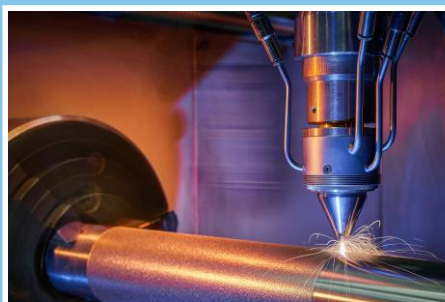
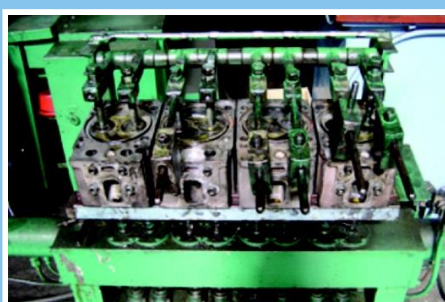




Научно-технический
журнал ⁽²⁾
Издается с 2012 года
Выходит четыре раза в год

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

Редакция:
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: vestnikvgtlta@mail.ru
Телефон: (473) 253-73-11
Сайт: <http://vestnikvgtlta.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

Ипатов А. Г., Шмыков С. Н. Алмазное выглаживание керамических
упрочняющих покрытий..... 3

Каюшин Е. С., Зубков Н. Н. Моделирование процесса формообразования
микроструктурированных поверхностей кипения методом конечных элементов..... 9

ТЕХНОЛОГИЯ МАШИНОСТРОЕНИЯ

Лебедев В. А., Райа Ахмад Особенности нанесения твёрдосмазочных покрытий
магнитодинамическим методом..... 15

Болдырев А. А., Перова А. В., Григораи В. В., Падурец А. А., Болдырев А. И.
Выравнивание исходной неравномерности припуска для электрохимической
размерной обработки при дискретной подаче электрода-инструмента 22

Гайст С. В., Леонов С. Л., Лопатин Б. А., Марков А. М., Некрасов В. Н.
Исследование влияния режимов обработки и износа инструмента на силу резания
при фрезеровании деталей из стеклопластика с нежесткими элементами концевыми
фрезами..... 29

ЭКСПЛУАТАЦИЯ АВТОМОБИЛЬНОГО ТРАНСПОРТА

Фирсова С. Ю., Скоробогатченко Д. А., Ширяев С. А., Зеликов В. А.
Интеллектуальный метод формирования парка грузовых автомобилей..... 37

Мухаметдинов Э. М., Габсалихова Л. М., Садыков М. Ф., Ильмухин Р. Р.,
Муртазин Т. Э. Систематизация сценариев эксплуатации: развитие подходов
к обеспечению функциональной безопасности автомобильных систем..... 49

Печатнова Е. В., Киришин И. И., Нагорный Н. Н., Еськов А. В. Исследование
наездов на препятствия в аспекте условий их возникновения и характеристик
водителя..... 58

Штепа А. А., Снятков Е. В. Интеграция когнитивных цифровых двойников
в систему управления качеством городских пассажирских перевозок..... 69

Волков В. С., Восковых П. А. Оценка работоспособности автомобильного
сцепления..... 78

DOI: 10.34220/2311-8873-2026-2-8



УДК 621.891

UDC 621.891

2.5.5 – технология и оборудование
механической и физико-технической
обработки

АЛМАЗНОЕ ВЫГЛАЖИВАНИЕ КЕРАМИЧЕСКИХ УПРОЧНЯЮЩИХ ПОКРЫТИЙ

✉¹ **Ипатов Алексей Геннадьевич**,
к.т.н., доцент кафедры «Эксплуатация и
ремонт машин» ФГБОУ ВО «Удмуртский
государственный аграрный университет»,
г. Ижевск, e-mail: Ipatow.al@yandex.ru

Шмыков Сергей Николаевич,
к.э.н., доцент кафедры «Эксплуатация и
ремонт машин» ФГБОУ ВО «Удмуртский
государственный университет», г. Ижевск,
e-mail: sergei-natali@mail.ru

Аннотация. В работе представлена техноло-
гия алмазного выглаживания керамического
упрочняющего покрытия на основе карбонит-
рида бора. Выполнены исследования влияния
режимов алмазного выглаживания на шерохо-
ватость керамического упрочняющего покры-
тия. Определена устойчивая область режимов
алмазного выглаживания, при которых дости-
гаются минимальные значения шероховато-
сти, а также определены оптимальные пара-
метры режимов обработки по критерию ше-
роховатости. Отмечено, что алмазное выгла-
живание снижает шероховатость керамиче-
ского упрочняющего покрытия до $Ra\ 0,16$.
Глубина упрочненного слоя составляет 20
мкм при микротвердости 21 ГПа.

Ключевые слова: КЕРАМИЧЕСКОЕ
ПОКРЫТИЕ, АЛМАЗНОЕ ВЫГЛАЖИВА-
НИЕ, МИКРОТВЕРДОСТЬ, ШЕРОХОВА-
ТОСТЬ ПОВЕРХНОСТИ, ОПТИМИЗАЦИЯ
РЕЖИМОВ.

DIAMOND SMOOTHING CERAMIC REINFORCING COATINGS

✉¹ **Ipatov Alexey Gennadievich**,
candidate of technical sciences, associate professor
of the department of "Operation and repair of ma-
chines" Federal State Budgetary Educational Insti-
tution of Higher Education "Udmurt state agrarian
university", Izhevsk, e-mail: Ipatow.al@yandex.ru

Shmykov Sergey Nikolaevich,
candidate of economics sciences, associate professor
of the department of "Operation and repair of ma-
chines" Federal State Budgetary Educational Institu-
tion of Higher Education "Udmurt state agrarian uni-
versity", Izhevsk, e-mail: sergei-natali@mail.ru

Annotation. The paper presents the technology of
diamond smoothing of a ceramic hardening coating
based on boron carbide. The paper studies the ef-
fect of diamond smoothing modes on the roughness
of the ceramic hardening coating. The paper deter-
mines the stable range of diamond smoothing
modes that achieve the minimum roughness values,
and also determines the optimal processing modes
based on the roughness criterion. It has been noted
that diamond smoothing reduces the roughness of
the ceramic hardening coating to $Ra\ 0.16$. The
depth of the hardened layer is 20 μm , with a micro-
hardness of 21 GPa.

Keywords: CERAMIC COATING, DIAMOND
SMOOTHING, MICROHARDNESS, SURFACE
ROUGHNESS, OPTIMIZATION OF MODES.

¹ Автор для ведения переписки

1 Состояние вопроса исследования и актуальность работы

Формирование керамических функциональных покрытий на деталях машин является перспективным направлением современного машиностроительного производства, и к их практическому внедрению приковано пристальное внимание [1-3]. Несмотря на активное развитие технологий наращивания функциональных керамических покрытий немаловажной проблемой остаются вопросы финишной обработки поверхностей керамических покрытий с целью достижения требуемых параметров шероховатости и чистоты [4, 5]. Способы абразивной, электроэрозионной обработки не всегда эффективны, что вызвано высокой твердостью керамических покрытий и малой толщиной керамического слоя, достигающей нескольких микрон. Поэтому разработка и исследование способов финишной обработки керамических покрытий остается крайне актуальной задачей. В данной работе предложена технология финишной обработки керамических покрытий методом алмазного выглаживания. Технология алмазного выглаживания широко апробирована в условиях упрочняющей обработки деталей машин и доказала свою эффективность при обеспечении необходимой шероховатости и твердости металлических поверхностей [6-8]. Однако в условиях обработки керамических поверхностей алмазное выглаживание практически не исследовано, и отсутствуют практические рекомендации по применению технологии алмазного выглаживания керамических поверхностей. Поэтому целью настоящих исследований является оптимизация режимов алмазного выглаживания и исследование шероховатости и микротвердости керамических покрытий на основе карбонитрида бора после алмазного выглаживания.

2 Материалы и методы

В качестве объекта исследования приняли тонкое упрочняющее керамическое покрытие на основе керамической композиции системы « B_4C-BN », синтезированное методом высокоскоростного лазерного оплавления на поверхности стали 40Х (рис. 1).



а
б
1 – пружинный алмазный выглаживатель, 2 – токарный станок,
3 – лабораторный образец с керамическим покрытием

Рисунок 1 – Вид процесса алмазного выглаживания керамических покрытий на лабораторных образцах (а) и вид керамического покрытия после алмазного выглаживания

Карбонитридные покрытия, синтезируемые высокоскоростным лазерным оплавлением, активно внедряются в отечественное машиностроение и ремонтное производство. Покрытия обладают толщиной в диапазоне от 30 до 50 мкм, низкой пористостью (5 %), микротвердостью от 4,5 до 6,2 ГПа [9, 10]. Опыт реализации карбонитридных покрытий выявил их

высокую износостойкость, термостойкость и возможность применения в условиях масляного голодания [11, 12].

Для лабораторных исследований керамическое карбонитридное покрытие нанесли на поверхность стального диска диаметром 180 мм, что позволяет реализовывать различные скорости выглаживания в зависимости от диаметра выбранной окружности. В качестве алмазного выглаживателя использовали пружинный выглаживатель разработанный и изготовленный на кафедре «Эксплуатация и ремонт машин» ФГБОУ ВО Удмуртский ГАУ. Пружинный выглаживатель обеспечивает усилие поджатия алмазного наконечника от 50 до 800 Н. Продольная подача алмазного наконечника обеспечивается поперечной подачей суппорта используемого токарного станка. В качестве инструмента для выглаживания приняли алмазный наконечник из синтетического алмаза АСК радиусом сферы 3 мм.

Технология алмазного выглаживания керамического карбонитридного покрытия реализуется следующим образом:

1. Стальной диск с керамическим покрытием фиксируется в трехкулачковом, самоцентрирующемся патроне и поджимается при помощи центров пиноли задней бабки.

2. После фиксации стального диска керамическое покрытие обильно смазывается индустриальным маслом И-20.

3. При помощи продольного и поперечного перемещения суппорта станка алмазный наконечник подводится к поверхности керамического покрытия и фиксируется необходимое значение усилия поджатия.

4. Включается привод шпинделя станка на расчетную скорость выглаживания и поперечное перемещение суппорта станка на необходимую подачу.

5. После алмазного выглаживания поверхность протирается сухой ветошью и при необходимости обезжиривается.

Выглаженные таким образом керамические карбонитридные покрытия исследовали на шероховатость и микротвердость поверхности. Анализ шероховатости проводился в Институте физики металлов (ИФМ) Уральского отделения Академии наук в г. Екатеринбург при помощи оптического профилометра модели WYKO NT9300 фирмы Veeco. Анализ микротвердости поверхности проводился при помощи микротвердомера ПМТ-3М по шкале Виккерса. Для оптимизации режимов алмазного выглаживания использовали методы однофакторных исследований, а также метод активного трехфакторного эксперимента по плану Бокса-Бенкина. Обработка результатов осуществлялась с использованием программного комплекса *STATISTICA 10*.

3 Результаты исследований

Поисковые однофакторные исследования были направлены на определение рациональных режимов алмазного выглаживания (рис. 2). В качестве режимов выглаживания исследовали влияние скорости выглаживания, усилия выглаживания и продольной подачи алмазного наконечника на шероховатость поверхности Ra . На основе анализа данных результатов была выявлена область режимов алмазного выглаживания, при которых достигаются минимальные значения шероховатости поверхности Ra . В данной области режимов был проведен трехфакторный эксперимент по оптимизации режимов алмазного выглаживания. В качестве уровней варьирования исследуемых факторов приняли следующие значения (табл. 1). Определение уровней факторов, при которых формируется минимальное значение шероховатости поверхности Ra , выполнено с применением функции «Критические значения, минимум, максимум» анализа эксперимента программного комплекса *STATISTICA 10*.

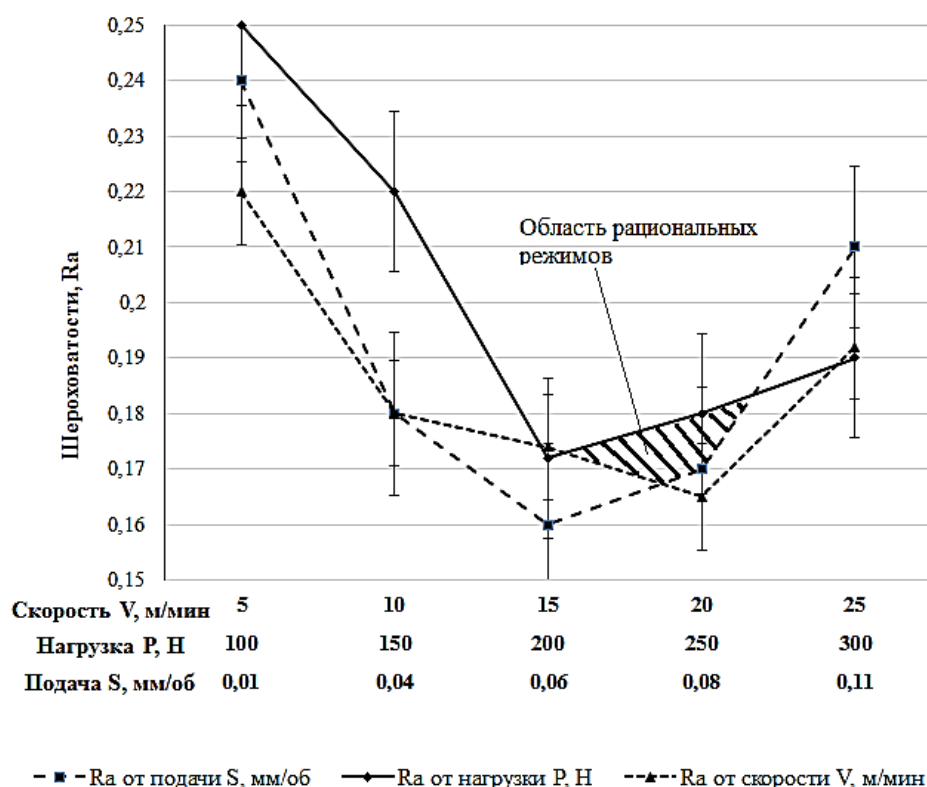


Рисунок 2 – Результаты поисковых исследований по определению диапазона рациональных режимов

Таблица 1 – Основные факторы и уровни их варьирования

Фактор	Обоз.	Ед. изм.	Уровни варьирования		
			+1	0	-1
Скорость выглаживания	X_1	м/мин	23	19	15
Нагрузка выглаживания	X_2	Н	280	240	200
Продольная подача	X_3	мм/об	0,1	0,08	0,06

В качестве критерия оптимизации приняли шероховатость поверхности Ra.

Согласно полученным данным, математическая модель, описывающая влияние режимов алмазного выглаживания на шероховатость поверхности, имеет вид:

$$Ra = 2,28 - 0,229X_1 + 0,0041875X_2 + 0,8375X_3 + 0,1125X_1X_3 - 0,1X_2X_3 + 0,00578X_1^2. \quad (1)$$

Выявлено, что минимальное значение шероховатости поверхности Ra в рассматриваемом диапазоне варьирования факторов для полученной математической модели достигается при следующих значениях режимов обработки: скорость выглаживания v – 21,65 м/мин; усилие выглаживания P – 237,16 Н; продольная подача S – 0,05554 мм/об.

Учитывая паспорт станка и конструкцию алмазного выглаживателя были приняты следующие режимы обработки: скорость выглаживания v – 20 м/мин; усилие выглаживания P – 230 Н; продольная подача S – 0,05 мм/об.

Основная задача алмазного выглаживания сводилась к формированию упрочнённого слоя. Поэтому нами была исследована микротвердость исследуемого образца по глубине от поверхности сферы при помощи микротвердомера ПМТ-3М (рис. 3).

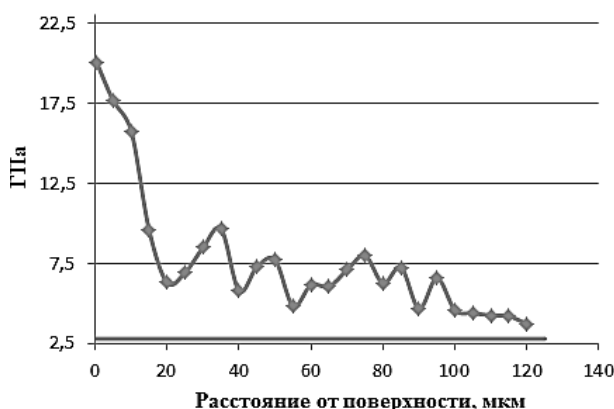
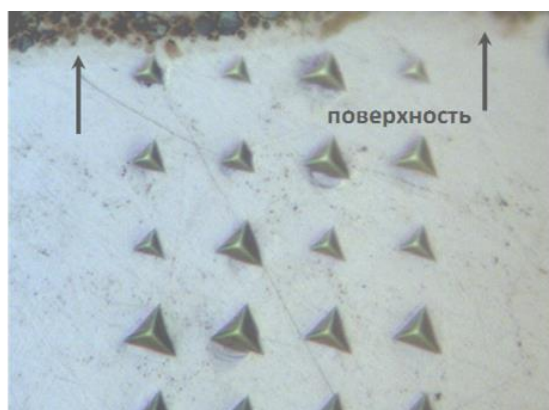


Рисунок 3 – Изменение микротвердости по глубине упрочненного слоя (горизонтальной линией представлена величина микротвердости стальной основы)

Микротвердость керамического карбонитридного покрытия после алмазного выравнивания с оптимизированными режимами составляет 21,4 ГПа, ниже покрытия наблюдается упрочненный слой подложки порядка 20 мкм с постепенным снижением микротвердости от 8-10 ГПа до 2,8 ГПа

4 Обсуждение и заключение

В результате алмазного выравнивания наблюдается понижение шероховатости керамического карбонитридного покрытия с $Ra\ 3,2$ (исходная шероховатость керамического покрытия) до $Ra\ 0,16$. Шаржирования и задиры поверхности керамического покрытия не выявлено. В процессе алмазного выравнивания отслоение и трещинообразование покрытия не наблюдается. Высокая твердость и жесткость керамического покрытия формируют интенсивное тепловыделение при деформации поверхности алмазным наконечником, поэтому в процессе обработки требуется постоянная жидкостная смазка. Отсутствие масляного слоя приводит к адгезионному разрушению покрытия. Повышение микротвердости поверхности составляет более чем в 3,3 раза. Эффективная глубина наклепанного слоя составляет 20 мкм, после которого микротвердость соответствует исходной микротвердости керамического слоя. Степень деформации керамического покрытия, при которой достигается минимальная шероховатость, составила 15 %.

Список литературы

- 1 Болотов, А. Н. Применение износостойких керамических покрытий в строительстве / А. Н. Болотов, В. В. Новиков, О. О. Новикова // Вестник Тверского государственного технического университета. – 2016. – № 2(30). – С. 112-114. – EDN WKOANF.
- 2 Мишин, М. М. Методы нанесения керамических покрытий металлов / М. М. Мишин, В. М. Медведев // Наука и Образование. – 2019. – Т. 2, № 2. – С. 220. – EDN YPMLLK.
- 3 Структура износостойких плазменных покрытий из никель-керамической смеси / Ю. С. Чесов, Е. А. Зверев, Н. В. Плотникова [и др.] // Актуальные проблемы в машиностроении. – 2015. – № 2. – С. 405-409. – EDN TZDZGL.
- 4 Технологические особенности формирования пористых функциональных керамических покрытий на алюминии методом микродугового оксидирования в силикатных электролитах / М. А. Марков, А. В. Красиков, А. Д. Быкова [и др.] // Сварочное производство. – 2020. – № 3. – С. 23-29. – EDN CQLDCX.
- 5 Плахотин, А. А. Упрочнение изнашиваемых поверхностей деталей лесных машин плазменным нанесением и упрочнением покрытий переменного состава / А. А. Плахотин, А. М. Кадырметов, Д. А. Попов // Воронежский научно-технический Вестник. – 2023. – Т. 3, № 3(45). – С. 34-47. – DOI 10.34220/2311-8873-2023-3-3-34-47. – EDN IFLWNN.

6 Зарубин, В. П., Киселев В.В. Применение алмазного выглаживания для повышения износостойкости поверхностей валов пожарных насосов // Упрочняющие технологии и покрытия. – 2022. – Т. 18, № 10(214). – С. 451-453. – DOI 10.36652/1813-1336-2022-18-10-451-453. – EDN TLSSZL.

7 Швецов, А. Н., Скуратов Д.Л. Влияние параметров процесса алмазного выглаживания на качество поверхностного слоя деталей при производстве изделий авиационной техники // Вестник Московского авиационного института. – 2023. – Т. 30, № 4. – С. 220-231. – EDN HLALUU.

8 Домасевич В. В., Кульгейко М.П. К вопросу о формировании рельефа поверхности при алмазном выглаживании // Механика машин, механизмов и материалов. – 2020. – № 2(51). – С. 55-62. – EDN LUQCRN.

9 Ипатов, А. Г. Упрочнение и восстановление короткоимпульсной лазерной наплавкой деталей керамическими материалами / А. Г. Ипатов // Сельский механизатор. – 2025. – № 10. – С. 27-29. – DOI 10.47336/0131-7393-2025-10-27-28-29. – EDN NLESEH.

10 Ипатов, А. Г. Технология комбинированной лазерной наплавки восстановительных покрытий с керамическим упрочняющим слоем / А. Г. Ипатов // Ремонт. Восстановление. Модернизация. – 2026. – № 1. – С. 14-19. – DOI 10.31044/1684-2561-2026-0-1-14-19. – EDN NTNVSМ.

11 Физико-механические свойства керамических покрытий, получаемых короткоимпульсной лазерной наплавкой порошковой смеси на основе бора / А. Г. Ипатов, М. Н. Ерохин, С. П. Казанцев [и др.] // Агроинженерия. – 2023. – Т. 25, № 1. – С. 71-76.

12 Kharanzhevskiy, E.V., Ipatov, A.G., Makarov, A.V. et al. Towards eliminating friction and wear in plain bearings operating without lubrication. Sci Rep 13, 17362 (2023). <https://doi.org/10.1038/s41598-023-44702-6>.

References

1 Bolotov, A. N. Application of wear-resistant ceramic coatings in construction / A. N. Bolotov, V. V. Novikov, O. O. Novikova // Bulletin of Tver State Technical University. – 2016. – No. 2(30). – Pp. 112-114. – EDN WKOANF.

2 Mishin, M. M. Methods of applying ceramic coatings on metals / M. M. Mishin, V. M. Medvedev // Science and Education. – 2019. – Vol. 2, No. 2. – Pp. 220. – EDN YPMLLK.

3 Structure of wear-resistant plasma coatings from a nickel-ceramic mixture / Yu. S. Chesov, E. A. Zverev, N. V. Plotnikova [et al.] // Actual Problems in Mechanical Engineering. – 2015. – No. 2. – Pp. 405-409. – EDN TZDZGL.

4 Technological features of the formation of porous functional ceramic coatings on aluminum by microarc oxidation in silicate electrolytes / M. A. Markov, A. V. Krasikov, A. D. Bykova [et al.] // Welding Production. – 2020. – No. 3. – Pp. 23-29. – EDN CQLDCX.

5 Plakhotin, A. A. Hardening of wear-resistant surfaces of forestry machine parts by plasma deposition and hardening of coatings of variable composition / A. A. Plakhotin, A. M. Kadyrmetov, D. A. Popov // Voronezh Scientific and Technical Bulletin. – 2023. – Vol. 3, No. 3(45). – Pp. 34-47. – DOI 10.34220/2311-8873-2023-3-3-34-47. – EDN IFLWNN.

6 Zarubin V. P., Kiselev V. V. Application of diamond honing to increase the wear resistance of the surfaces of fire pump shafts // Hardening Technologies and Coatings. – 2022. – Vol. 18, No. 10(214). – Pp. 451-453. – DOI 10.36652/1813-1336-2022-18-10-451-453. – EDN TLSSZL.

7 Shvetsov A. N., Skuratov D. L. Influence of the parameters of the diamond honing process on the quality of the surface layer of parts in the production of aviation equipment // Bulletin of the Moscow Aviation Institute. – 2023. – Vol. 30, No. 4. – Pp. 220-231. – EDN HLALUU.

8 Domasevich V. V., Kulgeiko M. P. On the formation of surface relief during diamond honing // Mechanics of Machines, Mechanisms, and Materials. – 2020. – No. 2(51). – Pp. 55-62. – EDN LUQCRN.

9 Ipatov A. G. Hardening and restoration of parts using short-pulse laser welding with ceramic materials / A. G. Ipatov // Selsky Mechanizator. – 2025. – No. 10. – Pp. 27-29. – DOI 10.47336/0131-7393-2025-10-27-28-29. – EDN NLESEH.

10 Ipatov A. G. Technology of combined laser welding of repair coatings with a ceramic hardening layer / A. G. Ipatov // Repair. Recovery. Modernization. – 2026. – No. 1. – Pp. 14-19. – DOI 10.31044/1684-2561-2026-0-1-14-19. – EDN NTNVSМ.

11 Physical and mechanical properties of ceramic coatings obtained by short-pulse laser welding of a boron-based powder mixture / A. G. Ipatov, M. N. Erokhin, S. P. Kazantsev [et al.] // Agroengineering. – 2023. – Vol. 25, No. 1. – Pp. 71-76.

12 Kharanzhevsky E. V., Ipatov A. G., Makarov A. V. et al. On the way to eliminating friction and wear in lubrication-free plain bearings. Sci Rep 13, 17362 (2023). <https://doi.org/10.1038/s41598-023-44702-6>.

DOI: [10.34220/2311-8873-2026-9-14](https://doi.org/10.34220/2311-8873-2026-9-14)



УДК 621.9

UDC 621.9

2.5.5 – технология и оборудование
механической и физико-технической
обработки

**МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА
ФОРМООБРАЗОВАНИЯ
МИКРОСТРУКТУРИРОВАННЫХ
ПОВЕРХНОСТЕЙ КИПЕНИЯ
МЕТОДОМ КОНЕЧНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ**

✉¹ **Каюшин Егор Сергеевич**,
студент, кафедра инструментальной техники
и технологии, МГТУ им. Н.Э. Баумана,
г. Москва, e-mail: kay.yegor@internet.ru

Зубков Николай Николаевич,
д.т.н., профессор кафедры инструменталь-
ной техники и технологии, МГТУ им. Н.Э.
Баумана, г. Москва.

Аннотация. В работе выполнено конечно-элементное моделирование процесса формирования микроструктурированных поверхностей кипения с подповерхностными полостями методом обкатывания накатным роликом оребренной поверхности, полученной деформирующим резанием. Целью исследования являлась оценка точности воспроизведения параметров получаемого микрорельефа при использовании программного комплекса *DEFORM-3D*. Показано, что расчётные значения основных геометрических параметров удовлетворительно согласуются с экспериментальными данными, а расхождение не превышает 4 %. Полученные результаты подтверждают возможность применения конечно-элементного моделирования для прогнозирования формы микроструктурированных поверхностей, предназначенных для интенсификации теплоотдачи при кипении различных жидкостей.

**MODELING OF THE FORMATION
PROCESS OF MICROSTRUCTURED
BOILING SURFACES USING THE FINITE
ELEMENT METHOD**

✉¹ **Kayushin Egor Sergeevich**,
student, department of instrumentation and tech-
nology, Bauman moscow state technical university,
Moscow, e-mail: kay.yegor@internet.ru

Zubkov Nikolai Nikolaevich,
doctor of technical sciences, professor of the de-
partment of tool technics, Bauman Moscow state
technical university, Moscow.

Annotation. The article presents finite element modeling of the process of forming microstructured boiling surfaces with subsurface cavities by the knurling method using a rolling roller on a finned surface obtained by deformational cutting. The aim of the study was to assess the accuracy of reproducing the parameters of the resulting micro-relief using the *DEFORM-3D* software package. It is shown that the calculated values of the main geometric parameters are in satisfactory agreement with the experimental data, and the discrepancy does not exceed 4 %. The obtained results confirm the possibility of using finite element modeling to predict the shape of microstructured surfaces intended for enhancing heat transfer during boiling of various liquids.

Ключевые слова: ДЕФОРМИРУЮЩЕЕ РЕЗАНИЕ, ПУЗЫРЬКОВОЕ КИПЕНИЕ, ИНТЕНСИФИКАЦИЯ ТЕПЛООБМЕНА, ПОДПОВЕРХНОСТНЫЕ ПОЛОСТИ. **Keywords:** DEFORMATION CUTTING, POOL BOILING, HEAT TRANSFER ENHANCEMENT, SUBSURFACE CAVITIES.

¹ Автор для ведения переписки

1 Состояние вопроса исследования и актуальность работы

Интенсификация теплоотдачи при кипении рабочих жидкостей на тепловыделяющих поверхностях является одной из ключевых задач при разработке компактных и высоконагруженных теплообменных аппаратов и систем охлаждения. Особый интерес представляют микроструктурированные поверхности, способные увеличивать плотность активных центров парообразования и повышать критический тепловой поток. В последние годы активно исследуются поверхности с различным микрорельефом, включая структуры, формируемые методом деформирующего резания [1, 2]. Этот метод позволяет значительно увеличивать площадь теплообмена и создавать полуоткрытые подповерхностные поры, которые эффективно функционируют в режиме кипения. Повышение эффективности достигается за счёт комбинирования предварительного оребрения и последующей пластической обработки поверхности обкатыванием накатным роликом [3, 4], что приводит к формированию пористого микрорельефа с частично перекрытыми подповерхностными полостями.

Получение заданных геометрических параметров теплообменной структуры осуществляется подбором технологических параметров накатки в ходе экспериментальных апробаций. Данный подход требует значительных материальных и временных затрат для получения заданных подповерхностных структур. Альтернативным вариантом является использование современных CAE-систем моделирования технологических процессов, основанных на методе конечных элементов [5]. Для оценки достоверности результатов моделирования необходима сравнительная количественная оценка результатов моделирования и реально получаемого макрорельефа. Ранее были проведены работы по CAE-моделированию формирования оребрения [6], включая сравнительные исследования с использованием *DEFORM-3D* и других программных комплексов [7].

Тем не менее, систематические данные о применении этих методов именно для формирования микроструктурированных поверхностей кипения на медных трубах с предварительно сформированным оребрением, а также о сопоставлении расчётной геометрии с экспериментальными результатами, практически отсутствуют.

В связи с этим настоящая работа посвящена конечно-элементному моделированию процесса формирования микроструктурированных поверхностей кипения методом обкатывания накатным роликом по оребрённым медным трубам. Основная цель исследования заключается в оценке точности воспроизведения геометрических параметров макрорельефа и проверке применимости численного моделирования для прогнозирования формы поверхностей, предназначенных для интенсификации теплоотдачи при кипении различных жидкостей.

2 Материалы и методы

Проверка адекватности полученных моделированием геометрических параметров поверхностей кипения проводилась их сравнением с реально полученной поверхностью на образце [3]. Этапы при моделировании были следующие: проектирование геометрии накатного ролика и заготовки, расположение созданных объектов в пространстве относительно друг друга, выбор инструментального материала и материала заготовки, выбор режимов накатывания (величина заглубления ролика, обороты шпинделя). Моделировался процесс накатывания при обработке чистой меди.

В качестве референсов для 3D-моделей были взяты реально полученное оребрение и реальный профиль накатного ролика. На рис. 1 представлено профилирование зуба накатного ролика по фото. Его диаметр – 19,05 мм. На рис. 2 представлено профилирование ребра из эксперимента [3] по фотографии. Шаг ребра – 0,1 мм. Восстановленная по микрофотографиям высота ребра составила 205 мкм, что согласуется с номинальным значением 220 мкм, указанным авторами. Для уменьшения машинного времени в симуляции использована не полноразмерная заготовка, а только ее участок, непосредственно участвующий в процессе деформирования накатным роликом.

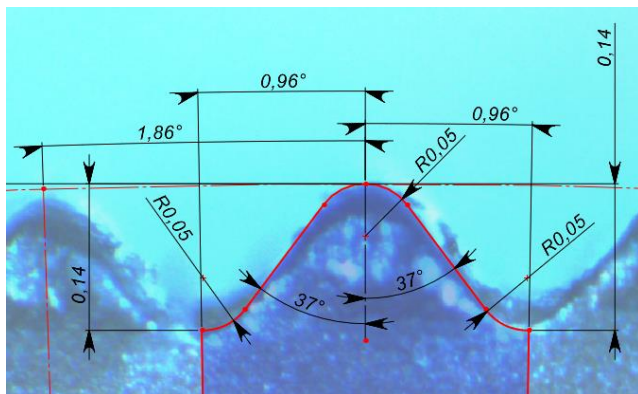


Рисунок 1 – Профилирование зуба накатного ролика

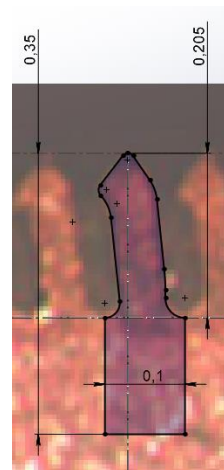


Рисунок 2 – Профилирование ребра

Накатка моделировалась как абсолютно твердое тело. Заготовка – как деформируемое. Фиксация заготовки осуществлялась по плоскости, представленной на рис. 3. Все движения были рассмотрены относительно заготовки, следовательно, движение накатного ролика было задано двумя вращениями: вокруг оси заготовки Z_1 и вокруг своей оси Z_2 . Зацепление ролика с заготовкой было рассмотрено как взаимное вращение двух дисков без проскальзывания. На рис. 4 представлена общая схема, где показаны начальные положения инструмента и заготовки, а также движения ролика, где ω_1 равна числу оборотов шпинделя в минуту, а ω_2 рассчитывается исходя из равенства линейных скоростей заготовки и ролика в точке контакта. Число оборотов шпинделя в минуту – 50 об/мин. Заглубление накатного ролика – 0,08 мм. Ось ролика расположена параллельно оси заготовки. Продольная подача не учитывалась. В процессе моделирования использование смазочно-охлаждающих жидкостей не предусматривалось. Коэффициент трения между накатным роликом и заготовкой принимался равным 0,4. Это значение является средним, если сравнивать с источниками [7, 8]. Было принято решение взять коэффициент меньше 0,5, так как в источнике [7] рассматривалось резание, где коэффициент будет больше за счет более химически активных вновь образующихся ювенильных поверхностей. Размер конечных элементов в сетке принят в диапазоне от 0,006 мм до 0,012 мм.

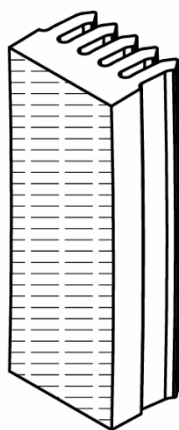


Рисунок 3 – Фиксация заготовки

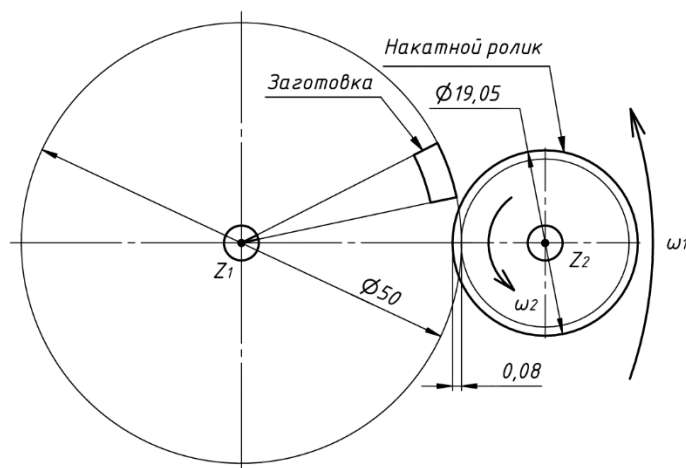


Рисунок 4 – Схема движения накатного ролика

В дальнейшем было произведено сравнение полученной геометрии микроструктурированной поверхности со шлифом по дну впадины, полученным в результате эксперимента [3].

3 Результаты исследований

В результате сравнения полученной расчетной геометрии и экспериментальных данных выявлено максимальное расхождение по геометрическим параметрам в 4 %. На рисунках 5, 6 и 7 показано сравнение полученной 3D модели с фотографиями. В табл. 1 представлены измеренные величины.

Таблица 1 – Сравнение полученных величин

Величина	Эксперимент, мкм	DEFORM-3D, мкм	Расхождение, %
Глубина впадины	134	134	0
Ширина ребра на высоте 67 мкм	72	75	+4
Шаг ребра	100	100	0

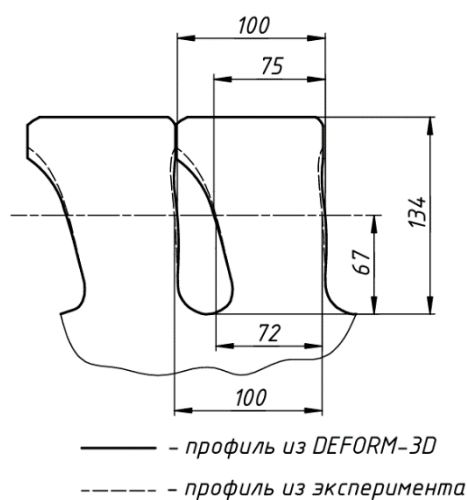
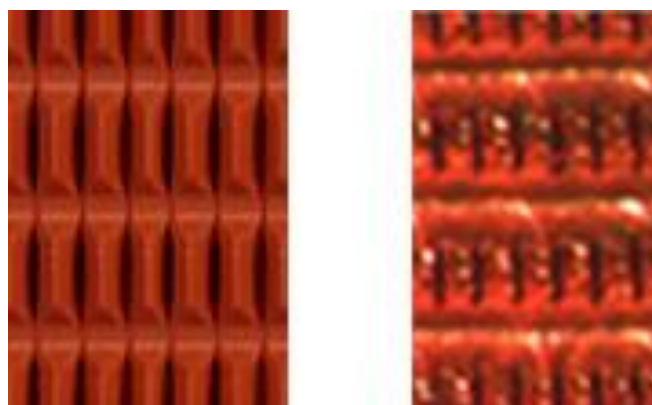
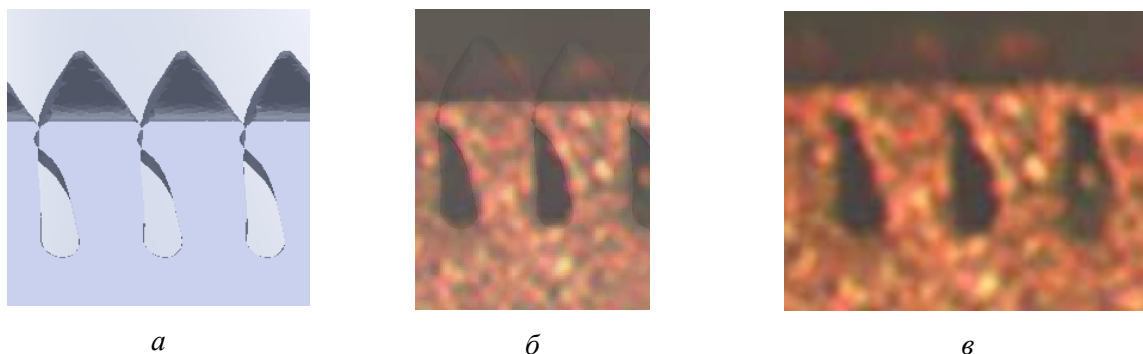


Рисунок 5 – сечение по дну впадины, сравнение профилей (схематично)



а
 а – DEFORM-3D; б – фотография

Рисунок 6 – Вид, параллельный осевой плоскости



a – *DEFORM-3D*; *б* – наложение профиля из *DEFORM-3D* на фотографию; *в* – фотография
Рисунок 7 – Сечение по дну впадины, сравнение профилей по микрофотографии

4 Обсуждение и заключение

Полученные результаты показали, что использование программного комплекса *DEFORM-3D* позволяет корректно воспроизводить основные закономерности пластического течения материала и формирование микрогеометрии рельефа при заданных технологических параметрах обработки. Сопоставление расчётных данных с экспериментальными наблюдениями свидетельствует о качественном соответствии моделируемой и реальной геометрии поверхности, что подтверждает адекватность выбранной модели и корректность принятых допущений.

Таким образом, показано, что конечно-элементное моделирование в *DEFORM-3D* является эффективным и достоверным инструментом для анализа и прогнозирования процесса формирования микроструктурированных поверхностей кипения и может быть использовано на этапе инженерного проектирования теплообменных поверхностей без необходимости выполнения большого объёма трудоёмких экспериментальных исследований.

Список литературы

- 1 Аксянов, Р. А. Обобщение экспериментальных данных по теплоотдаче и критическим тепловым потокам на микроструктурированных поверхностях при кипении различных жидкостей [Текст] / Р. А. Аксянов, Ю. С. Коханова, Е. С. Куимов, Р. А. Лэй, И. А. Попов // Тепловые процессы в технике. – 2020. – Т. 12, № 7. – С. 301–313. – DOI: 10.34759/tpt-2020-12-7-301-313.
- 2 И.А. Попов, А.В. Щелчков, Ю.Ф. Гортышов, Н.Н. Зубков. Интенсификация теплоотдачи и критические тепловые потоки при кипении на поверхностях с микрооребрением // Теплофизика высоких температур. – 2017. – Т. 55, № 4. – С. 537–546. DOI: 10.7868/S0040364417030206.
- 3 Volodin O., Pecherkin N., Pavlenko A., Zubkov N. Heat Transfer and Crisis Phenomena at Boiling of Refrigerant Films Falling down the Surfaces Obtained by Deformational Cutting // Journal of Enhanced Heat Transfer. – 2018. – Vol. 25, No. 4–5. – P. 317–329. DOI: 10.1615/JEnhHeatTransf.2018025345
- 4 Das M.K., Moharana S., Laskar N., Pecherkin N.I., Pavlenko A.N., Volodin O.A. Heat transfer enhancement of different ribbing pitched semi-closed microstructure tube bundles fabricated by deformational cutting method // International Journal of Thermofluids. – 2024. – Vol. 22. – Art. 100695. DOI: 10.1016/j.ijft.2024.100695
- 5 Astakhov V.P., Outeiro J.C. Metal Cutting Mechanics, Finite Element Modelling // Machining: Fundamentals and Recent Advances / ed. by J. Paulo Davim. – London : Springer, 2008. — P. 1–40. DOI: 10.1007/978-1-84800-213-5
- 6 Битюцкая, Ю. Л. Получение штырьковых теплообменных структур повышенной теплогидравлической эффективности методом деформирующего резания : автореферат дис. кандидата технических наук : 05.02.07 / Битюцкая Юлия Леонидовна; Место защиты: ФГБОУ ВО Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана (национальный исследовательский университет). – Москва, 2019. – 16 с.

7 Зубков Н.Н., Цуканов Д.В., Бузаев Д.А., Битюцкая Ю.Л. САЕ-моделирование формирования оребренных структур, получаемых методом деформирующего резания // Воронежский научно-технический вестник. – 2022. – № 2(40). – С. 5–10.

8 Nuruzzaman D.M., Chowdhury M.A. Friction coefficient and wear rate of copper and aluminum sliding against mild steel // International Transaction Journal of Engineering, Management, & Applied Sciences & Technologies. – 2013. – Vol. 4, No. 2. – P. 171–182.

References

1 Aksyanov, R. A. Generalization of experimental data on heat transfer and critical heat fluxes on microstructured surfaces during boiling of various liquids [Text] / R. A. Aksyanov, Yu. S. Kokhanova, E. S. Kuimov, R. A. Lei, I. A. Popov // Thermal Processes in Engineering. – 2020. – Vol. 12, No. 7. – P. 301–313. – DOI: 10.34759/tpt-2020-12-7-301-313.

2 I.A. Popov, A.V. Shchelchkov, Yu.F. Gortyshov, N.N. Zubkov. Intensification of heat transfer and critical heat fluxes during boiling on micro-finned surfaces // High Temperature. – 2017. – Vol. 55, No. 4. – P. 524–533. (Note: English translation page numbers may differ slightly from the original Russian) DOI: 10.1134/S0018151X17030164 (Note: DOI for the English version is provided, corresponding to the Russian DOI: 10.7868/S0040364417030206)

3 Volodin O., Pecherkin N., Pavlenko A., Zubkov N. Heat Transfer and Crisis Phenomena at Boiling of Refrigerant Films Falling down the Surfaces Obtained by Deformational Cutting // Journal of Enhanced Heat Transfer. – 2018. – Vol. 25, No. 4–5. – P. 317–329. DOI: 10.1615/JEnhHeatTransf.2018025345

4 Das M.K., Moharana S., Laskar N., Pecherkin N.I., Pavlenko A.N., Volodin O.A. Heat transfer enhancement of different ribbing pitched semi-closed microstructure tube bundles fabricated by deformational cutting method // International Journal of Thermofluids. – 2024. – Vol. 22. – Art. 100695. DOI: 10.1016/j.ijft.2024.100695

5 Astakhov V.P., Outeiro J.C. Metal Cutting Mechanics, Finite Element Modelling // Machining: Fundamentals and Recent Advances / ed. by J. Paulo Davim. – London : Springer, 2008. — P. 1–40. DOI: 10.1007/978-1-84800-213-5

6 Bityutskaya, Yu. L. Production of pin-type heat exchange structures of increased thermal-hydraulic efficiency by the deformational cutting method : abstract of the dissertation of the Candidate of Technical Sciences : 05.02.07 / Bityutskaya Yuliya Leonidovna; Defense place: Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education "Bauman Moscow State Technical University (National Research University)". — Moscow, 2019. — 16 p.

7 Zubkov N.N., Tsukanov D.V., Buzaev D.A., Bityutskaya Yu.L. CAE-modeling of the formation of finned structures obtained by the deformational cutting method // Voronezh Scientific and Technical Bulletin. – 2022. – No. 2(40). – P. 5–10.

8 Nuruzzaman D.M., Chowdhury M.A. Friction coefficient and wear rate of copper and aluminum sliding against mild steel // International Transaction Journal of Engineering, Management, & Applied Sciences & Technologies. – 2013. – Vol. 4, No. 2. – P. 171–182.

© Каюшин Е. С., Зубков Н. Н., 2026

DOI: 10.34220/2311-8873-2026-15-21



УДК 621

UDC 621

2.5.6 – технология машиностроения

ОСОБЕННОСТИ НАНЕСЕНИЯ ТВЁРДОСМАЗОЧНЫХ ПОКРЫТИЙ МАГНИТОДИНАМИЧЕСКИМ МЕТОДОМ

Лебедев Валерий Александрович,
к.т.н., профессор, кафедра «Технология
машиностроения», Донской государственный
технический университет, г. Ростов-на-Дону.

✉¹ **Райа Ахмад**,
аспирант, кафедра «Технология машино-
строения», Донской государственный тех-
нический университет, г. Ростов-на-Дону.

Аннотация. В статье рассмотрен механизм нанесения твёрдосмазочных покрытий магнитодинамическим методом. Показано, что основным энергетическим фактором, оказывающим комплексное воздействие на весь процесс, является неоднородное вращающееся электромагнитное поле. Ключевым рабочим элементом выступают ферромагнитные неравноосные инденторы цилиндрической формы, формирующие магнитовибрирующий слой. Описан механизм перевода технологической среды покрытия в псевдооживлённое состояние. На основе анализа исследований в области вибрационных механохимических покрытий сформулированы основные этапы формирования покрытия. Установлены модели, которые должны быть положены в основу аналитического описания особенностей и как следствие управления процессом твёрдосмазочных покрытий магнитодинамическим методом.

Ключевые слова: ТВЁРДОСМАЗОЧНОЕ ПОКРЫТИЕ, МАГНИТОДИНАМИЧЕСКИЙ МЕТОД, ВРАЩАЮЩЕЕСЯ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОЕ ПОЛЕ, ФЕРРОМАГНИТНЫЕ НЕРАВНООСНЫЕ ИНДЕНТОРЫ.

FEATURES OF APPLYING SOLID LUBRICANT COATINGS BY THE MAGNETODYNAMIC METHOD

Lebedev Valery Alexandrovich,
candidate of technical sciences, professor,
department of mechanical engineering technology,
Don state technical university, Rostov-on-Don.

✉¹ **Raya Ahmad**,
postgraduate student, department of mechanical
engineering technology, Don state technical
university, Rostov-on-Don.

Annotation. This article examines the mechanism for applying solid lubricant coatings using the magnetodynamic method. It is shown that the primary energy factor, which has a complex effect on the entire process, is a non-uniform rotating electromagnetic field. The key working element is ferromagnetic, non-equiaxed, cylindrical indenters that form a magnetically vibrating layer. The mechanism for converting the coating process medium into a fluidized state is described. Based on an analysis of research in the field of vibration-assisted mechanochemical coatings, the main stages of coating formation have been formulated. Models have been established that should form the basis for an analytical description of the characteristics and, consequently, for the control of the process of applying solid lubricant coatings using the magnetodynamic method.

Keywords: SOLID LUBRICANT COATING, MAGNETODYNAMIC METHOD, ROTATING ELECTROMAGNETIC FIELD, FERROMAGNETIC NONEQUIAXIAL INDENTERS.

¹ Автор для ведения переписки

1 Состояние вопроса исследования и актуальность работы

Твердосмазочные покрытия на основе порошкообразных материалов (ТСП) со слоистой структурой, нанесенные на металлические поверхности, широко применяются в технологии изготовления деталей для улучшения технологических характеристик, снижения трения, повышения надежности, в том числе долговечности, машин и механизмов.

В качестве компонента для формирования ТСП чаще всего используют сульфиды различных материалов, селениды, теллуриды, хлориды, фториды, иониды, оксиды металлов и др. Большой интерес в этом отношении представляет дисульфид молибдена (MoS_2), обладающий слоистой структурой, в которой есть "прочные" и "плотные" слои, в достаточно большой степени удаленные друг от друга. В слое, покрывающем поверхность трения, имеются сильные связи, тогда как между слоями связь слабая. Такие свойства покрытия обеспечивают "легкое" скольжение трущихся поверхностей относительно друг друга, способствуя снижению коэффициента трения и повышению износостойкости поверхностей деталей, входящих в пары трения различных механизмов и машин.

Методы нанесения ТСП разнообразны и обусловлены эксплуатационными условиями трения и изнашивания узлов и механизмов, конструкциями покрываемых деталей, необходимыми техническими ресурсами. Анализ работ, характеризующих условия образования ТСП и особенности взаимодействия обрабатывающей среды с поверхностью обрабатываемых деталей, показал, что перспективным направлением является формирование механохимических ТСП с использованием ударно-импульсных эффектов [1, 2]. Опыт, накопленный в ДГТУ, показал, что механическая активация процессов нанесения покрытия путём ударно-импульсного воздействия частиц (гранул) рабочей среды в условиях виброволновых технологических систем позволяет повысить эффективность процесса и получить дополнительные технико-экономические преимущества: производить обработку деталей в больших количествах; обеспечить равномерное и всестороннее воздействие на поверхности различной кривизны. Наряду с отмеченными преимуществами, как показали исследования, энергосиловые возможности этого метода, составляющие по силе интервал порядка $3,0 \dots 12$ кГс, не обеспечивают формирование на поверхности достаточно прочного покрытия. Это сужает область его практического применения и, как следствие, определяет актуальность исследований в этом направлении.

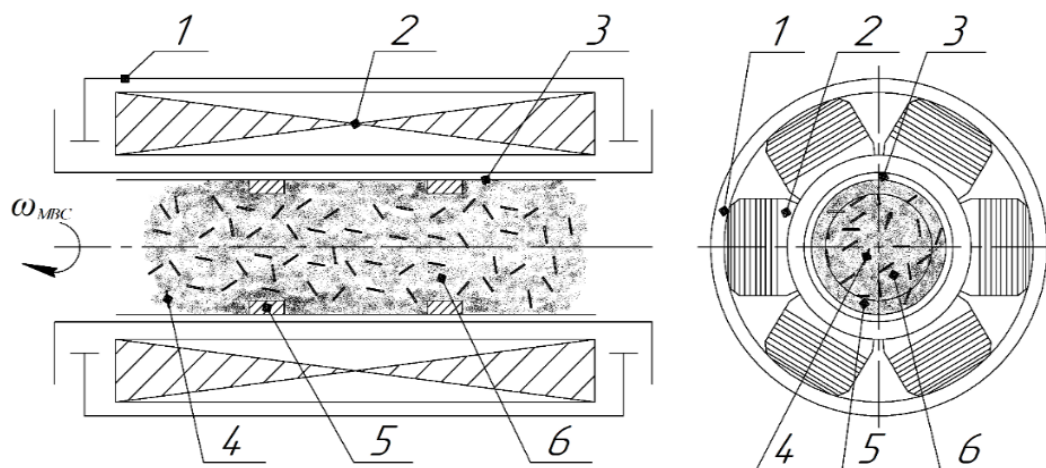
В качестве решения этой задачи предлагается рассмотреть к использованию магнитодинамический метод нанесения твердосмазочных покрытий в устройствах с вращающимся электромагнитным полем [3-6]. Однако для практической реализации этого метода требуется разработка инженерной методики, позволяющей прогнозировать рациональный выбор основных параметров и режимов обработки, а также управлять этими параметрами для получения качественных твердосмазочных покрытий с учетом условий их эксплуатации.

Целью настоящей работы является разработка технологических основ нанесения твердосмазочных покрытий магнитодинамическим методом в устройствах с вращающимся электромагнитным полем на основе анализа физико-механических процессов, кинетики движения рабочих тел и механизма формирования покрытия.

2 Материалы и методы

На рис. 1 представлена схема магнитодинамического метода нанесения покрытий, реализуемого с использованием устройства с вращающимся электромагнитным полем.

Процесс нанесения твердосмазочных покрытий происходит за счёт воздействия вращающегося электромагнитного поля на ферромагнитные неравноосные инденторы приходящие в сложное, хаотичное движение, создавая своеобразный магнитовибрирующий слой (МВС), вращающийся с определенной угловой скоростью, от действия которых вносимые в такие устройства твердосмазочные материалы, переходя во взвешенное хаотическое состояние попадают на поверхность детали и происходит их внедрение за счёт ударно импульсного воздействия инденторов [3, 7-9].



1 – корпус; 2 – индуктор; 3 – рабочее пространство; 4 – инденторы; 5 – обрабатываемые детали, 6 – среда покрытия (дисульфид молибдена).

Рисунок 1 – Схема магнитодинамического способа нанесения покрытий

В процессе обработки детали могут находиться в рабочей зоне устройства или в свободном состоянии, или в закреплённом относительно магнитовибрирующего слоя, или осуществлять относительное осевое перемещение вдоль рабочей зоны устройства. По форме рабочей зоны различают устройства с цилиндрической рабочей камерой и винтообразной. Винтообразное исполнение рабочей зоны устройства позволяет активизировать процесс перехода частиц твердосмазочного материала покрытия, не обладающего магнитными свойствами во взвешенное псевдооживлённое состояние и, как следствие, интенсифицировать процесс нанесения покрытия.

3 Результаты исследований

Технологическая система (ТС), реализующаяся магнитодинамический метод нанесения покрытий, как представлено на рис. 2, обеспечивает взаимосвязь между входными и выходными параметрами. К входным параметрам ТС нанесения покрытия магнитодинамическим способом относятся:

- деталь, характеризующаяся показателями качества поверхности и физико-механическими свойствами материала, габаритными размерами изделия;
- технологическая среда покрытия, определяющая вид наносимого покрытия в процессе обработки;
- средства механической активации процесса, включающая ферромагнитные неравноосные инденторы, обеспечивающие нанесение покрытия на поверхность в состоянии магнитовибрирования, и винтовой ротор, формирующий форму поверхности рабочей зоны устройства и активирующий процесс псевдооживления технологической среды покрытия и энергетического состояния магнитовибрирующего слоя;
- технологическое оборудование, создающее вращающееся электромагнитное поле.

В качестве выходных параметров ТС выступают: параметры качества покрытия; производительность процесса; эксплуатационные свойства покрытия; технико-экономические показатели процесса. Установлено, что рабочий процесс представляет собой комплекс явлений и эффектов, протекающих в зоне устройства от воздействий вращающегося электромагнитного поля, проиллюстрированный на рис. 2.

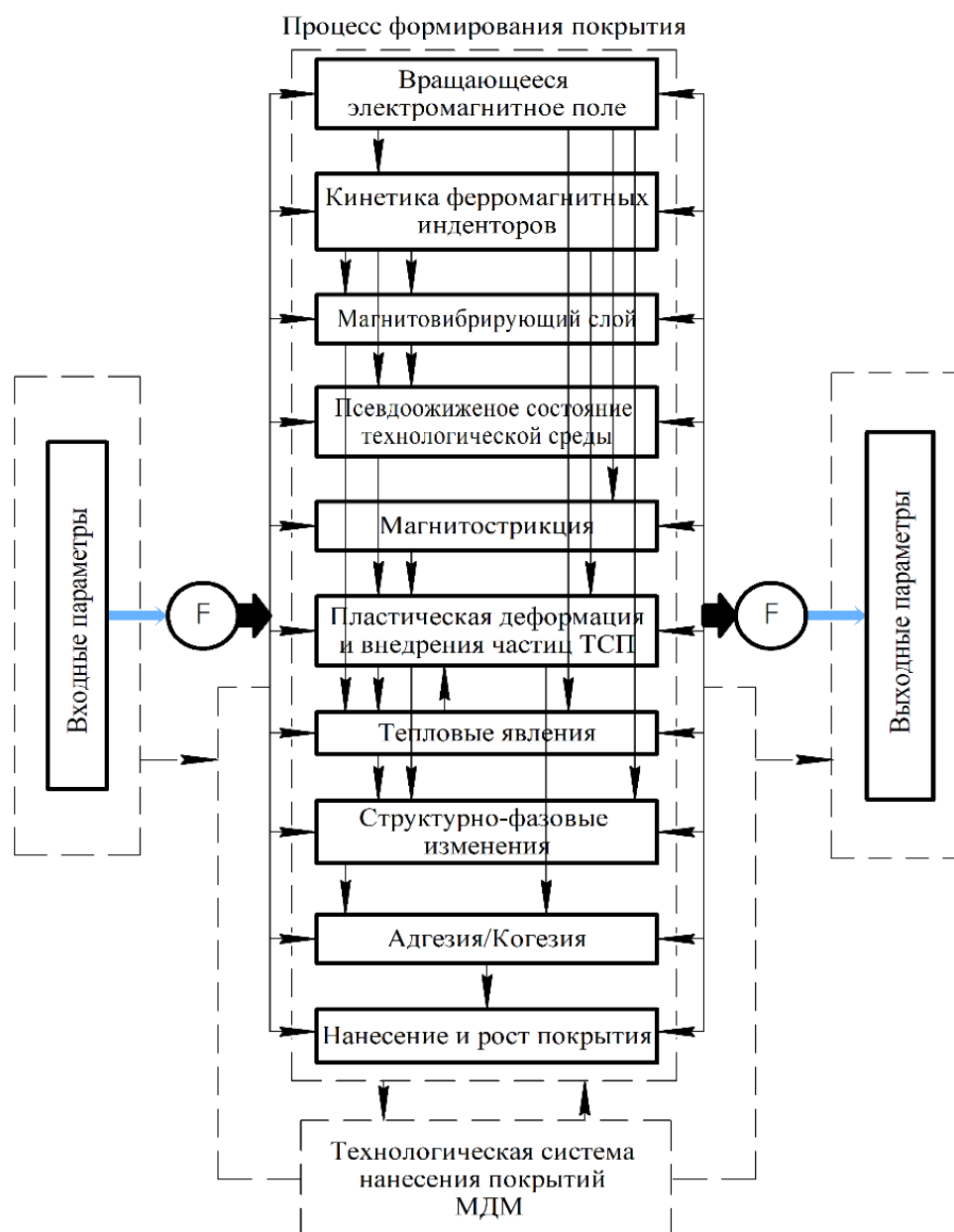


Рисунок 2 – Физические явления и эффекты, определяющие процесс нанесения твёрдосмазочного покрытия магнитодинамическим методом

Рабочий процесс нанесения покрытия является связующим звеном входных и выходных параметров ТС и представляет собой механохимический синтез явлений и эффектов, протекающих в рабочей зоне устройства под воздействием вращающегося электромагнитного поля, обеспечивающих нанесение покрытия на поверхности обрабатываемых деталей. Комплекс взаимосвязанных физических явлений и эффектов, протекающих в поверхностном слое детали, проиллюстрирован на рис. 2.

Основным энергетическим фактором магнитодинамического метода, оказывающим комплексное воздействие на весь процесс нанесения покрытия, является неоднородное вращающееся электромагнитное поле, от напряжённости, градиента и индукции которого зависит эффективность протекания процесса.

Качество наносимого на поверхность детали твёрдосмазочного покрытия главным образом определяется его адгезионными и когезионными характеристиками, которые обуслов-

лены силами межмолекулярного взаимодействия как в кристаллической структуре среды покрытия, так и в детали, и зависят от степени их сближения [3]. Для повышения степени сближения среды покрытия и металла на макро/нано уровне и как следствие повышение адгезионной прочности покрытия возможно с помощью применения высокого внешнего локального силового воздействия, которое позволит осуществить не только пластическую деформацию поверхности металла, но и внедрение в неё мелкодисперсных частиц технологической среды покрытия. В этом плане магнитодинамический метод по сравнению с вибрационным методом, имеет достаточно широкие преимущества из-за сопровождающих его эффективную реализацию физических явлений и процессов: магнитных, тепловых, структурно-фазовых, магнитострикционных, механических (рис. 2).

Ключевым рабочим элементом метода, непосредственно осуществляющим технологический эффект нанесения покрытия на поверхность, выступают неравноосные инденторы, обладающие ферромагнитными свойствами и имеющие цилиндрическую форму. Энергетическое состояние инденторов и кинетика их движения в рабочей зоне устройства определяется топологией и характеристиками вращающегося электромагнитного поля, а также формой рабочей зоны устройства.

Формирующийся из инденторов магнитовибрирующий слой позволяет перевести технологическую среду покрытия, состоящую из мелкодисперсных частиц, не обладающих магнитными свойствами, из состояния покоя в псевдоожженное состояние. Находясь в этом состоянии частицы технологической среды покрытия при попадании между двумя соударяющимися инденторами подвергаются дальнейшему измельчению, а при попадании между индентором, соударяющимся с обрабатываемой поверхностью, вдавливаются в неё и тем самым формируют покрытие.

Процесс внедрения частиц технологической среды покрытия в поверхность металла сопровождается пластической деформацией, в результате чего происходит модификация поверхностного слоя, обусловленная структурно-фазовыми превращениями, изменяются его геометрические и физико-механические параметры. Кроме того следует подчеркнуть, что на эффективность этих процессов формирования покрытия в условиях неоднородного магнитного поля существенное влияние оказывают тепловые эффекты, способствующие возрастанию скорости движения молекул в локальной зоне контактного взаимодействия, а также магнитострикционные процессы, связанные с изменением взаимосвязей между атомами в кристаллической решетке, свойственные всем материалам, что характеризует изменение состояния намагниченности тела, его объёма и линейных размеров [7].

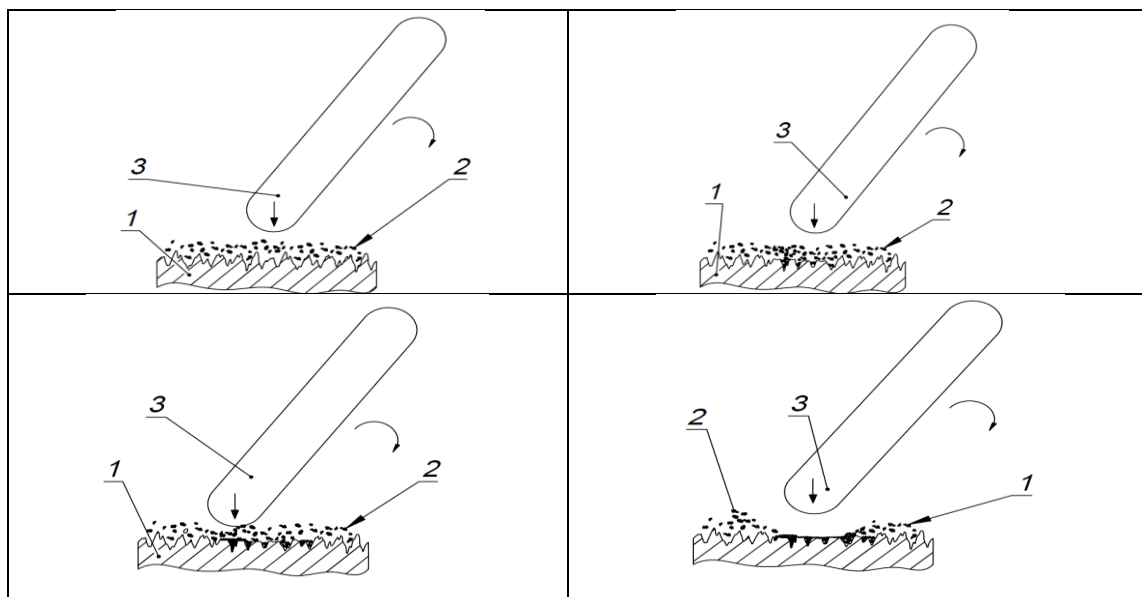
Вышеизложенный анализ механизма образования слоя твёрдой смазки слоистой структуры позволяет представить структурно-логическую последовательность формирования ТСП дисульфида молибдена магнитодинамическим методом следующим образом (рис. 3):

1. Механический контакт и адсорбция частиц MoS_2 . В момент приложения внешней нагрузки, благодаря силе соударения индентора с поверхностью обрабатываемого материала, происходит упругопластическая деформация в зоне контакта. За счёт сближения наносимого покрытия с деталью частицы порошка адсорбируются на поверхности металла.

2. Активация поверхностного слоя металла. Активация поверхности осуществляется в результате пластического деформирования и увеличения плотности дислокаций, разрушения оксидных плёнок и образования ювенильных участков поверхности, увеличения площади контакта, повышение температуры в зоне соударения (температурная вспышка).

3. Образование граничного слоя. Этот этап осуществляется вследствие измельчения кристаллитов MoS_2 , разрушения ими окисных плёнок металла во впадинах микрорельефа, внедрении частиц порошка и адсорбции их к поверхностному слою активированного металла.

4. Образование слоя покрытия. Этот этап характеризуется уплотнением частиц нанесённого покрытия, измельчением кристаллитов, слипанием их друг с другом, образованием сплошного покрытия.



1 – обрабатываемая поверхность, 2 – среда покрытия (дисульфид молибдена),
3 – неравноосные инденторы

Рисунок 3 – Последовательность формирования твердосмазочного покрытия магнитодинамическим методом

5. Формирование поверхностного слоя покрытия. В результате скольжения частиц рабочей среды (шаров) относительно обрабатываемой поверхности частицы порошка ориентируются базовыми плоскостями параллельно поверхности трения

4 Обсуждение и заключение

Проведенный анализ физических явлений и эффектов процесса формирования твердосмазочных покрытий магнитодинамическим методом и его результаты служат исходной теоретической основой для разработки технологических систем данного процесса и их структуры с учетом его особенностей и сочетания различных материалов основы и покрытий, режимов, конструктивных схем и параметров. Решение данных задач и дальнейшее развитие теоретического описания процесса обоснованно приводит к необходимости разработки и конкретизации физико-математических моделей составляющих исследуемого процесса, которые включают:

- модель магнитовибрирующего слоя, описывающая энергетическое состояние инденторов в зависимости от топологии и характеристик вращающегося электромагнитного поля;
- модель процесса пластической деформации и внедрения среды покрытия в поверхность детали, определяющая величину энергии, накапливаемой в локальных микрообъемах на границе «покрытие-подложка», модифицированного в процессе ударно-импульсного контактного взаимодействия с поверхностью частиц активирующей среды, среды покрытия, поверхностного слоя;
- модель влияния магнитного поля на процесс нанесения покрытий, устанавливающая степень влияния на изменение величины энергии, накапливаемой в локальных микрообъемах на границе «покрытие-подложка», модифицированного в процессе нанесения покрытия поверхностного слоя, таких эффектов как тепловой и магнитострикционный;
- энергетическая модель управления процессом нанесения твердосмазочного покрытия, определяющая энергетическое состояние локальных микрообъемов на границе «покрытие – подложка», сформированных в процессе нанесения покрытий магнитодинамическим методом с учетом механических, тепловых и магнитных воздействий, обеспечивающих его реализацию;

– модель адгезионной прочности твердосмазочного покрытия, позволяющая количественно оценить энергию адгезии двух твердых тел, вступающих в адгезионный контакт.

Разработка общей физико-математической модели процесса нанесения твёрдосмазочных покрытий магнитодинамическим методом позволит глубже теоретически изучить данный процесс, определять оптимальные параметры для их экспериментального уточнения. Это особенно важно для разработки технологического обеспечения нанесения твердосмазочных покрытий на трибоповерхности, работающие в условиях сухого трения.

Список литературы

- 1 Бабичев, А.П. Вибрационные механохимические покрытия [Текст] / А.П. Бабичев, В.В. Иванов. - Саарбрюкен, Германия: LAP LAMBERT Academic Publishing, 2014. – 119 с.
- 2 Бабичев, А.П. Основы вибрационной технологии [Текст] / А.П. Бабичев. - Ростов-на-Дону: Издательский центр ДГТУ, 2008. – 694 с.
- 3 Болога, М.К. Магнитооживление во вращающемся магнитном поле. [Текст] / М.К. Болога, И.Ф. Марта // Магнитная гидродинамика. – 1988. – № 3. – С. 103-108.
- 4 Егорова С.И. Магнитовибрационное оживление. [Текст] / С.И. Егорова - Ростов-на-Дону.: ДГТУ, 2009. – 16 с.
- 5 Лебедев В.А. Исследование процесса переработки конгломератов шлифовального шлама в устройствах с вращающимся электромагнитным полем [Текст] / В.А. Лебедев, А.А. Ширин, Н.С. Коваль, Ю.М. Вернигоров. // Advanced Engineering Research. – 2022. – Т. 22. – № 4. – С. 338–345.
- 6 Лебедев, В.А. Технологическое обеспечение переработки шламовых отходов шлифовального производства с применением электромагнитного поля [Текст] / В.А. Лебедев, А.А. Ширин, Н.С. Коваль, Ю.М. Вернигоров. // Воронежский научно-технический Вестник. – 2022. – Т. 2. № 2 (40). – С. 30-37.
- 7 Лебедев, В.А. Упрочнение длинномерных деталей во вращающемся электромагнитном поле [Текст] / В.А. Лебедев, Ю.М. Вернигоров, А.А. Кочубей. - Ростов-на-Дону.: ДГТУ, 2018. – 135 с.
- 8 Лебедев, В.А. Энергетические аспекты отделочно-упрочняющей обработки деталей в условиях вращающегося электромагнитного поля [Текст] / В.А. Лебедев, Ю.М. Вернигоров, А.А. Кочубей. // Научные технологии в машиностроении - Ростов-на-Дону, 2016. – С. 35-42.
- 9 Логвиненко, Д.Д. Интенсификация технологических процессов в аппаратах с вихревым слоем [Текст] / Д.Д. Логвиненко, О.П. Щеляков. - Киев.: Техника, 1976. – 143 с.

References

- 1 Babichev, A.P. Vibration Mechanochemical Coatings [Text] / A.P. Babichev, V.V. Ivanov. - Saarbrücken, Germany: LAP LAMBERT Academic Publishing, 2014. - 119 p.
- 2 Babichev, A.P. Fundamentals of Vibration Technology [Text] / A.P. Babichev. - Rostov-on-Don: DSTU Publishing Center, 2008. - 694 p.
- 3 Bologa, M.K. Magnetic Fluidization in a Rotating Magnetic Field. [Text] / M.K. Bologa, I.F. Marta // Magnetnaya Hydrodynamics. - 1988. - No. 3. - pp. 103–108.
- 4 Egorova S.I. Magneto-vibrational liquefaction. [Text] / S.I. Egorova - Rostov-on-Don.: DSTU, 2009. - 16 p.
- 5 Lebedev V.A. Study of the process of processing conglomerates of grinding slurry in devices with a rotating electromagnetic field [Text] / V.A. Lebedev, A.A. Shirin, N.S. Koval, Yu.M. Vernigorov. // Advanced Engineering Research. - 2022. - Vol. 22. No. 4. - P. 338–345.
- 6 Lebedev, V.A. Technological Support for the Processing of Slurry Waste from Grinding Production Using an Electromagnetic Field [Text] / V.A. Lebedev, A.A. Shirin, N.S. Koval, Yu.M. Vernigorov. - // Voronezh Scientific and Technical Bulletin. - 2022. - Vol. 2. No. 2 (40). - P. 30–37.
- 7 Lebedev, V.A. Strengthening of Long Parts in a Rotating Electromagnetic Field [Text] / V.A. Lebedev, Yu.M. Vernigorov, A.A. Kochubey. - Rostov-on-Don.: DSTU, 2018. - 135 p.
- 8 Lebedev, V.A. Energy aspects of finishing and hardening treatment of parts under conditions of a rotating electromagnetic field [Text] / V.A. Lebedev, Yu.M. Vernigorov, A.A. Kochubey. // Science-intensive technologies in mechanical engineering - Rostov-on-Don, 2016. - P. 35–42.
- 9 Logvinenko, D.D. Intensification of technological processes in devices with a vortex layer [Text] / D.D. Logvinenko, O.P. Shchelyakov. - Kyiv.: Tekhnika, 1976. - 143 p.

DOI: 10.34220/2311-8873-2026-22-27



УДК 621.9.047

UDC 621.9.047

2.5.6 – технология машиностроения

**ВЫРАВНИВАНИЕ ИСХОДНОЙ
НЕРАВНОМЕРНОСТИ ПРИПУСКА
ДЛЯ ЭЛЕКТРОХИМИЧЕСКОЙ
РАЗМЕРНОЙ ОБРАБОТКИ
ПРИ ДИСКРЕТНОЙ ПОДАЧЕ
ЭЛЕКТРОДА-ИНСТРУМЕНТА**

**ALIGNMENT OF THE INITIAL
UNEVENNESS OF THE ALLOWANCE
FOR ELECTROCHEMICAL
DIMENSIONAL MACHINING
WITH DISCRETE FEED OF THE
TOOL ELECTRODE**

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

✉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

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.

Падурец Анна Александровна,
магистрант 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.

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.

Аннотация. В статье рассматривается про-
блема прогнозирования распределения при-
пусков в процессе электрохимической раз-
мерной обработки, учитывающая неравно-
мерность припуска на заготовке. Предлага-
ется математическая модель выравнивания
припусков на деталях. Результаты теоретиче-
ского исследования удовлетворительно со-
гласуются с экспериментальными данными.

Annotation. This article examines the problem of
predicting the distribution of allowances during
electrochemical dimensional machining, taking
into account the unevenness of the allowance on the
workpiece. A mathematical model for equalizing
allowances on parts is proposed. The results of the
theoretical study are in satisfactory agreement with
experimental data.

Ключевые слова: ЭЛЕКТРОХИМИЧЕСКАЯ РАЗМЕРНАЯ ОБРАБОТКА, ДИСКРЕТНАЯ ПОДАЧА ЭЛЕКТРОДА-ИНСТРУМЕНТА, ВЫРАВНИВАНИЕ ПРИПУСКА.

Keywords: ELECTROCHEMICAL DIMENSIONAL MACHINING, DISCRETE FEED OF THE TOOL ELECTRODE, ALLOWANCE ALIGNMENT.

¹ Автор для ведения переписки

1 Состояние вопроса исследования и актуальность работы

При электрохимической размерной обработке (ЭХРО) заготовок, полученных методом литья или горячей штамповки, существенное влияние на точность формообразования оказывает погрешность, определяемая исходной неравномерностью припуска заготовки [1]. Уменьшение ее величины достигается, главным образом, ведением процесса анодного растворения на малых межэлектродных зазорах (МЭЗ), применением пассивирующих электролитов [2, 3] и повышением качества исходных заготовок [4]. Реализация перечисленных факторов связана, как правило, с ухудшением экономических показателей внедряемого процесса ЭХРО [5]. Поэтому наличие возможности математического анализа погрешностей, определяемых неравномерностью припуска, позволяет путем варьирования технологических параметров ЭХРО проектировать наиболее оптимальный технологический процесс изготовления детали [6]. Существующие математические модели [7-12] представляют кинетику выравнивания припуска на деталях в зависимости или от наперед заданной постоянной, или от изменяющейся по определенному закону скорости движения электрода-инструмента (ЭИ).

Для схемы ЭХРО с дискретной подачей ЭИ, т.е. с периодической корректировкой МЭЗ путем касания электродов и отвода их на постоянную величину a , соответствующая модель отсутствует. Создание математической модели для данной схемы обработки усложняется тем, что подача ЭИ зависит от распределения припуска после каждого цикла анодного растворения металла.

2 Материалы и методы

Математическое представление выравнивания припуска при дискретной подаче ЭИ сводится к последовательному определению [13]:

- точки касания ЭИ с обрабатываемой поверхностью;
- расстояние ЭИ до своего конечного положения S ;
- величин МЭЗ в точках β_m , $m = 1, 2, \dots, n$ (β_m – угол между направлением подачи ЭИ и нормалью к поверхности детали в точке m);
- съема металла при полученном распределении припусков z_m .

Пусть поверхность детали определена точками M_m^0 , координаты которых заданы системой центров кривизны C_m , системой радиусов кривизны R_m , углами β_m и координатами точек сопряжения B_m (рис. 1).

$$\overline{M_m^0}(\beta) = C_m + R_m e^{i\beta}. \quad (1)$$

В установившемся режиме при идеальном процессе МЭЗ определяются по формуле:

$$a_n = \frac{a}{\cos \beta}, \quad (2)$$

где a – величина лобового зазора, т. е. зазора на участке $\beta = 0$.

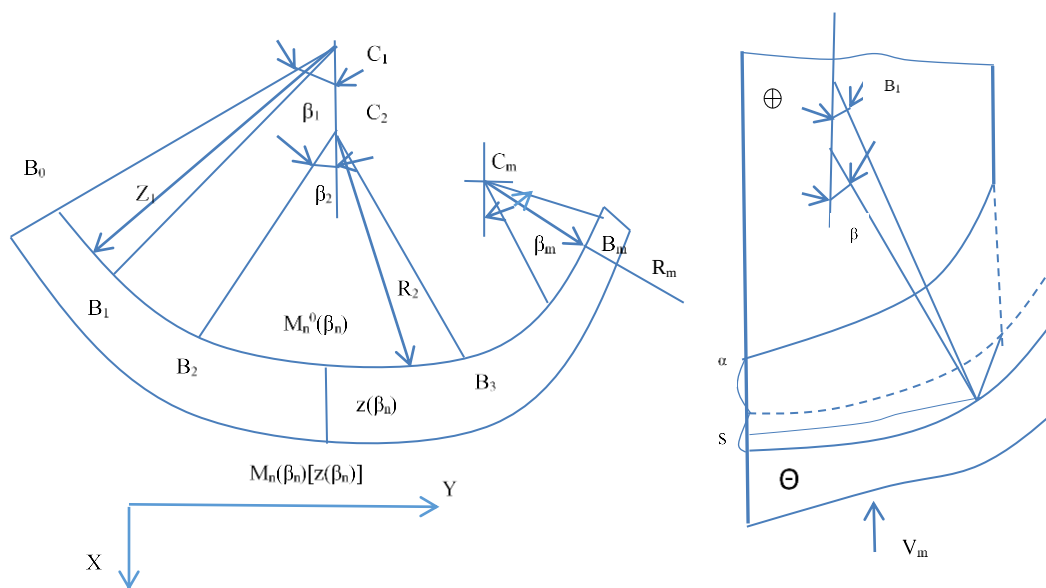


Рисунок 1 – Схема электрохимической ячейки

Соответственно координаты точек ЭИ в конечном положении определяются как

$$\overline{N}_p^0(\beta) = \overline{M}_m^0(\beta) + \frac{a}{\cos \beta} \cdot e^{i\beta}. \quad (3)$$

Координаты точек профиля исходной заготовки с припуском (припуск по нормали к профилю) представляются как:

$$\overline{M}_m(\beta; z) = \overline{M}_m^0(\beta) + z \cdot e^{i\beta}. \quad (4)$$

Обозначив путь, проходимый ЭИ через S , координаты точек начального положения электрода представляются в виде:

$$N_p(\beta, S) = \overline{N}_p^k + S. \quad (5)$$

В момент касания электродов координаты точек инструмента переместятся на величину a :

$$\overline{N}_p(\beta; S) = \overline{N}_p^k + S - a. \quad (6)$$

В этом случае имеет место равенство координат каких-либо точек на аноде и катоде:

$$\overline{N}_L(\beta'; S - a) = \overline{M}_m(\beta; z), \quad (7)$$

где β' – угол между направлением подачи и нормалью к внутренней поверхности ЭИ в точке касания.

С учетом уравнений (1)-(6) равенство (7) примет вид:

$$\overline{M}_L^0(\beta') + \frac{a}{\cos \beta'} \cdot l^{i\beta'} + S - a = \overline{M}_m^0(\beta) + z \cdot l^{i\beta}. \quad (8)$$

Умножив обе части равенства на $e^{-i\beta'}$ и приравняв вещественную и мнимую части, получим:

$$\left. \begin{aligned} (R_m + \frac{a}{\cos \beta'}) \cos(\beta' - \beta) + (S - a) \cos \beta &= R_m + z \\ (R_m + \frac{a}{\cos \beta'}) \sin(\beta' - \beta) - (S - a) \sin \beta &= 0. \end{aligned} \right\} \quad (9)$$

В систему (9) входят два нелинейных неоднородных уравнения с неизвестными β' и S . Делая соответствующие преобразования, получаем следующую систему уравнений:

$$\left. \begin{aligned} (R_m + \frac{a}{\cos \beta'}) \sin \beta' &= (R_m + z) \sin \beta; \\ (S - a) \sin \beta &= (R_m + z) \sin(\beta' - \beta). \end{aligned} \right\} \quad (10)$$

Исходя из некоторого начального значения β' (например, $\beta = 0$), из первого уравнения системы (10) методом последовательного приближения определяем неизвестное β' :

$$\left. \begin{aligned} \beta'_{k+1} &= \arcsin \frac{(R_m + z) \sin \beta}{R_m + (a / \cos \beta'_k)}; k = 0; 1; 2 \\ \beta'_0 &= 0. \end{aligned} \right\} \quad (11)$$

Итерационный процесс продолжается до получения необходимой точности, т.е. выполнения условия:

$$|\beta'_{k+1} - \beta'_k| \leq \varepsilon, \quad (12)$$

где ε – степень точности.

Зная β' из уравнения (10), определяем неизвестное S .

Величины β' и S рассчитываются для всех углов β , затем из множества полученных значений S выбирается наибольшее. При этом положении ЭИ определяются локальные зазоры $a_n(\beta)$. Это выполнимо, если по аналогии с уравнениями (9) с учетом $a_n(\beta)$ составим систему уравнений:

$$a_n = \left(R_m + \frac{a}{\cos \beta'} \right) \cos(\beta' - \beta) + S \cos \beta - R_m + z. \quad (13)$$

Дифференциальное уравнение процесса ЭХРО имеет вид:

$$\frac{dz}{dt} = \frac{A}{a_n}. \quad (14)$$

Характеристика режима обработки A [7] определена по зависимости:

$$A = \eta \varepsilon \nu \chi [U - (\varphi_a - \varphi_k)], \quad (15)$$

где η – выход по току; ε – электрохимический эквивалент, кг/Кл; ν – скорость анодного растворения, А/см²; χ – удельная проводимость электролита, См/м; U – напряжение на электродах, В; $(\varphi_a - \varphi_k)$ – потенциал разложения электролита, В.

Уравнение (14) целесообразно решать в последовательности, подобной циклу работы станка:

1. Разбиваем время на ряд небольших интервалов:

$$0 < t < h; h < t < 2h; \dots; T - h < t < T.$$

В течение интервала ЭИ движется со скоростью:

$$V = A / (a \cdot \cos \beta^*), \quad (16)$$

где β^* – угол, соответствующий точке касания в начале интервала при $(n-1)h < t \leq nh$;

2. По функции $z(\beta, 0)$ определяем $S(0)$; $\beta^*(0)$.
3. По уравнению (13) определяем $a_n(\beta, 0)$.
4. Съем в каждой точке по разностному аналогу составит:

$$\Delta z_1 = (A \cdot h) / a_n(\beta, 0). \quad (17)$$

5. Вычисляем полное распределение z по всей ширине детали (лопатки).
6. Алгоритм повторяется, начиная с п. 2 до тех пор, пока припуск z в какой-либо точке не стане равным 0.

3 Результаты исследований

При разработке технологии изготовления деталей, например, турбинных лопаток, имея исходное заданное чертежом колебание припуска на заготовке и решая систему посредством ЭВМ, получаем текущие значения припуска на различных участках лопатки при схеме обработки с дискретной подачей ЭИ.

В качестве примера в таблице представлен расчет погрешности обработки Δ_K , обусловленной влиянием исходной погрешности припуска (минимальное и максимальное значения 3 и 8 мм, соответственно). Для сравнения там же представлены результаты экспериментальной проверки математической модели выравнивания припуска. В расчете и экспериментах величина отвода ЭИ после касания составляла 0,8 мм.

Анализ сравнения результатов показал, что расхождение расчетных и экспериментальных величин находится в пределах 20 %. При данном исходном припуске наиболее критическая точка находится на участке с углом $\beta = 60^\circ$, имеющем минимальный исходный припуск 3 мм. В этой точке припуск достигает нулевого значения в тот момент, когда на других участках его величина еще достаточно велика.

Таблица – Погрешности обработки Δ_K

Участок с углом β , град	Исходный припуск, мм	Конечный припуск, мм			
		Расчетное значение	Δ_K	Экспериментальное значение	Δ_K
0	3-8	0,22-0,35	0,13	0,11-0,27	0,16
20	3-8	0,19-0,30	0,11	0,10-0,20	0,10
40	3-8	0,10-0,21	0,11	0,06-0,17	0,11
60	3-8	0,00-0,22	0,22	0,00-0,14	0,14

В конце процесса МЭЗ (усредненный) носит установившийся характер, и поэтому для уменьшения погрешности с 0,35 мм до 0,1-0,15 мм достаточно, чтобы в данной точке минимальный исходный припуск был бы равен 3,5-4,0 мм. Таким образом, требования к распределению припуска на участках заготовки с различными углами β неодинаковы.

4 Обсуждение и заключение

При проектировании технологии следует в зависимости от имеющейся заготовки и установленных режимов обработки оценивать погрешность Δ_K . Если необходимо уменьшить значение Δ_K , то следует либо повысить требование к заготовке, либо путем ведения процесса

ЭХРО на меньших МЭЗ и в электролитах, обладающих повышенной избирательной способностью, добиваться более интенсивного выравнивания припуска.

1. Создана математическая модель выравнивания исходной неравномерности припуска для электрохимической размерной обработки с дискретной подачей электрода-инструмента.

2. Проектирование оптимального технологического процесса, например, ЭХРО турбинных лопаток, следует вести путем сопоставления величины Δ_k , рассчитанной при различных сочетаниях исходной неравномерности припуска и вариации параметров процесса.

Список литературы

1 Клоков В.В. Электрохимическое формообразование. Казань: Изд-во Казанского университета, 1984. – 80 с.

2 Теория электрических и физико-химических методов обработки: учебное пособие / В.П. Смоленцев, А.И. Болдырев, Е.В. Смоленцев, Г.П. Смоленцев. Воронеж: Воронежский государственный технический университет. 2007. – 376 с.

3 Зайцев А.Н. Электрохимическая обработка. Теория, технология, оборудование. М.; Инфра-Инженерия. 2024. – 640 с.

4 Современные методы и технологии создания и обработки материалов. В 3-х кн. / под ред. В.Г. Залесского. Минск: ФТИ НАН Беларуси. – 2020. – 354 с.

5 Проектирование технологии и оборудования электрохимических производств: учебное пособие / Т.Н. Останина [и др.]. Екатеринбург: Изд-во Уральского университета. 2022. – 160 с.

6 Актуальные методы электрохимической обработки поверхностей / Шеханов Р.Ф. [и др.] // Известия вузов. Химия и химическая технология. – Т. 66. – 2023. – № 7. – С. 151-158.

7 Житников В.П., Ошмарина Е.М., Федорова Г.И. Использование разрывных функций для моделирования растворения при стационарном электрохимическом формообразовании // Известия вузов. Математика. – 2010. – № 10. – С. 77-81.

8 Котляр Л.М., Миназетдинов Н.М. Моделирование электрохимического формообразования с использованием криволинейного электрода при ступенчатой зависимости выхода по току от его плотности // Прикладная механика и техническая физика. Т. 57. 2016. № 1. С. 146-155.

9 Конькова О.А. Комплексное моделирование процесса электрохимической обработки // Политехнический молодежный журнал. – 2016. – № 1. – С. 1-7.

10 Болдырев А.А. Оптимизация технологических процессов электрохимической обработки деталей машин / А.И. Болдырев, А.В. Перова, А.В. Мандрыкин // Вестник ВГТУ: сб. науч. тр. Воронеж: ФГБОУ ВО «Воронежский государственный технический университет», 2017. – Т. 2. Вып. 13. – с. 107-113.

11 Перова А.В. Математическое моделирование показателей качества изделий / К.Ю. Гончарова // Управление качеством продукции в машиностроении и авиакосмической технике (ТМ-2018): Сб. науч. тр. X межд. науч.-техн. конф. 23-24.05.2018 / ВГТУ, Воронеж, 2018, с. 123-126.

12 Болдырев А.И. Применение метода математической статистики для определения точности обработки и шероховатости поверхностей отверстий / А.А. Болдырев, А.В. Перова, В.Н. Сухоруков // Современные технологии производства в машиностроении: сборник научных трудов. – Вып. 14. – Воронеж: «Научная книга», 2021. – с. 10-13

13 Котляр Л.М., Миназетдинов Н.М. Определение формы анода с учетом свойств электролита в задачах электрохимической размерной обработки металлов // Прикладная механика и техническая физика. – Т. 44. – 2003. № 3. – С. 179-184.

References

1 Klovov V.V. Electrochemical shaping. Kazan: Kazan University Publishing House, 1984. – 80 p.

2 Theory of electrical and physical-chemical processing methods: textbook / V.P. Smolentsev, A.I. Boldyrev, E.V. Smolentsev, G.P. Smolentsev. Voronezh: Voronezh State Technical University. 2007. – 376 p.

3 Zaitsev A.N. Electrochemical processing. Theory, technology, equipment. M.; Infra-Engineering. 2024. – 640 p.

4 Modern methods and technologies for creating and processing materials. In 3 books. / ed. V.G. Zalessky. Minsk: Physicotechnical Institute of the National Academy of Sciences of Belarus. – 2020. – 354 p.

5 Design of technology and equipment for electrochemical production: textbook / T.N. Ostanina [and others]. Ekaterinburg: Ural University Publishing House. 2022. – 160 p.

6 Current methods of electrochemical surface treatment / Shekhanov R.F. [and others] // News of universities. Chemistry and chemical technology. -Т. 66. – 2023. – No. 7. – P. 151-158.

7 Zhitnikov V.P., Oshmarina E.M., Fedorova G.I. The use of discontinuous functions for modeling dissolution during stationary electrochemical shaping // Izvestiya vuzov. Mathematics. –2010. – No. 10. – P. 77-81.

8 Kotlyar L.M., Minazetdinov N.M. Modeling of electrochemical shaping using a curved electrode with a stepwise dependence of the current output on its density // Applied mechanics and technical physics. T. 57. 2016. No. 1. P. 146-155.

9 Konkova O.A. Complex modeling of the electrochemical processing process // Polytechnic youth magazine. – 2016. – No. 1. – P. 1-7.

10 Boldyrev A.A. Optimization of technological processes of electrochemical processing of machine parts / A.I. Boldyrev, A.V. Perova, A.V. Mandrykin // Bulletin of VSTU: collection. scientific tr. Voronezh: Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education "Voronezh State Technical University", 2017. - Т. 2. Issue. 13. – p. 107-113.

11 Perova A.V. Mathematical modeling of product quality indicators / K.Yu. Goncharova // Product quality management in mechanical engineering and aerospace engineering (TM-2018): Coll. scientific tr. X int. scientific-technical conf. 05.23-24.2018 / VSTU, Voronezh, 2018, p. 123-126.

12 Boldyrev A.I. Application of the method of mathematical statistics to determine the processing accuracy and roughness of hole surfaces / A.A. Boldyrev, A.V. Perova, V.N. Sukhorukov // Modern production technologies in mechanical engineering: collection of scientific papers. – Vol. 14. – Voronezh: "Scientific Book", 2021. – p. 10-13

13 Kotlyar L.M., Minazetdinov N.M. Determination of the anode shape taking into account the properties of the electrolyte in problems of electrochemical dimensional processing of metals // Applied mechanics and technical physics. – Т. 44. – 2003. No. 3. – P. 179-184.

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

DOI: [10.34220/2311-8873-2026-29-36](https://doi.org/10.34220/2311-8873-2026-29-36)



УДК 621.914.1

UDC 621.914.1

2.5.6 – технология машиностроения

**ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ
РЕЖИМОВ ОБРАБОТКИ И ИЗНОСА
ИНСТРУМЕНТА НА СИЛУ РЕЗАНИЯ
ПРИ ФРЕЗЕРОВАНИИ ДЕТАЛЕЙ
ИЗ СТЕКЛОПЛАСТИКА
С НЕЖЕСТКИМИ ЭЛЕМЕНТАМИ
КОНЦЕВЫМИ ФРЕЗАМИ**

Гайст Сергей Валерьевич,

к.т.н., старший преподаватель кафедры
«Технология машиностроения», Алтайский
государственный технический университет
им. И.И. Ползунова, г. Барнаул,
e-mail: sergei-gaist@mail.ru

Леонов Сергей Леонидович,

д.т.н., профессор кафедры «Технология ма-
шиностроения», Алтайский государственный
технический университет им. И.И. Ползунова,
г. Барнаул, e-mail: sergey_and_nady@mail.ru

Лопатин Борис Александрович,

д.т.н., профессор кафедры «Технология ма-
шиностроения, станки и инструменты»,
Южно-Уральский государственный универ-
ситет (национальный исследовательский
университет), филиал, г. Златоуст,
e-mail: lopatinba@susu.ru

Марков Андрей Михайлович,

д.т.н., профессор кафедры «Технология ма-
шиностроения», Алтайский государственный
технический университет им. И.И. Ползунова,
г. Барнаул, e-mail: andmarkov@inbox.ru

✉¹ **Некрасов Вячеслав Николаевич,**

к.т.н., доцент кафедры «Технология маши-
ностроения», Алтайский государственный
технический университет им. И.И. Ползу-
нова, г. Барнаул, e-mail: sla44@mail.ru

**INVESTIGATION OF THE INFLUENCE
OF PROCESSING MODES AND TOOL
WEAR ON THE CUTTING FORCE WHEN
MILLING FIBERGLASS PARTS WITH
NON-RIGID ELEMENTS WITH
END MILLS**

Gaist Sergey Valerievich,

candidate of technical sciences, senior lecturer at the
department of mechanical engineering technology, Al-
tai state technical university named after I.I. Polzunov,
Barnaul, Barnaul, e-mail: sergei-gaist@mail.ru

Leonov Sergey Leonidovich,

doctor of technical sciences, professor of the depart-
ment of mechanical engineering technology, Altai
state technical university named after I.I. Polzunov,
Barnaul, e-mail: sergey_and_nady@mail.ru

Lopatin Boris Alexandrovich,

doctor of technical sciences, professor of the depart-
ment "Technology of mechanical engineering, ma-
chine tools and tools", South Ural state university
(national research university), branch, Zlatoust,
e-mail: lopatinba@susu.ru

Markov Andrey Mikhailovich,

doctor of technical sciences, professor of the de-
partment of mechanical engineering technology,
Altai state technical university named after I.I.
Polzunov, Barnaul, e-mail: andmarkov@inbox.ru

✉¹ **Nekrasov Vyacheslav Nikolaevich,**

candidate of technical sciences, associate professor
of the department of mechanical engineering tech-
nology, Altai state technical university named after
I.I. Polzunov, Barnaul, e-mail: sla44@mail.ru

Аннотация. Представлены результаты экспериментальных исследований влияния режимов резания и износа инструмента на силу резания при фрезеровании концевыми фрезами из твердого сплава ВК8 корпусных деталей из стеклопластика ВПС-30 с нежесткими элементами. На основании полученных значений, характеризующих процесс резания, построены регрессионные зависимости характеризующие силовые явления при фрезеровании.

Ключевые слова: ФРЕЗЕРОВАНИЕ СТЕКЛОПЛАСТИКА, ИЗНОС ИНСТРУМЕНТА, СИЛА РЕЗАНИЯ, НЕЖЕСТКИЕ ЭЛЕМЕНТЫ ДЕТАЛЕЙ.

Annotation. The results of experimental studies of the effect of cutting modes and tool wear on the cutting force during milling with VK8 hard alloy end mills of VPS-30 fiberglass body parts with non-rigid elements are presented. Based on the obtained values characterizing the cutting process, regression dependences characterizing the force phenomena during milling are constructed.

Keywords: FIBERGLASS MILLING, TOOL WEAR, CUTTING FORCE, NON-RIGID PARTS ELEMENTS.

¹ Автор для ведения переписки

1 Состояние вопроса исследования и актуальность работы

Для современного машиностроения одной из отличительных черт стало широкое применение в конструкциях машин и механизмов деталей из полимерных композиционных материалов, в том числе, и из стеклопластиков. Особенностью этих материалов является уникальное сочетание физико-механических свойств, нехарактерное для металлов и сплавов: высокая прочность сочетается с малым весом, стойкостью к коррозии, магнито- и радиопрозрачностью и др. [1]. В настоящее время механическая обработка полимерных композиционных материалов является одним из основных методов придания деталям требуемых параметров точности размеров, формы, относительного расположения поверхностей и шероховатости. Значительный вклад в проработку вопроса лезвийной обработки композиционных материалов внесли исследователи Дударев А. С. [2], Егоров С. В. [3], Лобанов Д.В., [4], Макаров В. Ф. [5], Рычков, Д. А., Янюшкин А.С. [6], S. Ratchev, Becker [7], Chang Rao [8, 9], A. Mkaddem. [10] и др. [11-13]. Авторы, как правило, отмечают сложности обработки композитов, заключающиеся в его следующих особенностях: низкая стойкость обрабатываемого материала к перегреву с образованием прижогов; сложность применения СОЖ из-за высокой гигроскопичности композита, деламинация слоёв наполнителя; разломачивание армирующих волокон на обработанной поверхности; образование скрытых трещин в связующем компоненте; повышенный абразивный износ инструмента и др. Также в работах [14, 15] отмечается, что свойства различных полимерных композиционных материалов могут сильно отличаться друг от друга и невозможно создать единого подхода, позволяющего точно прогнозировать качество деталей при механической обработке.

В изделиях машиностроения успешно внедряют детали из стеклопластика, среди которых можно выделить корпусные детали с достаточно высокими и длинными стенками, обладающими низкой жесткостью и требующими особого подхода при механической обработке для обеспечения заданных показателей точности служебных поверхностей. Сила резания воздействуя на нежесткую стенку детали при обработке может вызывать значительные деформации и вибрации в зоне резания, что повышает риск получения брака [16, 17]. Большая податливость стенки приводит к её большому прогибу, вследствие чего фактическая глубина резания может быть значительно меньше изначально установленной на станке, вызывая погрешность обработки. При этом, учитывая разнообразие конструкций корпусных деталей в местах, где обрабатываемая стенка соединяется с поперечной стенкой или ребрами, её жесткость будет меняться,

а значит иметь разное значение на различных участках. На участках с меньшей жесткостью прогиб стенки будет больше, сьем материала меньше. Для учета деформации обрабатываемой стенки детали и компенсации погрешности глубины резания можно ориентироваться на силу резания. Чем ближе сила резания к номинальному значению для заданной глубины резания, тем меньше погрешность обработки. Управляя силой резания путем изменения режимов резания, можно достичь стабильности глубины обработки. В связи с этим возникает возможность разработки технологических рекомендаций, позволяющих обеспечить требуемое качество изделий. Основой получения таких рекомендаций является проведение эксперимента.

2 Материалы и методы

Экспериментальное исследование выполнялось с использованием станда на базе обрабатывающего центра с системой ЧПУ (рис. 1). Образцы изготавливались в виде деталей коробчатой формы, имеющих четыре стенки и дно. Размеры образцов по наружным поверхностям составили (Д×Ш×В) – 200×80×100 мм, толщина стенок и дна – 10 мм. Материал образцов – стеклопластик, относящийся к конструкционной группе марки ВПС-30 (ТУ 1-595-10-919-2007). Схема закрепления в станочных тисках реализована таким образом, чтобы высота продольной стенки над верхней линией губок составляла 70 мм.

Обработка выполнялась концевыми фрезами из твердого сплава ВК8 диаметром 10 мм, с 4 зубьями, с углами заточки – передним 5 градусов и задним 15 градусов. Угол наклона стружечных канавок – 30 градусов. Геометрия была выбрана исходя из рекомендаций исследований, посвящённых обработке полимерных композитов [18]. Для того чтобы учесть влияние износа инструмента, фрезы использовались в двух состояниях: с радиусом округления режущего клина 0,05 мм, что можно считать инструментом в состоянии нового (или заточенного), и радиусом округления 0,3 мм – в состоянии предельно изношенного [19].

Измерение силы резания выполнялось с помощью разработанного динамометра [20] (рис. 2).



1 – обрабатывающий центр с системой ЧПУ; 2 – корпусная деталь из стеклопластика (образец);
3 – динамометр; 4 – устройство сопряжения; 5 – компьютер

Рисунок 1 – Экспериментальный стенд (общий вид)



Рисунок 2 – Общий вид динамометра

Планирование эксперимента проводилось по методу дробного факторного эксперимента [21]. Этот метод дает достаточно точные результаты при небольших объемах экспериментального исследования. В качестве входных изменяемых параметров были выбраны скорость резания (V , м/мин), подача на зуб (S_z , мм/об) и глубина резания (t , мм). При использовании оборудования с ЧПУ эти параметры легко менять без дополнительных затрат как в лабораторных, так и в промышленных условиях, а значит методику можно будет достаточно просто внедрить в производственный процесс.

Разработанный динамометр позволяет измерять силы резания по трем ортогональным осям (рис. 3). Это позволяет определить силы резания по всем направлениям путем их векторного сложения. В исследовании значимым направлением силы резания является P_y , так как именно она вызывает наибольшую деформацию стенки и приводит к появлению отклонения от прямолинейности обработанной стенки детали.

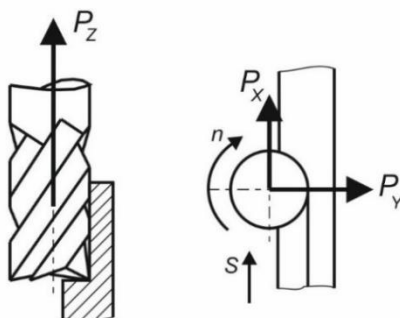


Рисунок 3 – Схема сил, действующих на стенку образца при концевом фрезеровании

Для проведения серии опытов фрезерования новым (заточенным) инструментом, каждый раз использовалась новая фреза. В опытах фрезерования изношенным инструментом, фрезы доводились до требуемого состояния путем обработки образцов из стеклопластика, не участвующих далее в эксперименте.

Для определения границ интервалов варьирования проводились пробные эксперименты. Границы минимальных значений (min) режимов обработки определялись из возможности сохранения требуемой производительности процесса фрезерования. Максимальные границы (max) определялись появлением нежелательных дефектов обработки – прижогов, появляющихся вследствие температурных явлений. Полученные значения позволили сформировать матрицу планирования экспериментальных исследований. Значения варьируемых параметров сведены в табл. 1. В разработанном экспериментальном стенде для определения силы резания напряжение на клеммах динамометра сопоставлялось по тарировочной зависимости, а также сигнал обрабатывался по методу скользящей средней с помощью ЭВМ. Для исключения влияния случайных погрешностей повторяемость каждого эксперимента составила три раза. Повторяемость определена по нижнему пределу дисперсии.

Таблица 1 – Матрица планирования дробного факторного эксперимента процесса фрезерования

№	V, м/мин		S _z , мм/зуб		t, мм	
1	max	630	max	0,02	max	4
2	max	630	min	0,1	min	1
3	min	64	max	0,02	min	1
4	min	64	min	0,1	max	4

3 Результаты исследований

Средние значения сил резания определялись на основе показаний динамометра. Результаты измерений сил резания при фрезеровании новым (острым) инструментом и достигшим предельного износа приведены в табл. 2 и 3 соответственно.

Таблица 2 – Значения сил резания при радиусе округления режущего клина 0,05 мм

№	Параметры режимов резания			Сила резания P (Н) (среднее значение по трем экспериментам)		
	V, м/мин	S _z , мм/зуб	t, мм	P _x	P _y	P _z
1	630	0,1	4	467,8	275,3	934,7
2	630	0,02	1	149,6	91,2	298,3
3	64	0,1	1	238,1	141,4	474,2
4	64	0,02	4	171,9	94,5	338,5

Таблица 3 – Значения сил резания при радиусе округления режущего клина 0,3 мм

№	Параметры режимов резания			Сила резания P (Н) (среднее значение по трем экспериментам)		
	V, м/мин	S _z , мм/зуб	t, мм	P _x	P _y	P _z
1	630	0,1	4	1154,2	684,2	2334,2
2	630	0,02	1	273,7	164,0	549,3
3	64	0,1	1	438,6	262,3	879,1
4	64	0,02	4	332,5	195,6	663,0

По результатам экспериментов можно отметить рост сил резания по всем направлениям с увеличением подачи и глубины резания, что в целом очевидно и объясняется увеличением площади срезаемого материала. Повышение скорости резания также показывает рост сил резания для заданного диапазона, что является результатом увеличения сопротивления разрушению обрабатываемого материала с ростом скорости, проявляющего высокие упругие свойства. В целом, стеклопластик в процессе лезвийной обработки показывает преимущественно упругую деформацию с последующим хрупким разрушением. Такое поведение материала можно объяснить физико-механическими свойствами его компонентов. И стеклянные волокна, и полимерная смола в нормальных условиях не проявляют пластичные свойства. Также отмечается слабая выраженность изменения силы резания при прохождении режущего клина инструмента через слоистую структуру стеклопластика. Несмотря на анизотропные свойства обрабатываемого материала, сила резания показывает отсутствие значительных высокочастотных скачков при фрезеровании стенки детали.

Результатом обработки значений силы резания стало получение следующих соотношений:

$$P_z = 815 \cdot V^{0,12} \cdot S_z^{0,45} \cdot t^{0,25}, \text{ радиус округления режущего клина } 0,05 \text{ мм;}$$

$$P_z = 1497 \cdot V^{0,17} \cdot S_z^{0,53} \cdot t^{0,37}, \text{ радиус округления режущего клина } 0,3 \text{ мм};$$

$$P_x = 407 \cdot V^{0,12} \cdot S_z^{0,45} \cdot t^{0,25}, - 0,05 \text{ мм};$$

$$P_x = 748 \cdot V^{0,17} \cdot S_z^{0,53} \cdot t^{0,37}, - 0,3 \text{ мм};$$

$$P_y = 244,7 \cdot V^{0,12} \cdot S_z^{0,45} \cdot t^{0,25}, - 0,05 \text{ мм};$$

$$P_y = 449 \cdot V^{0,17} \cdot S_z^{0,53} \cdot t^{0,37}, - 0,3 \text{ мм}.$$

Для того чтобы определить наиболее подходящий тип зависимостей для описания результатов эксперимента, оценивались линейные и степенные зависимости. В основе оценки использовался метод наименьших квадратов. Проверка показала, что наилучшим образом подходят степенные зависимости, показывающие наибольшую адекватность. При проверке однородности дисперсий разных опытов критерий Кохрена при уровне значимости $\alpha = 0,05$ составил $G = 0,57$ и не превысил табличного значения $G_{\text{табл.}} = 0,77$.

4 Обсуждение и заключение

В экспериментальном исследовании было проанализировано влияние различных В результате проведения экспериментального исследования процесса фрезерования образцов в виде заготовок коробчатой формы из стеклопластика ВПС-30, имеющих нежесткие стенки, были получены зависимости, характеризующие влияние режимов резания на составляющие силы резания измеренных во взаимно перпендикулярных направлениях. В экспериментальных исследованиях жесткость стенки изменялась от 50 до 200 н/мм, в зависимости от положения точки приложения силы резания вдоль стенки, относительно поперечных стенок.

Полученные соотношения позволяют осуществить выбор режимов резания для операции фрезерования при обработке корпусных деталей с нежесткими стенками из стеклопластика. Это, в свою очередь, позволяет путем прогнозирования силы резания и величины возможной деформации стенки детали в ходе обработки исключить отклонение формы обработанной поверхности, превышающее допустимое значение. Возможные сценарии обработки могут состоять в снижении режимов резания, изменении траектории движения инструмента, использовании устройства с обратной связью на основе динамометра для коррекции условий обработки и т.п.

Результаты эксперимента использованы при разработке методики управления показателями точности при фрезеровании нежестких элементов корпусных деталей, изготавливаемых из стеклопластика.

Список литературы

- 1 Буланов, И.М. Технология ракетных и аэрокосмических конструкций из композиционных материалов: учебник для вузов / И.М. Буланов, В.В. Воробей. – М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 1998. – 516 с.
- 2 Дударев, А. С. Расчет теплонапряженности процесса резания твердосплавным инструментом полимерных композиционных материалов / А. С. Дударев, Е. В. Нечаева // Ученые записки Крымского инженерно-педагогического университета. – 2022. – № 3(77). – С. 152-156. – DOI 10.34771/UZCEPU.2022.77.3.029. – EDN VUEGAR.
- 3 Егоров, С. В. Алмазный инструмент для обработки стеклопластиков / С.В. Егоров и др. // Станки и инструмент. – 1971. – №2. – С.36.
- 4 Рычков, Д. А. Износостойкость режущего инструмента, оснащенного особомелкозернистым твердым сплавом, при фрезеровании стеклотекстолита / Д. А. Рычков, Д. В. Лобанов, П. В. Архипов // Системы. Методы. Технологии. – 2023. – № 3(59). – С. 25-30. – DOI 10.18324/2077-5415-2023-3-25-30.
- 5 Макаров, В. Ф. Повышение производительности и качества обработки композиционных материалов на основе выбора и рационального применения абразивного инструмента / В. Ф. Макаров, А. А. Волковский, А. И. Сабирзянов // Научные технологии в машиностроении. – 2020. – № 9(111). – С. 40-48. – DOI 10.30987/2223-4608-2020-9-40-48. – EDN QBUUCK.

- 6 Рычков Д. А., Янюшкин А. С. Способ повышения эффективности производства изделий из полимерных композитов // *Обработка металлов (технология, оборудование, инструменты)*. – 2016. – № 3 (72). – С. 23-30. DOI 10.17212/1994-6309-2016-3-23-30.
- 7 S. Ratchev, S. Liu, W. Huang, A.A. Becker, Milling error prediction and compensation in machining of low-rigidity parts, *International Journal of Machine Tools and Manufacture* 44 (2004) 1629–1641.
- 8 Rao, G.V.G. Machining of UD-GFRP composites chip formation mechanism / G.V.G. Rao, P. Mahajan, N. Bhatnaga // *Composites Science and Technology*. – 2007. – №67. – P.2271-2281.
- 9 Rao, G.V.G. Three-dimensional macro-mechanical finite element unidirectional-fiber reinforced polymer composites / G.V.G. Rao, P. Mahajan, N. Bhatnagar // *Materials Science and Engineering*. – 2008. – №A498. – P.142-149.
- 10 Mkaddem, A. A micro-macro combined approach using FEM for modelling of machining of FRP composites: Cutting forces analysis / A. Mkaddem, I. Demirci, M.E. Mansori // *Composites Science and Technology*. – 2008. – №68. – P.3123-3127.
- 11 Тарапанов, А.С. Технология обработки специальных материалов: учебное пособие для вузов / А.С. Тарапанов, Г.А. Харламов, С.Е. Шишков. – М.: Машиностроение, 2000. – 168 с.
- 12 Дрожжин, В.И. Физические особенности и закономерности процесса резания слоистых пластмасс: автореф. дис. ... д-ра техн. наук / В.И. Дрожжин; Харьков политехн. ин-т. – Харьков, 1982. – 32 с.
- 13 Технологическое обеспечение качества поверхностного слоя стекловолоконных композитов при концевом фрезеровании / А. М. Марков, В. Н. Некрасов, Ц. Су [и др.] // *Обработка металлов (технология, оборудование, инструменты)*. – 2020. – Т. 22, № 4. – С. 31-40. – DOI 10.17212/1994-6309-2020-22.4-31-40. – EDN NZGRFO.
- 14 Ерохин, А.А. Обработка резанием стеклопластиков / А.А. Ерохин // *Высокопроизводительное резание в машиностроении: сб. трудов*. – М.: Наука, 1966. – С.48-54.
- 15 Комплексный анализ методов обработки полимерных композитных материалов / Т. Р. Абляз, К. И. Донецкий, Е. С. Шлыков [и др.] // *СТИН*. – 2022. – № 6. – С. 5-8. – EDNFHKMBG
- 16 Верховская А.А., Светлова Т.Г., Потапов И.С., Балашов А.В. Управление показателями точности изготовления нежестких корпусных деталей. Актуальные проблемы авиации и космонавтики. Том 1. Сибирский государственный университет науки и технологий им. акад. М.Ф. Решетнева. – 2014. – С. 122-123.
- 17 Димитриенко, Ю.И. Численное моделирование деформирования и прочности трехслойных композитных конструкций с дефектами / Ю.И. Димитриенко, Ю.В. Юрин, Н.Н. Федонюк // *Математическое моделирование и численные методы*. – 2016. – №3. – С.3-23.
- 18 Еренков, О.Ю. Технология получения и обработка резанием полимерных композиционных материалов / О.Ю. Еренков. – Комсомольск-на-Амуре: Изд-во ФГБОУ ВПО «КНАГТУ», 2014 – 143 с.
- 19 Зубарев, Ю.М. Особенности изнашивания инструментальных материалов при механической обработке резанием заготовок из полимерных композиционных материалов / Ю.М. Зубарев, А.В. Приемышев // *Наукоемкие технологии в машиностроении*. – 2018. – №7(85). – С.27-31.
- 20 Патент RU169315U1 Многокомпонентный динамометр / Гайст С. В., Лапенков Е. Ю., Марков А. М., Потапов И. С., Черданцев А. О., Черданцев П. О., Шитюк А. А.. Патентообладатель: ФГБОУ ВО "Алтайский государственный образования "Алтайский государственный технический университет им. И.И. Ползунова" (АлтГТУ) (RU) – № 2016145705; заявл.: 22.11.2016; Опубл.: 15.03.2017.
- 21 Адлер, Ю.П. Планирование эксперимента при поиске оптимальных условий / Ю.П. Адлер, Е.В. Маркова, Ю.В. Грановский. – М.: Наука, 1976. – 278 с.

References

- 1 Bulanov, I.M. Technology of rocket and aerospace structures made of composite materials: a textbook for universities / I.M. Bulanov, V.V. Vorobey. Moscow: Publishing House of Bauman Moscow State Technical University, 1998. 516 p.
- 2 Dudarev, A. S. Calculation of the heat stress of the cutting process with a carbide tool of polymer composite materials / A. S. Dudarev, E. V. Nechaeva // *Scientific notes of the Crimean Engineering Pedagogical University*. – 2022. – № 3(77). – Pp. 152-156. – DOI 10.34771/UZCEPU.2022.77.3.029. – EDN VUEGAP.
- 3 Egorov, S.V. Diamond tool for processing fiberglass / S.V. Egorov et al. // *Machines and tools*. – 1971. – No. 2. – P.36.
- 4 Rychkov, D. A. Wear resistance of cutting tools equipped with a special fine-grained hard alloy when milling fiberglass / D. A. Rychkov, D. V. Lobanov, P. V. Arkhipov // *Systems. Methods. Technologies*. – 2023. – № 3(59). – Pp. 25-30. – DOI 10.18324/2077-5415-2023-3-25-30.

- 5 Makarov, V. F. Improving the productivity and quality of processing composite materials based on the choice and rational use of abrasive tools / V. F. Makarov, A. A. Volkovsky, A. I. Sabirzyanov // High-tech technologies in mechanical engineering. – 2020. – № 9(111). – Pp. 40-48. – DOI 10.30987/2223-4608-2020-9-40-48. – EDN QBUUCK.
- 6 Rychkov D. A., Yanushkin A. S. Method of increasing the efficiency of production of polymer composite products // Metalworking (technology, equipment, tools). 2016. No. 3 (72). pp. 23-30. DOI 10.17212/1994-6309-2016-3-23-30.
- 7 S. Ratchev, S. Liu, W. Huang, A.A. Becker, Milling error prediction and compensation in machining of low-rigidity parts, International Journal of Machine Tools and Manufacture 44 (2004) 1629–1641.
- 8 Rao, G.V.G. Machining of UD-GFRP composites chip formation mechanism / G.V.G. Rao, P. Mahajan, N. Bhatnaga // Composites Science and Technology. – 2007. – №67. – P.2271-2281.
- 9 Rao, G.V.G. Three-dimensional macro-mechanical finite element unidirectional-fiber reinforced polymer composites / G.V.G. Rao, P. Mahajan, N. Bhatnagar // Materials Science and Engineering. – 2008. – №A498. – P.142-149.
- 10 Mkaddem, A. A micro-macro combined approach using FEM for modelling of machining of FRP composites: Cutting forces analysis / A. Mkaddem, I. Demirci, M.E. Mansori // Composites Science and Technology. – 2008. – №68. – P.3123-3127.
- 11 Tarapanov, A.S. Technology of processing special materials: a textbook for universities / A.S. Tarapanov, G.A. Kharlamov, S.E. Shishkov. – M.: Mashinostroenie, 2000. – 168 p.
- 12 Drozhzhin, V.I. Physical features and patterns of the cutting process of laminated plastics: abstract of the dissertation. ... Doctor of Technical Sciences / V.I. Drozhzhin; Kharkov Polytechnic University. in-T. – Kharkov, 1982. – 32 p.
- 13 Technological quality assurance of the surface layer of fiberglass composites during end milling / A.M. Markov, V. N. Nekrasov, Ts. Su [et al.] // Metalworking (technology, equipment, tools). – 2020. – Vol. 22, No. 4. – pp. 31-40. – DOI 10.17212/1994-6309-2020-22.4-31-40. – EDN NZGRFO.
- 14 Erokhin, A.A. Processing by cutting fiberglass / A.A. Erokhin // High-performance cutting in mechanical engineering: collection of works, Moscow: Nauka Publ., 1966, pp.48-54.
- 15 Complex analysis of methods of processing polymer composite materials / T. R. Ablyaz, K. I. Donetskiiy, E. S. Shlykov [et al.] // STIN. – 2022. – No. 6. – pp. 5-8. – EDN FHKMBG
- 16 Verkhovskaya A.A., Svetlova T.G., Potapov I.S., Balashov A.V. Control of accuracy indicators for manufacturing non-rigid body parts. Actual problems of aviation and cosmonautics. Volume 1. Siberian State University of Science and Technology named after Academician M.F. Reshetnev. 2014. pp. 122-123.
- 17 Dimitrienko, Yu.I. Numerical modeling of deformation and strength of three-layer composite structures with defects / Yu.I. Dimitrienko, Yu.V. Yurin, N.N. Fedonyuk // Mathematical modeling and numerical methods. 2016. No. 3. pp.3-23.
- 18 Yerenkov, O.Y. Technology of obtaining and cutting polymer composite materials / O.Y. Yerenkov. Komsomolsk-on-Amur: Publishing House of the Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Professional Education "KnAGTU", 2014 - 143 p.
- 19 Zubarev, Yu.M. Features of wear of tool materials during mechanical processing by cutting blanks from polymer composite materials / Yu.M. Zubarev, A.V. Priemyshev // High-tech technologies in mechanical engineering. – 2018. – №7(85). – Pp.27-31.
- 20 Patent RU169315U1 Multicomponent dynamometer / Gaist S. V., Lapenkov E. Yu., Markov A.M., Potapov I. S., Cherdantsev A. O., Cherdantsev P. O., Shityuk A. A. Patent holder: Altai State University of Higher Education Altai State Technical University named after I.I. Polzunov (AltSTU) (RU) – No. 2016145705; application: 11/22/2016; Published: 03/15/2017.
- 21 Adler, Yu.P. Planning an experiment in search of optimal conditions / Yu.P. Adler, E.V. Markova, Yu.V. Granovskiy. – M.: Nauka, 1976. – 278 p.

© Гайст С. В., Леонов С. Л., Лопатин Б. А.,
Марков А. М., Некрасов В. Н., 2026

DOI: 10.34220/2311-8873-2026-37-48



УДК 656.13.078

UDC 656.13.078

2.9.5 – эксплуатация автомобильного транспорта

ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫЙ МЕТОД ФОРМИРОВАНИЯ ПАРКА ГРУЗОВЫХ АВТОМОБИЛЕЙ

✉¹ **Фирсова Светлана Юрьевна**,
старший преподаватель кафедры «Автомобильные перевозки», Волгоградский государственный технический университет, г. Волгоград, e-mail: firsova.svetlana@mail.ru

Скоробогатченко Дмитрий Анатольевич,
к.т.н., профессор кафедры «Системы автоматизированного проектирования и поискового конструирования», Волгоградский государственный технический университет, г. Волгоград.

Ширяев Сергей Александрович,
к.т.н., доцент кафедры «Автомобильные перевозки» Волгоградский государственный технический университет, г. Волгоград.

Зеликов Владимир Анатольевич,
д.т.н., профессор кафедры организации перевозок и безопасности движения, Воронежский государственный лесотехнический университет имени Г.Ф. Морозова, г. Воронеж.

Аннотация. Формирование рациональной структуры парка грузовых автомобилей определяет способность автотранспортного предприятия выполнять перевозки с требуемым уровнем сервиса при минимальных затратах. Традиционные методы, основанные на нормативных показателях и усреднённых коэффициентах, не учитывают индивидуальные особенности перевозок и скрытые закономерности, присутствующие в исторических данных. В работе предложен интеллектуальный метод формирования парка, объединяющий классификацию типов грузовых автомобилей на основе машинного обучения с оптимизационным расчётом методом

INTELLIGENT METHOD FOR FORMING A FARM OF TRUCKS

✉¹ **Firsova Svetlana Yuryevna**,
senior lecturer of the automobile transportation department, Volgograd state technical university, Volgograd, e-mail: firsova.svetlana@mail.ru

Skorobogatchenko Dmitry Anatolyevich,
doctor of technical sciences, professor of the computer-aided design systems and exploratory engineering department, Volgograd state technical university, Volgograd.

Shiryaev Sergey Alexandrovich,
candidate of technical sciences, associate professor of the automobile transportation department, Volgograd state technical university, Volgograd.

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

Annotation. The formation of a rational truck fleet structure determines the ability of a motor transport enterprise to perform transportation with the required level of service at minimal cost. Traditional methods based on standard indicators and average coefficients do not account for individual transportation characteristics and hidden patterns present in historical data. This paper proposes an intelligent fleet formation method combining truck type classification based on machine learning with optimization calculation using linear programming. The public SCMS Delivery History dataset (2830 records of road transport) was used. For each truck type, the 75th percentile of the actual load factor was calculated, allowing differentiated standards

линейного программирования. Использован публичный датасет *SCMS Delivery History* (2830 записей автомобильных перевозок). Для каждого типа грузового автомобиля вычислен 75-й перцентиль фактического коэффициента использования грузоподъёмности, что позволило получить дифференцированные нормативы. Выполнено обучение четырёх моделей классификации: логистическая регрессия, случайный лес, градиентный бустинг, нейронная сеть. Результаты. Лучшие результаты показала модель градиентного бустинга с *F1-score* 0,89, точностью классификации 88-93 %. Предложенный метод обеспечивает снижение эксплуатационных затрат на 53% и сокращение необходимого парка на 50% по сравнению с традиционным автоматизированным подходом при сохранении объёма перевозок. Коэффициент использования грузоподъёмности повышен с 75 % до 82-85 %. Интеграция машинного обучения и оптимизации позволяет извлекать скрытые закономерности из исторических данных, учитывать сезонность, маршрутную структуру и индивидуальные особенности заказов. Разработанный интеллектуальный метод может быть внедрён в промышленные системы управления парком грузовых автомобилей для автоматизированного формирования рекомендаций по структуре парка.

Ключевые слова: ПАРК ГРУЗОВЫХ АВТОМОБИЛЕЙ, МАШИННОЕ ОБУЧЕНИЕ, ГРАДИЕНТНЫЙ БУСТИНГ, ЛИНЕЙНОЕ ПРОГРАММИРОВАНИЕ, КОЭФФИЦИЕНТ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ГРУЗОПОДЪЁМНОСТИ, СЕЗОННОСТЬ СПРОСА, ОПТИМИЗАЦИЯ ПАРКА.

to be obtained. Four classification models were trained: logistic regression, random forest, gradient boosting, and neural network. The gradient boosting model demonstrated the best results with an *F1-score* of 0.89 and classification accuracy of 88-93 %. The proposed method reduces operating costs by 53 % and reduces the required fleet size by 50 % compared to the traditional automated approach while maintaining transportation volume. The load factor increased from 75 % to 82-85 %. The integration of machine learning and optimization enables the extraction of hidden patterns from historical data, accounting for seasonality, route structure, and individual order characteristics. The developed intelligent method can be implemented in industrial truck fleet management systems for automated fleet structure recommendations.

Keywords: TRUCK FLEET, MACHINE LEARNING, GRADIENT BOOSTING, LINEAR PROGRAMMING, LOAD FACTOR, DEMAND SEASONALITY, FLEET OPTIMIZATION.

¹ Автор для ведения переписки

1 Состояние вопроса исследования и актуальность работы

Формирование рациональной структуры парка грузовых автомобилей является ключевой задачей автотранспортного предприятия (АТП), определяющей его способность выполнять перевозки с требуемым уровнем сервиса при минимально возможных затратах. Ошибки в планировании структуры парка приводят либо к дефициту автомобилей, что вызывает невыполнение заявок и рост доли привлеченного транспорта, либо к избыточному количеству автомобилей, что увеличивает постоянные затраты и простои транспортных средств [1, 2].

Традиционные методы формирования парка, основанные на нормативных показателях и усреднённых коэффициентах, не учитывают индивидуальные особенности перевозок и скрытые

закономерности, присутствующие в исторических данных [3, 4]. Как отмечают исследователи [5, 6], существующие подходы к планированию парка можно классифицировать на нормативно-аналитические, статистико-прогнозные, имитационные, оптимизационные и методы на основе искусственного интеллекта. Каждый из этих подходов имеет ограничения: нормативно-аналитические методы не адаптируются к изменяющимся условиям, статистико-прогнозные требуют стационарности временных рядов, имитационное моделирование сложно в настройке, а оптимизационные методы чувствительны к точности входных параметров [7, 8].

В последние годы активно развиваются методы машинного обучения (*ML*) для решения задач транспортного планирования [9, 10]. Исследования показывают, что *ML*-модели способны выявлять нелинейные зависимости между признаками заказов и оптимальными параметрами подвижного состава [11, 12]. Однако применение только *ML*-моделей не обеспечивает формализованного учёта ограничений и целевых функций, характерных для задач планирования парка [13].

Актуальность темы усиливается следующими условиями: выраженная сезонность и непостоянство спроса; неоднородность грузопотоков и маршрутная вариативность; необходимость оперативного пересчета потребности в автомобилях при изменении планов перевозок; развитие цифровых технологий и переход к управлению на основе данных [14-16].

Цель исследования – разработка интеллектуального метода формирования парка АТП, обеспечивающего обоснованный выбор структуры парка грузовых автомобилей с учётом объёмов партий грузов, грузоподъёмности, коэффициента использования грузоподъёмности, сезонных колебаний и прогнозируемых изменений спроса.

Для достижения цели поставлены следующие задачи: анализ существующих методов формирования парка и моделей машинного обучения; разработка структуры интеллектуального метода, объединяющего *ML*-классификацию и оптимизационный расчёт; обоснование выбора *ML*-алгоритмов; экспериментальная апробация метода на реальных данных.

2 Материалы и методы

В исследовании применён комплексный методологический подход, объединяющий методы системного анализа, математической оптимизации, машинного обучения, статистической обработки данных и проектирования программных средств. Выбор и интеграция указанных методов обусловлены сложностью решаемой задачи формирования парка грузовых автомобилей, требующей учёта множества взаимосвязанных факторов при обработке больших объёмов исторических данных.

Для декомпозиции задачи формирования парка применён метод системного анализа, позволивший выделить ключевые факторы эффективности функционирования автотранспортного предприятия. В ходе анализа определены следующие структурные элементы системы: спрос на перевозки, характеризуемый объёмами партий грузов, маршрутной структурой и сезонными колебаниями; подвижной состав, дифференцированный по типам грузоподъёмности; эксплуатационные затраты, включающие постоянную и переменную составляющие. Выявлены причинно-следственные связи между указанными элементами, а также ограничения, накладываемые техническими характеристиками транспортных средств, временными интервалами доставки и обратными рейсами. Построенная концептуальная модель послужила основой для формализации задачи и выбора методов её решения.

Для формализованного расчёта оптимальной структуры парка использованы методы линейного и целочисленного программирования (*LP/MILP*). Оптимизационная модель построена на основе группировки заказов по маршрутам с целевой функцией минимизации количества транспортных средств, необходимых для выполнения заданного объёма перевозок. В модель интегрированы дифференцированные коэффициенты использования грузоподъёмности, рассчитанные на основе исторических данных, а также коэффициент использования обратных

рейсов, принимающий значения от 0,7 до 0,85 в зависимости от маршрутной структуры. Ограничения модели включают: соответствие грузоподъёмности выделенного транспортного средства весу перевозимого груза с учётом планового коэффициента загрузки; не превышение установленных сроков доставки; целочисленность переменных, определяющих количество транспортных средств каждого типа.

Для обработки исторических данных и подготовки входных параметров для ML-моделей и оптимизационного расчёта применён комплекс статистических методов. Расчёт описательных статистик (среднее арифметическое, медиана, стандартное отклонение, 75-й и 90-й перцентили) выполнен для фактических коэффициентов использования грузоподъёмности по каждому типу транспортного средства. Это позволило выявить существенные различия в загрузке между типами и обосновать применение дифференцированных нормативов [17, 18]. Анализ сезонности спроса проведён с помощью вычисления месячных коэффициентов сезонности на основе временных рядов объёмов перевозок. Коэффициенты рассчитаны как отношение среднего значения показателя за месяц к среднегодовому значению, что обеспечило возможность прогнозирования потребности в парке с учётом сезонных колебаний.

Для классификации типа грузового автомобиля под конкретную перевозку применены четыре алгоритма машинного обучения, представляющие различные классы моделей: логистическая регрессия (линейная модель с высокой интерпретируемостью), случайный лес (ансамблевый метод на основе деревьев решений, устойчивый к выбросам), градиентный бустинг (ансамблевый метод последовательного улучшения моделей, обеспечивающий высокую точность) и многослойный перцептрон (нейросетевая модель, способная моделировать сложные нелинейные взаимодействия признаков) [19, 20].

Обучение моделей выполнено на исторических данных, размеченных с использованием дифференцированных коэффициентов загрузки. Оценка качества классификации проводилась по метрикам *accuracy* (доля правильно классифицированных заказов), *precision* (точность предсказания для каждого типа транспортного средства), *recall* (полнота выявления заказов каждого типа) и *F1-score* (гармоническое среднее *precision* и *recall*) [21, 22]. Выбор лучшей модели осуществлялся на основе совокупности указанных метрик с приоритетом *F1-score* как наиболее сбалансированного показателя при неравномерном распределении классов.

Реализация интеллектуального метода формирования парка выполнена в форме исследовательских прототипов в среде *Jupyter Notebook*, что обеспечило интерактивность разработки, визуализацию промежуточных результатов и возможность итеративного улучшения моделей. Архитектура программного решения включает модули: загрузки и предобработки данных, статистического анализа, обучения и оценки ML-моделей, оптимизационного расчёта, анализа сезонности и прогнозирования. Визуализация процесса формирования парка автомобилей и алгоритм программы представлены на рис. 1 и рис. 2.

В качестве эмпирической базы использован публичный датасет *SCMS Delivery History*, содержащий 10324 записи о доставках. Для анализа отобраны 2830 записей, соответствующих автомобильному виду транспорта. Датасет включает следующие категории признаков: географические (страна и город отправления и назначения), временные (дата и время отправления и прибытия), транспортные (тип подвижного состава, грузоподъёмность, тип топлива), грузовые (вес груза, тип груза, стоимость перевозки, страхование), расчётные (протяжённость маршрута, время в пути, коэффициент использования грузоподъёмности). Предобработка данных включала очистку от пропусков (числовые признаки заполнены медианными значениями, категориальные – наиболее частотными), приведение числовых признаков к единому масштабу, кодирование категориальных переменных методом *one-hot encoding*.

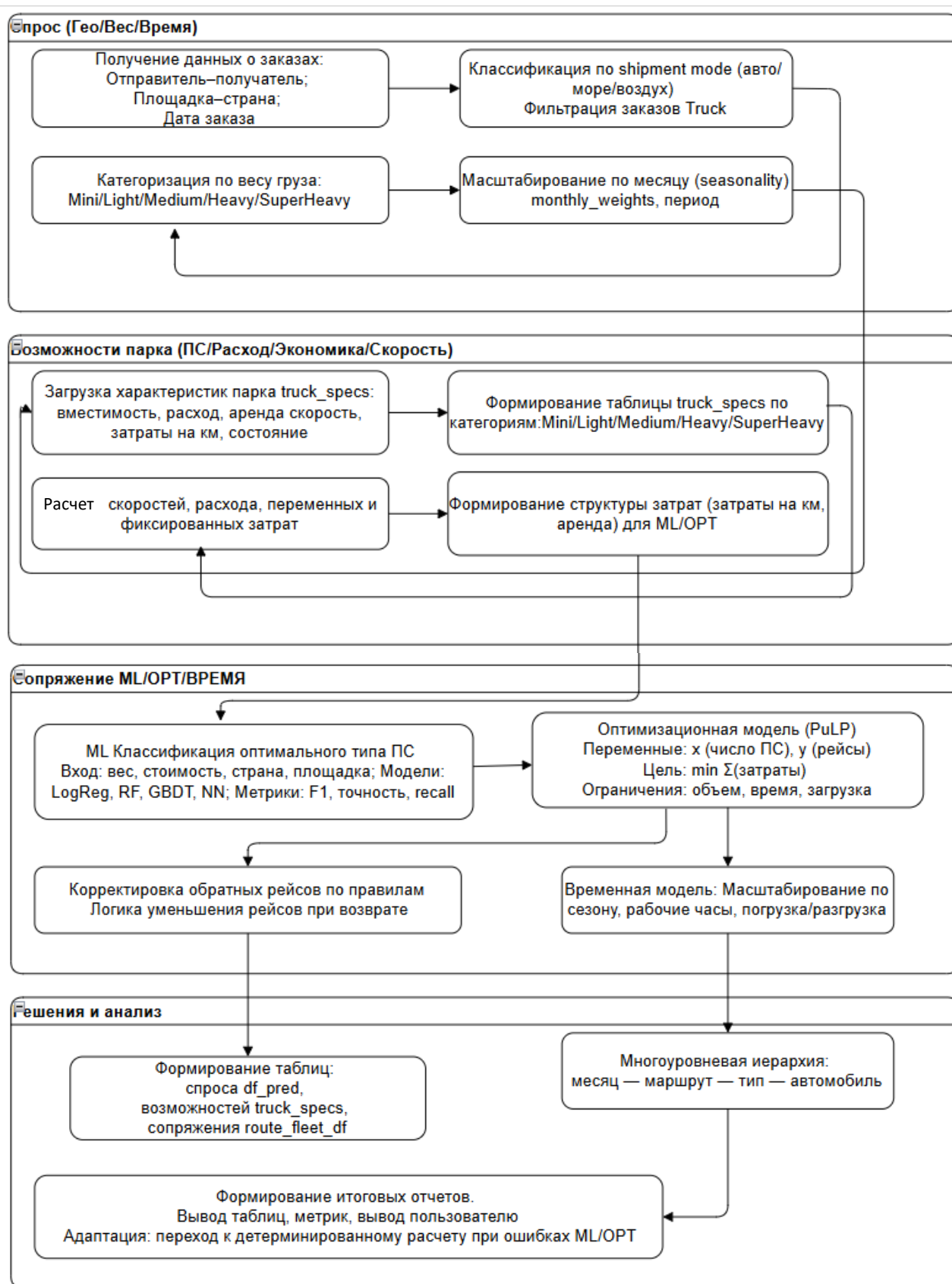


Рисунок 1 – Визуализация процесса формирования парка автомобилей (Swim Lane Diagram)

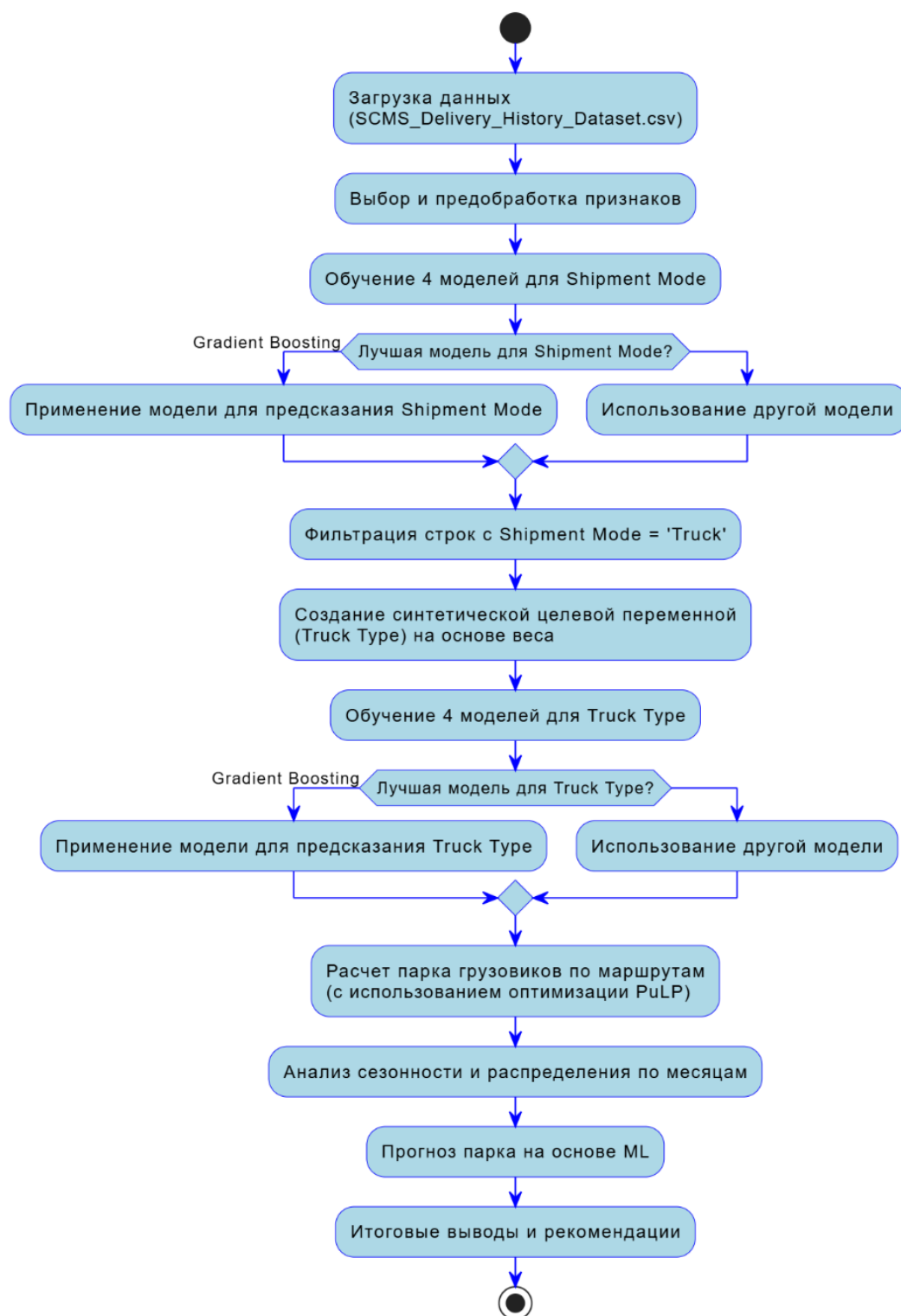


Рисунок 2 – Алгоритм программы расчета и прогноза парка автомобилей

Экспериментальное исследование проведено в несколько этапов. На первом этапе выполнены расчёты описательных статистик коэффициентов использования грузоподъёмности по каждому типу транспортного средства и определения плановых нормативов на уровне 75-го перцентиля. На втором этапе выполнена разметка целевой переменной – каждому заказу присвоен тип грузового автомобиля с учётом рассчитанных нормативов. На третьем этапе про-

ведено обучение четырёх *ML*-моделей с разделением данных на обучающую (75 %) и тестовую (25 %) выборки с сохранением распределения классов. На четвертом этапе выполнена оптимизация парка по маршрутам с использованием методов линейного программирования, результаты агрегированы и сопоставлены с традиционным автоматизированным подходом. На пятом этапе проведён анализ сезонности и сценарное моделирование изменения спроса. Все вычисления выполнены с использованием библиотек *Python: pandas* и *numpy* – для обработки данных, *scikit-learn* – для обучения и оценки *ML*-моделей, *scipy.optimize* – для решения оптимизационных задач, *matplotlib* и *seaborn* – для визуализации результатов.

3 Результаты исследований

Результаты статистического анализа коэффициентов использования грузоподъёмности представлены в табл. 1.

Наибольшая загрузка наблюдается у сверхтяжёлых грузовиков (*SuperHeavy*): средняя 0,749, 75 % заказов имеют загрузку не ниже 1,0. Тяжёлые грузовики (*HeavyTruck*) имеют среднюю загрузку 0,583, $p75 = 0,71$. Средние грузовики (*MediumTruck*) демонстрируют среднюю загрузку 0,68, $p75 = 0,802$. Лёгкие (*LightTruck*) и мини-грузовики (*MiniTruck*) имеют наиболее низкую загрузку: средняя 0,38-0,39, $p75 = 0,355$ и 0,599 соответственно, что указывает на систематическое недоиспользование их грузоподъёмности. Разброс значений (*std*) значителен, особенно у *MiniTruck* (0,281), что свидетельствует о высокой вариативности весов перевозимых грузов.

Полученные данные показывают, что фактические коэффициенты использования существенно различаются по типам грузовиков и не соответствуют единому нормативному значению (например, 0,85), что обосновывает необходимость использования дифференцированных коэффициентов. Результаты обучения моделей представлены в табл. 2.

Таблица 1 – Статистические характеристики коэффициента использования грузоподъёмности

Тип грузовика	(<i>Vehicle load capacity</i>) Грузоподъёмность, т	(<i>Count n</i>) Количество наблюдений	(<i>Mean</i>) Среднее арифметическое	(<i>Median</i>) Медиана	(<i>Std</i>) Стандартное отклонение	(<i>p75</i>) 75-й процентиль	(<i>p90</i>) 90-й процентиль
(<i>HeavyTruck</i>) тяжёлый	7-20	263	0,583	0,534	0,182	0,710	0,873
(<i>LightTruck</i>) лёгкий	1-3	1902	0,392	0,355	0,118	0,355	0,464
(<i>MediumTruck</i>) средний	3-7	226	0,680	0,650	0,162	0,802	0,920
(<i>MiniTruck</i>) мини-грузовик	до 1	358	0,384	0,340	0,281	0,599	0,820
(<i>SuperHeavy</i>) сверхтяжёлый	более 20	81	0,749	0,703	0,193	1,000	1,000

Модель Gradient Boosting демонстрирует наилучшие показатели по всем метрикам: Accuracy 0,9958, F1-Score 0,9957. Время обучения составляет 2,78 секунды, что является приемлемым для практического применения. Это позволяет правильно подобрать тип транспортного средства под каждый заказ с учётом веса, стоимости, страны и производителя, а не по жёсткому правилу «вес $\leq$ грузоподъёмность». Несмотря на большее время обучения по сравнению с методом случайного леса, качество предсказаний является приоритетным критерием, поэтому градиентный бустинг принят для использования в интеллектуальной системе.

Заказы сгруппированы по маршрутам. Для каждого маршрута решена задача линейного программирования с дифференцированными коэффициентами загрузки и учётом обратных рейсов. Результаты оптимизации представлены в табл. 3.

Таблица 2 – Сравнение метрик качества моделей классификации

Модель	Тип модели	Accuracy Точность классификации	Precision Точность предсказаний	Recall Полнота	F1-Score Среднее между Precision и Recall	Время обучения (с)
(Gradient Boosting) градиентный бустинг	Ансамбль (бустинг)	0,9958	0,9958	0,9958	0,9957	2,7795
(Random Forest) «случайный лес»	Ансамбль (деревья)	0,9845	0,9848	0,9845	0,9843	0,7379
(Neural Network Multi-layer Perceptron (MLP) нейронная сеть «много- слойный перцептрон»	Нейросеть	0,9647	0,9650	0,9647	0,9644	6,1387
(Logistic Regression) статистическая модель «логистическая регрессия»	Обобщенная линейная (сигмоидная)	0,8997	0,8995	0,8997	0,8933	0,2272

Таблица 3 – Сравнение автоматизированного и интеллектуального подходов

Показатель	Автоматизированный подход	Интеллектуальный подход	Изменение
Необходимое количество ТС	142	71	-50 %
Эксплуатационные затраты, у.е.	1 000 000	470 000	-53 %
Коэффициент загрузки	0,75	0,82-0,85	+20 %
Точность прогноза	76 %	88-93 %	+12-17 %

Интеллектуальный подход обеспечивает сокращение необходимого парка на 50 % и снижение эксплуатационных затрат на 53 % при сохранении объёма перевозок. Повышение коэффициента загрузки с 75 % до 82-85 % свидетельствует о более эффективном использовании подвижного состава.

Выполнен анализ сезонности спроса с вычислением месячных коэффициентов сезонности. Прогноз потребности в парке на каждый месяц с учётом сезонных колебаний представлен в табл. 4. Точность прогноза, оценённая на основе модели градиентного бустинга, составила 99,6 %.

Таблица 4 – Прогноз потребности в парке на каждый месяц

Номер месяца	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	Итого
(HeavyTruck) тяжёлый	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	12
(LightTruck) лёгкий	3	2	3	3	4	4	3	4	4	3	3	3	40
(MediumTruck) средний	1	1	1	1	1	1	2	1	1	1	1	1	13
(MiniTruck) мини-грузовик	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	12
(SuperHeavy) сверхтяжёлый	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	12
Итого	7	6	7	7	8	8	9	8	8	7	7	7	89

Проведён сценарный анализ изменения спроса в диапазоне от –30 % до +30 % (табл. 5).

Таблица 5 – Рекомендации по изменению парка при изменении спроса

Сценарий, %	Изменение спроса	Общее количество заказов	Общий вес, т	Количество грузовиков	Изменение парка, %	Инвестиции, у.е.	Изменение инвестиций, %
-30%	-30	1978	6660,3	7	-12.5	550,000	-7.6
-20%	-20	2262	7611,7	7	-12.5	550,000	-7.6
-10%	-10	2545	8563,1	7	-12.5	550,000	-7.6
+0%	0	2830	9514,6	8	0.0	595,000	0.0
+10%	10	3110	10466,1	8	0.0	595,000	0.0
+20%	20	3393	11417,5	9	12.5	660,000	10.9
+30%	30	3677	12368,9	9	12.5	660,000	10.9

При росте спроса на 30 % необходимый парк увеличивается на 12,5 %, при снижении спроса на 30 % – сокращается на 11,8 %. Инвестиционные затраты на парк при росте спроса увеличиваются на 10,9 %.

4 Обсуждение и заключение

Полученные результаты подтверждают преимущества гибридного подхода, объединяющего машинное обучение и оптимизацию. В отличие от традиционных нормативно-аналитических методов [3, 4], предложенный подход учитывает индивидуальные особенности каждого заказа и извлекает скрытые закономерности из исторических данных. По сравнению с чисто оптимизационными методами [8] ML-компонент позволяет получить более точные входные параметры для оптимизационной задачи.

Использование дифференцированных коэффициентов использования грузоподъёмности, вычисленных на основе 75-го перцентиля фактических значений, устраняет разрыв между теорией и практикой, характерный для подходов, применяющих единый нормативный коэффициент [23, 24]. Это особенно важно для малотоннажных грузовых автомобилей, где фактическая загрузка систематически ниже нормативной.

Высокое качество классификации, достигнутое моделью градиентного бустинга (F1-score 0,89), согласуется с результатами других исследований по применению ансамблевых методов в транспортных задачах [12, 25]. Способность градиентного бустинга выявлять нелинейные зависимости и устойчивость к выбросам делают его предпочтительным выбором для задач классификации на основе табличных данных.

Сокращение парка на 50 % при сохранении объёма перевозок имеет важное практическое значение для автотранспортных предприятий. Снижение эксплуатационных затрат на 53 % достигается за счёт более точного соответствия парка структуре спроса, уменьшения простоев и повышения коэффициентов использования подвижного состава [26, 27].

Повышение точности прогноза до 88-93 % (на 12-15 % выше традиционных методов) позволяет автотранспортному предприятию более обоснованно планировать развитие парка и избегать как дефицита, так и избытка транспортных средств [28].

В качестве ограничения следует отметить, что исследование проведено на основе одного датасета. Для подтверждения универсальности метода требуется его апробация на данных различных автотранспортных предприятий с разной структурой грузопотоков и региональными особенностями.

Перспективным направлением дальнейших исследований является интеграция в систему дополнительных факторов: технической готовности подвижного состава, ограничений по водительскому составу, требований к экологическому классу транспортных средств. Также представляет интерес разработка методов интерпретации предсказаний ML-моделей для повышения доверия к системе со стороны лиц, принимающих решения.

В результате проведённого исследования разработан интеллектуальный метод формирования парка грузовых автомобилей, объединяющий классификацию типов транспортных средств на основе машинного обучения с оптимизационным расчётом методом линейного программирования.

Проведён анализ фактических коэффициентов использования грузоподъёмности, на основе которого обоснована необходимость применения дифференцированных нормативов, численных как 75-й перцентиль исторических данных.

Выполнено сравнение четырёх моделей машинного обучения для классификации типа грузового автомобиля; модель градиентного бустинга показала наилучшие результаты (F1-score 0,99).

Разработана оптимизационная модель, учитывающая маршрутную структуру перевозок, дифференцированные коэффициенты загрузки и возможность обратных рейсов.

Экспериментально подтверждена эффективность предложенного метода: снижение эксплуатационных затрат на 53 %, сокращение необходимого парка на 50 %, повышение коэффициента использования грузоподъёмности на 20 % по сравнению с традиционным автоматизированным подходом.

Интеграция машинного обучения и оптимизации позволяет извлекать скрытые закономерности из исторических данных, учитывать сезонность спроса, маршрутную структуру и индивидуальные особенности заказов, что обеспечивает более точное и экономически эффективное планирование парка грузовых автомобилей.

Список литературы

- 1 Горев, А. Э. Грузовые автомобильные перевозки : учеб. пособие / А. Э. Горев. – Москва : Академия, 2018. – 304 с.
- 2 Вельможин, А. В. Грузовые автомобильные перевозки : учебник / А. В. Вельможин, В. А. Гудков, Л. Б. Миротин. – Москва : Горячая линия – Телеком, 2017. – 560 с.
- 3 Савин, В. И. Перевозки грузов автомобильным транспортом : справочное пособие / В. И. Савин. – Москва : Дело и Сервис, 2019. – 544 с.
- 4 Морозов, Б. И. Методы оптимизации парка грузовых автомобилей / Б. И. Морозов, А. В. Смирнов // Автомобильный транспорт. – 2018. – № 2. – С. 45–52.
- 5 Perboli, G. Fleet and Asset Management in Urban Freight Transportation: A Review / G. Perboli, R. Tadei // Transportation Research Procedia. – 2019. – Vol. 39. – P. 107–118. – DOI: 10.1016/j.trpro.2019.06.013.
- 6 Koç, Ç. A Review of Vehicle Fleet Management / Ç. Koç, T. Bektaş, O. Jabali // European Journal of Operational Research. – 2020. – Vol. 285, No. 2. – P. 401–418. – DOI: 10.1016/j.ejor.2019.09.045.
- 7 Ширяев, В. И. Имитационное моделирование процессов грузовых перевозок / В. И. Ширяев, Н. А. Кузнецов. – Москва : МАДИ, 2019. – 186 с.

- 8 Toth, P. Vehicle Routing: Problems, Methods, and Applications / P. Toth, D. Vigo. – 2nd ed. – Philadelphia : SIAM, 2018. – 462 p. – ISBN 978-1-61197-558-7.
- 9 Lujak, M. Fleet Management and Machine Learning: A Review / M. Lujak, A. Fernández // *Sensors*. – 2021. – Vol. 21, No. 8. – P. 2745. – DOI: 10.3390/s21082745.
- 10 Nguyen, T. Machine Learning Applications in Freight Transportation: A Review / T. Nguyen, T. Nguyen // *Journal of Advanced Transportation*. – 2020. – Vol. 2020. – P. 1–19. – DOI: 10.1155/2020/8831234.
- 11 Goodfellow, I. Deep Learning / I. Goodfellow, Y. Bengio, A. Courville. – Cambridge : MIT Press, 2016. – 800 p.
- 12 Chen, T. XGBoost: A Scalable Tree Boosting System / T. Chen, C. Guestrin // *Proceedings of the 22nd ACM SIGKDD International Conference on Knowledge Discovery and Data Mining*. – 2016. – P. 785–794. – DOI: 10.1145/2939672.2939785.
- 13 Боровская, Е. В. Интеллектуальные системы управления транспортными процессами / Е. В. Боровская, Ю. А. Попов. – Иркутск : ИрГУПС, 2020. – 212 с.
- 14 Bowersox, D. J. Supply Chain Logistics Management / D. J. Bowersox, D. J. Closs, M. B. Cooper. – 5th ed. – New York : McGraw-Hill, 2019. – 528 p.
- 15 Christopher, M. Logistics and Supply Chain Management / M. Christopher. – 5th ed. – Harlow : Pearson, 2016. – 336 p.
- 16 Ivanov, D. Digital Supply Chain Management / D. Ivanov // *International Journal of Production Research*. – 2019. – Vol. 57, No. 15. – P. 4715–4724. – DOI: 10.1080/00207543.2019.1631102.
- 17 Капустин, В. В. Оценка эффективности использования грузового автотранспорта / В. В. Капустин, А. С. Коваленко // *Вестник СибАДИ*. – 2020. – № 1. – С. 34–41.
- 18 Васильев, В. В. Методика определения рациональной структуры парка грузовых автомобилей / В. В. Васильев, Д. Н. Афоничев, Е. В. Раецкая // *Лесотехнический журнал*. – 2021. – Т. 11, № 2. – С. 112–123. – DOI: 10.12737/issn.2222-7956.
- 19 Bishop, C. M. Pattern Recognition and Machine Learning / C. M. Bishop. – New York : Springer, 2016. – 738 p.
- 20 Hastie, T. The Elements of Statistical Learning / T. Hastie, R. Tibshirani, J. Friedman. – 2nd ed. – New York : Springer, 2017. – 764 p.
- 21 Powers, D. M. W. Evaluation: From Precision, Recall and F-Measure to ROC, Informedness, Markedness and Correlation / D. M. W. Powers // *Journal of Machine Learning Technologies*. – 2020. – Vol. 2, No. 1. – P. 37–63.
- 22 Sokolova, M. A Systematic Analysis of Performance Measures for Classification Tasks / M. Sokolova, G. Lapalme // *Information Processing & Management*. – 2019. – Vol. 45, No. 4. – P. 427–437. – DOI: 10.1016/j.ipm.2009.03.002.
- 23 Ларин, О. Н. Повышение эффективности использования грузового автотранспорта / О. Н. Ларин, А. А. Казаков // *Автомобильная промышленность*. – 2019. – № 5. – С. 28–32.
- 24 Афоничев, Д. Н. Оптимизация структуры парка автомобилей при сезонных перевозках / Д. Н. Афоничев, А. Н. Петров // *Вестник ВГЛУ*. – 2021. – № 4. – С. 67–74.
- 25 Prokhorenkova, L. CatBoost: Unbiased Boosting with Categorical Features / L. Prokhorenkova, G. Gusev, A. Vorobev // *Advances in Neural Information Processing Systems*. – 2018. – Vol. 31. – P. 6638–6648.
- 26 Максимов, И. В. Управление парком грузовых автомобилей на основе анализа данных / И. В. Максимов // *Транспорт: наука, техника, управление*. – 2020. – № 3. – С. 12–18.
- 27 Семенов, В. А. Экономическая эффективность оптимизации парка грузовых автомобилей / В. А. Семенов // *Экономика и управление*. – 2021. – № 2. – С. 45–52.
- 28 Кузнецов, А. В. Прогнозирование спроса на грузовые перевозки с использованием методов машинного обучения / А. В. Кузнецов, М. А. Соколова // *Интеллектуальные системы на транспорте*. – 2020. – № 4. – С. 23–31.

References

- 1 Gorev, A. E. Freight Road Transport : textbook / A. E. Gorev. – Moscow : Akademiya, 2018. – 304 p.
- 2 Velmozhin, A. V. Freight Road Transport : textbook / A. V. Velmozhin, V. A. Gudkov, L. B. Miro-tin. – Moscow : Goryachaya liniya – Telekom, 2017. – 560 p. (In Russian)
- 3 Savin, V. I. Freight Transportation by Road : reference guide / V. I. Savin. – Moscow : Delo i Servis, 2019. – 544 p.
- 4 Morozov, B. I. Methods of Truck Fleet Optimization / B. I. Morozov, A. V. Smirnov // *Automobile Transport*. – 2018. – No. 2. – P. 45–52.

- 5 Perboli, G. Fleet and Asset Management in Urban Freight Transportation: A Review / G. Perboli, R. Tadei // *Transportation Research Procedia*. – 2019. – Vol. 39. – P. 107–118. – DOI: 10.1016/j.trpro.2019.06.013.
- 6 Koç, Ç. A Review of Vehicle Fleet Management / Ç. Koç, T. Bektaş, O. Jabali // *European Journal of Operational Research*. – 2020. – Vol. 285, No. 2. – P. 401–418. – DOI: 10.1016/j.ejor.2019.09.045.
- 7 Shiryaev, V. I. Simulation Modeling of Freight Transportation Processes / V. I. Shiryaev, N. A. Kuznetsov. – Moscow : MADI, 2019. – 186 p.
- 8 Toth, P. Vehicle Routing: Problems, Methods, and Applications / P. Toth, D. Vigo. – 2nd ed. – Philadelphia : SIAM, 2018. – 462 p. – ISBN 978-1-61197-558-7.
- 9 Lujak, M. Fleet Management and Machine Learning: A Review / M. Lujak, A. Fernández // *Sensors*. – 2021. – Vol. 21, No. 8. – P. 2745. – DOI: 10.3390/s21082745.
- 10 Nguyen, T. Machine Learning Applications in Freight Transportation: A Review / T. Nguyen, T. Nguyen // *Journal of Advanced Transportation*. – 2020. – Vol. 2020. – P. 1–19. – DOI: 10.1155/2020/8831234.
- 11 Goodfellow, I. Deep Learning / I. Goodfellow, Y. Bengio, A. Courville. – Cambridge : MIT Press, 2016. – 800 p.
- 12 Chen, T. XGBoost: A Scalable Tree Boosting System / T. Chen, C. Guestrin // *Proceedings of the 22nd ACM SIGKDD International Conference on Knowledge Discovery and Data Mining*. – 2016. – P. 785–794. – DOI: 10.1145/2939672.2939785.
- 13 Borovskaya, E. V. Intelligent Systems for Transport Process Management / E. V. Borovskaya, Yu. A. Popov. – Irkutsk : IrGUPS, 2020. – 212 p.
- 14 Bowersox, D. J. Supply Chain Logistics Management / D. J. Bowersox, D. J. Closs, M. B. Cooper. – 5th ed. – New York : McGraw-Hill, 2019. – 528 p.
- 15 Christopher, M. Logistics and Supply Chain Management / M. Christopher. – 5th ed. – Harlow : Pearson, 2016. – 336 p.
- 16 Ivanov, D. Digital Supply Chain Management / D. Ivanov // *International Journal of Production Research*. – 2019. – Vol. 57, No. 15. – P. 4715–4724. – DOI: 10.1080/00207543.2019.1631102.
- 17 Kapustin, V. V. Efficiency Assessment of Freight Vehicle Use / V. V. Kapustin, A. S. Kovalenko // *Bulletin of SibADI*. – 2020. – No. 1. – P. 34–41.
- 18 Vasiliev, V. V. Methodology for Determining the Rational Structure of a Truck Fleet / V. V. Vasiliev, D. N. Afonichev, E. V. Raetskaya // *Forestry Engineering Journal*. – 2021. – Vol. 11, No. 2. – P. 112–123. – DOI: 10.12737/issn.2222-7956.
- 19 Bishop, C. M. Pattern Recognition and Machine Learning / C. M. Bishop. – New York : Springer, 2016. – 738 p.
- 20 Hastie, T. The Elements of Statistical Learning / T. Hastie, R. Tibshirani, J. Friedman. – 2nd ed. – New York : Springer, 2017. – 764 p.
- 21 Powers, D. M. W. Evaluation: From Precision, Recall and F-Measure to ROC, Informedness, Markedness and Correlation / D. M. W. Powers // *Journal of Machine Learning Technologies*. – 2020. – Vol. 2, No. 1. – P. 37–63.
- 22 Sokolova, M. A Systematic Analysis of Performance Measures for Classification Tasks / M. Sokolova, G. Lapalme // *Information Processing & Management*. – 2019. – Vol. 45, No. 4. – P. 427–437. – DOI: 10.1016/j.ipm.2009.03.002.
- 23 Larin, O. N. Improving the Efficiency of Freight Vehicle Use / O. N. Larin, A. A. Kazakov // *Automotive Industry*. – 2019. – No. 5. – P. 28–32.
- 24 Afonichev, D. N. Optimization of Fleet Structure for Seasonal Transportation / D. N. Afonichev, A. N. Petrov // *Bulletin of VSUFT*. – 2021. – No. 4. – P. 67–74.
- 25 Prokhorenkova, L. CatBoost: Unbiased Boosting with Categorical Features / L. Prokhorenkova, G. Gusev, A. Vorobev // *Advances in Neural Information Processing Systems*. – 2018. – Vol. 31. – P. 6638–6648.
- 26 Maksimov, I. V. Truck Fleet Management Based on Data Analysis / I. V. Maksimov // *Transport: Science, Technology, Management*. – 2020. – No. 3. – P. 12–18.
- 27 Semenov, V. A. Economic Efficiency of Truck Fleet Optimization / V. A. Semenov // *Economics and Management*. – 2021. – No. 2. – P. 45–52.
- 28 Kuznetsov, A. V. Freight Demand Forecasting Using Machine Learning Methods / A. V. Kuznetsov, M. A. Sokolova // *Intelligent Transport Systems*. – 2020. – No. 4. – P. 23–31.

DOI: [10.34220/2311-8873-2026-49-57](https://doi.org/10.34220/2311-8873-2026-49-57)



УДК 629.3.067

UDC 629.3.067

2.9.5 – эксплуатация автомобильного транспорта

**СИСТЕМАТИЗАЦИЯ СЦЕНАРИЕВ
ЭКСПЛУАТАЦИИ: РАЗВИТИЕ
ПОДХОДОВ К ОБЕСПЕЧЕНИЮ
ФУНКЦИОНАЛЬНОЙ
БЕЗОПАСНОСТИ
АВТОМОБИЛЬНЫХ СИСТЕМ**

**SYSTEMATIZATION OF OPERATIONAL
SCENARIOS: EVOLUTION OF
AP-PROACHES TO ENSURING
THE FUNCTIONAL SAFETY
OF AUTOMOTIVE SYSTEMS**

Мухаметдинов Эдуард Мухаматзакиевич,
к.т.н., доцент кафедры сервиса транспорт-
ных систем, ФГАОУ ВО «Набережночел-
нинский (институт) филиал КФУ»,
Набережные Челны.

Mukhametdinov Eduard Mukhamatzakievich,
candidate of technical sciences, associate professor
of the department of transport systems service,
Naberezhnye Chelny (Institute) branch of Kazan
Federal University, Naberezhnye Chelny.

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

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

Садыков Марат Фатихович,
аспирант, ФГАОУ ВО «Набережночелнин-
ский (институт) филиал КФУ», Набережные
Челны.

Sadykov Marat Fatikhovich,
graduate student, Naberezhnye Chelny (Institute)
branch of Kazan Federal University, Naberezhnye
Chelny.

Ильмухин Ришат Ринатович,
соискатель, ФГАОУ ВО «Набережночел-
нинский (институт) филиал КФУ»,
Набережные Челны.

Ilmukhin Rishat Rinatovich,
applicant, Naberezhnye Chelny (Institute) branch
of Kazan Federal University, Naberezhnye Chelny.

Муртазин Тимур Эдуардович,
студент, кафедра сервиса транспортных
систем, ФГАОУ ВО «Набережночелнин-
ский (институт) филиал КФУ», Набережные
Челны.

Murtazin Timur Eduardovich,
student of the department of transport systems
service, Naberezhnye Chelny (Institute) branch of
Kazan Federal University, Naberezhnye Chelny.

Аннотация. Статья посвящена исследова-
нию роли каталога эксплуатационных ситуа-
ций как фундаментального элемента про-
цесса функциональной безопасности при
разработке современных автомобилей. Осо-
бое внимание уделяется применению ката-
лога в рамках анализа опасностей и оценки

Annotation. This article explores the role of a cat-
alog of operational situations as a fundamental ele-
ment of the functional safety process in the develop-
ment of modern automobiles. Particular attention is
paid to the catalog's application within the frame-
work of hazard analysis and risk assessment
(HARA) in accordance with the requirements of the

рисков (*HARA*) согласно требованиям стандарта *ISO 26262*. На примере анализа функциональной безопасности пассажирских транспортных средств продемонстрировано практическое применение разработанного каталога. Представлены результаты оценки опасных событий (потеря освещения, отказ стоп-сигналов) в различных эксплуатационных контекстах.

Ключевые слова: ФУНКЦИОНАЛЬНАЯ БЕЗОПАСНОСТЬ, КАТАЛОГ ЭКСПЛУАТАЦИОННЫХ СИТУАЦИЙ, *ISO 26262*.

ISO 26262 standard. Using the example of a functional safety analysis of passenger vehicles, the practical application of the developed catalog is demonstrated. The results of the assessment of hazardous events (loss of lighting, failure of brake lights) in various operational contexts are presented.

Keywords: FUNCTIONAL SAFETY, CATALOGUE OF OPERATING SITUATIONS, *ISO 26262*.

¹ Автор для ведения переписки

1 Состояние вопроса исследования и актуальность работы

Современные транспортные средства стремительно эволюционируют от механических устройств к сложным киберфизическим системам. Внедрение систем автоматизированного вождения (*ADAS*) и полностью автономных транспортных средств радикально увеличивает количество потенциальных сценариев взаимодействия автомобиля с окружающей средой. Традиционные подходы к анализу безопасности, основанные на экспертных оценках ограниченного набора ситуаций, становятся недостаточными. Комбинаторный перебор параметров окружающей среды, действий водителя и состояний самого автомобиля порождает практически бесконечное множество возможных эксплуатационных ситуаций, что требует разработки формализованных методов их систематизации.

Каталог эксплуатационных ситуаций представляет собой структурированный набор условий, в которых функционирует автомобиль и его системы. Он включает описание дорожных условий (тип покрытия, разметка, интенсивность движения, наличие перекрестков), погодных факторов (осадки, температура, освещенность, время суток), режимов движения (разгон, торможение, маневрирование, парковка), взаимодействия с другими участниками дорожного движения (пешеходы, велосипедисты, транспортные средства с различным уровнем автоматизации) и технических характеристик транспортного средства (скорость, состояние тормозной системы, загрузка, режимы работы *ADAS*-систем). Такой каталог служит основой для проведения анализа опасностей и оценки рисков (*HARA*), что является обязательным этапом в процессе разработки безопасных систем по *ISO 26262* [1].

Каталог эксплуатационных ситуаций формируется на основе комбинаторного перебора параметров окружающей среды, действий водителя и состояний самого автомобиля. Ключевая задача разработчика – обеспечить репрезентативность набора ситуаций, избегая как избыточности, так и пропусков потенциально опасных сочетаний факторов. Для этого используются классификационные схемы (таксономии), такие как *PEGASUS* [2], *ASAM OpenX* [3] или собственные разработки автопроизводителей. Структурирование каталога позволяет унифицировать требования к системам активной безопасности и автоматизированному вождению, создавая единый язык обмена данными между подразделениями разработки, испытательными полигонами и регуляторами.

В связи с развитием полностью автоматизированных транспортных средств в ближайшем будущем необходимо решать новые задачи в области безопасности. В работе [4] представлена методология функционального анализа безопасности на основе сценариев в соответствии со стандартом *ISO 26262* на примере автоматизированной системы парковки автомобилей (*AVP*).

Ожидается, что автономные транспортные средства окажут значительное влияние на сферу транспорта и принесут существенные преимущества, но они также создают новые проблемы в плане обеспечения безопасности [5]. Анализ опасностей и рисков является неотъемлемой частью процесса разработки, обеспечивающего функциональную безопасность системы [6, 7]. Основной целью функциональной безопасности является борьба с отказами электронных и электрических компонентов, ведущих к травмам и жертвам водителя, пассажиров и других участников дорожного движения – создание отказобезопасного транспортного средства [7].

В статье [8] рассматривается анализ функциональной безопасности системы управления высокоавтоматизированными транспортными средствами. Рассмотрен метод извлечения набора сценариев движения, который после анализа позволит обеспечить безопасность дорожного движения, а также справиться с растущим трафиком.

Взаимодействие требований, связанных со свойствами безопасности и защищенности, на примере автомобильных тормозных систем в статье [9] начинают с оценок рисков *TARA* (оценка угроз и рисков, ISO 21434) и *HARA* (Анализ опасностей и оценка рисков, ISO 26262).

Автор статьи [10] формулирует набор правил, позволяющих сократить потенциально бесконечное множество кандидатов в опасные события до ограниченного количества, которое при этом остаётся достаточным для покрытия всех целей безопасности.

Автор статьи [11] утверждает, что формальное заполнение шаблонов *HARA* без активного, осознанного выбора аналитиком опасных событий, сценариев и классификаций *ASIL* (уровень целостности автомобильной безопасности) приводит к системным ошибкам: либо к пропуску реальных опасностей, либо к необоснованно завышенным требованиям безопасности.

Статья [12] посвящена исследованию конфликтов между требованиями безопасности (в двух смыслах: защита от взлома и защита от аварий) при проектировании современных автомобилей. Авторы показывают, что попытка сделать автомобиль более защищённым от хакеров может непреднамеренно сделать его менее безопасным для водителя и пассажиров, и наоборот. Все описанные выше разработки направлены на создание предсказуемо безопасных автономных систем в условиях неполной информации и растущей сложности.

Работы [13, 14] направлены на улучшение традиционного метода анализа опасностей и оценки рисков (*HARA*) в первую очередь за счет изучения возможностей интеграции технологий машинного обучения при работе со сложными и неизвестными сценариями.

Растущая сложность автомобильных систем требует выхода за рамки отдельных стандартов. Исследователи [15, 16] в этой группе работают над объединением требований разных нормативных документов (например, *ISO 26262* по функциональной безопасности и *ISO 21448*).

Совокупность рассмотренных работ формирует целостную картину перехода автомобильной промышленности к предсказуемо безопасным автономным системам. Ключевыми векторами развития являются:

- формализация сценариев через таксономии и стандарты обмена данными;
- интеграция требований функциональной безопасности, кибербезопасности и безопасности предполагаемой функциональности;
- интеллектуализация анализа за счет методов машинного обучения для работы со сложными и неизвестными сценариями;
- осознанная экспертиза – переход от формального заполнения шаблонов к активному, структурированному анализу с применением формальных правил.

Это создает основу для разработки систем, способных функционировать в условиях неполной информации и растущей сложности дорожной среды.

2 Материалы и методы

В контексте *ISO 26262* каталог эксплуатационных ситуаций выступает исходным референтным хранилищем: для каждой выявленной функции системы инженер выбирает из каталога релевантные ситуации и оценивает в них тяжесть последствий потенциального отказа

(*Severity*), контролируемость (*Controllability*) и вероятность возникновения (*Exposure*). Без формализованного каталога процесс анализа опасностей и оценки рисков (*HARA*) рискует стать субъективным, зависящим от опыта конкретного эксперта. Наличие каталога обеспечивает прослеживаемость требований к безопасности: каждая сформулированная цель обеспечения безопасности (*safety goal*) может быть явно привязана к конкретной записи в каталоге, что критически важно при сертификации и аудите.

ISO 26262 делит процесс обеспечения безопасности на этапы, начиная с определения контекста эксплуатации и заканчивая верификацией и валидацией. Каталог эксплуатационных ситуаций служит основой для оценки потенциальных опасностей, определения требований к системе безопасности и разработки мер по их устранению.

Основные функции каталога включают:

- систематизацию условий эксплуатации;
- выявление возможных сценариев взаимодействия пользователя с системой;
- определение границ допустимых условий эксплуатации;
- поддержку анализа опасных событий.

Рассмотрим структуру каталога эксплуатационных ситуаций, он обычно включает следующие разделы:

- общие сведения о транспортном средстве и его эксплуатации;
- описание дорожных условий (погода, качество покрытия);
- описание условий движения (скорость, интенсивность трафика);
- взаимодействие водителя с системой (маневры, реакции);
- влияние внешних факторов (освещение, шум);
- особые ситуации (аварийные ситуации, неисправности).

Каждый сценарий содержит параметры: описание ситуации, вероятностные оценки, потенциальные опасности.

Создание каталога осуществляется на основе: анализа данных реальных дорожных условий; моделирования сценариев эксплуатации; использования статистических данных о ДТП и аварийных случаях; экспертных оценок инженеров по безопасности.

Инструменты автоматизации включают системы сбора данных с датчиков автомобиля, системы мониторинга дорожной обстановки и базы данных аварийных случаев.

3 Результаты исследований

Каталог эксплуатационных ситуаций служит основой для оценки вероятности возникновения различных воздействий на систему или безопасность транспортного средства. В процессе его формирования собираются и систематизируются сценарии реальной эксплуатации, учитываются условия дорожной обстановки, внешние факторы и возможные неисправности. На основе этой информации можно количественно оценить вероятность того, что определённое воздействие действительно произойдет в реальных условиях эксплуатации.

Вероятность воздействия классифицируется классами вероятности от E0 до E4 (табл. 1).

Для получения вероятности эксплуатационной ситуации необходимо знать вероятность возникновения дорожных ситуаций. Например, пассажирский транспорт ежедневно эксплуатируется на городских дорогах, чему соответствует вероятность нахождения на городской дороге – E4, а проезд ж/д переезда – это редкое событие E1. (табл.2).

Таблица 1 – Вероятность воздействия

Описание	Класс				
	E0	E1	E2	E3	E4
Вероятность	Невероятное	Очень низкая вероятность	Низкая вероятность	Средняя вероятность	Высокая вероятность
По частоте	Невероятное	Реже раза в год	Несколько раз в год	Несколько раз в месяц	Каждый день
От времени эксплуатации, %	0 %	0,01...0,1 %	0,1...1 %	1...10 %	10 % и более
По числовому коэффициенту ситуации	0	0,001	0,01	0,1	1

Таблица 2 – Примеры дорожных ситуаций для составления эксплуатационной ситуации

Местонахождения	Городская дорога (E4), туннель (E2), ж/д переезд (E1)
Дорожные условия	Любые дорожные условия (E4), уклон вниз (до 10 градусов) (E3), уклон вверх (до 10 градусов) (E3), гололедица (E2)
Окружающая среда	Любая температура (E4), 0 градусов Цельсия (E4), температура выше 5 градусов Цельсия (E4), низкая (-40...0 градусов Цельсия) (E4)
Дорожное движение и люди	Не имеет значение (E4), водитель и пассажиры в салоне (E4), полный автобус (E4), посадка/высадка пассажиров на остановке (E4)
Скорость и динамика	0 км/ч (E4), любая скорость (< 80 км/ч) (E4), выполнение поворота (руление) (E4), городская скорость (< 50 км/ч) (E4), задний ход (E2), любая скорость (E4), маневр у остановки общ. транспорта (E4), рекуперация (E4), ускорение (E4)
Применение объекта	Начало движения (E4), номинальный (рабочий) режим (E4), общее вождение (E4), перевозка пассажиров (E4), выполнение поворота на перекрестке (E3)
Другие эксплуатационные ситуации	ТС остановлено (E4), смена направления движения (E3), торможение (E4), движение по прямой (E4), движение назад (E2), торможение (E4), движение по подъему (E4), движение по спуску (E3), объезд препятствия (E2), особые ситуации: буксировка ТС (E1), ДТП (E1), отъезд от остановки общ. транспорта (E4), перестроение (E4), смена направления движения (E4), снижение скорости (E4), техническая неисправность (E1), ТС остановлено (E4)

Для получения вероятности возникновения эксплуатационной ситуации, необходимо рассчитать итоговой параметр E для данной ситуации. Для этого необходимо перемножить соответствующие числовые коэффициенты дорожных ситуаций, например, для ситуации: городская дорога (E4), любая температура (E4), движение и люди не имеют значение (E4), режим работы: номинальный (E4), городская скорость (< 50 км/ч) (E4), выполнение поворота на перекрестке (E3), необходимо последовательно перемножить следующие коэффициенты, $1 \times 1 \times 1 \times 1 \times 1 \times 0,1 = 0,1$, что соответствует E3.

Примеры строк из каталога эксплуатационных ситуаций для пассажирских транспортных средств представлены в табл. 3. Каталог эксплуатационных ситуаций используется на этапах: идентификация потенциальных опасностей в различных сценариях; определение требований к безопасности: установление необходимых уровней полноты безопасности автомобиля для каждого сценария; разработка мер по снижению риска: проектирование систем защиты или предупреждений. Это обеспечивает системный подход к обеспечению безопасности на всех этапах жизненного цикла продукта.

Таблица 3 – Примеры строк из каталога эксплуатационных ситуаций для пассажирских транспортных средств

Эксплуатационная ситуация	Итоговая вероятность воздействия	Комментарий по вероятности воздействия
Городская дорога, любые дорожные условия, любая температура, водитель и пассажиры в салоне, любая скорость (<80 км/ч)	E4	Происходит во время каждой поездки
Городская дорога, любая температура, движение и люди не имеют значение, режим работы: номинальный, городская скорость (< 50 км/ч), выполнение поворота на перекрестке	E3	По продолжительности менее 10 %
Туннель, любые дорожные условия, любая температура, дорожное движение и люди не имеют значение, любая скорость	E2	Протяженность туннелей менее 1 % дорог
Ж/д переезд, любые дорожные условия, любая температура, дорожное движение и люди не имеют значение, любая скорость (< 80 км/ч)	E1	По продолжительности менее 0,1 %

В рамках анализа функциональной безопасности для пассажирских транспортных средств был разработан каталог эксплуатационных ситуаций. В табл. 4 представлена часть данного каталога.

Таблица 4 – Пример анализа опасностей и оценки рисков

Опасность	Эксплуатационная ситуация (резюме)	Потенциальные последствия	Управляемость	S	E	C	ASIL
1	2	3	4	5	6	7	8
Потеря ближнего света (с обеих сторон)	Городская дорога, любые дорожные условия, любая температура, водитель и пассажиры в салоне, любая скорость (< 80 км/ч), происходит во время почти каждой поездки	Автомобиль выезжает за пределы полосы движения и врезается в препятствие, что приводит к смертельным травмам	Водитель прибегает к снижению скорости, другие участники движения проинформированы о торможении, ситуация легко контролируемая	S3	E4	C1	B
Потеря ближнего света (с обеих сторон)	Городская дорога, любые дорожные условия, любая температура, дорожное движение и люди не имеют значения, режим работы: номинальный, городская скорость (< 50 км/ч), по продолжительности менее 10 %	Автомобиль выезжает за пределы полосы движения и врезается в препятствие, что приводит к смертельным травмам	Водитель прибегает к снижению скорости, другие участники движения проинформированы о торможении, ситуация легко контролируемая	S3	E3	C1	A

Продолжение табл. 4

1	2	3	4	5	6	7	8
Потеря стоп-сигнала (с обеих сторон)	Туннель, любые дорожные условия, любая температура, дорожное движение и люди не имеют значения, общее вождение, любая скорость, очень низкая вероятность (протяженность туннелей менее 1 % дорог)	Автомобиль выезжает за пределы полосы движения и врывается в препятствие, что приводит к смертельным травмам	Водитель прибегает к снижению скорости, другие участники движения проинформированы о торможении, ситуация легко контролируемая	S3	E2	C1	QM
Потеря ближнего света (с обеих сторон)	Ж/д переезд, любые дорожные условия, любая температура, дорожное движение и люди не имеют значения, общее вождение, любая скорость (< 80 км/ч), по продолжительности менее 0,1 %	Автомобиль выезжает за пределы полосы движения и врывается в препятствие, что приводит к смертельным травмам	Водитель прибегает к снижению скорости, другие участники движения проинформированы о торможении, ситуация легко контролируемая	S3	E1	C1	QM

Как видно из анализа *HARA*, при идентичных параметрах тяжести последствий *S* и управляемости *C* параметр *E* значительно влияет на уровень целостности автомобильной безопасности *ASIL*. Поэтому важно обеспечить качественное наполнение каталога эксплуатационных ситуаций, чтобы обеспечить полную объективность анализа функциональной безопасности.

4 Обсуждение и заключение

Современные автомобили оснащены сложными электронными системами, выполнение требований безопасности которых требует тщательного анализа условий эксплуатации. Стандарт *ISO 26262* определяет процессы оценки и управления рисками, связанными с функциональной безопасностью. Каталог эксплуатационных ситуаций является неотъемлемой частью процесса обеспечения безопасности согласно стандарту *ISO 26262*. Его правильное формирование и применение позволяют систематически выявлять потенциальные опасности и разрабатывать меры по их устранению или снижению риска. В условиях развития технологий автоматизации сбора данных и моделирования сценариев ожидается дальнейшее совершенствование методов создания каталогов эксплуатационных ситуаций, что повысит уровень безопасности автомобильных систем.

Формализованный каталог эксплуатационных ситуаций обеспечивает прослеживаемость требований к безопасности, объективность анализа *HARA* и является необходимой основой для сертификации и аудита при разработке систем, соответствующих требованиям *ISO 26262*.

Список литературы

- 1 ГОСТ Р ИСО 26262-2-2020. Дорожные транспортные средства. Функциональная безопасность. Часть 2. Менеджмент функциональной безопасности. — Москва: Стандартинформ, 2020. — VI. — 54 с.
- 2 Winner, H., Lemmer, K., Form, T., & Mazzega, J. (2019). PEGASUS – First Steps for the Safe Introduction of Automated Driving. In G. Meyer & S. Beiker (Eds.), Road Vehicle Automation 5 (pp. 185–195). Springer. (Lecture Notes in Mobility).
- 3 Yoo, D., Oh, T., & Yoo, J. (2024). Scenario Format-Conversion and Consistency-Validation Methodology Based on OpenSCENARIO for Autonomous Driving. Transactions of the Korean Society of Automotive Engineers, 32(5), 431–441. <https://doi.org/10.7467/KSAE.2024.32.5.431>.

4 Schönmann V., Winner H., Glock T., Otten S., Sax E., Boeddeker B., Verhaeg G., Tronci F., Padilla G. G.. Scenario-based functional safety for automated driving on the example of valet parking. *Advances in Intelligent Systems and Computing* ((AISC, volume 886). pp 53–64.

5 Warg, F., Gassilevski, M., Tryggvesson, J., Izosimov, V., Werneman, A., & Johansson, R. (2016). Defining Autonomous Functions Using Iterative Hazard Analysis and Requirements Re-finement. In A. Skavhaug, J. Guiochet, E. Schoitsch, & F. Bitsch (Eds.), *Computer Safety, Reliability, and Security: SAFECOMP 2016 Workshops: ASSURE, DECSoS, SASSUR, and TIPS*, Trondheim, Norway, September 20, 2016, *Proceedings* (Vol. 9923, pp. 286–297). Springer. (Lecture Notes in Computer Science). https://doi.org/10.1007/978-3-319-45480-1_23.

6 Мухаметдинов Э.М., Габсалихова Л.М., Садыков М.Ф., Ильмухун Р.Р., Муртазин Т.Э. Анализ опасностей и оценка рисков отказа функций системы внешнего освещения транспортных средств. *Транспорт: наука, техника, управление. Научный информационный сборник*. 2025. – № 10. – С. 44-50.

7 Мухаметдинов Э.М., Габсалихова Л.М., Садыков М.Ф., Ризатдинов И.Т., Логинова М.В., Ильмухун Р.Р. К вопросу о функциональной безопасности транспортных средств. *Социально-экономические и технические системы: исследование, проектирование, оптимизация*. – 2025. – № 1 – (99). – С. 102-107.

8 Mishkina, A., Kirovsky, O., & Mozolin, I. (2022). Creating a set of scenarios for the purpose of analyzing the functional safety of control systems. *International Journal of Open Information Technologies*, 10(5), 53–60. <http://injoit.org/index.php/j1/article/view/1274>.

9 Arnaboldi L., Aspinall D., Kolb C., Radomirović S. From Bouncing Break-ins to Frictional Firewalls: Ideas About Interacting Requirements for Vehicle Safety and Security. *International Conference on Computer Safety, Reliability, and Security*, volume 15955, 2025

10 Johansson, R. Efficient Identification of Safety Goals in the Automotive E/E Domain. In *Proceedings of the 8th European Congress on Embedded Real Time Software and Systems (ERTS 2016)*. Toulouse, France. HAL Id: hal-01292289.

11 Johansson, R. (2015). The Importance of Active Choices in Hazard Analysis and Risk Assessment. In *2nd Workshop on Critical Automotive Applications: Robustness & Safety (CARS 2015)*. Paris, France. HAL Id: hal-01193028.

12 Arnaboldi L. From Bouncing Break-ins to Frictional Firewalls: Ideas About Interacting Requirements for Vehicle Safety and Security / L. Arnaboldi, D. Aspinall, C. Kolb, S. Radomirović // *Computer Safety, Reliability, and Security. SAFECOMP 2025 Workshops : Proceedings of the 44th International Conference*, Stockholm, Sweden, September 9, 2025. – Cham : Springer, 2025. – P. 85-98. – (Lecture Notes in Computer Science ; vol. 15955). – DOI: 10.1007/978-3-031-68781-5-7.

13 Khatun, M., Wagner, F., Jung, R., & Glass, M. (2025). Conceptual Approaches to Identify the Hazardous Scenarios in Safety Analysis for Automated Driving Systems. In *Proceedings of the 17th International Conference on Agents and Artificial Intelligence (ICAART 2025)* (Vol. 1, pp. 549-555). SciTePress. <https://doi.org/10.5220/0013250900003890>.

14 Sini, J., & Violante, M. (2020). A simulation-based methodology for aiding advanced driver assistance systems hazard analysis and risk assessment. *Microelectronics Reliability*, *108*, 113661. <https://doi.org/10.1016/j.microrel.2020.113661>.

15 Sari, A., & Soleimani, M. (2025). Integration of Safety Standards for a Unified Safety Framework for Automated Vehicles. *SAE Technical Paper*, (2025-01-8717). <https://doi.org/10.4271/2025-01-8717>.

16 Muthusamy, S. (2025). Hybrid Safety Framework for Autonomous Off-Highway Vehicles. *SAE Technical Paper*, (2025-28-0325). <https://doi.org/10.4271/2025-28-0325>.

References

1 GOST R ISO 26262-2-2020. Road vehicles. Functional safety. Part 2. Functional safety management. Moscow: Standartin-form, 2020. – VI, – 54 p.

2 Winner, H., Lemmer, K., Form, T., & Mazzega, J. (2019). PEGASUS—First Steps for the Safe Introduction of Automated Driving. In G. Meyer & S. Beiker (Eds.), *Road Vehicle Automation 5* (pp. 185–195). Springer. (Lecture Notes in Mobility).

3 Yoo, D., Oh, T., & Yoo, J. (2024). Scenario Format-Conversion and Consistency-Validation Methodology Based on OpenSCENARIO for Autonomous Driving. *Transactions of the Korean Society of Automotive Engineers*, 32(5), 431–441. <https://doi.org/10.7467/KSAE.2024.32.5.431>

4 Schönmann V., Winner H., Glock T., Otten S., Sax E., Boeddeker B., Verhaeg G., Tronci F., Padilla G. G. Scenario-based functional safety for automated driving on the example of valet parking. *Advances in Intelligent Systems and Computing* ((AISC, volume 886).pp 53–64

5 Warg, F., Gassilevski, M., Tryggvesson, J., Izosimov, V., Werneman, A., & Johansson, R. (2016). Defining Autonomous Functions Using Iterative Hazard Analysis and Requirements Re-finement. In A. Skavhaug, J. Guiochet, E. Schoitsch, & F. Bitsch (Eds.), *Computer Safety, Reliability, and Security: SAFECOMP 2016 Workshops: ASSURE, DECSoS, SASSUR, and TIPS*, Trondheim, Norway, September 20, 2016, *Proceedings* (Vol. 9923, pp. 286–297). Springer. (Lecture Notes in Computer Science). https://doi.org/10.1007/978-3-319-45480-1_23

6 Mukhametdinov E.M., Gabsalikhova L.M., Sadykov M.F., Ilmukhin R.R., Murtazin T.E. Hazard analysis and risk assessment of failure of external lighting system functions of vehicles. *Transport: Science, Technology, Management. Scientific information collection*. 2025. - No. 10. - P. 44-50.

7 Mukhametdinov E.M., Gabsalikhova L.M., Sadykov M.F., Rizatdinov I.T., Loginova M.V., Ilmukhin R.R. On the issue of functional safety of vehicles. *Socio-economic and technical systems: research, design, optimization*. - 2025. - No. 1 - (99). – pp. 102-107.

8 Mishkina, A., Kirovsky, O., & Mozolin, I. (2022). Creating a set of scenarios for the purpose of analyzing the functional safety of control systems. *International Journal of Open Information Technologies*, 10(5), 53–60. <http://injoit.org/index.php/j1/article/view/1274>

9 Arnaboldi L., Aspinall D., Kolb C., Radomirović S. From Bouncing Break-ins to Frictional Firewalls: Ideas About Interacting Requirements for Vehicle Safety and Security. *International Conference on Computer Safety, Reliability, and Security*, volume 15955, 2025

10 Johansson, R. Efficient Identification of Safety Goals in the Automotive E/E Domain. In *Proceedings of the 8th European Congress on Embedded Real Time Software and Systems (ERTS 2016)*. Toulouse, France. HAL Id: hal-01292289.

11 Johansson, R. (2015). The Importance of Active Choices in Hazard Analysis and Risk Assessment. In *2nd Workshop on Critical Automotive Applications: Robustness & Safety (CARS 2015)*. Paris, France. HAL Id: hal-01193028

12 Arnaboldi L. From Bouncing Breakins to Frictional Firewalls: Ideas About Interacting Requirements for Vehicle Safety and Security / L. Arnaboldi, D. Aspinall, C. Kolb, S. Radomirović // *Computer Safety, Reliability, and Security. SAFECOMP 2025 Workshops : Proceedings of the 44th International Conference*, Stockholm, Sweden, September 9, 2025. – Cham : Springer, 2025. – P. 85–98. – (Lecture Notes in Computer Science; vol. 15955). – DOI: 10.1007/978-3-031-68781-5_7.

13 Khatun, M., Wagner, F., Jung, R., & Glass, M. (2025). Conceptual Approaches to Identify the Hazardous Scenarios in Safety Analysis for Automated Driving Systems. In *Proceedings of the 17th International Conference on Agents and Artificial Intelligence (ICAART 2025)* (Vol. 1, pp. 549-555). SciTePress. <https://doi.org/10.5220/0013250900003890>

14 Sini, J., & Violante, M. (2020). A simulation-based methodology for aiding advanced driver assistance systems hazard analysis and risk assessment. *Microelectronics Reliability*, *108*, 113661. <https://doi.org/10.1016/j.microrel.2020.113661>

15 Sari, A., & Soleimani, M. (2025). Integration of Safety Standards for a Unified Safety Framework for Automated Vehicles. *SAE Technical Paper*, (2025-01-8717). <https://doi.org/10.4271/2025-01-8717>

16 Muthusamy, S. (2025). Hybrid Safety Framework for Autonomous Off-Highway Vehicles. *SAE Technical Paper*, (2025-28-0325). <https://doi.org/10.4271/2025-28-0325>

© Мухаметдинов Э. М., Габсалихова Л. М., Садыков М. Ф.,
Ильмухин Р. Р., Муртазин Т. Э., 2026

DOI: 10.34220/2311-8873-2026-58-68



УДК 656.1

UDC 656.1

2.9.5 – эксплуатация автомобильного транспорта

**ИССЛЕДОВАНИЕ НАЕЗДОВ
НА ПРЕПЯТСТВИЯ В АСПЕКТЕ
УСЛОВИЙ ИХ ВОЗНИКНОВЕНИЯ
И ХАРАКТЕРИСТИК ВОДИТЕЛЯ**

**STUDY OF OBSTACLE COLLISIONS
IN RELATION TO THEIR OCCURRENCE
CONDITIONS AND DRIVER
CHARACTERISTICS**

✉¹ **Печатнова Елена Владимировна**,
к.т.н., доцент, доцент кафедры информатики
и специальной техники, Барнаульский юри-
дический институт МВД России; доцент ка-
федры «Автомобильный транспорт и назем-
ные технологические системы», Алтайский
государственный технический университет
им. И.И. Ползунова, г. Барнаул,
e-mail: phukcia@yandex.ru

✉¹ **Pechatnova Elena Vladimirovna**,
candidate of technical sciences, associate profes-
sor, associate professor, department of computer
science and specialized technology, Barnaul law
institute of the Ministry of Internal Affairs of Rus-
sia; associate professor, department of automobile
transport and ground-based technological systems,
Altai state technical university named after I.I.
Polzunov, Barnaul, e-mail: phukcia@yandex.ru

Кiryushin Иван Иванович,
старший преподаватель кафедры информа-
тики и специальной техники, Барнаульский
юридический институт МВД России; препо-
даватель колледжа, магистрант, Алтайский
государственный технический университет
им. И.И. Ползунова, г. Барнаул.

Kiryushin Ivan Ivanovich,
senior lecturer, department of computer science
and specialized technology, Barnaul law institute
of the Ministry of Internal Affairs of Russia;
college lecturer, master's student, Altai state tech-
nical university named after I.I. Polzunov, Barnaul.

Нагорный Николай Николаевич,
к.филос.н., доцент, доцент кафедры гумани-
тарных и социально-экономических дисци-
плин, Сибирский юридический институт
МВД России, г. Красноярск.

Nagorny Nikolai Nikolaevich,
candidate of philosophy, associate professor, asso-
ciate professor of the department of humanities and
socio-economic disciplines, Siberian law institute
of the Ministry of Internal Affairs of Russia,
Krasnoyarsk.

Еськов Александр Васильевич,
д.т.н., профессор кафедры Математики и ин-
форматики, Краснодарское Высшее военное
авиационное училище лётчиков имени
Героя Советского Союза А.К. Серова,
г. Краснодар.

Eskov Alexander Vasilievich,
doctor of technical sciences, professor, department
of mathematics and computer science, Krasnodar
Higher military aviation school of pilots named after
Hero of the Soviet Union A.K. Serov, Krasnodar.

Аннотация. Настоящее исследование посвя-
щено изучению факторов возникновения
ДТП, связанных с наездами транспортных
средств на препятствия. Основной целью ра-
боты является определение частотных законо-
мерностей распределения этих ДТП. В каче-
стве факторов рассмотрены: период суток,

Annotation. The present study is devoted to inves-
tigating the factors contributing to road traffic acci-
dents involving vehicle collisions with obstacles.
The primary objective of this work is to identify fre-
quency patterns in the distribution of such accidents.
Factors considered include time of day, type of ob-
stacle, month of the year, driver characteristics, and

вид препятствия, месяц года, характеристики водителей и управляемых ими транспортных средств. Для работы использована обширная база данных, содержащая подробную информацию о времени, условиях наездов на препятствия и индивидуальные особенности водителей. Проведено статистическое исследование методом одно- и многомерного частотного анализа. Результаты представлены в виде графиков распределения указанных факторов. Результаты исследования будут полезны для повышения уровня безопасности на дорогах, разработки профилактических мероприятий и формирования рекомендаций по повышению квалификации водителей.

Ключевые слова: ДОРОЖНО-ТРАНСПОРТНАЯ АВАРИЙНОСТЬ, НАЕЗДЫ НА ПРЕПЯТСТВИЯ, ЧАСТОТНЫЙ АНАЛИЗ ДТП, ХАРАКТЕРИСТИКИ ВОДИТЕЛЯ, АВТОМОБИЛЬНЫЕ ДОРОГИ ФЕДЕРАЛЬНОГО ЗНАЧЕНИЯ.

types of vehicles involved. A comprehensive database containing detailed information on accident times, conditions surrounding collisions, and individual driver profiles was utilized for analysis. Statistical research using one-dimensional and multidimensional frequency analysis methods has been conducted. The results obtained allowed constructing clear graphs illustrating the distributions of these factors. The findings will be useful for enhancing road safety levels, developing preventive measures, and formulating recommendations aimed at improving drivers' qualifications.

Keywords: ROAD ACCIDENTS, COLLISION BETWEEN A VEHICLE AND OBSTACLE, FREQUENCY ANALYSIS OF ROAD ACCIDENTS, DRIVER CHARACTERISTICS, FEDERAL MOTORWAY.

¹ Автор для ведения переписки

1 Состояние вопроса исследования и актуальность работы

Современные тенденции развития общества характеризуются сохранением значимости вопросов, касающихся безопасности дорожного движения (БДД) [1-3]. Рост числа автомобилей, увеличение подвижности населения и усиление транспортной загруженности требуют повышения степени ответственности всех участников дорожного движения, включая автомобилистов, пешеходов и пассажиров [4-6]. Несмотря на активные усилия государственных структур и общественных институтов, направленные на преодоление существующих трудностей, наблюдаемые темпы сокращения ДТП остаются недостаточными для реализации целевых ориентиров, предусмотренных соответствующими государственными программами [7, 8].

Одной из ключевых проблем в сфере обеспечения БДД выступает высокий уровень аварийности на автомобильных дорогах федерального значения (ФАД), характеризующийся более серьезными последствиями ДТП по сравнению с прочими категориями дорог [9]. К одному из распространенных видов ДТП на ФАД относят наезды на препятствия. Последствия наезда на препятствие могут включать летальный исход и серьезные травмы водителя и пассажиров автомобиля, повреждение транспортного средства (ТС), дорожной инфраструктуры (например, барьерного ограждения), нарушение дорожного покрытия, создание помех движению транспорта [10].

В сфере анализа факторов, влияющих на возникновение наезда на препятствие мировым сообществом получены следующие результаты. Согласно исследованию [11] более половины наездов на препятствия происходят на сухой проезжей части, в светлое время суток; около трети наездов отмечаются при пасмурной погоде, а половина – при ясной; также указывается, что «подавляющее большинство наездов происходили на прямолинейных и горизонтальных участках УДС». Также проведен анализ характеристик водителей и их нарушений, определено, что наиболее распространенным было несоответствие выбранной скорости конкретным условиям движения и превышение установленной скорости движения, которое обычно было совершено

мужчинами в возрасте 18-39 лет со стажем вождения более 10 лет. В работе [12] указывается связь частоты наездов на препятствия с интенсивностью движения, а также с периодом года – выявлен пик возникновения ДТП этого вида в осенне-зимний период. В работе [13], проведенной на основе данных об аварийности в Новом Южном Уэльсе (Австралия), проанализирована частота наездов в зависимости от препятствия, определено, что наибольшая доля приходится на деревья и столбы инженерных коммуникаций (39,4 % и 39,2 % соответственно); немного другое распределение получено хорватскими учеными: доля наездов на деревья составила 44 %, на столбы инженерных коммуникаций – 12 % и на ограждения – 10 % [14].

Работа зарубежных исследователей, направленная на оценку тяжести последствий ДТП при наезде на различные типы препятствий, содержит следующие результаты: вероятность летального исхода водителя при наезде на металлическое ограждение барьерного типа была ниже в сравнении с аналогичной вероятностью при наезде на деревья, столбы и ограждения парапетного типа в 3,1, 4,7 и 2,5 раза соответственно [15]. В то же время аналогичное исследование в горной местности показало высокую тяжесть последствий при наезде на металлическое ограждение барьерного типа [16].

Ученые из Хорватии определили отдельные характерные особенности наездов на препятствия: определено, что около половины смертельных случаев происходит ночью, часто с участием водителей в состоянии алкогольного опьянения [14]. Алкогольное опьянение как значимый фактор возникновения наезда на препятствие указывается и в работе [17], также выявлено, что водители, не использующие ремни безопасности, подвержены повышенному риску получения более тяжелых травм даже при срабатывании подушки безопасности.

Некоторые зарубежные исследования посвящены оценке тяжести последствий ДТП с участием мотоциклов, в частности в работе [18] определено, что наезд мотоциклиста на придорожный объект отличается более высоким риском смертельного исхода, чем падения или столкновения с другим транспортным средством.

Проведенный анализ существующих исследований выявил дефицит публикаций по тематике, связанной с оценкой влияния различных факторов на частоту наездов на препятствия. Кроме того, отдельные результаты носят противоречивый характер, что указывает на зависимость распределения аварийности от местных условий и территориальных особенностей.

Целью работы является оценка условий возникновения наездов на препятствия на ФАД и характеристик водителей, совершивших наезд.

2 Материалы и методы

Исследование проведено путем анализа базы данных наездов на препятствия, сопровождающихся повреждением ТС и/или травмированием участников движения, произошедших на автомобильных дорогах федерального значения Алтайского края в течение периода с 2023 по 2025 годы включительно. Общее количество рассмотренных случаев составило 322 ДТП.

Научное исследование проводилось на основании полученных данных о датах наездов на препятствия, временных показателях, типах препятствий, характеристиках водителей (включая возраст, стаж вождения и нарушение правил дорожного движения, повлекшее наезд), а также видах ТС, участвовавших в авариях. Для дальнейшего углубленного анализа были использованы специализированные сервисы («Карта дня и ночи», предоставляемая Яндекс картами¹) и программное обеспечение *Microsoft Excel* для определения периода суток и конкретного месяца каждого происшествия соответственно.

Работа была разделена на две основные стадии исследования. Первая стадия посвящена выявлению закономерностей аварийности относительно различных типов препятствий, месяца года и периода суток. Вторая же направлена на изучение характеристик самих водителей – распределение по возрасту, стажу вождения, нарушению ПДД, управляемому ТС.

¹ <https://yandex.ru/maps/night-overlay/>

Для обработки и визуализации собранных данных применялись методы одномерного и двумерного частотного анализа, реализуемые посредством программного пакета Microsoft Excel и статистического комплекса *Statistica*. Итоги исследований представлены в форме графиков-гистограмм, отображающих полученные частоты распределений изучаемых признаков.

3 Результаты исследований

На начальном этапе исследования было сформировано распределение наездов на препятствия согласно временному интервалу в разрезе месяцев календарного года, представленное графически на рис. 1. Наибольшее число наездов на препятствие регистрируется в осенне-зимний период – с октября по январь. Это значимо отличается от общего распределения ДТП по месяцам на ФАД – максимальные значения традиционно приходятся на теплый период года.

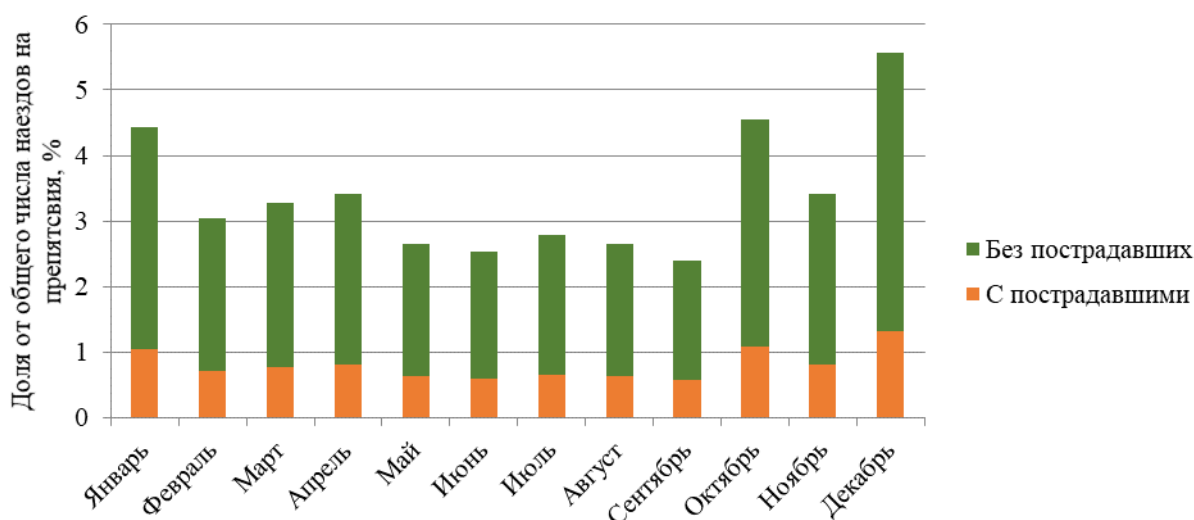


Рисунок 1 – Распределение наездов на препятствия по месяцам

На рис. 2 представлено распределение наездов на препятствия по периоду суток. Суммарно в дневное время происходит около 60 % всех наездов на препятствия, причем распределение среди наездов с пострадавшими и без них схоже – среди наездов без пострадавших в дневное время регистрируется 59 % аварий, в ночное время 23 %, в сумеречное около 18 %; среди наездов с пострадавшими процентное соотношение следующее: 63 %, 19 %, 8 % в дневное, ночное, сумеречное время соответственно.

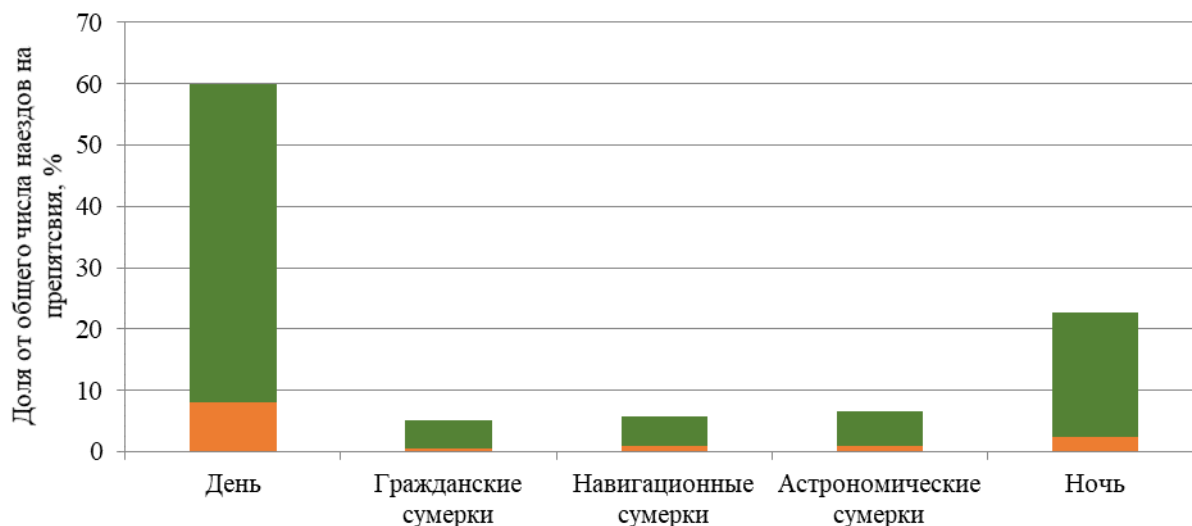


Рисунок 3 – Распределение наездов на препятствия по периоду суток

Проведен анализ распределения наездов по периоду суток (рис. 3) и по типу препятствия (рис. 4). Он показал, что чаще всего рассматриваемый вид ДТП связан с наездами на ограждение, которые занимают более половины от общей совокупности. Также распространены такие препятствия как: дорожные знаки, опоры освещения, ямы, отсоединившиеся колеса; встречаются наезды на деревья, снежные валы, бордюры и прочее, однако эти ДТП занимают не более 2 % от общей выборки. Следует отметить, что ДТП с пострадавшими отмечались только при наезде на два вида препятствий: ограждения и опоры освещения.

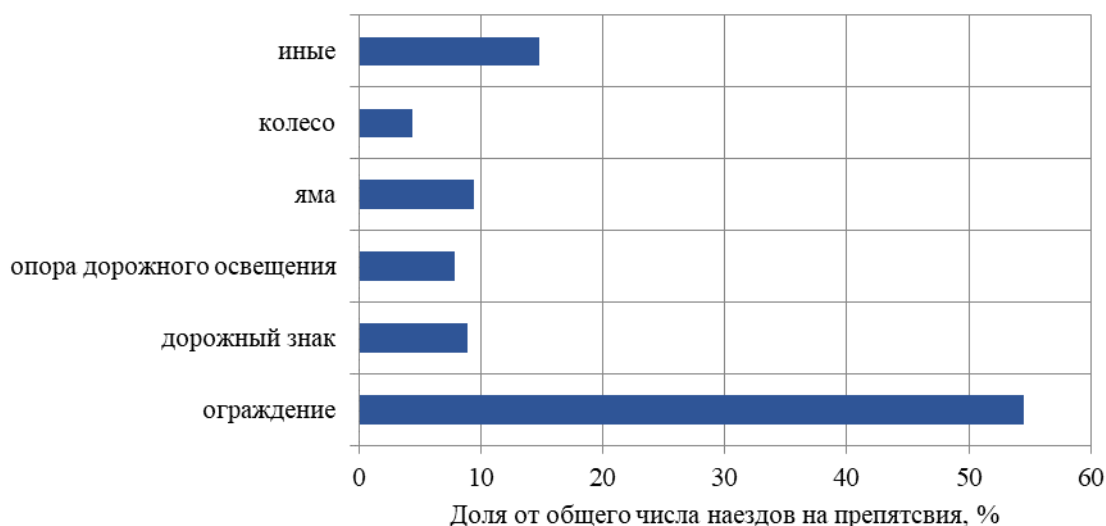


Рисунок 4 – Распределение наездов по видам препятствия

Далее проведен частотный анализ характеристик водителей, которые совершили наезд на препятствие. Проанализировано распределение по возрасту и стажу (рис. 5). Определено два основных максимума: со стажем вождения до 5 лет и возрастом от 20 до 25 лет и со стажем от 15 до 20 лет и в возрастной группе от 35 до 40 лет.

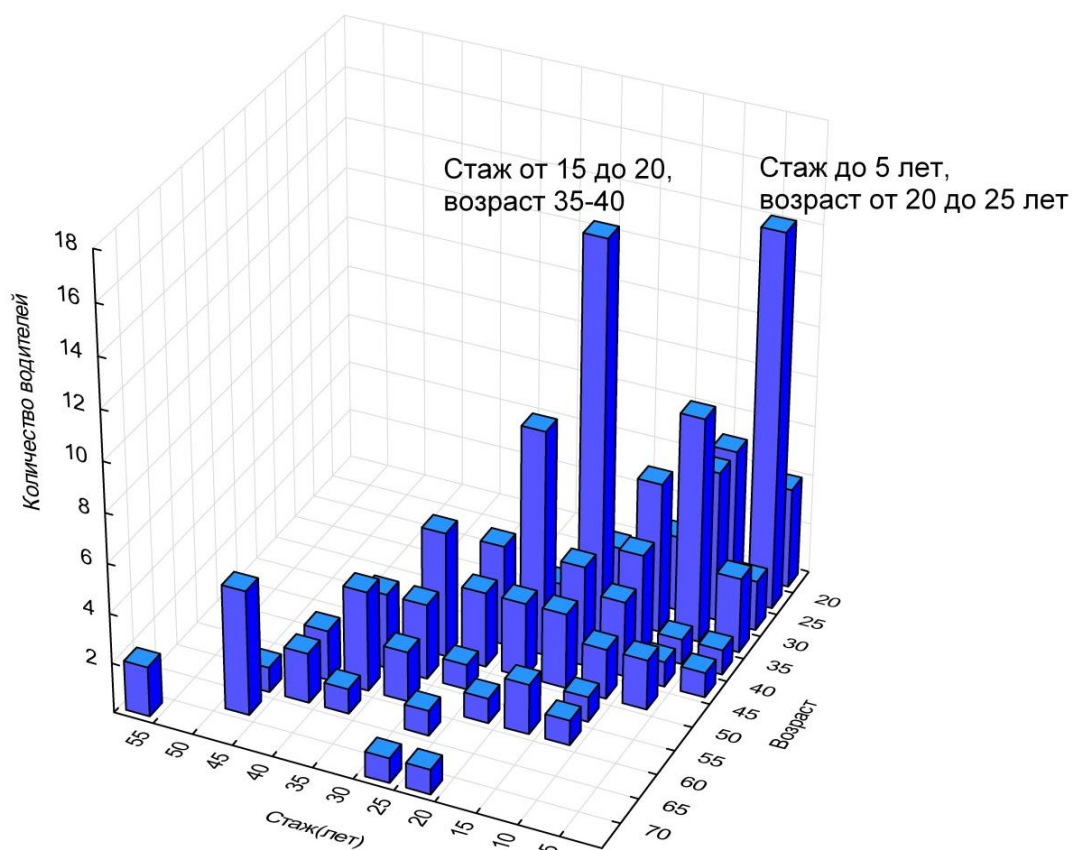


Рисунок 5 – Распределение водителей по стажу и возрасту

Проведен анализ непосредственных нарушений ПДД при наезде на препятствия. Определено, что 87 % от всех нарушений ПДД занимают два вида нарушений: нарушение правил расположения ТС на проезжей части (16 %) и несоответствие скорости конкретным условиям движения (71 %). Среди прочих нарушений: несоблюдение бокового интервала, неправильный выбор дистанции и другие.

Проведен двухмерный анализ распределения водителей в паре «непосредственное нарушение ПДД – возраст», результаты которого показаны на рис. 6.

Анализ позволяет сделать вывод о том, что нарушение, связанное с неверным выбором скоростного режима более характерно для молодого и среднего возраста. Нарушение правил расположения распределено по возрастным группам практически равномерно. Также примечательно, что среди наиболее молодых водителей (до 25 лет) фиксируются различные нарушения, что отличает этих водителей от других возрастных групп.

Проведено исследование влияния алкогольного опьянения как фактора возникновения наезда на препятствие на ФАД. Для этого получены сведения о наличии алкогольного опьянения среди водителей, совершивших наезд на препятствие, где погибли или ранены люди, т.е. анализировалась только выборка отчетных наездов на препятствия. Определено, что треть рассматриваемых ДТП совершено водителями в состоянии алкогольного опьянения. Двухмерный анализ, отражающий частное распределение водителей в алкогольном опьянении по возрастным группам, показал, что 43 % из них находились в возрастной группе от 20 до 30 лет. В возрастной группе от 55 до 65 лет такие водители отсутствовали. Аналогичный анализ по стажу вождения показал, что 42 % водителей имели стаж вождения от 5 до 10 лет и 25 % – от 10 до 15 лет. Со стажем вождения от 25 до 55 лет водители в алкогольном опьянении отсутствовали. Кроме того выявлено, что среди водителей в алкогольном опьянении отмечалось только два вида нарушений: нарушение правил расположения ТС на проезжей части и несоответствие скорости конкретным условиям движения.

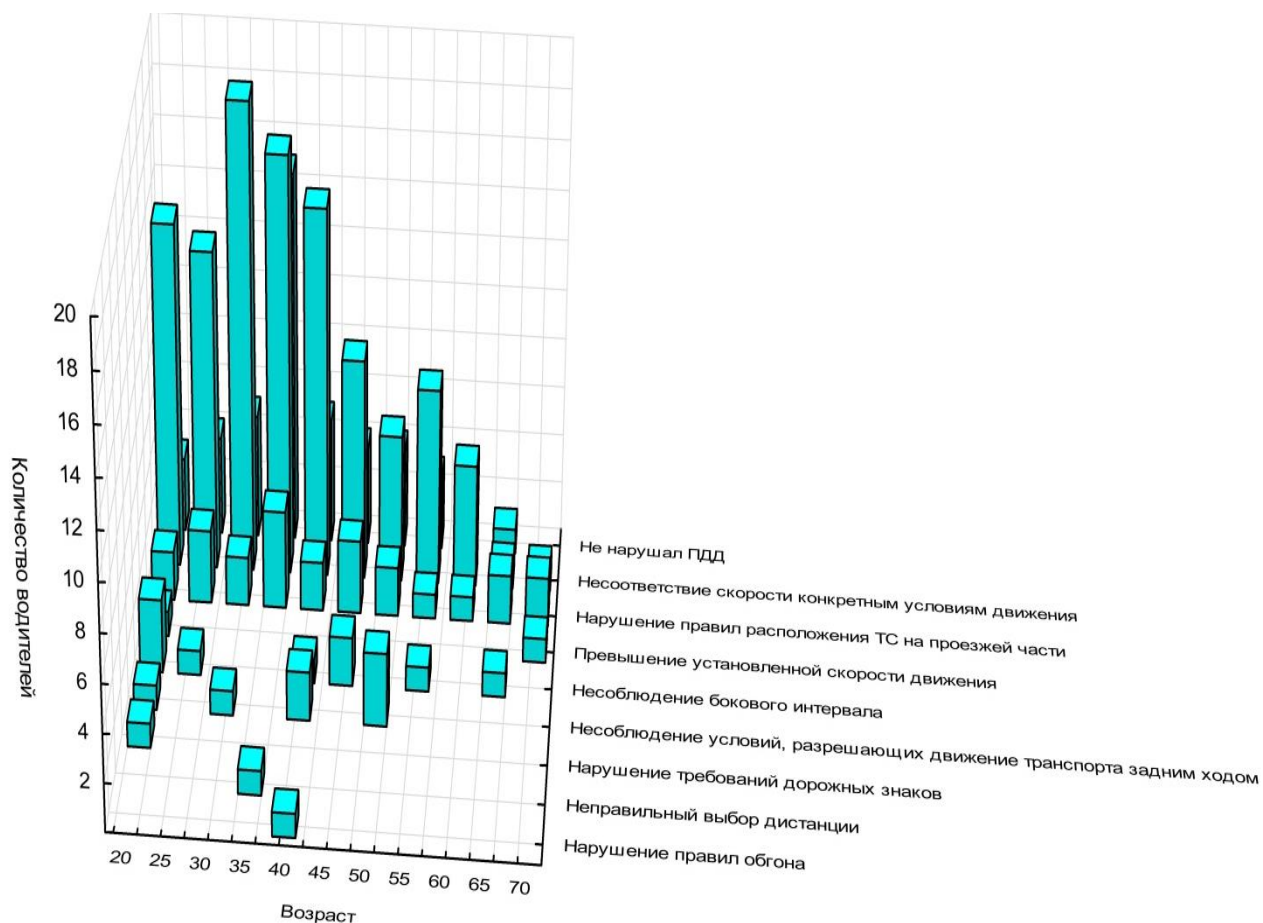


Рисунок 6 – Распределение водителей по возрасту и непосредственному нарушению ПДД

Проанализировано распределение транспортных средств (ТС) по видам, результат показан на рис. 7.

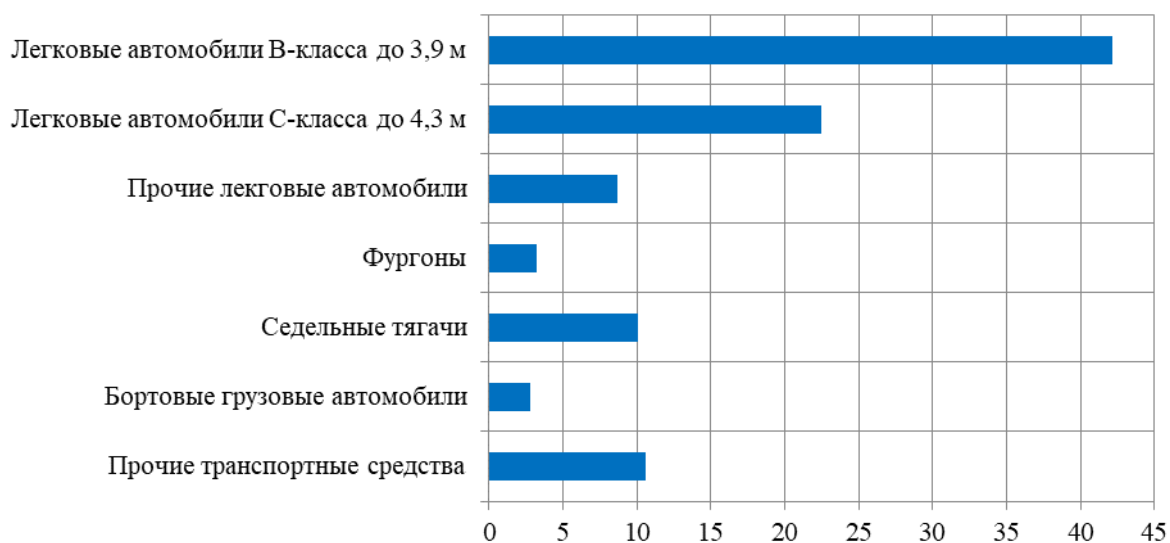


Рисунок 7 – Распределение наездов на препятствия по типу транспортного средства

Около 42 % занимают легковые автомобили В-класса длиной до 3,9 м и около 22 % – легковые автомобили С-класса длиной до 4,3 м. Среди других видов ТС наибольшую долю занимают седельные тягачи (10 %). При этом наибольшее число пострадавших и погибших приходится на легковые автомобили С-класса (42 % и 100 % соответственно). Также отмечено, что все водители в состоянии алкогольного опьянения, совершившие наезд на препятствие, управляли легковыми автомобилями, причем практически в половине случаев (43 %) – легковыми автомобилями В-класса.

4 Обсуждение и заключение

Исследование показало, что наезды на препятствия имеют свои характерные признаки в аспекте условий и характеристик водителя. В частности, полученные данные показывают значительное увеличение числа наездов на препятствия в осенне-зимний период, что вероятно связано с ухудшением погодных условий, гололедными явлениями. Максимальное количество наездов зафиксировано осенью и зимой, тогда как летние месяцы характеризуются меньшим числом таких происшествий. Подобная динамика существенно отличается от общей статистики ДТП, где пиковые показатели приходятся на теплые сезоны года. Также особенностью наездов на препятствия является их подавляющее возникновение в дневное время, в то время как повышенный относительный риск ДТП в темное время суток и сумерки характерен для многих других видов ДТП (наезды на пешеходов, животных) [19, 20].

Анализ распространенности наездов по виду препятствия отличается от результатов, полученных зарубежными учеными: наиболее часто наезды совершаются на ограждения, в то время как за рубежом лидируют деревья и опоры освещения. Между тем, опоры освещения тоже имеют определенную распространенность и занимают около 8 %. При этом наезды на деревья – единичные случаи. Такие результаты могут быть связаны с тем, что участков ФАД, на которых установлено освещение немного, что и обуславливает достаточно низкую объективную распространенность наездов на опоры освещения. Деревья в полосе отвода на ФАД не располагаются.

В отношении характеристик водителей получены следующие результаты. По возрастным группам и стажу определено, что выделяются две группы риска – молодые водители с малым стажем вождения и водители средних лет со стажем от 15 до 20 лет. Причем для первой группы свойственна большая вариация непосредственных нарушений ПДД, которые являлись причиной ДТП. Основная часть ТС, на которых совершены наезды на препятствия – легковые автомобили, преимущественно В-класса. Полученные выводы согласуются с результатами, полученными по общей выборке водителей – участников ДТП на ФАД без учета вида ДТП.

Отличительной чертой наездов на препятствия является увеличенная доля водителей в алкогольном опьянении – 33 %, в то время как в среднем этот показатель находится на уровне 10-15 %. Наиболее проблемной группой оказались молодые водители в возрасте от 20 до 30 лет, имеющие небольшой водительский стаж (от 5 до 10 лет), управляющие легковыми автомобилями.

Интеграция полученных результатов позволяет сделать вывод о том, что в целях практического использования следует обратить особое внимание на превентивные мероприятия по предупреждению наездов на препятствия в осенне-зимний период в дневное время, в частности предупреждение управления транспортным средством в алкогольном опьянении.

Перспективным направлением исследований в данной сфере является оценка частотного распределения наездов на препятствия в зависимости от характеристик участков дороги, где произошли эти ДТП.

Список литературы

- 1 Kapski, D. V. Road Safety Concept in the Republic of Belarus / D. V. Kapski, S. V. Bogdanovich, E. N. Kot, L. V. Khmel'nitskaya // Science and Technique. – 2024. – Vol. 23, No. 2. – P. 163-171. – DOI 10.21122/2227-1031-2024-23-2-163-171;
- 2 Ануфриев, К. А. Возможности применения усовершенствованного способа дорожной диагностики для повышения безопасности дорожного движения / К. А. Ануфриев, С. А. Евтюков, Е. А. Ануфриев // Воронежский научно-технический Вестник. – 2025. – Т. 4, № 4(54). – С. 63-72. – DOI 10.34220/2311-8873-2025-63-72;
- 3 Былинин, И.А. Некоторые аспекты повышения безопасности дорожного движения в современных условиях / И.А. Былинин // ВВ: Административное право и практика администрирования. – 2019. – № 4. – С. 6-11.
- 4 Казаченок, В. В. Превентивные меры полиции в сфере обеспечения безопасности участников дорожного движения / В. В. Казаченок // Юридическая наука и правоохранительная практика. – 2024. – № 4(70). – С. 66-73.
- 5 Балтабекова, А. Н. Надежность работы водителя в обеспечении безопасности дорожного движения / А. Н. Балтабекова, К. К. Абишев, Р. Б. Муканов [и др.] // Наука и техника Казахстана. – 2025. – № 1. – С. 311-323. – DOI 10.48081/CIFL5767.
- 6 Петров, Г. В. Факторы, влияющие на безопасность дорожного движения / Г. В. Петров // Научно-практические исследования. – 2020. – № 5-9(28). – С. 69-72.
- 7 Майоров, В. И. Цель и задачи государственной политики в области обеспечения безопасности дорожного движения: в контексте стратегического планирования / В. И. Майоров // Современная наука. – 2024. – № 2. – С. 28-31.
- 8 Москалу, Р. А. Система обеспечения безопасности дорожного движения как один из важнейших элементов системы национальной безопасности Российской Федерации / Р. А. Москалу, Е. С. Биксултанова // Вестник Восточно-Сибирской Открытой Академии. – 2024. – № 52(52). С. 128-135.
- 9 Печатнова, Е. В. Варианты снижения наездов на пешеходов на федеральных дорогах с помощью интеллектуальных транспортных систем / Е. В. Печатнова, И. А. Джурко // Актуальные вопросы автомобильного транспорта (Ават-2022) : Сборник статей Всероссийской научно-практической конференции, Барнаул, 15–16 декабря 2022 года. – Барнаул: Алтайский государственный технический университет им. И.И. Ползунова, 2023. – С. 127-130.
- 10 Abinet, Habtemariam Discrete element method simulation of high-speed vehicle collisions with road barrier systems / Habtemariam Abinet, Brunnabend Luis, Fischer Kai, Stolz Alexander // Computational Particle Mechanics. – 2024. – 12. – DOI 10.1007/s40571-024-00833-9.
- 11 Горбатенко, Д. С. Профилактика наездов на препятствия на улично-дорожной сети / Д. С. Горбатенко // Научно-технический вестник Поволжья. – 2023. – № 10. – С. 95-97.
- 12 Котлов, А. А. Анализ аварийности при наезде автомобилей на препятствия / А. А. Котлов // Актуальные проблемы строительства, ЖКХ и техносферной безопасности : Материалы VII Всероссийской (с международным участием) научно-технической конференции молодых исследователей, Волгоград, 20–25 апреля 2020 года / Под общей редакцией Н.Ю. Ермиловой, И.Е. Степановой. – Волгоград: Волгоградский государственный технический университет, 2020. – С. 51-52.
- 13 Bambach, M. Mean Injury Costs of Run-Off-Road Collisions with Fixed Objects: Passenger Vehicles and Motorcycles / M. Bambach, Rebecca Mitchell, Garrett Mattos // Journal of Transportation Safety & Security. – 2014. – 7. – DOI 10.1080/19439962.2014.947395.
- 14 Lakušić, V. F. Crash Severity in Collisions with Roadside Light Poles: / V. F. Lakušić, B.D. Marija // Highlighting the Potential of Passive Safe Pole Solutions. Infrastructures. – 2025 – 10. – DOI 10.3390/infrastructures10070163.
- 15 Benicio, A. Roadside Fixed-Object Collisions, Barrier Performance, and Fatal Injuries in Single-Vehicle, Run-Off-Road Crashes. / A. Benicio, A.D. Francisco // Safety. – 2020 – 6.27.0.3390/safety6020027.
- 16 Zhang, C. W. An Assessment of the Safety Effects of Roadside Barriers on Reducing Mountainous Crash Injury Severity. / C. W. Zhang, W. Yanying, T. Keqi, S.D. Le // Journal of Advanced Transportation. – 2024. – 1-16. – DOI 10.1155/2024/5568950.
- 17 Holdridge, J. S. The crash severity impacts of fixed roadside objects. / J. S. Holdridge, U.G. Venky // Journal of safety research. – 2005 – 36. – 139-47. – DOI 10.1016/j.jsr.2004.12.005.

18 Daniello, A. G. Fatality risk in motorcycle collisions with roadside objects in the United States. / A. Daniello, G. Hampton. // *Accident; analysis and prevention*. – 2011 – 43. 1167-70. – DOI 10.1016/j.aap.2010.12.027.

19 Plainis, S. Road traffic casualties: understanding the night-time death toll / S. Plainis, I. J. Murray, I. G. Pallikaris // *Injury Prevention* – 2006.–№ 12.– pp. 125–128.

20 Печатнова, Е.В. Влияние периода суток на риск возникновения наезда на пешехода / Е. В. Печатнова, И. А. Новиков, И. И. Кирюшин, Е. В. Шаталов // Воронежский научно-технический Вестник. – 2023. – Т. 3, № 3(45). – С. 60-66. – DOI 10.34220/2311-8873-2023-3-3-60-66.

References

1 Kapski, D. V. Road Safety Concept in the Republic of Belarus / D. V. Kapski, S. V. Bogdanovich, E. N. Kot, L. V. Khmelnitskaya // *Science and Technique*. – 2024. – Vol. 23, No. 2. – P. 163-171. – DOI 10.21122/2227-1031-2024-23-2-163-171;

2 Anufriev, K. A. Possibilities of Using an Improved Method of Road Diagnostics to Improve Road Safety / K. A. Anufriev, S. A. Evtyukov, E. A. Anufriev // *Voronezh Scientific and Technical Bulletin*. – 2025. – Vol. 4, No. 4(54). – P. 63-72. – DOI 10.34220/2311-8873-2025-63-72;

3 Bylinin, I.A. Some aspects of improving road safety in modern conditions / I.A. Bylinin // *NB: Administrative law and administration practice*. – 2019. – No. 4. – pp. 6-11.

4 Kazachenok, V.V. Preventive police measures in the field of ensuring the safety of road users / V.V. Kazachenok // *Legal science and law enforcement practice*. – 2024. – No. 4(70). – pp. 66-73.

5 Baltabekova, A. N. Driver Reliability in Ensuring Road Safety / A. N. Baltabekova, K. K. Abishev, R. B. Mukanov [et al.] // *Science and Technology of Kazakhstan*. – 2025. – No. 1. – Pp. 311-323. – DOI 10.48081/CIFL5767.

6 Petrov, G. V. Factors Affecting Road Safety / G. V. Petrov // *Scientific and Practical Research*. – 2020. – No. 5-9 (28). – Pp. 69-72.

7 Mayorov, V. I. The Goal and Objectives of State Policy in the Field of Ensuring Road Safety: in the Context of Strategic Planning / V. I. Mayorov // *Modern Science*. – 2024. – No. 2. – P. 28-31.

8 Moskalu, R. A. Road safety system as one of the most important elements of the national security system of the Russian Federation / R. A. Moskalu, E. S. Biksultanova // *Bulletin of the East Siberian Open Academy*. – 2024. – No. 52(52). P. 128-135.

9 Pechatnova, E. V. Options for reducing collisions with pedestrians on federal roads using intelligent transport systems / E. V. Pechatnova, I. A. Dzhurko // *Current issues of automobile transport (Avat-2022): Collection of articles of the All-Russian scientific and practical conference, Barnaul, December 15-16, 2022*. – Barnaul: Altai State Technical University named after I.I. Polzunova, 2023. – P. 127-130.

10 Abinet, Habtemariam. Discrete element method for modeling high-speed vehicle collisions with road barrier systems / Habtemariam Abinet, Brunnabend Luis, Fischer Kai, Stolz Alexander // *Computational Particle Mechanics*. – 2024. – 12. – DOI 10.1007/s40571-024-00833-9.

11 Gorbatenko, D. S. Prevention of collisions with obstacles on the road network / D. S. Gorbatenko // *Scientific and Technical Bulletin of the Volga Region*. – 2023. – No. 10. – P. 95-97.

12 Kotlov, A. A. Analysis of accidents caused by vehicle collisions with obstacles / A. A. Kotlov // *Actual problems of construction, housing and communal services and technosphere safety: Proceedings of the VII All-Russian (with international participation) scientific and technical conference of young researchers, Volgograd, April 20–25, 2020 / General editors N. Yu. Ermilova, I. E. Stepanova*. – Volgograd: Volgograd State Technical University, 2020. – P. 51-52.

13 Bambach, M. Mean Injury Costs of Run-Off-Road Collisions with Fixed Objects: Passenger Vehicles and Motorcycles / M. Bambach, Rebecca Mitchell, Garrett Mattos // *Journal of Transportation Safety & Security*. – 2014. -7. – DOI 10.1080/19439962.2014.947395.

14 Lakušić, V. F. Crash Severity in Collisions with Roadside Light Poles: / V. F. Lakušić, B.D. Marija // *Highlighting the Potential of Passive Safe Pole Solutions. Infrastructures*. – 2025 –10. – DOI 10.3390/infrastructures10070163.

15 Benicio, A. Roadside Fixed-Object Collisions, Barrier Performance, and Fatal Injuries in Single-Vehicle, Run-Off-Road Crashes. / A. Benicio, A.D. Francisco // *Safety*. – 2020 – 6.27.0.3390/safety6020027.

16 Zhang, C. W. An Assessment of the Safety Effects of Roadside Barriers on Reducing Mountainous Crash Injury Severity. / C. W. Zhang, W. Yanying, T. Keqi, S. D. Le // *Journal of Advanced Transportation*. –2024. – 1-16. – DOI 10.1155/2024/5568950.

17 Holdridge, J. S. The crash severity impacts of fixed roadside objects. / J. S. Holdridge, U.G. Venky // Journal of safety research. – 2005 – 36. – 139-47. – DOI 10.1016/j.jsr.2004.12.005.

18 Daniello, A. G. Fatality risk in motorcycle collisions with roadside objects in the United States. / A. Daniello, G. Hampton. // Accident; analysis and prevention. – 2011 – 43. 1167-70. – DOI 10.1016/j.aap.2010.12.027.

19 Plainis, S. Road traffic casualties: understanding the night-time death toll / S. Plainis, I. J. Murray, I. G. Pallikaris // Injury Prevention – 2006.–№ 12.– pp. 125–128.

20 Pechatnova, E.V. Influence of the period of day on the risk of a collision with a pedestrian / E. V. Pechatnova, I. A. Novikov, I. I. Kiryushin, E. V. Shatalov // Voronezh Scientific and Technical Bulletin. – 2023. – Vol. 3, No. 3(45). – P. 60-66. – DOI 10.34220/2311-8873-2023-3-3-60-66.

© Печатнова Е. В., Кирюшин И. И., Нагорный Н. Н., Еськов А. В., 2026

DOI: [10.34220/2311-8873-2026-69-77](https://doi.org/10.34220/2311-8873-2026-69-77)

УДК 656.072.6

UDC 656.072.6



2.9.5 – эксплуатация автомобильного транспорта

ИНТЕГРАЦИЯ КОГНИТИВНЫХ ЦИФРОВЫХ ДВОЙНИКОВ В СИСТЕМУ УПРАВЛЕНИЯ КАЧЕСТВОМ ГОРОДСКИХ ПАССАЖИРСКИХ ПЕРЕВОЗОК

✉¹ **Штепа Алексей Анатольевич**,
к.т.н., доцент кафедры организации перевозок и безопасности движения, Воронежский государственный лесотехнический университет имени Г.Ф. Морозова, г. Воронеж, Воронеж, e-mail: alexei_shtepa@mail.ru

Снятков Евгений Вячеславович,
к.т.н., доцент кафедры производства, ремонта и эксплуатации машин Воронежский государственный лесотехнический университет имени Г.Ф. Морозова, г. Воронеж.

Аннотация. В статье рассматривается концептуальный подход к повышению качества обслуживания пассажиров городского пассажирского транспорта на основе интеграции когнитивных цифровых двойников в систему управления перевозочным процессом. Проведен анализ современных методов оценки качества перевозок, включая методологию структурирования функции качества, методы стохастического моделирования и имитационного моделирования транспортных процессов. Обоснована необходимость перехода от реактивных моделей управления к проактивным системам, способным учитывать когнитивные аспекты поведения пассажиров и адаптироваться к изменяющимся условиям. Предложена архитектура системы когнитивного управления, интегрирующая модели прогнозирования пассажиропотоков, оценки удовлетворенности и оптимизации маршрутной сети. Приведены результаты апробации предложенного подхода на примере муниципального пассажирского автотранспортного предприятия, включая построение прогнозистических моделей ключевых показателей

INTEGRATION OF COGNITIVE DIGITAL TWINS INTO THE QUALITY MANAGEMENT SYSTEM OF URBAN PASSENGER TRANSPORTATION

✉¹ **Shtepa Alexei Anatolievich**,
candidate of technical sciences, associate professor of the department of transportation organization and traffic safety, Voronezh state forestry university named after G.F. Morozov, Voronezh, e-mail: alexei_shtepa@mail.ru

Snyatkov Evgeny Vyacheslavovich,
candidate of technical sciences, associate professor, department of machine production, repair, and operation, Voronezh state forestry university named after G.F. Morozov, Voronezh

Annotation. The article discusses a conceptual approach to improving the quality of passenger service in urban public transport based on the integration of cognitive digital twins into the transportation process management system. The analysis of modern methods for assessing the quality of transportation, including the quality function deployment methodology, stochastic modeling methods, and simulation modeling of transport processes, is carried out. The necessity of transition from reactive management models to proactive systems capable of taking into account cognitive aspects of passenger behavior and adapting to changing conditions is substantiated. The architecture of a cognitive control system integrating models for passenger traffic forecasting, satisfaction assessment, and route network optimization is proposed. The results of testing the proposed approach on the example of a municipal passenger motor transport enterprise are presented, including the construction of predictive models of key performance indicators (revenue, cost) using the group method of data handling. It is shown that the introduction of a cognitive digital twin makes it possible to increase the

деятельности (выручка, себестоимость) с использованием метода группового учета аргументов. Показано, что внедрение когнитивного цифрового двойника позволяет повысить обоснованность управленческих решений, снизить эксплуатационные затраты и улучшить качество транспортного обслуживания населения.

Ключевые слова: КОГНИТИВНОЕ УПРАВЛЕНИЕ, ЦИФРОВОЙ ДВОЙНИК, КАЧЕСТВО ПАССАЖИРСКИХ ПЕРЕВОЗОК, УДОВЛЕТВОРЕННОСТЬ ПАССАЖИРОВ, СТОХАСТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ, ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНАЯ ТРАНСПОРТНАЯ СИСТЕМА, ПОДДЕРЖКА ПРИНЯТИЯ РЕШЕНИЙ.

validity of management decisions, reduce operating costs and improve the quality of transport services for the population.

Keywords: COGNITIVE CONTROL, DIGITAL TWIN, QUALITY OF PASSENGER TRANSPORTATION, PASSENGER SATISFACTION, STOCHASTIC MODELING, INTELLIGENT TRANSPORT SYSTEM, DECISION SUPPORT.

¹ Автор для ведения переписки

1 Состояние вопроса исследования и актуальность работы

Городской пассажирский транспорт является ключевым элементом социально-экономической инфраструктуры современного мегаполиса, обеспечивающим мобильность населения и устойчивое развитие городской среды [1]. В условиях роста уровня автомобилизации, изменения демографической структуры и возрастающих требований к качеству жизни проблема повышения эффективности управления пассажирскими перевозками приобретает стратегическое значение.

Анализ современного состояния пассажирских перевозок в Российской Федерации свидетельствует о глубоком структурном кризисе отрасли. За период с 2000 по 2025 гг. объемы перевозок пассажиров автобусами общего пользования сократились более чем на 60 %, парк подвижного состава не только уменьшается количественно, но и критически стареет – более 58 % автобусов эксплуатируются свыше 9 лет [2]. Эти негативные тенденции усугубляются двойственной природой муниципальных пассажирских автотранспортных предприятий (ПАТП), которые, с одной стороны, обязаны выполнять социальную функцию обеспечения транспортной доступности, а с другой – вынуждены функционировать в условиях жестких бюджетных ограничений и рыночной конкуренции.

Традиционные методы управления, основанные на реактивном подходе и интуитивных решениях, исчерпали свой потенциал. Возникает потребность в переходе к научно-обоснованным, преактивным системам управления, способным обрабатывать большие объемы разнородной информации, прогнозировать развитие ситуаций и вырабатывать оптимальные управленческие решения в условиях неопределенности [3]. В этой связи особую актуальность приобретает концепция когнитивного управления, интегрирующая достижения искусственного интеллекта, теории самоорганизации и когнитивной психологии.

Краткий обзор известных исследований показывает, что эволюция методов управления транспортными системами прошла несколько этапов. На начальном этапе преобладали детерминистские регламенты и жесткие расписания, не учитывающие стохастическую природу транспортных процессов. Затем получили распространение «мягкие» модели на основе нечеткой логики, позволяющие формализовать качественные характеристики и работать в условиях неопределенности [4]. Современный этап характеризуется переходом к сетям интеллектуаль-

ных цифровых двойников с механизмами самообучения [5]. Как отмечается в работе [6], когнитивная архитектура интеллектуальной транспортной системы включает подсистему восприятия и анализа текущей ситуации, базу знаний, содержащую формализованные модели транспортных процессов, механизмы логического вывода и принятия решений, а также интерфейс взаимодействия с лицом, принимающим решения.

В области оценки качества перевозок широко применяется методология структурирования функции качества *QFD* (Quality Function Deployment), позволяющая переводить требования пассажиров, выраженные на качественном уровне, в технические характеристики транспортного процесса [7]. Однако традиционная методология *QFD* является статическим инструментом и не учитывает динамику изменения предпочтений пассажиров. Исследования в области когнитивной эргономики показывают, что удовлетворенность пассажиров формируется под влиянием множества факторов, включая не только объективные параметры перевозки, но и психологический комфорт, социальные нормы, эмоциональное восприятие [8]. Учет факторов ограниченной рациональности пассажиров, включая их когнитивные особенности, существенно влияет на результаты оценки удовлетворенности и требует коррекции традиционных моделей [9].

Таким образом, проблема исследования заключается в необходимости разработки и интеграции когнитивных цифровых двойников в систему управления качеством пассажирских перевозок, что позволит объединить существующие методы моделирования (*QFD*, стохастическое моделирование, имитационное моделирование) в единую адаптивную систему, способную учитывать как объективные параметры перевозочного процесса, так и субъективные когнитивные аспекты восприятия качества пассажирами.

Целью настоящей статьи является разработка концептуальных основ интеграции когнитивных цифровых двойников в систему управления качеством городских пассажирских перевозок на основе анализа существующих методов моделирования и оценки транспортных процессов.

2 Материалы и методы

Теоретическое исследование базируется на системном подходе и методах математического моделирования. В качестве методологической основы используются теория самоорганизации, метод группового учета аргументов, методология *QFD* и имитационное моделирование. Для интеграции разнородных данных предлагается использовать аппарат когнитивных цифровых двойников.

2.1 Постановка задачи

Необходимо разработать концептуальную архитектуру системы когнитивного управления качеством пассажирских перевозок, которая объединяет следующие компоненты:

- подсистему сбора и обработки данных (включая данные ГЛОНАСС, социологических опросов, финансово-экономических показателей, внутрипроизводственных показателей и др.);
- подсистему когнитивного моделирования (прогностические модели на основе метода группового учета аргументов, имитационные модели маршрутной сети, *QFD*-модели);
- базу знаний (формализованные описания ситуаций, причинно-следственные связи, нормативно-справочная информация);
- подсистему поддержки принятия решений (визуализация, генерация рекомендаций, оценка сценариев).

Для математической формализации процессов используются следующие модели.

Для прогнозирования ключевых показателей деятельности пассажирского автотранспортного предприятия, функционирующего под влиянием совокупности макроэкономических и внутрипроизводственных факторов, в условиях нестабильной экономической среды целесообразно применение методов самоорганизации моделей. В частности, метод группового учета аргументов позволяет строить прогностические модели дифференциального типа, описываемые следующим уравнением:

$$\frac{\partial Y}{\partial t} = \sum_{i=1}^n a_i d_i + \sum_{j=n+1}^{2n} a_j d_j^2 - n + \sum_{k=2n+1}^{2n + \frac{n!}{2!(n-2)!}} a_k \sum_{m=1}^{n-1} \sum_{p=m+1}^n d_m d_p + a_0,$$

где Y – исследуемый параметр системы ПАТП (например, Y – выручка от реализации услуг, руб.), ед. изм. исследуемого параметра; n – число независимых переменных, взятых для проведения эксперимента по идентификации социально-экономических процессов; $d = \frac{\partial x_i^{t-z}}{\partial t} / (x_1, x_2, \dots, x_n)$ – параметры системы ПАТП; t – время, квартал; z – период запаздывания ($z = 0, 1, 2$); $a_i, a_j, a_k, \dots, a_n$ – коэффициенты при параметрах системы ПАТП; a_0 – свободный член, учитывающий неучтенные параметры.

Специфика функционирования конкретного транспортного предприятия во многом определяется его индивидуальными особенностями. В силу этого для построения математических моделей, описывающих его внутренние процессы, обоснованным является применение полиномиальных зависимостей следующего вида:

$$w_e = \sum_{i=1}^n a_i w_i + \sum_{j=n+1}^{2n} a_j w_j^2 - n + \sum_{k=2n+1}^{2n + \frac{n!}{2!(n-2)!}} a_k \sum_{m=1}^{n-1} \sum_{p=m+1}^n w_m w_p + a_0,$$

где w_e – выходные параметры (например, себестоимость перевозок, руб.), ед. изм. выходных параметров; n – число независимых внутренних параметров изучаемой системы.

Для учета субъективных факторов удовлетворенности пассажиров предлагается когнитивная модель, представленная системой уравнений:

$$\begin{cases} S = f(P, C, T) \\ P = g(X_1, X_2, \dots, X_n) \\ C = h(Y_1, Y_2, \dots, Y_n) \\ T = q(Z_1, Z_2, \dots, Z_k) \end{cases},$$

где S – интегральная удовлетворенность (безразмерная величина); P – вектор объективных факторов (временные, пространственные, технические, экономические характеристики, которые могут иметь разные единицы: квартал, руб., км и др.); C – вектор когнитивных факторов (воспринимаемое качество, ожидания, аффективные реакции, социальные нормы, которые могут иметь разные единицы, условные баллы, например, по шкале Лайкерта и др.); T – вектор ситуационных факторов (цель поездки, время суток, погодные условия, которые могут иметь разные единицы, условные баллы, час и др.); f, g, h, q – нелинейные функции, идентифицируемые по экспериментальным данным.

Для оценки эффективности управления используется комплексный критерий:

$$E = \omega_1 \cdot \frac{Q}{Q_{\text{норм}}} + \omega_2 \cdot \frac{R}{R_{\text{норм}}} + \omega_3 \cdot \frac{C_{\text{норм}}}{C},$$

где Q – фактический уровень качества обслуживания (безразмерная единица измерения (доля от 1 или %)); $Q_{\text{норм}}$ – нормативный уровень качества (безразмерная единица измерения (доля от 1 или %)); R – регулярность движения (безразмерная единица измерения (доля от 1 или %)); $R_{\text{норм}}$ – нормативная регулярность (безразмерная единица измерения (доля от 1 или %)); C – удельные эксплуатационные затраты, руб./((пасс.-км) или руб./час работы; $C_{\text{норм}}$ – нормативные затраты, руб./((пасс.-км) или руб./час работы; $\omega_1, \omega_2, \omega_3$ – весовые коэффициенты, отражающие приоритеты транспортной политики, безразмерная единица измерения.

Стоит отметить, что показатели Q, R, C и их нормативные значения не являются выходными параметрами переменных из прогностических моделей МГУА. Комплексный критерий служит для интегральной оценки эффективности управления и объединяет три самостоятельные группы показателей, каждая из которых имеет собственную методику расчёта. Это позволяет гибко настраивать весовые коэффициенты в зависимости от приоритетов транспортной политики муниципалитета.

2.2 Алгоритмы и программные продукты

Для реализации предложенного подхода используется комбинаторный алгоритм метода группового учета аргументов, реализованный в прототипированном программном комплексе *EKONOM_IDEN 4.0* [2]. Алгоритм включает:

- нормализацию и центрирование данных по формуле:

$$X_{i,j} = \frac{X_{i,j} - X_{c_i}}{D_{c_i}},$$

где $X_{i,j}$ – значение переменной; $i = 1, \dots, n$; $j = 1, \dots, p$; X_{c_i} – среднее значение переменной; D_{c_i} – среднеквадратическое отклонение.

- ранжирование переменных с использованием модифицированного алгоритма Шишовой для сокращения размерности пространства признаков [2];
- генерацию множества моделей различной сложности и их оценку по внешним критериям (несмещенность, сходимость, точность эпигнозного прогноза);
- выбор оптимальной модели.

Имитационное моделирование маршрутных сетей выполняется с использованием специализированных программных средств, позволяющих учитывать динамику пассажиропотоков, интервалы движения, вместимость подвижного состава и другие параметры [10].

3 Результаты исследований

В результате проведенного анализа существующих методов и разработанной концепции получены следующие основные результаты.

На основе данных социологического обследования населения выявлены наиболее значимые требования пассажиров к качеству перевозок: повышение комфортности поездки (20 %), повышение культуры обслуживания (16 %), повышение безопасности (15 %), сокращение времени поездки (12 %), уменьшение интервала движения (9 %).

Ранжирование параметров транспортного процесса с использованием матрицы корреляции позволило определить приоритетные направления улучшений: интервал движения, регулярность, наполнение подвижного состава [7].

Эксперименты по идентификации прогностических моделей для ключевых показателей деятельности ПАТП на примере МКП МТК «Воронежпассажиртранс» с использованием 51 параметра (включая макроэкономические и внутрипроизводственные данные) показали высокую точность прогнозов. Минимальное значение критерия эпигнозного прогноза для целевой функции «Выручка» составило 0,00322 при 13 параметрах и запаздывании -1 квартал (табл. 1). Для целевой функции «Себестоимость» минимальное значение критерия составило 0,0386 при 14 параметрах и запаздывании -2 квартала (табл. 2).

Таблица 1 – Лучшие модели процесса «Выручка»

Коэффициенты при 13 параметрах макроэкономических и внутрипроизводственных данных	Своб. член	Критерий Δ
0,0236; 2659270,7; -9,2878; -2,8503; 192,84; 0,1883	361,95	0,0070
0,0213; 2560927,3; -7,7426; -2,6692; 0,1863	424,75	0,0095
0,0232; 2653998,7; -9,3590; -2,8192; 176,88; 0,1885; 0,0208	344,14	0,0032

С учетом базисного класса дифференциального типа модель «Выручка» представлена в виде:

$$y^{t+1} = y^t + 0,0232 \cdot (x_1^t - x_1^{t-1}) + 2653998,7 \cdot (x_4^{t-1} - x_4^{t-2}) - \\ - 9,359 \cdot (x_{14}^t - x_{14}^{t-1}) - 2,8192 \cdot (x_{27}^t - x_{27}^{t-1}) + \\ + 176,88 \cdot (x_9^t - x_9^{t-1}) \cdot (x_{20}^t - x_{20}^{t-1}) - 0,1885 \cdot (x_{27}^t - x_{27}^{t-1}) \cdot \\ \cdot (x_{36}^{t-1} - x_{36}^{t-2}) + 0,0208 \cdot (x_{27}^t - x_{27}^{t-1}) \cdot (x_{38}^t - x_{38}^{t-1}) + 344,14,$$

где y – целевая функция «Выручка»; $x_1, x_4, x_9, x_{14}, x_{20}, x_{27}, x_{36}, x_{38}$ – независимые переменные (себестоимость продаж, цена на газомоторное топливо, тариф на пассажирские перевозки, влажность воздуха, пассажирские перевозки организациями автомобильного пассажирского транспорта, нераспределенная прибыль предприятия, текущий налог на прибыль предприятия, количество сотрудников предприятия).

Таблица 2 – Лучшие модели процесса «Себестоимость»

Коэффициенты при 14 параметрах макроэкономических и внутрипроизводственных данных	Своб. член	Критерий Δ
33,90; 241962802,2; 8,3809; -4,0670	-103031	0,0766
34,40; 243885946,6; 9,1405; 8,8941	-207663	0,0386
30,48; 250130342; 9,1595	-153932	0,0502

С учетом применения полиномиальных зависимостей модель «Себестоимость» представлена в виде:

$$y^t = 34,4 \cdot x_{26}^t + 243885946,6 \cdot x_4^t \cdot x_4^t + \\ + 9,1405 \cdot x_{15}^t \cdot x_{17}^{t-1} + 8,8941 \cdot x_{17}^{t-1} \cdot x_{18}^{t-2} - 207663,$$

где y – целевая функция «Себестоимость»; $x_4, x_{15}, x_{17}, x_{18}, x_{26}$ – независимые переменные (цена на газомоторное топливо, количество рабочих дней, индексы потребительских цен на товары и услуги, индекс потребительских цен на услуги пассажирского транспорта, протяженность маршрутной сети, обслуживаемом предприятием).

Полученные модели позволили выполнить сценарное прогнозирование влияния управляемых параметров на выручку предприятия.

В табл. 3 представлены результаты прогноза при изменении цены на газомоторное топливо, тарифа на перевозки и объема пассажирских перевозок.

Таблица 3 – Результаты прогноза изменения выручки при варьировании ключевых параметров

Параметр	Изменение параметра, %	Изменение выручки, %
Цена на газомоторное топливо	+5	+0,5
	+10	+1,0
Тариф на перевозки	+5	+2,0
	+10	+4,0
Объем перевозок	+5	+3,0
	+10	+6,0

Сравнение прогнозных и фактических значений за отчетный период показало, что при реализации предлагаемых управленческих решений (оптимизация тарифной политики, регулирование объемов перевозок) возможно достижение роста выручки на 17,9 % при контролируемом росте себестоимости на 10 %, что создает предпосылки для снижения убыточности основной деятельности (табл. 4).

Разработанная архитектура когнитивной системы управления включает структурно-функциональную схему, представленную на рис. 1 [2].

Реализация управленческого цикла предусматривает последовательное прохождение трех ключевых стадий. Начальная стадия (диагностическая) посвящена определению контролируемых переменных, накоплению статистически значимого объема данных и построению на их основе прогностической модели изучаемого процесса.

Третья стадия (регулирующая) включает в себя оптимизацию параметров процесса на базе принятой модели и формирование соответствующих управленческих воздействий, направленных на поддержание устойчивого развития.

Система обеспечивает непрерывный цикл «мониторинг – моделирование – принятие решений – контроль», основанный на математических методах и анализе данных.

4 Обсуждение и заключение

Результаты согласуются с известными исследованиями в области применения метода группового учета аргументов для моделирования экономических процессов [2, 5] и использования метода *QFD* для управления качеством на транспорте [7]. В отличие от существующих подходов предложенная интеграция когнитивных цифровых двойников позволяет учитывать не только количественные показатели, но и качественные характеристики восприятия пассажиров, что повышает адекватность моделей реальным условиям.

Высокая точность прогнозных моделей (погрешность менее 3 % для выручки и менее 4 % для себестоимости) подтверждает эффективность выбранного метода группового учета аргументов для задач управления ПАТП. Возможные различия с результатами других исследований могут объясняться спецификой исходных данных (региональные особенности, структура парка, социально-экономические условия). Например, в работе [9] показано, что учет ограниченной рациональности пассажиров существенно влияет на оценку удовлетворенности, что подтверждает необходимость включения когнитивных факторов в модель.

На основе проведенного исследования можно сделать следующие выводы:

- интеграция когнитивных цифровых двойников в систему управления ПАТП позволит повысить обоснованность управленческих решений в реальном времени;
- использование самообучающихся моделей на основе метода группового учета аргументов даст возможность адаптироваться к изменяющимся внешним условиям (экономические кризисы, пандемии и др.) с минимальной задержкой;
- внедрение системы поддержки принятия решений на основе когнитивных цифровых двойников сократит время реакции диспетчерских служб на нештатные ситуации и повысит регулярность движения.

Таким образом, предложенная концепция интеграции когнитивных цифровых двойников в систему управления качеством пассажирских перевозок открывает новые возможности для повышения эффективности работы городского пассажирского транспорта и удовлетворенности потребностей населения. Полученные результаты могут быть использованы при разработке стратегий развития транспортных систем крупных городов.

Список литературы

- 1 Еналеев, А. К. Стимулирование внедрения когнитивных и интеллектуальных систем управления на транспорте / А. К. Еналеев // Транспорт России: проблемы и перспективы - 2021: Материалы Международной-научно-практической конференции, Санкт-Петербург, 09-10 ноября 2021 года. Том 1. – Санкт-Петербург: Институт проблем транспорта им. Н.С. Соломенко РАН, 2021. – С. 61-64.
- 2 Штепа, А. А. Управление процессами принятия решений в организационных системах автотранспортных предприятий на основе аппарата стохастического моделирования: диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук / Штепа Алексей Анатольевич, 2024. – 149 с.
- 3 Горелова, Г. В. Припортовые транспортно-технологические системы, когнитивное моделирование / Г. В. Горелова, Е. А. Чеботарева // Системный анализ в проектировании и управлении : сборник научных трудов XXVIII Международной научно-практической конференции : в 2 ч., Санкт-Петербург, 27-29 июня 2024 года. – Санкт-Петербург: Политех-Пресс, 2024. – С. 353-362. – DOI 10.18720/SPBPU/2/id24-470.
- 4 Кригер, Л. С. Управление движением городского пассажирского транспорта на основе нечеткого ситуационного подхода : специальность 05.13.01 «Системный анализ, управление и обработка информации (по отраслям)» : диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук / Кригер Лилия Сергеевна, 2014. – 157 с. – EDN ECLLUR.
- 5 Мартынов, Б. В. Когнитивные цифровые двойники участников движения как драйвер адаптивного управления международными транспортными коридорами / Б. В. Мартынов, Е. С. Прокопенко // Журнал монетарной экономики и менеджмента. – 2025. – № 9. – С. 30-37. – DOI 10.26118/2782-4586.2025.93.45.016.
- 6 Селиверстов, С. А. О разработке когнитивной архитектуры интеллектуальной транспортной системы / С. А. Селиверстов, Я. А. Селиверстов, А. В. Кураков // Транспорт России: проблемы и перспективы – 2021 : Материалы Международной-научно-практической конференции, Санкт-Петербург, 09-10 ноября 2021 года. Том 1. – Санкт-Петербург: Институт проблем транспорта им. Н.С. Соломенко РАН, 2021. – С. 303-306.

7 Епифанов, В. В. Повышение качества перевозок в системе городского пассажирского автомобильного транспорта на основе оценки удовлетворенности потребителей / В.В. Епифанов, А.С. Тюрин; под науч. ред. М. Ю. Обшивалкина. – Ульяновск : УлГТУ, 2017. – 195 с.

8 Burkhardt J.M., Cahour B., Allinc A. Exploring user experience of transport modes through the multiple dimensions of psychological comfort // Proceedings of European Conference on Cognitive Ergonomics, ECCE 2024. – ACM, 2024. – Article 42.

9 Zhang B., Xing Y., Hu Q., Xue Y. Bus Service Satisfaction Evaluation Based on Bounded Rationality // Journal of Chongqing Jiaotong University (Natural Science). – 2025. – Vol. 44, № 3. – P. 96-104.

10 Смирнова, А. А. Повышение качества пассажирских перевозок с применением моделирования процессов планирования на транспорте / А. А. Смирнова, Э. Е. Смирнова, И. С. Кравчук // Аспирантские чтения : Сборник научных статей аспирантов РУТ (МИИТ) / Под общей редакцией Т.В. Шепитко. Том Выпуск 4. – Москва: Издательство «Перо», 2021. – С. 263-267.

References

1 Enaleev, A.K. Stimulating the Implementation of Cognitive and Intelligent Management Systems in Transport / A.K. Enaleev // Transport of Russia: Problems and Prospects – 2021: Proceedings of the International Scientific-Practical Conference, St. Petersburg, November 9-10, 2021. Volume 1. – St. Petersburg: N.S. Solomenko Institute of Transport Problems, Russian Academy of Sciences, 2021. – pp. 61-64.

2 Shtepa, A.A. Managing Decision-Making Processes in Organizational Systems of Motor Transport Enterprises Based on Stochastic Modeling: Dissertation for the Degree of Candidate of Technical Sciences / Shtepa, Aleksey Anatolyevich, 2024. – 149 p.

3 Gorelova, G. V. Port transport and technological systems, cognitive modeling / G. V. Gorelova, E. A. Chebotareva // Systems analysis in design and management: collection of scientific papers of the XXVIII International scientific and practical conference: in 2 parts, St. Petersburg, June 27-29, 2024. – St. Petersburg: Polytech-Press, 2024. – P. 353-362. – DOI 10.18720/SPBPU/2/id24-470.

4 Kriger, L. S. Urban passenger transport traffic management based on a fuzzy situational approach: specialty 05.13.01 "System analysis, management and information processing (by industry)": dissertation for the degree of candidate of technical sciences / Kriger, Liliya Sergeevna, 2014. – 157 p. – EDN ECLLUR.

5 Martynov, B. V. Cognitive digital twins of traffic participants as a driver of adaptive management of international transport corridors / B. V. Martynov, E. S. Prokopenko // Journal of Monetary Economics and Management. – 2025. – № 9. – pp. 30-37. – DOI 10.26118/2782-4586.2025.93.45.016.

6 Seliverstov, S. A. On the Development of a Cognitive Architecture for an Intelligent Transport System / S. A. Seliverstov, Ya. A. Seliverstov, A. V. Kurakov // Transport of Russia: Problems and Prospects – 2021: Proceedings of the International Scientific and Practical Conference, St. Petersburg, November 9-10, 2021. Volume 1. – St. Petersburg: N.S. Solomenko Institute of Transport Problems, Russian Academy of Sciences, 2021. – Pp. 303-306.

7 Epifanov, V. V. Improving the Quality of Transportation in the Urban Passenger Automobile Transport System Based on Assessing Customer Satisfaction / V.V. Epifanov, A.S. Tyurin; edited by M. Yu. Obshivalkin. – Ulyanovsk: Ulyanovsk State Technical University, 2017. – 195 p.

8 Burkhardt J.M., Cahour B., Allinc A. Exploring user experience of transport modes through the multiple dimensions of psychological comfort // Proceedings of European Conference on Cognitive Ergonomics, ECCE 2024. – ACM, 2024. – Article 42.

9 Zhang B., Xing Y., Hu Q., Xue Y. Bus Service Satisfaction Evaluation Based on Bounded Rationality // Journal of Chongqing Jiaotong University (Natural Science). – 2025. – Vol. 44, No. 3. – P. 96-104.

10 Smirnova, A. A. Improving the quality of passenger transportation using modeling of transport planning processes / A. A. Smirnova, E. E. Smirnova, I. S. Kravchuk // Postgraduate readings: Collection of scientific articles by postgraduate students of RUT (MIIT) / General editor T.V. Shepitko. Volume Issue 4. – Moscow: Pero Publishing House, 2021. – P. 263-267.

© Штепа А. А., Снятков Е. В., 2026

DOI: 10.34220/2311-8873-2026-78-92



УДК 629.113

UDC 629.113

2.9.5 – эксплуатация автомобильного транспорта

ОЦЕНКА РАБОТОСПОСОБНОСТИ АВТОМОБИЛЬНОГО СЦЕПЛЕНИЯ

ASSESSMENT OF THE PERFORMANCE OF AN AUTOMOBILE CLUTCH

✉¹ Волков Владимир Сергеевич,
д.т.н., профессор, Воронежский государственный лесотехнический университет имени Г.Ф. Морозова, г. Воронеж, e-mail: wl.volkov@yandex.ru

Восковых Пётр Алексеевич,
студент, Воронежский государственный технический университет, г. Воронеж, e-mail: tntrun14@gmail.com

✉¹ Volkov Vladimir Sergeevich,
doctor of technical sciences, professor, Voronezh state forestry university named after G.F. Morozov, Voronezh, e-mail: wl.volkov@yandex.ru

Voskovyh Petr Alekseevich,
student, Voronezh state technical university, Voronezh, e-mail: tntrun14@gmail.com

Аннотация. Представлен вариант конструктивного расчёта составных элементов автомобильного сцепления в вариантах существующих компоновочных схем. Рассмотрены предельно допускаемые величины нагрузочных режимов по согласованию с нормативными требованиями. Определены границы начала пробуксовки сцеплений в зависимости от частоты вращения коленчатого вала двигателя. Проанализированы достоинства и недостатки различных вариантов конструктивных решений.

Annotation. A variant of the constructive calculation of the components of the automotive clutch in variants of existing layout schemes is presented. The maximum permissible values of load conditions are considered in accordance with regulatory requirements. The limits of the beginning of clutch slip are determined depending on the engine crankshaft speed. The advantages and disadvantages of various design solutions are analyzed.

Ключевые слова: СЦЕПЛЕНИЕ, ДИСК, НАПРЯЖЕНИЯ, ПРУЖИНА, УСИЛИЕ.

Keywords: CLUTCH, DISC, TENSION, SPRING, FORCE.

¹ Автор для ведения переписки

1 Состояние вопроса исследования и актуальность работы

В проектных расчётах функциональная роль сцепления рассматривается в виде механизма, осуществляющего плавное соединение или разъединение потока крутящего момента, передаваемого от двигателя к трансмиссии. По виду рабочего процесса механизмы сцепления могут быть фрикционными [1] с передачей крутящего момента посредством сил трения, электромагнитными с передачей крутящего момента посредством магнитодвижущих сил [2], либо гидравлическими с передачей крутящего момента посредством потоков масла между ведущим и ведомым колёсами [3]. Фрикционные сцепления могут быть сухими с передачей крутящего момента посредством сухого трения между рабочими дисками, либо мокрыми с передачей крутящего момента между дисками, находящимися в полости, заполненной маслом.

Как указано многими авторами [4-7] в практике автомобилестроения при наличии на автомобиле механической коробки передач наибольшее распространение получили сухие

одно- и двухдисковые механизмы сцепления постоянно замкнутого типа с одной или несколькими нажимными пружинами. Нажимные пружины могут быть расположены по периферии или по центру нажимного диска, иметь витую цилиндрическую или коническую форму, либо выполняться в виде диафрагменного упругого элемента.

Формулировка проблемы исследования

В качестве основных требований, предъявляемых к фрикционным сцеплениям, следует рассматривать надежную передачу крутящего момента при любых условиях эксплуатации; минимальный уровень колебаний крутящего момента при включении; минимальный момент инерции ведомых элементов; необходимый отвод тепла от трущихся поверхностей, удобство и лёгкость управления. Кроме этого, скорость конца буксования сцепления $V_{сц}$ должна соответствовать минимальной устойчивой частоте вращения коленчатого вала двигателя n_{min} при трогании автомобиля с места согласно зависимости [8]:

$$V_{сц} = \frac{0,377n_{min}r_k}{U_{тр}}, \quad (1)$$

где r_k – радиус колеса; $U_{тр}$ – передаточное число трансмиссии, $U_{тр} = U_k U_{рк} U_0$, где U_k , $U_{рк}$ и U_0 – соответственно передаточные числа коробки передач, раздаточной коробки и главной передачи в рассматриваемый момент работы сцепления.

Целью настоящей работы является попытка установления влияния массы и расположения пружин нажимного диска сцепления на характеристики механизма по граничным скоростным режимам сохранения работоспособности

2 Материалы и методы

2.1. Постановка задачи

При проектном расчете сцепления предварительно выбирается кинематическая схема механизма, производится выбор и расчёт его основных параметров, к которым относятся коэффициент запаса сцепления, наружный и внутренний диаметры фрикционных накладок; усилие на нажимной диск; удельное давление на накладки; число ведомых дисков. Указанные параметры должны соответствовать требованиям действующих стандартов [9] на основные параметры сухих фрикционных сцеплений и на асбестовые фрикционные накладки [10]. Размер внутреннего диаметра фрикционной накладки должен учитывать возможность размещения гасителя крутильных колебаний.

При выборе основных параметров гасителя крутильных колебаний определяются: момент замыкания гасителя; момент трения фрикционных элементов, число и жёсткость пружин гасителя. При конструировании привода сцепления должны быть соблюдены требования [9] по величинам усилия на педали и ходу педали.

В качестве расчетных оценочных параметров сцепления рассматриваются: удельная работа буксования; работа водителя при выключении сцепления и температура нагрева фрикционных поверхностей при однократном включении сцепления.

В качестве начального этапа расчёта данного механизма выступает выбор коэффициента запаса сцепления $\beta_{сц}$, определяемый по формуле:

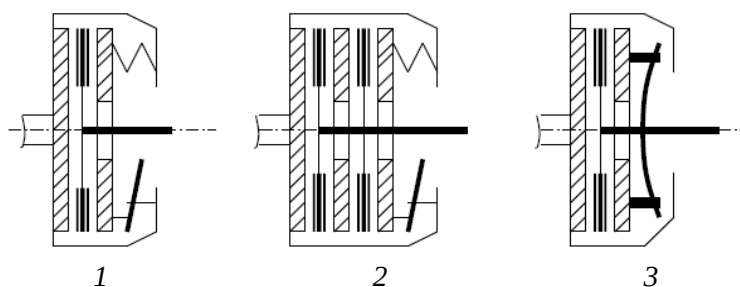
$$\beta_{сц} = \frac{M_c}{M_{e\max}}, \quad (2)$$

где M_c – момент, присутствующий на нажимном диске, соответствующий началу пробуксовки сцепления Н/м; $M_{e\max}$ – максимальный крутящий момент двигателя, Н/м.

С учётом того, что при изменении скоростного режима работы двигателя его крутящий момент изменяется в относительно широких пределах, коэффициент запаса сцепления также

может рассматриваться в виде переменной величины, зависящей от частоты вращения коленчатого вала двигателя. Кроме того, исследованиями [10] установлено, что вследствие действия центробежных сил момент M_c , присутствующий на нажимном диске, также зависит от скоростного режима работы двигателя.

В современных условиях наибольшее предпочтение получили следующие варианты компоновочных схем механизмов сцеплений, показанных на рис. 1.



1 – однодисковое с периферийными пружинами; 2 – двухдисковое;
3 – однодисковое с диафрагменной пружиной

Рисунок 1 – Компоновочные схемы сухих фрикционных сцеплений

Величина коэффициента $\beta_{сц}$ должна учитывать неизбежное изменение в сторону уменьшения коэффициента трения μ накладок в процессе эксплуатации, усадки нажимных пружин, наличия регулировок нажимного диска, в связи с чем авторы [11] рекомендуют использовать следующие значения $\beta_{сц}$, показанные в табл. 1.

Таблица 1 – Рекомендуемые [11] значения коэффициента запаса сцепления

Тип транспортного средства	Величина $\beta_{сц}$
Легковые автомобили	1,2 ... 1,75
Грузовые автомобили	1,5 ... 2,2
Автобусы, самосвалы, автомобили повышенной проходимости	1,8 ... 3,0

2.2 Методика расчетной оценки работоспособности автомобильного сцепления

В качестве исходной величины при проектном расчёте определяется внешний диаметр D ведомого диска и соответствующий ему диаметр фрикционной накладки:

$$D = 2R = 2,5 \sqrt[3]{\frac{M_c}{\rho_0 \mu i}}, \quad (3)$$

где R – наружный радиус ведомого диска, м; i – число поверхностей трения.

Внутренний радиус фрикционной накладки r в зависимости от наружного радиуса R может быть в пределах $r = (0,5 \dots 0,7)R$.

По данным работы [10] в существующих конструкциях сцеплений удельное давление на фрикционные накладки принимается $\rho_0 = 0,15 \dots 0,25$ МПа; коэффициент трения находится в пределах $\mu = 0,22 \dots 0,30$.

Число поверхностей трения для однодисковых сцеплений $i = 2$, для двухдисковых сцеплений $i = 4$. На уровне инженерных расчетов допускается принимать $i = 2$ при мощности двигателя $N_e \leq 130$ кВт и $i = 4$ при $N_e \geq 130$ кВт.

По величине D наружного диаметра фрикционной накладки с учётом нормативных требований [9] подбираются рекомендуемые размеры фрикционной накладки (наружный D и

внутренний d диаметры, а также толщина δ), ориентируясь на величины максимального крутящего момента двигателя M_{max} и частоты вращения его коленчатого вала n_e .

Средний радиус по активной площади трения фрикционных накладок определяется по формуле:

$$R_{\text{cp}} = \frac{2}{3} \cdot \frac{R^3 - r^3}{R^2 - r^2} = 0,33 \frac{D^3 - d^3}{D^2 - d^2} . \quad (4)$$

Усилие нажимного диска на фрикционные накладки, необходимое для передачи заданной величины крутящего момента, определяется как отношение

$$P_{\text{н1}} = \frac{M_c}{R_{\text{cp}} \mu i} . \quad (5)$$

Нажимное усилие $P_{\text{н}}$ создает удельное давление на фрикционную накладку ρ_0 , которое не должно превышать допустимую величину $[\rho_0]$ исходя из условий прочности материала накладки:

$$\rho_0 = \frac{P_{\text{н}}}{F_{\text{тр}}} , \quad (6)$$

где $F_{\text{тр}}$ – активная площадь трения при передаче момента, м^2 .

Геометрическая площадь одной стороны фрикционной накладки:

$$F = \frac{\pi(D^2 - d^2)}{4} . \quad (7)$$

При клеевом соединении накладки с ведомым диском $F_{\text{тр}} = F \cdot i$, однако, при наличии заклепочных соединений необходимо учитывать уменьшение рабочей площади трения под заклепки на величину коэффициента учёта заклёпочных соединений $k_{\text{зс}}$. В существующих конструкциях обычно $k_{\text{зс}} = 0,95$. Тогда:

$$F_{\text{тр}} = k_{\text{зс}} F i . \quad (8)$$

Проверка несущей способности накладки производится по условию $\rho_0 \leq [\rho_0]$, при этом для существующих материалов накладок $[\rho_0] = 0,15 \dots 0,26$ МПа, причём для автомобилей большой максимальной разрешенной массы более 10 т рекомендуется $[\rho_0] \leq 0,2$ МПа [10].

Нажимные пружины создают усилие, зажимающее периферийную часть ведомого диска между плоскостями нажимного диска и маховика. Число нажимных пружин и их расположение должно обеспечивать передачу заданной величины крутящего момента при равномерном распределении давления на поверхностях фрикционных накладок. В конструкциях современных механизмов сцеплений нашли применение витые цилиндрические, конические и тарельчатые нажимные пружины.

В качестве исходных величин при данном расчете принимается число пружин z нажимного диска и средний диаметр витка пружины D_{cp} . Согласно рекомендациям работы [4] средний диаметр витка пружины должен находиться в пределах $D_{\text{cp}} = 22 \dots 30$ мм. По величине D наружного диаметра фрикционной накладки производится ориентировочный выбор числа нажимных пружин, которое должно быть кратным числу нажимных рычагов для исключения возможности перекоса нажимного диска при выключении сцепления. Рекомендуемая в работе [5] зависимость числа нажимных пружин от наружного диаметра фрикционной накладки представлена в табл. 2.

Таблица 2 – Зависимость числа нажимных пружин Z от диаметра фрикционной накладки D [5]

D , мм	< 200	200 ... 280	280 ... 360	> 360
Z	6 ... 8	8 ... 12	12 ... 18	18 ... 30

Рекомендуемое в работе [4] усилие на одну пружину должно быть в пределах 600 ... 700 Н. Для автомобилей максимальной разрешенной массы более 15 т допускается применение пружин усилием до 1000 Н. Для уменьшения массогабаритных параметров сцепления целесообразно двухрядное расположение пружин, либо расположение одной пружины внутри другой. Расчётная схема цилиндрической пружины показана на рис. 2.

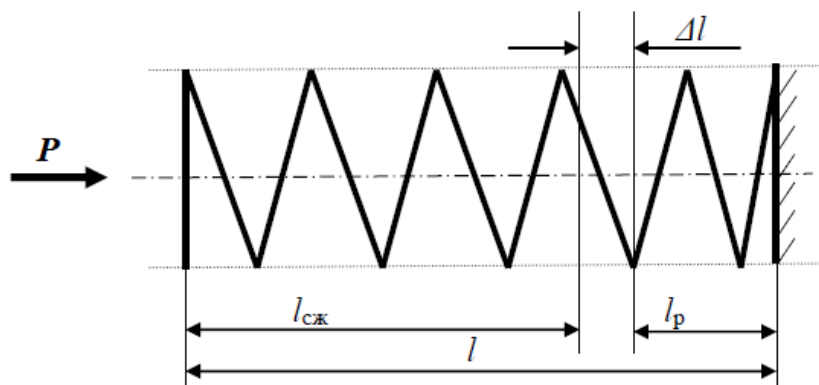


Рисунок 2 – Схема нагружения пружины нажимного диска сцепления

В любом случае усилие одной пружины при включенном сцеплении определяется как отношение:

$$P = \frac{P_n}{z}. \quad (9)$$

При выключении сцепления в результате сжатия пружин их усилие P возрастает на 10 ... 15 %, которое с учетом неравномерности давления и потерь на трение центрирующих витков пружины достигает уровня

$$P_{max} = (1,1 \dots 1,15)P. \quad (10)$$

Диаметр проволоки пружины d определяется из условия на прочность:

$$d = \sqrt[3]{\frac{8P_{max}D_{cp}}{\pi[\tau]}}, \quad (11)$$

где $[\tau]$ – допускаемое напряжение на кручение витков; для сталей 50ХГ, 50ФХА, 55С2, 65Г $[\tau] = 500 \dots 700$ МПа [13].

Жёсткость пружины определяется уравнением:

$$C_{пр} = \frac{P_{max}}{l_p} = \frac{d^4 G}{8D_{cp}^3} = \frac{P_{max} - P}{\Delta l} \leq [C_{пр}]. \quad (12)$$

Допускаемый уровень жёсткости одной пружины $[C_{пр}] = 15 \dots 40$ Н/мм.

В приведенной формуле: P_{max} – усилие пружины при включенном сцеплении, Н; l_p – рабочая деформация пружины, когда сцепление выключено; G – модуль упругости второго

рода (при кручении), для сталей типа 50ХГ, 50ФХА, 55С2, 65Г $G = 80 \dots 85$ ГПа; n_p – рабочее число витков пружины; $l_{сж}$ – длина пружины в сжатом состоянии при выключенном сцеплении; l – длина пружины в свободном состоянии; Δl – дополнительная деформация пружины при выключении сцепления или ход нажимного диска:

$$\Delta l = si, \quad (13)$$

где s – зазор между трущимися поверхностями при выключенном сцеплении, мм; i – число поверхностей трения. Рекомендуемая в работе [9] величина зазора s может находиться в пределах:

- для однодискового сцепления $s = 1 \dots 1,5$ мм;
- для двухдискового сцепления $s = 0,5 \dots 0,75$ мм;
- для многодискового сцепления $s = 0,25 \dots 0,3$ мм.

Рабочее число витков пружины:

$$n_p = \frac{\Delta l d^4 G}{8(P_{max} - P)D_{ср}^3}. \quad (14)$$

Полное число витков пружины с учетом крайних витков, неработающих на кручение, составляет:

$$n = n_p(1,5 \dots 2,0). \quad (15)$$

Согласно работе [14] полное число витков рекомендуется $n < 9$ для уменьшения прогиба пружины от действия центробежной силы при большой частоте вращения коленчатого вала.

С учетом определенной жёсткости нажимной пружины $C_{пр}$ можно определить её рабочую деформацию l_p при выключении сцепления:

$$l_p = \frac{P}{C_{пр}}. \quad (16)$$

Длина пружины в предварительно поджатом состоянии $l_{сж}$ при выключенном сцеплении определяется как сумма витков и зазоров между витками и с учетом дополнительного зазора между рабочими витками:

$$l_{сж} = nd + 0,1n_p. \quad (17)$$

Длина пружины в свободном (разжатом) состоянии:

$$l = l_{сж} + \Delta l + l_p. \quad (18)$$

Определенные расчётом параметры пружины уточняются по стандарту [14].

Основным недостатком рассматриваемого типа автомобильных сцеплений является уязвимость нажимных пружин от радиального изгиба под действием центробежных сил при частоте вращения коленчатого вала более 4000 мин^{-1} . Изгиб пружин приводит к снижению нажимного усилия P_n и соответствующему уменьшению коэффициента запаса сцепления, что в общем итоге может приводить к пробуксовкам сцепления при больших скоростях движения. Указанные обстоятельства привели к созданию конструкции механизма сцепления с диафрагменной нажимной пружиной, устойчивой к восприятию радиальных центробежных сил [15].

При расчете диафрагменной пружины в качестве исходных величин используются: момент, передаваемый сцеплением M_c ; наружный и внутренний диаметры фрикционной

накладки D и d ; суммарное усилие нажимного диска P_n ; допускаемое удельное давление на фрикционную накладку $[\rho_0]$.

По величине наружного диаметра фрикционной накладки (наружного диаметра нажимного диска) D определяется наружный диаметр диафрагменной пружины D_e :

$$D_e = (0,9 \dots 0,95)D. \quad (19)$$

В соответствии с принимаемой компоновочной схемой пружины, показанной на рис. 3, определяются ее основные размеры: наружный диаметр D_e ; активный диаметр D_a ; внутренний диаметр лепестков D_i ; центральный диаметр D_c ; толщина лепестков пружины δ ; высота пояса пружины h ; высота центра пояса пружины l_1 .

Согласно работе [16] при проектировании тарельчатых пружин рекомендуется соблюдать следующие соотношения:

$$\frac{D_e}{D_a} = 1,2 \dots 1,5; \quad \frac{D_e}{D_i} \geq 2,5; \quad \frac{D_e}{\delta} = 75 \dots 100.$$

В качестве исходной величины целесообразно принимать число лепестков пружины $z = 8 \dots 20$ при соотношении диаметров $D_c = 0,5(D_e + D_a)$.

Отношение h/δ определяет нелинейность зависимости деформации пружины от осевой силы. При $h/\delta \geq 1,6$ имеется большая область с линейной характеристикой, однако при $h/\delta > 2,8$ возможно обратное "выворачивание" пружины. Расчётная схема диафрагменной пружины показана на рис. 3.

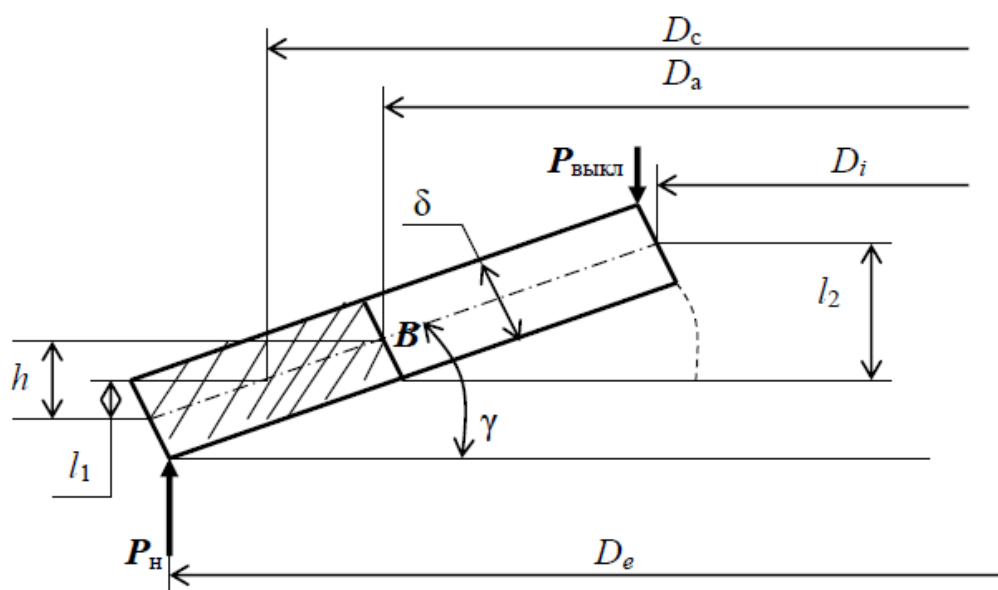


Рисунок 3 – Схема к расчету диафрагменной пружины

Действие на пружину нажимной силы P_n вызывает продольное смещение геометрического центра сплошного кольца l_1 . Перемещение l_2 конца лепестков пружины при выключении сцепления состоит из перемещения l_2' , вызванного изменением угла наклона сплошного кольца пружины, и деформации изгиба l_2'' лепестков разрезной части, $l_2 = l_2' + l_2''$, или

$$l_2' = l_1 \frac{D_c - D_i}{D_e - D_c}. \quad (20)$$

Если пренебречь величиной деформации лепестков l_2'' , то можно принять $l_2 \approx l_2'$. Величина l_2 рабочего хода подшипника выключения сцепления обычно составляет $l_2 = 8 \dots 9$ мм.

Сила, действующая на нажимной диск от усилия диафрагменной пружины P_n при выключении сцепления определяется по формуле:

$$P_{n2} = \frac{2}{3} \cdot \frac{\pi E}{1 - \mu_n^2} \cdot \frac{\delta l_1}{D_e^2} \cdot \frac{l_2 K_1^{-1}}{(1 - K_2)^2} \cdot \left[\delta^2 + \left(h - l_1 \frac{1 - K_1}{1 - K_2} \right) \cdot \left(h - 0,5 l_1 \frac{1 - K_1}{1 - K_2} \right) \right], \quad (21)$$

где E – модуль упругости материала пружины первого рода, составляющий для сталей типа 65Г, 55С2 $E = 210$ ГПа [17]; μ_n – коэффициент Пуассона (поперечной деформации) для указанных марок сталей $\mu_n = 0,26$; K_1 и K_2 – коэффициенты диаметральных соотношений пружины, определяемые по выражениям:

$$K_1 = \frac{D_a}{D_e}; K_2 = \frac{D_c}{D_e}. \quad (22)$$

Определенное усилие P_{n2} от диафрагменной пружины на нажимной диск должно обеспечивать передачу крутящего момента с заданными значениями среднего радиуса $R_{ср}$ и коэффициента трения μ , как и нажимное усилие P_{n1} , определённое для сцепления с периферийными пружинами. В случае, если нажимное усилие P_{n2} оказывается меньше усилия P_{n1} , необходимо принять другие параметры пружины, прежде всего, путем изменения величин D_a , D_i , D_c , δ , h . Наружный диаметр D_e изменению не подлежит, поскольку его величина является согласованной с внешним диаметром фрикционной накладки.

Отношение разностей размеров $(D_e - D_c)$ и $(D_c - D_i)$ определяет передаточное число пружины:

$$U_{пр} = \frac{D_c - D_i}{D_e - D_c}. \quad (23)$$

Сила P_b , прикладываемая к пружине при выключении сцепления, или сила, действующая от подшипника выключения сцепления, определяется из выражения:

$$P_b = \frac{P_n}{U_{пр}}. \quad (24)$$

По величине усилия P_b производится расчет привода сцепления с определением усилия на педали.

Оценка работоспособности пружины производится по напряжениям растяжения в наиболее нагруженном месте у середины основания лепестка (точка В, рис. 3) в режиме выключенного сцепления при заданной деформации $l_1 = h$:

$$\sigma_p = \frac{2P_b D_a}{\delta^2 (D_a + D_i)} + \frac{0,5E}{1 - \mu^2} \cdot \frac{0,5(D' - D_a)\alpha^2 + \delta\alpha}{D_a}, \quad (24)$$

где

$$D' = \frac{(D_e - D_a)}{l_2 \left(\frac{D_e}{D_a} \right)}, \quad (25)$$

$$\alpha = \frac{2h}{D_e - D_a}. \quad (26)$$

Напряжения σ_p не должны превышать допускаемые напряжения $[\sigma_T]$ предела текучести материала при растяжении. Для стали 60С2А $[\sigma_T] = 1400$ МПа; для стали 65СГ2 $[\sigma_T] = 1500$ МПа [18].

3 Результаты исследований

Центробежная сила, действующая на одну периферийно расположенную пружину сцепления, показанную на рис. 2, определяется по формуле:

$$P_{ц} = \frac{m_{пр} V^2}{r_{нп}} = m_{пр} 4\pi^2 r_{нп} n_e^2, \quad (27)$$

где $m_{пр}$ – масса одной пружины, кг; $r_{нп}$ – радиус расположения нажимных пружин, м; V – линейная скорость вращения пружин, определяемая по формуле:

$$V = 2\pi r_{нп} n_e, \quad (28)$$

где n_e – частота вращения коленчатого вала двигателя в мин^{-1} .

Действие центробежной силы $P_{рад}$ создаёт на пружине изгибающий момент:

$$M_{из} = P_{ц} \frac{l_{сж}}{2}, \quad (29)$$

где $l_{сж}$ – длина пружины в состоянии предварительного поджатия или расстояние между плоскостями кожуха и нажимного диска, мм.

Восстанавливающий момент на пружине определяется по формуле:

$$M_{в} = P \frac{d_{пр}}{2}, \quad (30)$$

где P – нажимная сила, приходящаяся на одну пружину, $P = \frac{P_{н1}}{Z_{пр}}$; $P_{н1}$ – суммарная нажимная сила, прикладываемая к нажимному диску сцепления; $Z_{пр}$ – число нажимных пружин в блоке; $d_{пр}$ – диаметр одной нажимной пружины по центру расположения её витков.

Начало изгиба блока пружин под действием центробежной силы $P_{ц}$ определяется равенством изгибающего и восстанавливающего моментов, уравнение которых после преобразования может быть представлено в виде:

$$m_{пр} 4\pi^2 r_{нп} n_e^2 l_{сж} Z_{пр} = P_{н1} d_{пр}. \quad (31)$$

Решение данного уравнения относительно частоты вращения коленчатого вала позволит определить частотный режим, соответствующий началу потери работоспособности сцепления:

$$n_{е кр} = \sqrt{\frac{P_{н1} d_{пр}}{39,44 m_{пр} r_{нп} l_{сж} Z_{пр}}}. \quad (32)$$

Как видно из уравнения, возрастанию частоты вращения коленчатого вала, при которой сохраняется работоспособность сцепления, может способствовать уменьшение массы нажимных пружин, радиуса их расположения и длины их предварительного поджатия, а также увеличение силы сжатия пружин и диаметра расположения их витков.

Таким же образом можно получить выражение, определяющее зависимость суммарной силы на нажимной диск от частоты вращения коленчатого вала:

$$P_{н1} = \frac{39,44m_{пр}r_{нп}l_{ск}Z_{пр}}{d_{пр}}. \quad (33)$$

Для варианта механизма сцепления с диафрагменной пружиной, показанного на рис. 3, центробежная сила, стремящаяся разогнуть пружину, определяется по формуле:

$$P_{ц2} = \frac{2m_{дп}V^2}{D_c} = 2m_{дп}4\pi^2D_cn_e^2 = 78,8m_{дп}D_cn_e^2, \quad (34)$$

где $m_{дп}$ – масса диафрагменной пружины, кг; D_c – диаметр расположения центра масс сплошной части диафрагменной пружины (как показано на рис. 3); n_e – частота вращения коленчатого вала двигателя, мин⁻¹.

Действие центробежной силы $P_{ц2}$, прикладываемой к точке центра масс сплошной части пружины, создаёт на диафрагменной пружине изгибающий момент, направленный на ослабление её прижатия к нажимному диску:

$$M_{и дп} = 2P_{ц2}l_1, \quad (35)$$

где l_1 – смещение геометрического центра сплошного кольца пружины, м, показанное на рис. 3.

В результате действия такого момента суммарная нажимная сила $P_{н2}$, осуществляемая диафрагменной пружиной на нажимной диск, уменьшается на величину $\Delta P_{н2}$, функционально зависящую от частоты вращения коленчатого вала двигателя:

$$\Delta P_{н2} = P_{ц2} \frac{D_e - D_c}{2}. \quad (36)$$

Это, в отличие от механизма с периферийно расположенными пружинами, является фактором, способствующим снижению коэффициента запаса сцепления данного механизма.

Зависимость усилия $\Delta P_{н2}$ от частоты вращения коленчатого вала можно выразить формулой:

$$\Delta P_{н2} = 39,4m_{дп}D_cn_e^2(D_e - D_c). \quad (37)$$

В итоговом выражении для сцепления с диафрагменной пружиной усилие на нажимной диск можно рассматривать как разность

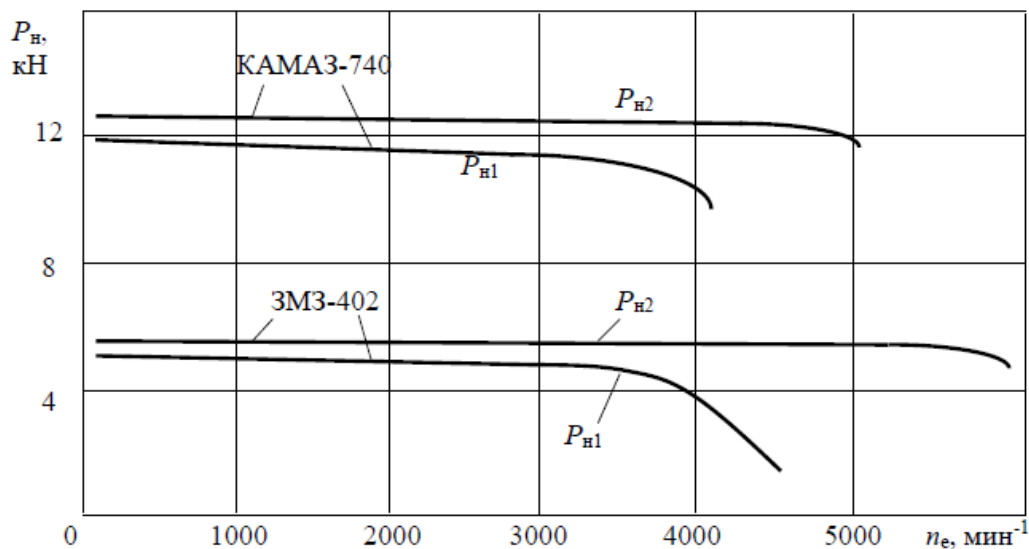
$$P_{н2} = P - \Delta P_{н2}, \quad (38)$$

где P – статическое усилие на диафрагменную пружину в предварительно поджатом состоянии, Н.

Из приведенных аналитических зависимостей можно заключить, что как для механизма сцепления с периферийными пружинами, так и для механизма с диафрагменной пружиной, величина нажимного усилия P_n зависит от частоты вращения коленчатого вала двигателя.

Как видно из рис. 4, для обоих видов сцепления характерно снижение нажимного усилия при увеличении частоты вращения коленчатого вала двигателя, причём для сцепления с периферийными пружинами снижение усилия $P_{н1}$ происходит более заметно при намного меньших величинах n_e . Такое явление можно объяснить как действием центробежных сил на пружины, так и геометрическими характеристиками их расположения на нажимном диске. Как

можно заметить, у сцепления КАМАЗ-740 сила P_n , действующая на нажимной диск в диапазоне рабочих частот вращения коленчатого вала двигателя от 500 до 2800 мин⁻¹, практически не меняется, что может быть объяснено использованием более жёстких нажимных пружин и их достаточно большим количеством.



P_{n1} – для механизма с периферийными пружинами;
 P_{n2} – для механизма с диафрагменной пружиной

Рисунок 4 – Зависимость усилия на нажимной диск сцепления P_n от частоты вращения коленчатого вала двигателя n_e

Показателем определения работоспособности сцепления любого типа служит коэффициент запаса сцепления, определяемый по формуле:

$$\beta_{\text{сц}} = \frac{M_c}{M_e}, \quad (39)$$

где M_c – момент, присутствующий на нажимном диске сцепления, Н/м; M_e – текущее значение крутящего момента двигателя, Н/м.

Из приведённого уравнения ясно, что начало пробуксовки сцепления, а следовательно, и потеря его работоспособности, наступает при снижении момента M_c до уровня $M_{e \text{ max}}$. При этом для механизма сцепления любого типа момент начала пробуксовки сцепления определяется с помощью выражения:

$$M_c = P_n D_c \mu i = \beta_{\text{сц}} M_{e \text{ max}}, \quad (40)$$

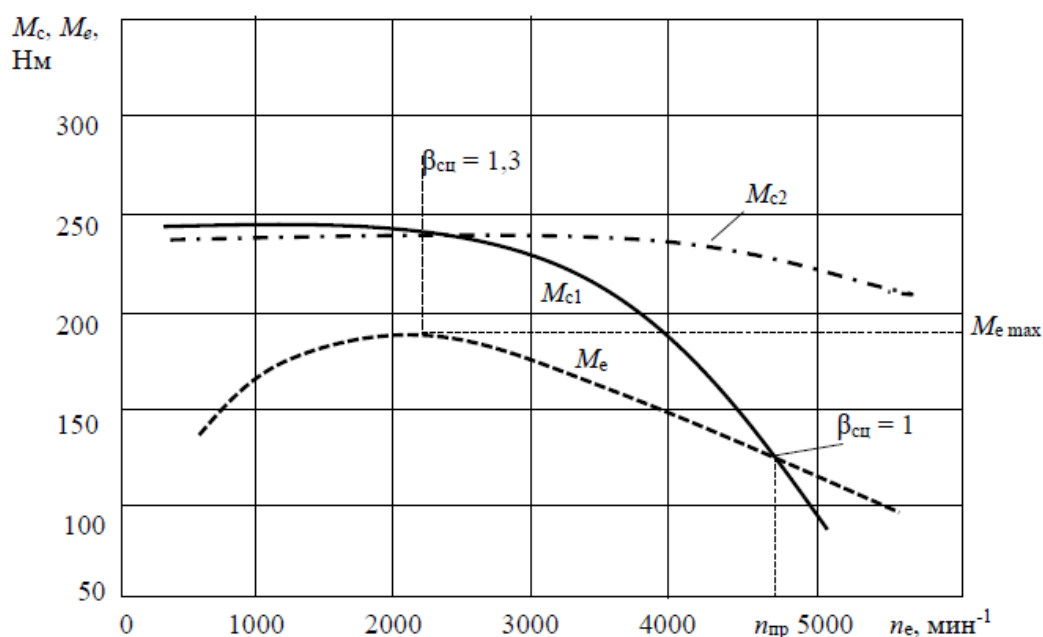
где P_n – сила, действующая на нажимной диск, Н; D_c – средний диаметр расположения нажимных пружин или, для сцепления с диафрагменной пружиной, средний диаметр рабочей части пружины, мм; μ – коэффициент трения между накладками ведомого диска и металлическими поверхностями маховика и нажимного диска; i – число поверхностей трения.

Из приведенных формул видно, что коэффициент запаса сцепления $\beta_{\text{сц}}$ является функцией двух параметров – крутящего момента двигателя и частоты вращения его коленчатого вала. Приведенные на рис. 5 и 6 зависимости позволяют определить влияние скоростного ре-

жима двигателя как на уровень его крутящего момента, так и на изменение момента M_c , присутствующего на нажимном диске сцепления, а также установить их соотношение, при котором начинается пробуксовка сцепления, а следовательно, и нарушение его работоспособности.

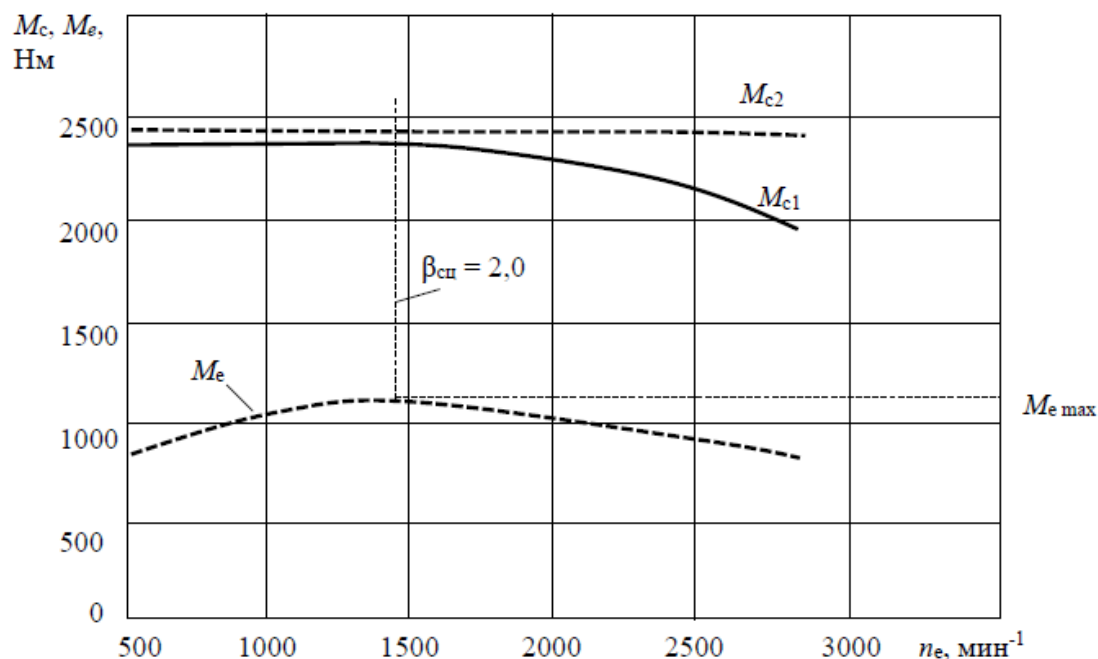
Как видно из рис. 5, для бензинового двигателя ЗМЗ-402, содержащего механизм сцепления с периферийными пружинами, при увеличении частоты вращения коленчатого вала характерно значительное снижение момента M_{c1} , присутствующего на нажимном диске, происходящее, как отмечено в работе [19], вследствие действия на пружины центробежной силы, определяемой массой пружин и радиусом их размещения на нажимном диске. При достижении частоты вращения коленчатого вала $n_{пр} = 4800 \text{ мин}^{-1}$ становятся равными моменты M_c и M_e , в результате чего начинается пробуксовка сцепления с утратой работоспособности всего механизма. Для устанавливаемого на том же двигателе механизма сцепления с диафрагменной пружиной при повышении частоты вращения коленчатого вала n_e снижение момента на нажимном диске M_{c2} вследствие действия центробежных сил происходит незначительно, что не оказывает заметного влияния на состояние его работоспособности.

Как видно из рис. 6, для дизельного двигателя КАМАЗ-740, комплектуемого двумя вариантами рассматриваемых видов сцеплений, характерно сохранение достаточно высокого уровня коэффициента запаса сцепления $\beta_{сц}$ во всём диапазоне рабочих частот вращения коленчатого вала от 500 до 2700 мин^{-1} . При этом в варианте сцепления с периферийными пружинами повышение частоты вращения коленчатого вала вызывает весьма незначительное снижение момента M_{c1} на нажимном диске, а в варианте сцепления с диафрагменной пружиной никакого практически значимого снижения момента M_{c2} не происходит. Коэффициент запаса сцепления, находящийся в зоне максимального крутящего момента на уровне $\beta_{сц} = 2,0$, при повышении частоты вращения коленчатого вала в варианте механизма с периферийными пружинами практически не меняется, а в варианте с диафрагменной пружиной незначительно возрастает, что не оказывает отрицательного действия на его работоспособность. Данные обстоятельства, рассмотренные в работах [20] и [21], указывают на необходимость установления функциональных зависимостей с целью создания алгоритмов, позволяющих осуществить управление силовыми параметрами сцепления.



M_{c1} — для сцепления с периферийными пружинами; M_{c2} — для сцепления с диафрагменной пружиной

Рисунок 5 – Корреляция зависимостей моментов M_{c1} и M_{c2} на нажимном диске и момента M_e на маховике двигателя ЗМЗ-402 при изменении частоты n_e вращения коленчатого вала



M_{c1} – для сцепления с периферийными пружинами; M_{c2} – для сцепления с диафрагменной пружиной

Рисунок 6 – Корреляция зависимостей моментов M_{c1} и M_{c2} на нажимном диске и момента M_e на маховике двигателя КАМАЗ-740 при изменении частоты n_e вращения коленчатого вала

4 Обсуждение и заключение

Результаты работы по оценке работоспособности автомобильных сцеплений рассматриваемых конструктивных вариантов рассматривались и обсуждались на научно-практических конференциях, проводимых в Воронежском государственном лесотехническом университете в 2023-2025 годах, а также в Орловском государственном университете в 2022-2024 годах. При этом было отмечено, что конструктивное замещение сцеплений с периферийными пружинами механизмами с диафрагменными пружинами оказывается целесообразным, прежде всего, на высокооборотных двигателях. Авторам было рекомендовано уделить больше внимания поиску границ работоспособного состояния автомобильных сцеплений не только по характеристикам пружин, но и по износным состояниям фрикционных поверхностей нагружаемых деталей, а также по критериям предельных циклов деформаций упругих элементов. Авторами работы было выражено согласие с данными замечаниями, но было пояснено, что вопрос потери работоспособности сцепления вследствие радиальной деформации пружин проявляется спонтанным образом при высокоскоростном движении автомобиля и относится к безопасности движения, в то время как потеря работоспособности сцепления по критериям износа фрикционных поверхностей носит предупредительный характер и может быть устранена в рамках плановых ремонтов.

Заключение

1 Уточнены параметры прочностного расчёта механизмов сцеплений в вариантах с расположением нескольких периферийных нажимных пружин и с наличием одной диафрагменной пружины, что позволяет на стадии проектирования оптимизировать геометрические и массогабаритные параметры деталей.

2 Определены корреляции зависимостей, передаваемых деталями сцепления моментов от частоты вращения коленчатого вала двигателя, позволяющие установить изменение коэффициента запаса сцепления и предельный скоростной режим, при котором происходит потеря работоспособности механизма.

3 Установлены нагрузочные режимы сцепления с диафрагменной пружиной, при которых не происходит нарушение его работоспособности.

4 В продолжении дальнейшей работы целесообразно сосредоточить внимание на вопросах повышения надёжности данного механизма и продления его ресурса, а также, как указано в работе [22], рассмотреть вопросы управления силовыми параметрами данного механизма.

Список литературы

- 1 Минкас, В. Автомобильные сцепления, трансмиссии, приводы / В. Минкас, Р. Попиаль, А. Шпренгер. – М.: За рулём, 2012. – 352 с.
- 2 Фаробин, Я.Е. Фрикционные передачи автомобилей и тракторов / Я.Е. Фаробин. – М.: Машгиз, 1962. – 164 с.
- 3 Барский И.Б. Сцепления транспортных и тяговых машин / И.Б. Барский, С.Г. Борисов, В.А. Галягин. – М.: Машиностроение, 1989. – 344 с.
- 4 Бухарин, Н. А. Автомобили. Конструкция, нагрузочные режимы, рабочие процессы, прочность агрегатов автомобиля. Учебное пособие для вузов. / Н.А. Бухарин, В.С. Прозоров, М.М. Щукин. – Л.: Машиностроение, 1973. – 504 с.
- 5 Высоцкий, М.С. Автомобили МАЗ. / М.С. Высоцкий, Л.Х. Гилелес, С.Г. Херсонский и др. – М.: Транспорт, 1968. – 328 с.
- 6 Гришкевич, А. И. Автомобили. Теория. Учебник для вузов / А.И. Гришкевич. - Минск: Вышэйша школа, 1986. – 208 с.
- 7 Малаховский, Я.Э. Сцепления (серия Проектирование автомобиля) / Я.Э. Малаховский, А.А. Лапин – М.: МАШГИЗ, 1960. – 190 с.
- 8 Тарасик, В. П. Математическое моделирование технических систем: учебник для вузов / В. П. Тарасик. – Минск, дизайн ПРО, 2004. – 640 с.
- 9 ГОСТ 21398-89 Автомобили грузовые. Общие технические требования. - М.: ГОССТАНДАРТ, 1989. – 15 с.
- 10 ГОСТ 1786-95 Накладки фрикционные. Общие технические требования. – Минск: Межгосударственный совет по стандартизации, метрологии и сертификации, 1995. – 11 с.
- 11 Лукин, П. П. Конструирование и расчет автомобиля. Учебник для студентов ВТУЗов, обучающихся по специальности "Автомобили и тракторы" / П.П. Лукин, Г.А. Гаспарянц, В.Ф. Родионов. – М.: Машиностроение, 1984 – 376 с.
- 12 Волков, В.С. Оценка работоспособности агрегатов и систем транспортных средств: монография / В.С. Волков; М-во науки и высшего образования РФ, ФГБОУ ВО «ВГЛУ». – Воронеж, 2022. - 172 с.
- 13 ГОСТ 14959-2016 Металлопродукция из рессорно-пружинной нелегированной и легированной стали. Технические условия. М.: Стандартиформ, 2017. – 32 с.
- 14 ГОСТ 16118-70 Пружины винтовые цилиндрические сжатия и растяжения из стали круглого сечения. Технические условия. – М.: Стандартиформ, 2005. – 13 с.
- 15 ГОСТ 3057-90 Пружины тарельчатые. Общие технические условия. М.: ИПК издательство стандартов, 2003. – 38 с.
- 16 Афанасьев, Б.А. Проектирование полноприводных колесных машин: Учебник для вузов / Б.А. Афанасьев, Б.Н. Белоусов, Г.И. Гладов; под ред. А.А. Полуняна. – М.: МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2008 – 496 с.
- 17 Осепчугов, В. В. Автомобиль: Анализ конструкций, элементы расчета. Учеб. для вузов / В.В. Осепчугов, А.К. Фрумкин. — М.: Машиностроение, 1989. – 304 с.
- 18 Цитович И.С. Трансмиссии автомобилей / И.С. Цитович, И.В. Каноник, В.А. Вавуло. – Минск: Наука и техника, 1979. – 256 с.
- 19 Острцов, А.В. Автомобильные сцепления: Учебное пособие по дисциплинам «Конструкция автомобиля и трактора» и «Конструирование и расчет автомобиля» для студентов вузов / А.В. Острцов, П.А. Красавин, В.В. Воронин. – М.: МГТУ «МАМИ», 2011. – 98 с.
- 20 Mikell, Processes, and Systems / P. Mikell. - John Wiley & Sons, 2010 - p. 1024 34 Pacejka H.B. Some recent investigations into dynamics and frictional behavior of pneumatic tires / H.B. Pacejka// Phys. Tire tract: Theory and Exp. - New-York - London, 1974.
- 21 Rabiner R. Theory and Application of Digital Signal Processing / R. Rabiner, B. Gold. -New York, Prentice-Hall, Inc. Englewood Cliffs, 1975.
- 22 Wittel, H. Maschinenelemente: Normung, Berechnung, Gestaltung - Lehrbuch und Tabellenbuch / H. Wittel, D. Muhs, D. Jannasch. - Vieweg+Teubner Verlag, 2011.

References

- 1 Minkas V. Automotive clutches, transmissions, drives / V. Minkas, R. Popial, A. Sprenger. – M.: Zarelem, 2012. – 352 p.
- 2 Farobin Ya.E. Friction gears of cars and tractors / Ya.E. Farobin. – M.: Mashgiz, 1962. – 164 p.
- 3 Barsky I.B. Coupling of transport and traction machines / I.B. Barsky, S.G. Borisov, V.A. Galyagin. – M.: Mashinostroenie, 1989. – 344 p.
- 4 Bukharin, N. A. Automobiles. Design, load conditions, work processes, and the strength of vehicle components. Textbook for universities. / N.A. Bukharin, V.S. Prozorov, M.M. Shchukin. – L.: Mashinostroenie, 1973. – 504 p.
- 5 Vysotsky M.S. Cars of MAZ. / M.S. Vysotsky, L.H. Gileles, S.G. Khersonsky et al. – M.: Transport, 1968. – 328 p.
- 6 Grishkevich, A. I. Automobiles. Theory. Textbook for universities / A.I. Grishkevich. - Minsk: Higher School, 1986. – 208 p.
- 7 Malakhovsky, Ya.E. Clutches (car Design series) / Ya.E. Malakhovsky, A.A. Lapin, Moscow: MASHGIZ, 1960. 190 p.
- 8 Tarasik, V. P. Mathematical modeling of technical systems: a textbook for universities / V. P. Tarasik. – Minsk, Design PRO, 2004. – 640 p.
- 9 GOST 21398-89 Trucks. General technical requirements. - M.: GOSSTANDART, 1989. – 15 p.
- 10 GOST 1786-95 Friction pads. General technical requirements. Minsk: Interstate Council for Standardization, Metrology and Certification, 1995. 11 p.
- 11 Lukin, P. P. Designing and calculating a car. Textbook for students of higher education institutions studying in the specialty "Automobiles and tractors" / P.P. Lukin, G.A. Gasparyants, V.F. Rodionov. Moscow: Mashinostroenie, 1984 – 376 p.
- 12 Volkov V.S. Assessment of the operability of aggregates and systems of vehicles: a monograph / V.S. Volkov; Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation, VGLTU. – Voronezh, 2022. - 172 p.
- 13 GOST 14959-2016 Metal products made of spring-loaded non-alloy and alloy steel. Technical specifications. Moscow: Standartinform, 2017. – 32 p.
- 14 GOST 16118-70 Cylindrical helical compression and tension springs made of circular steel. Technical specifications. – M.: Standartinform, 2005. – 13 p.
- 15 GOST 3057-90 Disc springs. General technical conditions. Moscow: IPK Publishing House of Standards, 2003. 38 p.
- 16 Afanasyev, B.A. Designing four-wheel drive wheeled vehicles: A textbook for universities / B.A. Afanasyev, B.N. Belousov, G.I. Gladov; edited by A.A. Polungyan. Moscow: Bauman Moscow State Technical University, 2008 – 496 p.
- 17 Osepchugov V. V. Automobile: Structural analysis, calculation elements. Textbook for universities / V.V. Osepchugov, A.K. Frumkin. — M.: Mashinostroenie, 1989. – 304 p.
- 18 Cytoich I.S. Transmissions of cars / I.S. Cytoich, I.V. Kanonik, V.A. Vavulo. Minsk: Nauka i Tekhnologiya Publ., 1979. 256 p.
- 19 Ostretsov A.V. Automotive clutches: A textbook on the disciplines "Car and tractor design" and "Car design and calculation" for university students / A.V. Ostretsov, P.A. Krasavin, V.V. Voronin. – M.: MSTU "MAMI", 2011. – 98 p.
- 20 Mikell, Processes, and Systems / P. Mikell. - John Wiley & Sons, 2010 - p. 1024 34 Pacejka H.B. Some recent investigations into dynamics and frictional behavior of pneumatic tires / H.B. Pacejka// Phys. Tire tract: Theory and Exp. - New-York - London, 1974.
- 21 Rabiner R. Theory and Application of Digital Signal Processing / R. Rabiner, B. Gold. -New York, Prentice-Hall, Inc. Englewood Cliffs, 1975.
- 22 Wittel, H. Maschinenelemente: Normung, Berechnung, Gestaltung - Lehrbuch und Tabellenbuch / H. Wittel, D. Muhs, D. Jannasch. - Vieweg+Teubner Verlag, 2011.

© Волков В. С., Восковых П. А., 2026