

Транспортные системы Transport systems

Научная статья

Статья в открытом доступе

УДК 656.1

doi: 10.30987/2782-5957-2025-5-39-45

КЛАСТЕРНЫЙ ПОДХОД ДЛЯ ОРГАНИЗАЦИИ АДАПТИВНОЙ СИСТЕМЫ ТЕХНИЧЕСКОГО ОБСЛУЖИВАНИЯ И РЕМОНТА АВТОМОБИЛЕЙ

Николай Александрович Загородний^{1✉}, Юрий Александрович Заяц², Александр Николаевич Новиков³, Алла Сергеевна Семькина⁴

^{1,4} Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова, Белгород, Россия

² Рязанское гвардейское высшее воздушно-десантное командное училище, Рязань, Россия

³ Орловский государственный университет имени И.С. Тургенева, Орел, Россия

¹ n.zagorodnij@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0002-2997-3282>

² sajua@yandex.ru, <https://orcid.org/0009-0000-4122-5853>

³ novikovan@ostu.ru, <https://orcid.org/0000-0001-5496-4997>

⁴ fantarock@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0003-4045-4237>

Аннотация

Цель исследования: разработка адаптивной системы ТО и Р по определению сроков и объема ТО, основанной на кластерном подходе, которая является плановой, предупредительной, но подстраиваемой в автоматическом режиме к увеличивающейся надежности, условиям эксплуатации, находящим отражение в эксплуатационных режимах, инфраструктуре предприятия, его назначении и характеристике решаемых транспортно-технологических задач.

Задача, решению которой посвящена статья. Разработать новый подход к техническому обслуживанию и ремонту транспортных средств, характеризующий режимы работы транспортного средства и необходимые для объективной оценки его фактического и прогнозируемого состояний.

Методы исследования. Прогнозирование, математическое моделирование, статистический

анализ, системный анализ, теория надежности, теория вероятности, теория управления.

Основные результаты и их новизна заключаются в создании адаптивной системы технического обслуживания и ремонта транспортных средств по наработке на режимах.

Выводы: Предложена адаптивная система ТО и Р по определению сроков и объема ТО, основанная на кластерном подходе, которая является плановой, предупредительной, но подстраиваемой в автоматическом режиме к увеличивающейся надежности, условиям эксплуатации, находящим отражение в эксплуатационных режимах, инфраструктуре предприятия, его назначении и характеристике решаемых транспортно-технологических задач.

Ключевые слова: надежность, автомобили, эксплуатация, период, срок службы.

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

Ссылка для цитирования:

Загородний Н.А. Кластерный подход для организации адаптивной системы технического обслуживания и ремонта автомобилей / Н.А. Загородний, Ю.А. Заяц, А.Н. Новиков, А.С. Семькина // Транспортное машиностроение. – 2025. - № 5. – С.39-45. doi: 10.30987/2782-5957-2025-5-39-45.

Original article

Open Access Article

CLUSTER APPROACH TO ORGANIZING ADAPTIVE SYSTEM OF CAR MAINTENANCE AND REPAIR

Nikolay Aleksandrovich Zagorodny^{1✉}, Yury Aleksandrovich Zayats², Aleksandr Nikolaevich Novikov³, Alla Sergeevna Semykina⁴

^{1,4} Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov, Belgorod, Russia

² Ryazan Guards Higher Airborne Command Military College, Ryazan, Russia

³ Orel State University named after I.S. Turgenev, Orel, Russia

¹ n.zagorodnij@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0002-2997-3282>

² sajua@yandex.ru, <https://orcid.org/0009-0000-4122-5853>

³ novikovan@ostu.ru, <https://orcid.org/0000-0001-5496-4997>

⁴ fantarock@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0003-4045-4237>

Abstract

The study objective is to develop an adaptive system of maintenance and repair for determining maintenance timing and content, based on a cluster approach, which is planned, preventive, and automatically adapts to increasing reliability, operating conditions reflected in operational modes, the infrastructure of the enterprise, its purpose and characteristics of the transport and technological tasks being solved.

The task to which the paper is devoted is to develop a new approach to vehicle maintenance and repair that characterizes vehicle operating modes and is necessary for an objective assessment of its actual and predicted conditions.

Research methods include forecasting, mathematical modeling, statistical analysis, system analysis,

reliability theory, probability theory, management theory.

The main results and their novelty are the creation of an adaptive system for maintenance and repair of vehicles based on operating modes.

Conclusions: An adaptive maintenance and repair system is proposed for determining the maintenance timing and content, based on a cluster approach, which is planned, preventive, but automatically adapts to increasing reliability, operating conditions reflected in the operating modes, the infrastructure of the enterprise, its purpose and characteristics of the transport and technological tasks being solved.

Keywords: reliability, cars, operation, period, service life.

Acknowledgements: The paper is written as a part of implementation of the federal university support program "Priority 2030" using the equipment based on the High Technology Center of BSTU named after V.G. Shukhov.

Reference for citing:

Zagorodny NA, Zayats YuA, Novikov AN, Semykina AS. Cluster approach to organizing adaptive system of car maintenance and repair. *Transport Engineering*. 2025;5:39-45. doi: 10.30987/2782-5957-2025-5-39-45.

Введение

Сегодня большинство вопросов обслуживания и ремонта автомобилей регулируется фактически требованиями регламентов к техническому обслуживанию и ремонту, разработанными заводами-изготовителями автомобилей. Основным смыслом планово-предупредительной системы – принудительная остановка автомобилей для проведения соответствующего ви-

да технического обслуживания по достижении определенного пробега или периода эксплуатации [1]. Это необходимо для недопущения преждевременного износа, а также для своевременного восстановления работоспособности узлов и агрегатов, которые ее утратили. Предусмотрены виды технических операций, представленные на рис. 1.

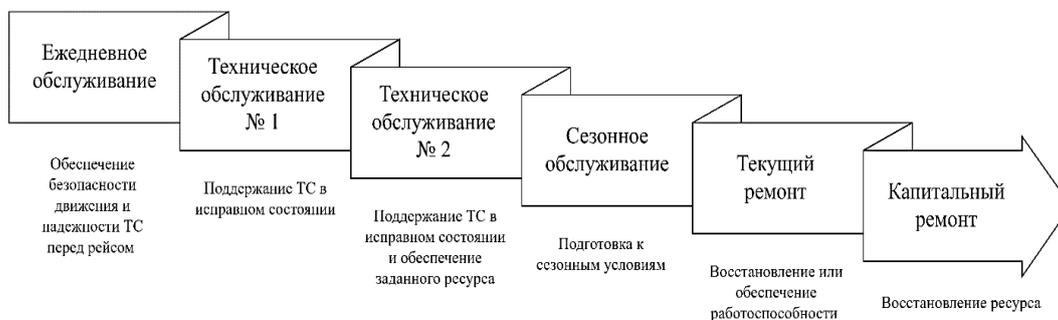


Рис. 1. Виды технических обслуживаний транспортных средств

Fig. 1. Types of vehicle maintenance

В настоящее время производители многих марок грузовых отечественных ав-

томобилей придерживаются этого перечня в своих рекомендациях по обслуживанию

и ремонту. Каждый из перечисленных видов обслуживания и ремонтов отличается трудоемкостью и периодичностью [2, 3].

Производители легковых отечественных автомобилей, а также импортных легковых и грузовых используют иной перечень видов операций, который, как правило, име-

Материалы, модели, эксперименты и методы

Решение задачи прогнозирования сводится к определению показателя сохранения работоспособного состояния автомобиля, используя статистику различных данных об автомобиле, и, следовательно, не исключает ошибок [5]. Современные электронные системы автомобилей обретают все большие возможности по управлению процессами с большим объемом данных, что в свою очередь, приводит к возможностям анализа закономерностей предвещающих возникновение неисправностей с переходом в прогнозирование отдельных отказов.

Одним из важных вопросов обеспечения требуемого уровня эксплуатационной надежности является вопрос об организации технических воздействий, в основу которых положены принципы обеспечения требуемого уровня эксплуатационной надежности грузовых автомобилей и оптимальных затрат на поддержание этого уровня [6].

Принятие решений по порядку и критериям принятия решений в части управления эксплуатационной надежностью грузовых автомобилей при организации технического

ет привязку к моточасам наработки или кра-тен определенному периоду пробега. Перечни операций не имеют периодичности как в ТО-1 и ТО-2, а скорее индивидуальны для каждого пробега или наработки, хотя основная суть остается той же [4].

воздействия должно основываться на данных системы мониторинга эксплуатационной надежности [7, 8]. Основу мониторинга составляет система прогнозирования воздействий [9, 10].

Для характеристики режима работы транспортного средства и необходимых для объективной оценки его фактического и прогнозируемого состояний, предложен новый подход к техническому обслуживанию и ремонту. Новый вид стратегии ТО и Р заключается в создании адаптивной системы технического обслуживания и ремонта по наработке на режимах.

Для полноценного результата повышения эффективности эксплуатации транспортных средств предприятия необходимо определить вектор изменений системы технического обслуживания, что является важной задачей исследования. Вопросы, связанные с организацией и проведением текущих ремонтов, могут быть решены на уровне прогнозирования, при этом вопросы комплексного изменения системы ТО, нуждаются в дополнительном анализе [11-13].

Результаты

На рис. 2 представлена классификация видов воздействий на автомобиль, в зависи-

мости от их связности с техническим состоянием ТС.



Рис. 2. Классификация видов воздействия на автомобиль

Fig. 2. Classification of types of impact on the car

Очевидно, что все рассмотренные воздействия могут быть зафиксированы систе-

мой прогнозирования с указанием конкретного значения ресурса до воздействия. В

рамках технического обслуживания целесообразно рассматривать воздействия 2-6 (рис. 2). Воздействие 1 связано с фактом наступления отказа и относится к текущему ремонту. Воздействие 2 может иметь место, а может быть также выполнено в рамках текущего ремонта.

Пусть в транспортном средстве имеется N систем, A агрегатов, M механизмов, P элементов, которые могут потребовать любое из воздействий 1–6. При этом множества $\{N\}, \{A\}, \{M\}, \{P\}$ являются исчерпывающими с точки зрения обеспечения безотказности транспортного средства. Допустим, в текущий момент времени t и до момента $t + \Delta t$ информационная система отображает из множества N ограниченное количество n необходимых воздействий для систем

$$K_6 = \sum_i^n N_i + \sum_i^a A_i + \sum_i^m M_i + \sum_i^p P_i \quad (1)$$

Величина K_6 является конечной и может принимать различные значения и является функцией $\Delta R = R - r$ – глубины предупредждающих воздействий.

В свою очередь, ΔR можно назвать кластером, характерными признаками которого являются:

- срок службы с момента ввода в эксплуатацию;
- расход ресурса с момента ввода в эксплуатацию;
- марка, тип транспортного средства;
- производственные возможности пункта технического обслуживания и ремонта;
- максимальный расход ресурса в автономной эксплуатации (параметр влияет только на $\inf R$).

Кроме того, на величину кластера могут влиять также и такие ограничения, как требование максимального ежедневного выхода машин на линию, унификации технологических операций при ограниченном штате ремонтников и др. Как правило, в этом случае объем воздействий в кластере будет снижаться.

Под кластером следует понимать глубину прогнозной информации в единицах ресурса, на которую планируется техническое обслуживание с перечнем работ, определяемым этой прогнозной информацией. Объем кластера зависит также и от учета (полноты) видов воздействий [14].

транспортного средства; из множества A ограниченное количество 1 необходимых воздействий для агрегатов транспортного средства; из множества M ограниченное количество m необходимых воздействий для механизмов транспортного средства; из множества P ограниченное количество p необходимых воздействий для элементов транспортного средства.

Тогда, рассматривая величину $t + \Delta t$ в единицах используемого ресурса (км, часы, циклы и др.) и обозначив условно нижнюю границу ресурса $t \sim \inf R = r$, а верхнюю $t + \Delta t \sim \sup R = R$ можно записать общее количество воздействий б-е для одного транспортного средства, определяемое по формуле:

Так в условиях ограниченных ресурсов воздействия 5-6 можно не учитывать при определении объема кластера, а ожидать момента входа в кластер событий 3-4. Однако, такой подход будет более затратным, так как ухудшение технического состояния одного из элементов может повлечь возникновение зависимых отказов и дополнительные издержки.

При определении объема кластера следует учитывать факт наличия в окрестности верхней границы кластера $\delta(\sup R)$ воздействий типа 1-4. В этом случае они должны войти в кластер, либо, если ΔR достаточно велико (например, $\Delta R + \delta(\sup R) > 2000 \div 3000$ км), должно быть запланировано единичное воздействие по восстановлению технического состояния.

Если в процессе эксплуатации был допущен выход за пределы $\inf R$ кластера событий 1-2, то они должны быть выполнены в первую очередь.

Таким образом кластерный подход к ТО характерен следующим. Для достаточно устойчивых, рентабельных предприятий, дорожащих своей репутацией, для которых высока цена отказа транспортного средства в процессе выполнения транспортно-технологических операций, размер кластера целесообразно увеличивать. Для небольших транспортных компаний, работающих на внутригородских сообщениях, размер кластера может быть небольшим. При этом ча-

стота проведения воздействий увеличивается [15].

Принципиальное отличие кластерного подхода к ТО и Р от планово-предупредительной системы представлено в таблице.

Под неординарным потоком воздействий на кластерном поле понимается поток,

при котором наработка на эксплуатационном режиме прогнозирует отказ, от которого в качестве зависимых могут иметь место (а могут и не иметь место) другие отказы, визуально не наблюдаемые. При реализации таких воздействий рекомендуется проводить техническое диагностирование по поиску таких зависимых отказов.

Таблица

Сопоставление кластерного подхода к ТО и традиционной планово-предупредительной системы ТО

Table

Comparison of the cluster approach to maintenance and the traditional preventive maintenance planning system

Кластерный подход к ТО	Планово-предупредительная система ТО
Система ТО – плановая	Система ТО – плановая
Система ТО – предупредительная	Система ТО – предупредительная
Сроки ТО зависят от появления прогнозируемых воздействий (типа <i>a-e</i>)	Сроки ТО зависят расхода моторесурса
Объем ТО зависит от многих факторов и не является постоянной величиной даже для одномарочных транспортных средств с одинаковым расходом ресурса.	Объем ТО определяется маркой автомобиля (типом) и номером ТО. Иногда учитываются условия эксплуатации.
Планирование сроков и объема ТО осуществляется в зависимости от наличия воздействий в кластере.	Планирование сроков и объема ТО осуществляется в зависимости расхода моторесурса.
Элементы технологических операций, связанных с сезонным ТО, будут появляться в системе прогнозирования воздействий и могут быть планово распределены и включены в кластер или выполнены при выполнении одиночного воздействия.	Требуется сезонное обслуживание
Техническое диагностирование не актуально, выполняется только в крайних случаях, например при неординарном потоке воздействий на кластерном поле.	Технической диагностирование предшествует ТО. Обязательный элемент.

Обсуждение/Заключение

Таким образом, предлагаемая адаптивная система технического обслуживания и ремонта транспортных средств основывается на кластерном подходе. Основу принятия решений, в части управления эксплуатационной надежностью транспортных средств предприятия при организации технического воздействия, обеспечивает система мониторинга и система прогнозирования воздействий.

Предложена адаптивная система технического обслуживания и ремонта транспортных средств для определения сроков и объема ТО, основанная на кластерном подходе, которая является плановой, пре-

дупредительной, но подстраивающейся в автоматическом режиме к увеличивающейся надежности, условиям эксплуатации, находящим отражение в эксплуатационных режимах, инфраструктуре предприятия, его назначении и характеристике решаемых транспортно-технологических задач.

Практическая реализация модели на предприятии для группы автомобилей, находящихся на подконтрольной эксплуатации, обеспечивает снижение отказов на 93 %, сведя их практически к нулю. Время планового простоя автомобиля по причине проведения ТО и Р снижается на 18 %.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Копылова, О.А. Кластеризация сбора транспортно-логистических систем // Современные

проблемы транспортного комплекса России. 2013. № 4 (4). С. 73-81.

2. Королев, А.Е. Влияние параметров конструкции дизельных двигателей на технические показатели их работы / А.Е. Королев // Грузовик. 2023. № 9. С. 3-5.
3. Косенко, Е.Е. Методы оценки эксплуатационной надежности автомобилей / Е.Е. Косенко, А.В. Черпаков, В.В. Косенко, А.И. Недолужко // Инженерный вестник Дона. 2017. № 3 (46). С. 33.
4. Лянденбургский, В.В. Коэффициент издержек динамичной системы технического обслуживания и текущего ремонта автомобилей / В.В. Лянденбургский // Мир транспорта и технологических машин. 2015. № 2 (49). С. 19-24.
5. Максимов, В.И. Когнитивный анализ и управление развитием ситуаций // Когнитивный анализ и управление развитием ситуаций (CASC'2001): Материалы I Междунар. конф. - В 3 т. - М.: ИПУ РАН. - 2001. - Т. 2. - С. 10 – 21.
6. Матвиенко, И.В. Формирование комплекса мероприятий, направленных на обеспечение эксплуатационной надежности транспортных средств / И.В. Матвиенко // Новости науки и технологий. 2022. № 2 (61). С. 11–18.
7. Семькина, А.С. Неисправности современных автомобилей. Применение компьютерных программ для расчета технических параметров поршня // В сборнике: Международная научно-техническая конференция молодых ученых БГТУ им. В.Г. Шухова Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова. 2016. С. 1751-1756.
8. Семькина, А.С. Повышение эффективности эксплуатации транспортного комплекса горно-обогатительных комбинатов / А.С. Семькина, Н.А. Загородный, А.А. Конев // Мир транспорта и технологических машин. 2018. № 1 (60). С. 134-139.
9. Сысков, В.В. Подход к построению системы интеллектуального процессного управления для обеспечения эффективной коллективной деятельности / В.В. Сысков, В.В. Борисов // Управ-

- ление экономическими системами: электронный научный журнал. 2015. № 11 (83). С. 3.
10. Сысков, В.В. Постановка задачи процессного управления в сложных организационно-технических системах / В.В. Сысков, В.В. Борисов // Известия Смоленского государственного университета. 2015. № 2/1. С. 301.
11. Терентьев, А.В. К вопросу развития системы управления жизненным циклом автомобиля / А.В. Терентьев, А.И. Беляев // Транспорт Российской Федерации. - СПб.: №5(60) 2015, С. - 30-32.
12. Терентьев, А.В. Метод оперативного анализа технического состояния автомобиля / А.В. Терентьев, Б.Д. Прудовский // Записки Горного института. Том 209. СПб.: Национальный минерально-сырьевой университет «Горный», 2014. С. 197-199.
13. Терентьев, А.В. Научно-методический подход к многокритериальной оценке срока эксплуатации автомобиля: 05.22.10 «Эксплуатация автомобильного транспорта»: Диссертация на соискание доктора технических наук / Терентьев, А.В.; Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет». Санкт-Петербург, 2019. 303с.
14. Шатерников, М.В. Повышение надежности и долговечности двигателя ЯМЗ-240Н / М.В. Шатерников, В.А. Корчагин, В.С. Шатерников // Автотранспортное предприятие. 2014. № 7. С. 41-45.
15. Якунин, Н.Н. Методологические основы контроля и управления техническим состоянием автомобилей в эксплуатации: специальность 05.22.10 «Эксплуатация автомобильного транспорта»: Диссертация на соискание доктора технических наук / Якунин, Н. Н. ; ФГБОУ ВО «Оренбургский государственный университет». Оренбург, 2004. 297 с.

REFERENCES

1. Kopylova OA. Clusterization of collecting transport and logistics systems. Modern Problems of Russian Transport Complex. 2013;4(4):73-81.
2. Korolev AE. Impact of parameters the design of diesel engines on technical indicators of their operation. Грузовик. 2023;9:3-5.
3. Kosenko E AIE, Cherpakov AV, Kosenko VV, Nedoluzhko. Methods for assessing the operational reliability of cars. Engineering Journal of Don. 2017;3(46):33.
4. Lyandenbursky VV. Cost coefficient of a dynamic system of car maintenance and routine repair. Transport and Technological Cars. 2015;2(49):19-24.
5. Maksimov VI. Cognitive analysis and situation development management. Proceedings of the I International Conference, 2001: Cognitive Analysis and Situation Development Management (CASC'2001); oscow: IPU RAS. 2001;2:10-21.
6. Matvienko IV. Formation of a complex of measures aimed to ensure the operational reliability of vehi-

- cles / I.V. Matvienko // News of Science and Technologies. 2022;2(61):11-18.
7. Semykina AS. Malfunctions of modern cars. The use of computer programs to calculate the technical parameters of the piston. In: International Scientific and Technical Conference of Young Scientists of BSTU named after VG Shukhov; Belgorod: Belgorod State Technological University named after VG Shukhov; 2016. pp. 1751-1756;
8. Semykina AS, Zagorodny NA, Konev AA. Improving the operation efficiency of the transport complex of mining and processing plants. Transport and Technological Cars. 2018;1(60):134-139.
9. Syskov VV, Borisov VV. Approach to building an intelligent process management system to ensure effective collective activity. Management in Economic Systems: Electronic Scientific Journal. 2015;11(83):3.
10. Syskov VV, Borisov VV. Setting the task of process management in complex organizational and

- technical systems. *Izvestiya of Smolensk State University*. 2015;2/1:301.
11. Terentyev AV, Belyaev AI. On the problem of developing a vehicle lifecycle management system. *Transport of the Russian Federation*. 2015;5(60):30-32.
 12. Terentyev, AV, Prudovsky BD. Method of operational analysis of the technical condition of the car. *Journal of Mining Institute*. 2014;209:197-199.
 13. Terentyev AV. Scientific and methodological approach to the multi-criteria assessment of the car

- life [dissertation]. [Saint Petersburg (RF)]: Saint Petersburg State University of Architecture and Civil Engineering; 2019.
14. Shaterinkov MV, Korchagin VA, Shaternikov VS. Improving the reliability and durability of ЯМЗ-240H engine. *Avtotransportnoe Predpriyatie*. 2014;7:41-45.
15. Yakunin NN. Methodological foundations of control and management of the technical condition of vehicles in operation [dissertation]. [Orenburg (RF)]: Orenburg State University; 2004.

Информация об авторах:

Загородний Николай Александрович – кандидат технических наук, доцент, заведующий кафедрой эксплуатации и организации движения автотранспорта Белгородского государственного технологического университета им. В.Г. Шухова, тел. 89202014925, SPIN-код: 5230-3519, AuthorID: 556967, ORCID 0000-0002-2997-3282, Scopus Author ID: 57201774823, AD Scientific Index ID: 4438890.

Заяц Юрий Александрович – доктор технических наук, профессор, профессор кафедры математических и естественно-научных дисциплин Рязанского высшего воздушно-десантного командного ордена Суворова дважды Краснознаменного училища имени генерала армии В.Ф. Маргелова, SPIN-код: 9222-2325, AuthorID..

Zagorodny Nikolay Aleksandrovich – Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Head of the Department of Operation and Management of Motor Transport at BSTU named after V.G. Shukhov, phone: 89202014925, spin code: 5230-3519, AuthorID: 556967, Scopus Author ID: 57201774823, AD Scientific Index ID: 4438890.

Zayats Yury Aleksandrovich – Doctor of Technical Sciences, Professor of the Department of Mathematics and Natural Sciences of Ryazan Guards Higher Airborne Command Military College, SPIN code: 9222-2325, AuthorID: 814390.

Новиков Александр Николаевич – доктор технических наук, профессор, директор Политехнического института имени Н.Н. Поликарпова, зав. кафедрой сервиса и ремонта машин ФГБОУ ВО «ОГУ имени И.С. Тургенева», тел.: 8-906-663-88-33, SPIN-код: 5917-3100, AuthorID: 143921.

Семькина Алла Сергеевна – кандидат технических наук, ассистент кафедры «Эксплуатация и организация движения автотранспорта» Белгородского государственного технологического университета им. В.Г. Шухова, тел. 89040943937, SPIN-код: 8855-4320, WOS Research ID: HJA-2623-2022, Scopus Author ID*: 57202281085, ID РИНЦ: 984531.

Novikov Aleksandr Nikolaevich – Doctor of Technical Sciences, Professor, Director of Polikarpov Polytechnic Institute, Head of the Department of Machine Service and Repair at OSU named after I.S. Turgenev; phone: 8-906-663-88-33, SPIN code: 5917-3100, AuthorID: 143921.

Semykina Alla Sergeevna – Candidate of Technical Sciences, Assistant of the Department of Operation and Organization of Motor Transport at Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov; phone: 89040943937, SPIN code: 8855-4320, WOS Research ID: HJA-2623-2022, Scopus Author ID*: 57202281085, RSCI ID: 984531.

Вклад авторов: все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации.
Contribution of the authors: the authors contributed equally to this article.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.
The authors declare no conflicts of interests.

Статья опубликована в режиме Open Access.
Article published in Open Access mode.

Статья поступила в редакцию 21.02.2025; одобрена после рецензирования 10.03.2025; принята к публикации 30.04.2025. Рецензент – Антипин Д.Я., кандидат технических наук, доцент кафедры «Подвижной состав железных дорог», директор учебно-научного института транспорта Брянского государственного технического университета, член редсовета журнала «Транспортное машиностроение».

The article was submitted to the editorial office on 21.02.2025; approved after review on 10.03.2025; accepted for publication on 30.04.2025. The reviewer is Antipin D.Ya., Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Department of Railway Rolling Stock, Director of the Educational and Scientific Institute of Transport at Bryansk State Technical University, member of the Editorial Council of the journal *Transport Engineering*.