСПОРТНЫЕ ЗАДЕРЖКИ, МИКРОСКОПИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ, ПРОПУСКНАЯ СПОСОБНОСТЬ, СВЕТОФОРНОЕ РЕГУЛИРОВАНИЕ, AIMSUN, КОНФЛИКТНЫЕ ТОЧКИ, ОРГАНИЗАЦИЯ ДВИЖЕНИЯ.

Annotation. The article investigates methods of organizing left-turn traffic at urban intersections. Based on microscopic modeling in Aimsun, a comparative analysis of three schemes with an assessment of traffic delays is carried out. The shortcomings of the empirical approach to method selection are identified, and the need for simulation modeling to optimize decisions is substantiated.

Keywords: LEFT-TURN TRAFFIC, SIGNALIZED INTERSECTIONS, TRAFFIC DELAYS, MICROSCOPIC SIMULATION, TRAFFIC CAPACITY, TRAFFIC SIGNAL CONTROL, AIMSUN, CONFLICT POINTS, TRAFFIC ORGANIZATION.

¹ Автор для ведения переписки

1 Состояние вопроса исследования и актуальность работы

Современные мегаполисы сталкиваются с парадоксом транспортного развития: рост автомобилизации, призванный повысить мобильность населения, неизбежно приводит к снижению эффективности дорожных сетей из-за увеличения заторов и аварийности. Центральным элементом этой проблемы выступает организация левоповоротного движения, которое, являясь одним из наиболее конфликтных маневров, напрямую влияет на пропускную способность узлов и безопасность участников движения. Левый поворот на перекрестке в одном уровне создает пересечение траекторий с встречным прямонаправленным потоком, генерируя до 32 % всех конфликтных точек на узле [1-3].

Эволюция методов управления транспортными потоками на пересечениях автомобильных дорог и городских улиц отражает постоянный поиск баланса между растущей автомобилизацией и требованиями к безопасности и эффективности дорожного движения. Несмотря на разработанные нормативы по внедрению светофорного регулирования и оптимизации геометрии пересечений сохраняется актуальность исследований, направленных на минимизацию конфликтных точек и задержек, которые непосредственно влияют на аварийность и пропускную способность узлов. Теоретической основой таких изысканий выступают принципы пространственно-временной организации движения, предполагающие разделение траекторий и фазовых циклов для снижения вероятности пересечения потоков [3, 4].

Ключевым элементом повышения эффективности узлов является организация левоповоротного движения, которая в условиях смешанных потоков требует учета стохастических факторов: вариативности интенсивности, различий в динамике транспортных средств (ТС) и поведенческих реакций водителей. Согласно классическим подходам левоповоротные маневры реализуются через три основных сценария [3, 5]:

1. Конфликтное взаимодействие со встречным прямонаправленным потоком, допустимое при низкой интенсивности и ограниченном числе поворачивающих ТС.

2. Метод временной отсечки встречного потока, основанный на фазировке светофорных циклов, позволяющий сократить очередь на подходе за счет смещения стартовой точки маневра к центру перекрестка.

3. Выделение отдельной фазы светофорного регулирования, исключающее конфликты, но увеличивающее длительность цикла.

В нашей стране в основном применяются четыре метода ввода левого поворота:

1. Схемы совмещенного левоповорота в общем потоке. Левоповоротные ТС используют общую полосу с прямонаправленным потоком в рамках одной фазы светофора. Рассматриваемый подход предполагает выполнение левоворотного маневра в рамках общей полосы движения, предназначенной также для следования прямо без выделения для этого отдельного временного интервала в светофорном цикле. Данное решение находит применение в условиях относительно невысокой интенсивности движения, когда количество транспортных средств, намеревающихся повернуть налево, не создает значительных помех сквозному потоку. Функционирование системы основано на предоставлении водителю возможности завершить маневр в промежутке между автомобилями встречного направления, что требует от него самостоятельной оценки безопасного интервала. Конфликт с встречными ТС и пешеходами увеличивают риск ДТП на 25-30 % и снижение пропускной способности прямой полосы на 40 % [1-3, 6]. Основным недостатком данной схемы является повышенный уровень аварийного риска, обусловленный неизбежным пересечением траекторий поворачивающих и встречных транспортных средств. Это приводит к росту количества конфликтных ситуаций, особенно в часы пиковой нагрузки, когда дефицит временных окон для безопасного поворота провоцирует вынужденные остановки в пределах перекрестка. Подобные остановки, в свою очередь, вызывают образование заторов и существенное снижение пропускной способности всей полосы, поскольку движение прямо блокируется ожидающим возможности повернуть транспортом.

2. Схема левоповоротного движения с использованием обособленной полосы в общем цикле регулирования. Данный подход предполагает организацию движения путем выделения для поворачивающих налево транспортных средств отдельной полосы, однако без предоставления им исключительного права проезда за счет отдельной светофорной фазы. Физическое разделение потоков осуществляется лишь на пространственном уровне, в то время как во временном аспекте они остаются совмещенными [1-3, 6, 7]. Несмотря на кажущееся усовершенствование по сравнению с предыдущим методом, данная схема не разрешает ключевую проблему – необходимость пересечения траектории встречного направления. Выделенная полоса лишь формирует организованную очередь для выполнения маневра, но не устраняет фундаментальную зависимость от наличия безопасных интервалов во встречном потоке. Водитель, находясь на специализированной полосе, по-прежнему вынужден проводить сложную оценку скоростного режима и дистанции приближающихся автомобилей, что в условиях интенсивного движения превращается в фактор повышенного риска и неуверенности. Как следствие, сохраняется и основная причина задержек: транспортные средства вынуждены простаивать в ожидании подходящего для поворота момента. Это приводит к закономерному снижению общей эффективности работы перекрестка. Более того, выделение отдельной полосы без соответствующей фазировки может создать ложное ощущение приоритета у отдельных водителей, что лишь усугубляет конфликтность ситуации. Данный метод, решая проблему хаотичного перестроения, оставляет неразрешенным основной конфликт, что ограничивает область его эффективного применения участками с умеренной и стабильной интенсивностью встречного потока.

3. Реализация левоповорота через метод временной отсечки встречного потока. Сущность данного способа организации движения заключается в предоставлении транспортным средствам, намеревающимся совершить левый поворот, возможности аккумулироваться в пределах перекрестка в течение фазы, разрешающей движение встречному направлению [1-3, 6, 7]. Разрешение на начало маневра возникает в момент переключения сигнала для встречного потока на запрещающий (желтый, а затем красный), это теоретически создает временное окно для освобождения перекрестка. Критическим аспектом успешности этой схемы является поведенческая составляющая. Водитель, ожидающий в центре пересечения, вынужден принимать решение в условиях высокой неопределенности: он должен спрогнозировать завершат ли встреч-

ные автомобили движение, оценить достаточность временного интервала и динамические возможности собственного транспортного средства. Отсутствие в отечественной практике однозначного сигнала (аналога мигающей желтой стрелки, используемой за рубежом для обозначения режима уступки) усугубляет эту неопределенность, порождая психологический диссонанс и задержку реакции. Именно эта стартовая задержка, обусловленная необходимостью сложной когнитивной оценки, становится системным недостатком метода. Она приводит к тому, что за отведенное время успевает проехать меньше автомобилей, чем позволяет геометрия узла, снижая практическую пропускную способность. В ситуациях, когда первым в очереди оказывается неопытный или чрезмерно осторожный водитель, эффект "затухания" потока многократно усиливается, провоцируя блокировку перекрестка и возмущения в виде звуковых сигналов сзади стоящего транспорта. Метод, потенциально эффективный для повышения пропускной способности, на практике часто нивелирует свои преимущества из-за факторов человеческого поведения и несовершенства системы информирования участников движения.

4. Организация левого поворота посредством выделенной светофорной фазы. Наиболее радикальный подход к разрешению конфликта левоповоротных и встречных потоков заключается в их полном временном разделении. Для этого в светофорный цикл вводится эксклюзивная фаза, в течение которой движение разрешено исключительно транспортным средствам, выполняющим левый поворот, в то время как всем другим направлениям предписывается остановка. Данный метод гарантированно исключает возможность столкновения с встречным потоком, кардинально повышая безопасность маневра. Подобная направленная оптимизация создает системную проблему на уровне всего перекрестка. Введение дополнительной фазы неизбежно увеличивает общую длительность цикла светофорного регулирования. Каждая секунда, выделенная для левоповоротных автомобилей, изымается из времени, отведенного для движения в иных направлениях. В результате, несмотря на локальное устранение конфликта, совокупная пропускная способность узла может снижаться, а на подходах, не задействованных в левоповороте, формируются вторичныезаторы. Эффективность этого метода резко падает в условиях асимметричной транспортной нагрузки. Если интенсивность левоповоротного потока непостоянна или объективно невысока, выделение для него фиксированного и продолжительного временного окна становится нерациональным. В такие периоды драгоценные секунды зеленого сигнала для специализированной фазы расходуются впустую, в то время как на смежных направлениях нарастают очереди. Таким образом, схема, обеспечивающая максимальную безопасность для одной категории участников движения, может провоцировать значительные потери времени для всех остальных, что требует ее тщательного и ситуационного обоснования [1-3, 6, 7].

Сложность внедрения описанных методов заключается в отсутствии формализованных алгоритмов выбора, базирующихся на результатах объективных полевых измерений и верифицированного компьютерного моделирования. В сложившихся условиях ключевое решение о применении конкретной схемы организации поворота принимается инженером-проектировщиком, опирающимся преимущественно на профессиональный опыт и эмпирические оценки. Подобная зависимость от субъективной интерпретации ситуации формирует значительный проектный риск, следствием которого нередко становится ухудшение показателей безопасности на вводимых в эксплуатацию регулируемых пересечениях.

2 Материалы и методы

Основу исследования составило микроскопическое моделирование транспортных потоков с применением программного продукта Aimsun [8], обеспечивающего детальную имитацию поведения отдельных транспортных средств с учетом динамических параметров: смены полос, маневрирования, временных интервалов движения. Инструментарий платформы включает модули для работы с разнородными элементами транспортной инфраструктуры, включая классификацию автомобилей, детекторы фиксации данных, а также объекты управления движением, состояние которых адаптируется в ходе калибровки модели [8].

Моделирование улично-дорожной сети выполнено на основе геоподложки, предварительно разработанной в среде AutoCAD и импортированной в Aimsun [9]. На импортированную схему наносились секции проезжей части с последующим формированием узлов соединения, определением количества полос, их ширины и допустимых направлений движения. Для каждой секции задавались разрешенные маневры, включая повороты и перестроения, что позволило воспроизвести реальную конфигурацию транспортных потоков.

Транспортно-пешеходные потоки интегрировались в модель с учетом данных о часовой интенсивности движения, распределении типов транспортных средств (легковые, грузовые, автобусы) и их маршрутизации. Параметры пешеходной активности включали плотность потока и направления перемещения [6, 9].

Регулирование движения на узлах моделировалось через введение приоритетных правил проезда, установку дорожных знаков («стоп», «уступи дорогу») и настройку светофорных объектов. Для последних определялись длительность цикла, временные интервалы сигналов (зеленый, красный, желтый), а также фазовые переходы. Завершающим этапом стала генерация динамического сценария с запуском эксперимента, созданием репликаций модели и последующим анализом выходных данных [6, 10-14].

3 Результаты исследований

Транспортные задержки, определяемые как временные потери, обусловленные снижением скорости движения или вынужденными остановками на узлах улично-дорожной сети (УДС), представляют собой критический показатель эффективности транспортных систем. С позиции теории транспортных потоков задержки формируются при дисбалансе между спросом на перемещение и пропускной способностью инфраструктуры. Длительные задержки, классифицируемые как заторы [15, 16], возникают при превышении интенсивности трафика над предельной пропускной способностью участка. Для количественной оценки совокупных временных потерь в транспортном потоке применяется формула:

$$T_{\Delta} = N_a t_{\Delta} T, \quad (1)$$

где N_a – приведенная интенсивность потока, авт/ч; t_{Δ} – средневзвешенная задержка одного транспортного средства, с; T – период наблюдения, ч.

Данный подход базируется на принципах микроскопического моделирования, учитывающих стохастические взаимодействия между участниками движения.

Локальные задержки на элементах УДС описываются коэффициентом:

$$K_z = \frac{t_{\phi}}{t_p}, \quad (2)$$

где t_p – фактическое время прохождения участка (с), t_p – расчетное время при свободном движении (с).

Для регулируемых перекрестков ключевым фактором является фазировка светофорного цикла. Теоретической основой расчета служит концепция Webster, предполагающая, что при нулевой интенсивности пересекающихся потоков транспортные средства (ТС) преодолевают узел без остановок на разрешающий сигнал. Практическая оценка задержек осуществляется методом дискретных наблюдений, включающим фиксацию количества остановившихся ТС на входе в перекресток с интервалом 15 с в течение 5 минут. Средняя задержка для j -го направления вычисляется как:

$$t_{\Delta j} = \frac{n_{стj} t_{инт}}{n_{дв}}, \quad (3)$$

где $n_{\text{ост}}$ – число остановленных ТС за интервал, $n_{\text{дв}}$ – число ТС, проехавших без остановки, $t_{\text{инт}}$ – длительность интервала измерений, с. Для минимизации погрешностей данные собираются параллельно двумя наблюдателями: первый фиксирует остановки в 15-секундных интервалах, второй – интенсивность движения в минутных [16].

Согласно нормативным требованиям [1, 2, 15-17] предельно допустимая задержка одного ТС не должна превышать 120 с; ее превышение свидетельствует о переходе системы в заторовый режим. Формирование очередей на подходах к перекресткам связано с явлением насыщения фазы, когда прибывающие в красный интервал ТС не успевают покинуть узел в течение зеленого сигнала. Дополнительными факторами выступают организационные задержки (оплата парковки, проверки), неучтенные в детерминированных моделях.

Рассмотрим три способа организации левоповоротного движения на регулируемых пересечениях городского округа город Воронеж.

Первый подход подразумевает минимальное вмешательство в организацию потоков: маневр налево выполняется из одной полосы с движением прямо в рамках общего разрешающего сигнала светофора. Иллюстрацией данной схемы служит пересечение Ленинского проспекта и улицы Серафимовича, где реализован именно этот принцип.

Второй подход представляет собой промежуточный вариант, при котором для поворачивающих налево выделяется обособленная полоса, однако отдельная светофорная фаза для нее не предусмотрена. Это создает пространственное, но не временное разделение потоков. Практической демонстрацией такой организации движения является перекресток улиц Ленинградской и Брусилова.

Третий, наиболее сложный в технической реализации подход, основан на полном разделении конфликтующих направлений как в пространстве, так и во времени. Для левоповоротного транспорта предусмотрена не только специализированная полоса, но и эксклюзивная фаза светофорного цикла. Данная конфигурация была исследована на примере узла, образованного Бульваром Победы и улицей Антонова-Овсеенко.

Моделирование первого подхода организации движения, при котором левый поворот осуществляется из общей полосы, продемонстрировало минимальные временные потери. Средняя величина задержки для транспортных средств, выполняющих данный маневр, составила 6,21 с. за период наблюдения, охватывающий 27 полных светофорных циклов (рис. 1). Этот результат указывает на сравнительно высокую эффективность схемы в условиях конкретной интенсивности и состава потока на исследуемом объекте [6].



Рисунок 1 – Изменение величины задержки транспортных средств, левый поворот осуществляется из общей полосы

Применение второго подхода, с выделением специализированной полосы, но без обособленной фазы, привело к кардинально иным результатам. Проведенное моделирование зафиксировало критический рост задержек. Их среднее значение достигло 373,9 с. (около 6 минут) за 25 циклов, при этом разброс показателей был чрезвычайно велик: от минимальных 127 с. до максимальных 900 с. (15 минут). Такая динамика, представленная на рис. 2, наглядно иллюстрирует нестабильность и низкую пропускную способность данного метода при заданных условиях моделирования [6].



Рисунок 2 – Изменение величины задержки транспортных средств с выделением специализированной полосы, но без обособленной фазы

Анализ третьего способа, предполагающего полное пространственно-временное разделение потоков, выявил значительные, но более системные задержки. Среднее значение за 26 смоделированных циклов составило 308,52 с. (5 минут 14 с.). Экстремальные значения варьировались в диапазоне от 65 до 540 с. (рис. 3). Полученная картина согласуется с теоретическими ожиданиями: введение защищенной фазы устраняет конфликты, но за счет существенного увеличения времени цикла, что приводит к закономерному накоплению транспортных средств и росту времени ожидания, особенно на смежных направлениях [6].



Рисунок 3 – Изменение величины задержки транспортных средств, полное пространственно-временное разделение потоков

4 Обсуждение и заключение

Проведенный анализ выявил системные сложности в функционировании левоповоротных направлений на исследуемых участках дорожной сети, обусловленные несоответствием применяемых схем регулирования актуальным параметрам транспортного потока.

В отечественной практике проектирования перекрестков применяются четыре ключевых метода организации левоповоротного движения, каждый из которых имеет специфические ограничения и области применения. Их выбор часто осуществляется эмпирически, что создает риски снижения безопасности и пропускной способности [18].

В работе мы не провели исследование еще одного способа организации движения левоповоротного потока – «Поворот налево методом «отсечки». Практическая реализация метода отсечки сопряжена с парадоксальным эффектом: несмотря на повышение пропускной способности, возникают стартовые задержки, обусловленные психофизиологическими факторами. Водитель, ожидающий момента для начала маневра, вынужден прогнозировать поведение участников встречного потока, что приводит к временным потерям между разрешающим сигналом и началом движения.

Экспериментальные наблюдения выявили нелинейную зависимость задержек от числа полос. При одной полосе, водители демонстрируют уверенность в выборе временного окна, тогда как увеличение до двух и выше возникает эффект "множественного лидера", когда маневр инициируется только после оценки скорости последнего ТС в каждой из полос. Максимальные задержки фиксируются в ситуациях, когда первым в очереди оказывается неопытный водитель, что подтверждается корреляцией между частотой звуковых сигналов и временем принятия решений. Поведенческая адаптация водителей, регулярно выполняющих маневр на конкретном узле, снижает задержки за счет формирования "паттернов ускорения" – использования минимально допустимых интервалов, соответствующих динамическим возможностям ТС. Однако такая оптимизация индивидуального поведения может провоцировать рост асимметрии в распределении задержек внутри потока, что требует учета в моделях светофорного регулирования.

Проведенное исследование подтвердило, что организация левоповоротного движения остается ключевым фактором, определяющим эффективность и безопасность транспортных узлов в условиях растущей автомобилизации. Критическим порогом, при котором задержки провоцируют коллапс движения, является 55 с. на ТС. На 40 % изученных перекрестков в городах-миллионниках РФ этот показатель превышен, что подтверждает необходимость пересчета светофорных циклов. Результаты подтверждают необходимость оптимизации длительности зеленого интервала для снижения пиковых задержек ниже порога заторового состояния.

Совершенствование организации левоповоротного движения требует комплексного подхода, сочетающего инженерные решения с анализом поведенческих и динамических аспектов, что позволит снизить дисбаланс между пропускной способностью узлов и растущим транспортным спросом.

Зачастую отсутствие четких критериев, основанных на комплексном анализе данных, приводит к субъективности проектных решений. По некоторым данным до 65 % случаев проектировщики выбирают метод, ориентируясь на локальный опыт, а не на моделирование или научно обоснованный подход.

Список литературы

1 Теория транспортных потоков в проектировании дорог и организации движения / В. В. Сильянов, А. Н. Новиков, С. В. Еремин, А. Г. Шевцова. – 2-е издание, переработанное и дополненное. – Москва - Орёл - Белгород: Белгородский Государственный Технологический Университет им. В. Г. Шухова, 2024. – 331 с. – ISBN 978-5-361-01336-4. – EDN RRPXZL.

2 Клиновштейн, Г. И. Организация дорожного движения [Текст]: Учеб. для вузов. - 5-е изд., перераб. и доп. / Г. И. Клиновштейн, М. Б. Афанасьев. - М.: Транспорт, 2001. – 247 с.

3 Основы организации дорожного движения : Учебное пособие для студентов направления подготовки 23.03.01 – Технология транспортных процессов / А. Н. Новиков, Л. Е. Кущенко, С. В. Кущенко, А. С. Камбур. – Белгород, Орел: Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова, 2023. – 170 с. – ISBN 978-5-361-01162-9. – EDN HWARDO.

4 Зырянов, В. В. Управление дорожным движением и перевозки : монография / В. В. Зырянов; М-во образования и науки Российской Федерации, Федеральное гос. бюджетное образовательное учреждение высш. проф. образования "Ростовский гос. строительный ун-т". – Ростов-на-Дону : Ростовский гос. строительный ун-т, 2012. – 148 с.

5 Highway Capacity Manual: A Guide to Multimodal Mobility Analysis. 6th ed. Transportation Research Board, Washington, D.C., 2016

6 Лихачев, Д. В. Повышение эффективности левоповоротного движения в зоне регулируемого перекрестка: специальность 05.22.10 "Эксплуатация автомобильного транспорта»: диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук / Лихачев Дмитрий Валерьевич, 2020. – 157 с. – EDNQFMAWP.

7 Новиков, А. Н. Современная оценка проблемы безопасности дорожного движения / А. Н. Новиков, И. А. Новиков, А. Г. Шевцова. – Белгород: Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова, 2021. – 108 с. – ISBN 978-5-361-00908-4. – EDN VACGFY.

8 Aimsun Version 7.0. (R10631). Copyright (C) 1997-2011 TSS-Transport Simulation Systems.

9 Якимов, М. Р. Транспортное планирование: создание транспортных моделей городов / М. Р. Якимов: монография. – М. : Логос, 2013. – С. 21-23.

10 Зырянов, В. В. Методы оценки адекватности результатов моделирования / В. В. Зырянов // Инженерный вестник Дона. – 2013. – № 2 (25). – С. 132.

11 Жанказиев, С. В. Интеллектуальные транспортные системы : Учебное пособие / С. В. Жанказиев. – Москва: Московский автомобильно-дорожный государственный технический университет (МАДИ), 2016. – 120 с.

12 Гусев, В. А. Различные подходы к моделированию транспортных потоков / В. А. Гусев // Ресурсоэнергоэффективные технологии в строительном комплексе региона. – 2014. – № 4. – С. 360-364.

13 Бурлуцкая, А. Г. Параметры для проверки адекватности моделирования / А. Г. Бурлуцкая, Ю. В. Семикопенко, А. Г. Шевцова // Проблемы исследования систем и средств автомобильного транспорта: сборник статей. - Вып.1. - Тула: Изд-во ТулГУ, 2017. – С. 279-283.

14 Сильянов, В. В. Теория транспортных потоков в проектировании дорог и организации движения / В. В. Сильянов. – М. : Транспорт, 1977. – 303 с.

15 Технические средства для организации и безопасности дорожного движения: учебник / С. В. Жанказиев, В. Я. Буйленко, Ю. А. Короткова [и др.]. – Москва: Общество с ограниченной ответственностью "Техполиграфцентр", 2022. – 208 с. – ISBN 978-5-94385-198-8. – EDN OVRBFK.

16 Кременец, Ю. А. Технические средства организации дорожного движения [Текст]: Учебник для вузов. / Ю. А. Кременец, М. П. Печеский, М. Б. Афанасьев. - М.: ИКЦ "Академкнига", 2005. – 279 с.

17 Локтионова, А. Г. Пути повышения эффективности управления городскими транспортными потоками / А. Г. Локтионова, А. Н. Новиков, А. Г. Шевцова. – Белгород-Орел : Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова, Орловский государственный университет им. И.С. Тургенева, 2024. – 173 с. – ISBN 978-5-361-01415-6. – EDN FXHSCY.

18 Михайлов, А. Ю. Современные тенденции проектирования и реконструкции улично-дорожных сетей городов / А. Ю. Михайлов, И. М. Головных. – Новосибирск: Наука, 2004. – 267 с.

References

1 Theory of Traffic Flows in Road Design and Traffic Organization / V. V. Silyanov, A. N. Novikov, S. V. Eremin, A. G. Shevtsova. - 2nd edition, revised and supplemented. - Moscow - Orel - Belgorod: Belgorod State Technological University named after V. G. Shukhov, 2024. - 331 p. - ISBN 978-5-361-01336-4. - EDN RRPXZL.

2 Klinkstein, G. I. Traffic Organization [Text]: Textbook for universities. - 5th ed., revised and supplemented / G. I. Klinkstein, M. B. Afanasyev. - M.: Transport, 2001. - 247 p.

3 Fundamentals of Road Traffic Management: A Textbook for Students Majoring in 23.03.01 – Transport Process Technology / A. N. Novikov, L. E. Kushchenko, S. V. Kushchenko, A. S. Kambur. – Belgorod, Orel: Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov, 2023. – 170 p. – ISBN 978-5-361-01162-9. – EDN HWARDO.

4 Zyryanov, V. V. Traffic Management and Transportation: A Monograph / V. V. Zyryanov; Ministry of Education and Science of the Russian Federation, Federal State Budgetary Educational Institution of Higher

Professional Education "Rostov State University of Civil Engineering". – Rostov-on-Don: Rostov State University of Civil Engineering, 2012. – 148 p.

5 Highway Capacity Manual: A Guide to Multimodal Mobility Analysis. 6th ed. Transportation Research Board, Washington, D.C., 2016

6 Likhachev, D. V. Improving the efficiency of left-turn traffic in a signalized intersection zone: specialty 05.22.10 "Operation of motor transport": dissertation for the degree of candidate of technical sciences / Likhachev, Dmitry Valerievich, 2020. - 157 p. - EDNQFMAWP.

7 Novikov, A. N. Modern assessment of the road safety problem / A. N. Novikov, I. A. Novikov, A. G. Shevtsova. - Belgorod: Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov, 2021. - 108 p. - ISBN 978-5-361-00908-4. - EDN VACGFY.

8 Aimsun Version 7.0. (R10631). Copyright (C) 1997-2011 TSS-Transport Simulation Systems.

9 Yakimov, M. R. Transport planning: creating urban transport models / M. R. Yakimov: monograph. - M.: Logos, 2013. - Pp. 21-23.

10 Zyryanov, V. V. Methods for assessing the adequacy of modeling results / V. V. Zyryanov // Engineering Bulletin of the Don. - 2013. - No. 2 (25). - P. 132.

11 Zhankaziev, S. V. Intelligent transport systems: A tutorial / S. V. Zhankaziev. - Moscow: Moscow Automobile and Road State Technical University (MADI), 2016. - 120 p.

12 Gusev, V. A. Various approaches to modeling traffic flows / V. A. Gusev // Resource and energy efficient technologies in the regional construction complex. - 2014. - No. 4. - P. 360-364.

13 Burlutskaya, A. G. Parameters for checking the adequacy of modeling / A. G. Burlutskaya, Yu. V. Semikopenko, A. G. Shevtsova // Problems of studying systems and means of automobile transport: a collection of articles. - Issue 1. - Tula: Tula State University Publishing House, 2017. - P. 279-283.

14 Silyanov, V. V. Theory of traffic flows in road design and traffic organization / V. V. Silyanov. - Moscow: Transport, 1977. - 303 p.

15 Technical means for the organization and safety of road traffic: a textbook / S. V. Zhankaziev, V. Ya. Builenko, Yu. A. Korotkova [et al.]. - Moscow: Society with Limited Liability Company "Tekhpolygon", 2022. - 208 p. - ISBN 978-5-94385-198-8. - EDN OVRBFK.

16 Kremenets, Yu. A. Technical means of traffic organization [Text]: Textbook for universities. / Yu. A. Kremenets, M. P. Pechersky, M. B. Afanasyev. - Moscow: ITC "Akademkniga", 2005. - 279 p.

17 Loktionova, A. G. Ways to improve the efficiency of urban traffic flow management / A. G. Loktionova, A. N. Novikov, A. G. Shevtsova. - Belgorod-Orel: Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov, Oryol State University named after I.S. Turgenev, 2024. - 173 p. - ISBN 978-5-361-01415-6. – EDN FXHSCY.

18 Mikhailov, A. Yu. Modern trends in the design and reconstruction of city street and road networks / A. Yu. Mikhailov, I. M. Golovnykh. - Novosibirsk: Nauka, 2004. - 267 p.

© Лихачев Д. В., Дорохин С. В., Артемов А. Ю., Кораблев Р. А., Паринов Н. Н., 2026