

Научная статья  
УДК 621.001.4

## Методика обоснования потребности в строительных машинах и механизмах при разработке проектов организации строительства

Виктор Иванович Карагодин<sup>1</sup>, Алексей Юрьевич Горелов<sup>2</sup>,  
Мария Дмитриевна Бровкина<sup>3</sup>

<sup>1,2</sup>Московский автомобильно-дорожный государственный технический университет (МАДИ),  
Москва, Россия

<sup>3</sup>Научно-технический центр «Энергоавтоматизация», Москва, Россия

<sup>1</sup>bik250248@yandex.ru, <https://orcid.org/0009-0005-8220-9928>

<sup>2</sup>gorelov.aleksey@yandex.ru

<sup>3</sup>karmanya@yandex.ru

**Аннотация.** В статье предлагается определять количество строительных машин и транспортных средств при разработке проектов организации строительства с учетом выхода техники в техническое обслуживание (ТО) и ремонт. Для этого предусмотрено на расчетный период использования в строительстве каждой машины задать динамику изменения во времени вероятности ее работоспособного состояния и согласовывать график строительных работ с графиком ТО и ремонта машин. Для одноковшовых фронтальных погрузчиков Liebherr L556 установлены зависимости параметра потока отказов от наработки, а также вероятности отказов между двумя смежными ТО в условиях ликвидации отказов службами технического сервиса. Полученные результаты могут быть использованы при обосновании числа работоспособных машин и средств транспорта в проектах организации строительства.

**Ключевые слова:** организация строительства, строительные машины, транспортные средства, работоспособное состояние, техническое обслуживание, ремонт.

**Для цитирования:** Карагодин В.И., Горелов А.Ю., Бровкина М.Д. Методика обоснования потребности в строительных машинах и механизмах при разработке проектов организации строительства // Автомобиль. Дорога. Инфраструктура. 2025. № 1(43).

Original article

## Methodology for substantiating the need for construction machines and mechanisms in the development of construction organization projects

Viktor I. Karagodin<sup>1</sup>, Alexey Y. Gorelov<sup>2</sup>, Maria D. Brovkina<sup>3</sup>

<sup>1,2</sup>Moscow Automobile and Road Construction State Technical University (MADI), Moscow, Russia

<sup>3</sup>Scientific and Technical Center «Energy automation», Moscow, Russia

<sup>1</sup>bik250248@yandex.ru, <https://orcid.org/0009-0005-8220-9928>

<sup>2</sup>gorelov.aleksey@yandex.ru

<sup>3</sup>karmanya@yandex.ru

**Abstract.** The article proposes to determine the number of construction machines and vehicles when developing construction organization projects, taking into account the output of equipment for maintenance (maintenance) and repair. To do this, it is provided for the estimated period of use in the construction of each machine to set the dynamics of changes in the probability of its working condition over time and coordinate the schedule of construction work with the schedule of maintenance and repair of machines. For Liebherr L556 single-bucket front loaders, the dependences of the failure rate parameter on operating time, as well as the probability of failures between two adjacent maintenance units in the conditions of failure elimination by maintenance services, have been established. The results obtained can be used to justify the number of workable machines and means of transport in construction projects.

**Keywords:** organization of construction, construction machinery, vehicles, working condition, maintenance, repair.

**For citation:** Karagodin V.I., Gorelov A.Y., Brovkina M.D. Methodology for substantiating the need for construction machines and mechanisms in the development of construction organization projects. *Avtomobil'. Doroga. Infrastruktura.* 2025. № 1 (43).

### Введение

При разработке проектов организации строительства необходимое количество машин и транспортных средств определяют исходя из технологии производства работ и продолжительности строительства согласно нормативам [1]. Количество однотипных машин на отдельных этапах строительства может составлять от одной до нескольких штук. Продолжительность каждого этапа в среднем – от одного до нескольких

№ 1(43)

март 2025

месяцев. За это время каждая машина согласно [2] должна пройти несколько технических обслуживаний (ТО), плановых ремонтов, а кроме этого, имеется определенная вероятность возникновения отказов. Таким образом, отвлечение машин и механизмов от выполнения строительно-монтажных работ неизбежно. Если машин несколько, это создает определенные проблемы в организации строительства. А если машина одна, то при проведении ее ТО или ремонта либо произойдет остановка строительных работ, либо возникнет необходимость в подменной машине, которая проектом организации строительства не предусмотрена. Из этого следует, что определять потребность в технике по нормативам недостаточно, и при разработке проектов организации строительства необходимо обоснование потребности в работоспособных строительных машинах и транспортных средствах.

### **Анализ характера научной задачи обоснования потребности в строительной технике**

Среди рассмотренных нами проектов особый интерес вызвал проект реконструкции гидротехнических сооружений и модернизации ремонтно-механических мастерских в одном из городов на реке Енисей. Особенностью проекта является сочетание строительства сооружений в водной акватории со строительством зданий и сооружений на суше. Это отразилось на специфике парка машин и транспортных средств. Для первых работ предусмотрено использовать плавучий кран, оборудованный грейфером, а в качестве транспортного средства – баржу с буксиром. Для работы на суше предусмотрены привычные наземные транспортные и транспортно-технологические средства.

В числе эксплуатационных качеств баржи в задании на проектирование указана автономность. Автономность судна (от греч. *autonomia* – независимость) – способность судна в течение определенного времени

выполнять свои задачи без захода на базу. Автономность исчисляют в сутках и определяют по запасам топлива, воды, продовольствия, боеприпасов (на военных кораблях) и пр. [3]. Указание этого качества баржи в задании на проектирование однозначно определяет, что в течение рассматриваемого времени строители могут располагать этим транспортным средством.

В отношении наземных транспортных и транспортно-технологических средств подобные указания отсутствуют. Это создает ситуацию неопределенности в организации строительных работ. Е.С. Кузнецов [4] в зависимости от объема и характера имеющейся информации выделяет три характерные ситуации принятия управленческих решений: в условиях определенности; при наличии риска; в условиях неопределенности. Обоснование потребности в строительных машинах и транспортных средствах при разработке проектов организации строительства ставит разработчиков в самую сложную ситуацию – в условия неопределенности. Основным шагом в направлении решения поставленной задачи является переход от условий неопределенности к более простым условиям. В приведенном выше примере с баржей четкое определение показателя автономности переводит задачу в условия определенности, т.е. максимально упрощает. Для наземных транспортных и транспортно-технологических средств по указанным ранее обстоятельствам достичь таких условий невозможно, но можно свести поставленную задачу к задаче принятия решений в условиях риска. Для этого необходимо на расчетный период использования в строительстве каждой машины задать динамику изменения во времени вероятности ее работоспособного состояния или определить динамику другого показателя, однозначно с ней связанного (например, вероятности отказа, параметра потока отказов и пр.).

## Место решаемой задачи в общей методике разработки проектов организации строительства

Технология строительных работ представляет собой совокупность взаимосвязанных действий. Например, реконструкция производственной зоны может включать следующие работы: обустройство строительной площадки; демонтажные работы; отсыпка грунта вертикальной планировки; строительство зданий и сооружений; прокладка наружных инженерных сетей; устройство проездов и площадок; благоустройство и озеленение. Очевидно, что между работами существуют отношения предшествования, т.е. выполнение одних работ может быть начато только после окончания других. В решаемой задаче необходимо построить оптимальное расписание выполнения работ с учетом отношений предшествования между работами и наличия необходимых ресурсов [5].

При этом должен быть достигнут экстремум целевой функции, в качестве которой чаще всего используется общее время выполнения работ ( $C_{max}$ ), при этом срок окончания строительства должен быть минимальным.

Постановка задачи звучит следующим образом. Дано множество работ  $N = \{i = 1, \dots, n\}$  и  $K$  необходимых типов машин и транспортных средств ( $k = 1, \dots, K$ ). В каждый момент времени  $t$  имеются  $A_k$  машин  $k$ -го типа, из них доступно  $Q_k$  машин  $k$ -го типа ( $Q_k$  машин находятся в работоспособном состоянии на объекте строительства, остальные  $A_k - Q_k$  находятся в ТО и ремонте). Заданы продолжительности выполнения  $p_i \geq 0$  каждой работы  $i = 1, \dots, n$ . Для выполнения  $i$ -й работы требуется  $q_{ik} \leq Q_k$  машин  $k$ -го типа. После завершения  $i$ -й работы освобожденные машины могут быть назначены на выполнение других работ. Между некоторыми парами работ заданы ограничения предшествования:  $i \rightarrow j$  означает, что выполнение  $j$ -й работы начинается не раньше окончания  $i$ -й работы. Работы начинаются в момент времени  $t = 0$ . Прерывания работ запрещены. Необходимо определить

моменты времени начала работ  $S_i$  ( $i = 1, \dots, n$ ) так, чтобы минимизировать время выполнения всех работ, т.е. минимизировать

$$C_{\max} = \max_i \{C_i\},$$

где  $C_i = S_i + p_i$ .

При этом должны соблюдаться следующие ограничения.

1. В каждый момент времени  $t \in [0, C_{\max})$  для всех  $i$  и  $k$  должно выполняться условие  $q_{ik} \phi_i(t) \leq Q_k$ , где  $\phi_i(t)=1$ , если  $i$ -я работа в момент времени  $t$  выполняется, и  $\phi_i(t)=0$  в противном случае. Это значит, что все работы в процессе своего выполнения должны быть полностью обеспечены техникой.

2. Должны обязательно соблюдаться отношения предшествования между требованиями, т.е.  $S_i + p_i \leq C_j$ , если  $i \rightarrow j$  для  $i, j \in N$ .

3. Также могут быть заданы ограничения на время выполнения работ. В этих случаях параметр принимает значения: «Как можно раньше», «Как можно позже», «Фиксированная дата», «Начало не позже», «Начало не раньше» и пр.

Рассматриваемая нами задача может иметь две постановки:

1) для заданного графика строительно-монтажных работ определить с учетом выхода машин в ТО и ремонт такое количество  $A_k$  машин каждого  $k$ -го типа, из которых в каждый момент времени  $t$  необходимое количество  $Q_k$  машин находятся в работоспособном состоянии на объекте строительства;

2) оптимизировать график строительно-монтажных работ с учетом выхода машин в ТО и ремонт, т.е. согласовать график строительно-монтажных работ с план-графиком ТО и ремонта строительных машин и средств транспорта.

Понятно, что вторая постановка задачи по сложности намного превосходит первую, но позволяет найти комплексное решение проблемы организации строительства.

## Исследование динамики изменения надежности машин

В ранее выполненных работах [6, 7, 8] доказано, что с увеличением продолжительности эксплуатации машин их техническое состояние ухудшается. Математическое описание закономерностей этого процесса может быть разным. А.И. Селиванов [6] рассматривает линейные зависимости показателя годности машины от ее наработки, Л.В. Дехтеринский [8] – нелинейные зависимости потенциала работоспособности системы от продолжительности ее эксплуатации. А.М. Шейнин [7] рассматривает ресурс автомобиля  $t_n$  как функцию периодичности  $t_o$  его ТО, т.е.

$$t_n = f(t_o).$$

ТО восстанавливает среду трения, снижая этим интенсивность изнашивания. Значения ресурса можно увеличивать путем уменьшения периодичности ТО, конечно, до некоторого предела. Износ  $U$  можно выразить степенной функцией наработки  $t$  вида [7]

$$U = a \cdot t^b, \quad (1)$$

где  $a$  и  $b$  – постоянные коэффициенты.

Если известны параметры кривой изнашивания (1), то пересечение линии 1, когда ТО не производится, с линией предельно допустимого износа  $U_n$  (рис. 1) определит ресурс  $t_{pl}$ . Если ТО производится с периодичностью  $t_o$ , то износ  $\Delta U_o$  за наработку  $t_o$  определится из соотношения (1) как

$$\Delta U_o = a \cdot t_o^b. \quad (2)$$

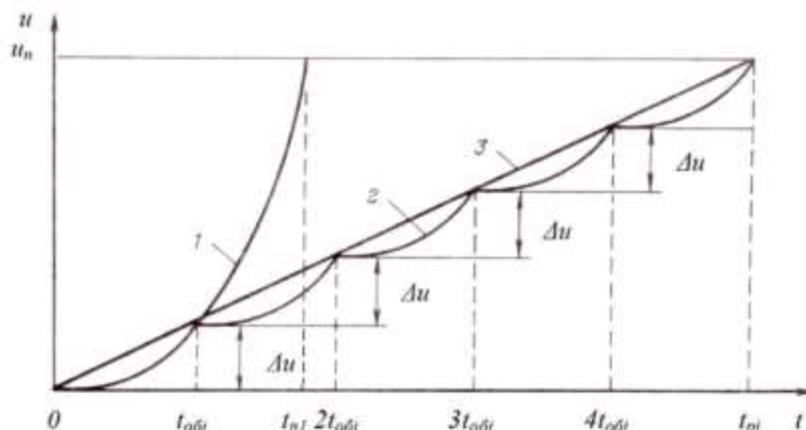


Рис. 1. Зависимость ресурса от периодичности ТО и предельного износа

Затем среда трения восстанавливается, и процесс изнашивания возобновляется, что и показано на рис. 1 кривыми 2, которые достигают линии  $U_n$  за наработку  $t_{n2}$ . Линейная закономерность изнашивания получается в результате аппроксимации кривых 2 прямой 3.

Из модели изнашивания А.М. Шейнина следуют два очень важных вывода:

- 1) при периодическом выполнении ТО вероятность отказа машины растет, имея при этом либо линейный, либо степенной характер;
- 2) в интервале между двумя смежными ТО вероятность отказа машины также растет.

Обычно эта закономерность подтверждалась экспериментальными данными. В [9] отмечается, что так было до тех пор, пока все работы по поддержанию технического состояния машин выполнялись и учитывались одним исполнителем, чаще всего владельцем машины. Развитие сферы услуг технического сервиса привело к тому, что часть информации о техническом состоянии машины находится у владельца машины, а другая часть – в сервисном центре. А эти частные данные не всегда соответствуют известным теоретическим закономерностям, поскольку охватывают не весь процесс

поддержания технического состояния машин, а только лишь определенные его части.

Информация о надежности одноковшовых фронтальных погрузчиков Liebherr L556 собиралась в ООО «Liebherr-Russland» по данным актов выполненных работ, где фиксируются все работы, выполненные сервисными инженерами. Получены данные за 11 лет (с 2012 по 2023 годы) по 40 машинам. Диапазон наработки машин был разделен на интервалы, и в каждом интервале определены экспериментальные значения параметра потока отказов (рис. 2).

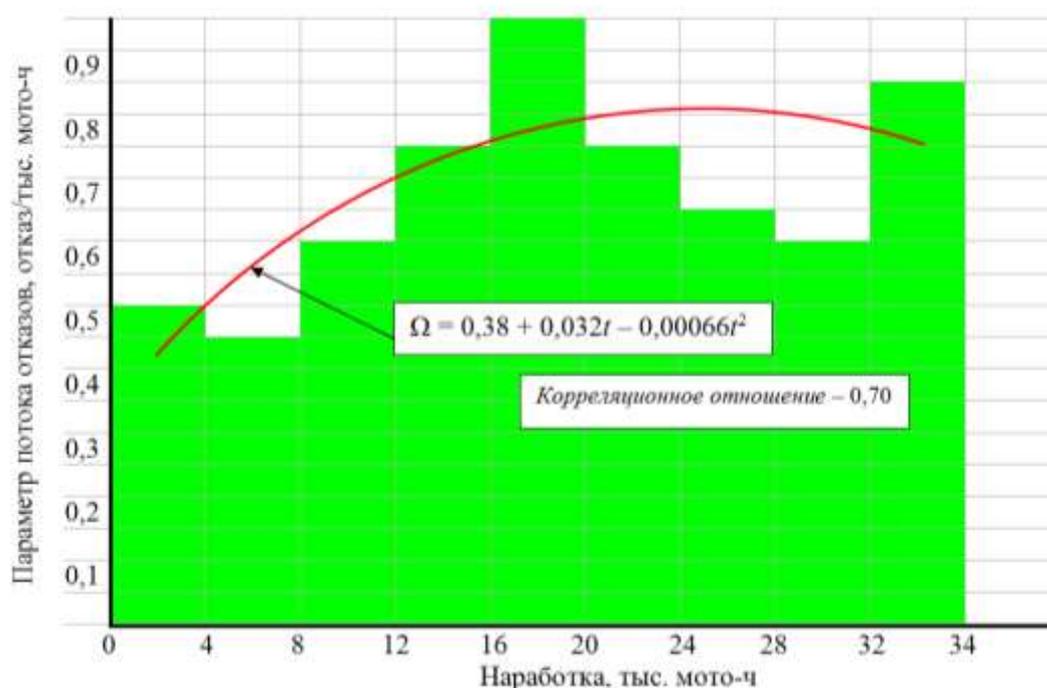


Рис. 2. Зависимость параметра потока отказов от наработки машин

Полученные результаты имеют некоторые отличия от закономерностей, отраженных в ранее опубликованных источниках:

1) отсутствует ярко выраженный всплеск количества отказов в начальный период эксплуатации (так называемых приработочных отказов);

2) монотонный рост количества отказов имеет место не до конца срока службы машины, а только до определенной (весьма большой) наработки, после чего наблюдается даже снижение интенсивности отказов.

Первое отличие объясняется повышением качества изготовления машин, что позволило избавиться от «приработочных» отказов, обусловленных, как правило, заводскими дефектами. Второе отличие объясняется тем, что в послегарантийный период владелец машины в целях экономии средств старается выполнять ТО и ремонт собственными силами. Такие работы в официальных актах отражения не имеют. Специалист службы сервиса будет вызван, когда у владельца не хватит собственных возможностей для восстановления работоспособности машины.

Таким образом, полученные результаты позволяют определить вероятность работоспособного состояния машины в зависимости от ее наработки с начала эксплуатации. Однако вероятность работоспособного состояния машины меняется и в промежутке между смежными ТО (рис. 1). С целью выявления закономерности изменения вероятности отказов в промежутках между смежными ТО промежутки были разделены на интервалы по 100 мото-ч и в каждом интервале определено значение вероятности отказов (рис. 3 и 4).

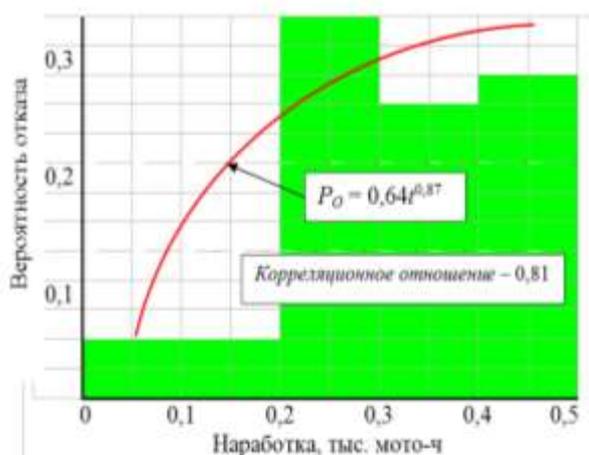


Рис 3. Вероятности отказа в периоды между ТО при наработках машины до 8000 мото-ч

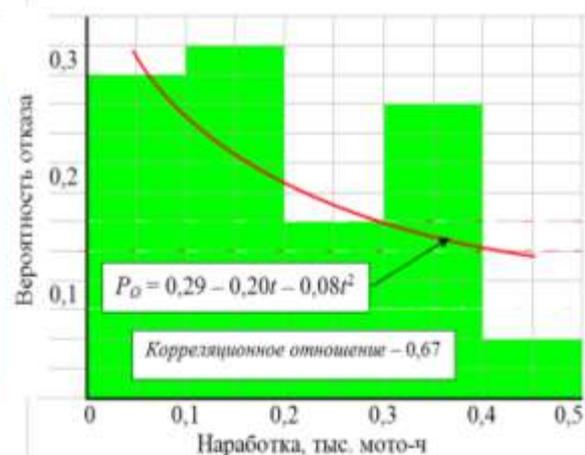


Рис 4. Вероятности отказа в периоды между ТО при наработках машин свыше 8000 мото-ч

На начальном этапе наработки машин (до 8000 мото-ч) в течение каждого промежутка вероятность отказа менялась от минимальной до максимальной (см. рис. 3), как это происходит и в модели А.М. Шейнина (рис. 1). Однако при наработках свыше 8000 мото-ч наблюдаются иные закономерности (рис. 4): непосредственно после ТО вероятность отказа максимальна, а в дальнейшем снижается. Это может быть обусловлено следующими причинами.

Отказ машины может быть выявлен не только при ее работе, но также при ТО или ремонте [4]. Чем хуже с течением времени становится техническое состояние машины, тем больше отказов выявляется при ТО. И не всегда отказ может быть устранен непосредственно при выполнении ТО. Иногда требуется время для выполнения заказа на запасные части. Кроме того, выполнение ТО – это вмешательство в естественный процесс старения механизма, и наряду с положительными результатами воздействие может иметь некоторые отрицательные результаты, приводящие к росту числа отказов непосредственно после ТО.

### **Выводы**

1. Определение количества машин и транспортных средств при разработке проектов организации строительства по нормативам без учета выхода техники в ТО и ремонт вносит ошибки, отрицательно влияющие на организацию строительных работ.

2. Для совершенствования организации строительства необходимо на расчетный период использования в строительстве каждой машины задать динамику изменения во времени вероятности ее работоспособного состояния и согласовывать график строительных работ с графиком ТО и ремонта машин.

3. Известные закономерности изменения во времени вероятности работоспособного состояния машин с развитием сферы услуг технического сервиса могут трансформироваться, так как процесс поддержания технического состояния машин разделяется на два процесса: ТО и ремонт собственными силами и централизованные ТО и ремонт.

4. Для одноковшовых фронтальных погрузчиков Liebherr L556 установлены зависимости параметра потока отказа от наработки, а также динамика вероятности отказов между двумя смежными ТО в условиях ликвидации отказов службами технического сервиса. Полученные результаты могут быть использованы при обосновании числа работоспособных машин и средств транспорта в проектах организации строительства.

### Список источников

1. Расчетные нормативы для составления проектов организации строительства. Часть I / ЦНИИОМТП. — 2-е изд-е, дополненное. — Москва : Издательство литературы по строительству. — 1973. — 283 с.
2. Рекомендации по организации технического обслуживания и ремонта строительных машин. МДС 12-8.2007 / ЦНИИОМТП. — Москва : ФГУП ЦПП, 2007. — 70 с.
3. Политехнический: Большой энцикл. словарь / Гл. ред. А. Ю. Ишлинский. — 4 изд., репр. — Москва : Большая Рос. энцикл., 1998. — 655 с.
4. Техническая эксплуатация автомобилей [Текст]: учебник для вузов. — 4-е изд., перераб. и доп. / Е.С. Кузнецов, А.П. Болдин, В.М. Власов и др. — Москва : Наука, 2001. — 535 с.
5. Лазарев, А.А. Теория расписаний. Задачи и алгоритмы / А.А. Лазарев, Е.Ф. Гафаров. — Москва : МГУ им. М.В.Ломоносова, 2011. — 222 с.
6. Селиванов, А.И. Основы теории старения машин / А.И.Селиванов. — Москва : Машиностроение, 1970. — 408 с.
7. Шейнин, А.М. Эксплуатационная надежность автомобилей / А.М. Шейнин. — Москва : Высш. школа, 1973. — 110 с.
8. Моделирование процессов восстановления машин / В.П. Апсин, Л.В. Дехтеринский, С.Б. Норкин, В.М. Приходько. — Москва: Транспорт, 1996. — 311 с.
9. Карагодин, В. И. Динамика отказов машин, устраняемых предприятиями технического сервиса / В. И. Карагодин, А. Ю. Горелов // Техничко-технологические проблемы сервиса. — 2024. — № 4(70). — С. 17-22. — EDN АКРJBF.

### References

1. TSNIIOMTP. *Raschetnyye normativy dlya sostavleniya proyektov organizatsii stroitel'stva* (Calculation standards for the preparation of construction organization projects), Part I, Moscow, Izdatel'stvo literatury po stroitel'stvu, 1973, 283 p.

2. TSNIOMTP. *Rekomendatsii po organizatsii tekhnicheskogo obsluzhivaniya i remonta stroitel'nykh mashin MDS 12-8.2007*. (Recommendations on the organization of maintenance and repair of construction machinery MDS 12-8.2007), – Moscow, FGUP TSPP, 2007, 70 p.
3. Chief editor Ishlinskiy A.YU. *Politekhnicheskii: Bol'shoy entsikl. slovar'* (Polytechnic: A large encyclopedia. Dictionary), Moscow, Bol'shaya Ros. entsikl., 1998, 655 p.
4. Kuznetsov E.S., Boldin A.P., Vlasov V.M. and oth. *Tekhnicheskaya ekspluatatsiya avtomobiley* (Technical operation of cars), Moscow, Nauka, 2001, 535 p.
5. Lazarev A.A., Gafarov E.F. *Teoriya raspisaniy. Zadachi i algoritmy* (Theory of schedules. Tasks and algorithms), Moscow, MGU im. M.V.Lomonosova, 2011, 222 p.
6. Selivanov A.I. *Osnovy teorii stareniya mashin* (Fundamentals of the theory of aging of machines), Moscow, Mashinostroenie, 1970, 408 p.
7. Sheinin A.M. *Ekspluatatsionnaya nadezhnost' avtomobiley* (Operational reliability of cars), Moscow, Vyssh. Shkola, 1973, 110 p.
8. Apsin V.P., Dekhterinsky L.V., Norkin S.B., Prikhodko V.M. *Modelirovaniye protsessov vosstanovleniya mashin* (Modeling of machine restoration processes), Moscow, Transport, 1996, 311 p.
9. Karagodin V.I., Gorelov A.Yu. *Tekhniko-tekhnologicheskiye problemy servisa*, 2024, no. 4 (70), pp. 17-22.

Рецензент: В.В. Ушаков, д-р техн. наук, проф., МАДИ

### *Информация об авторах*

**Карагодин Виктор Иванович**, д-р техн. наук, проф., МАДИ.

**Горелов Алексей Юрьевич**, канд. техн. наук, ст. преподаватель, МАДИ.

**Бровкина Мария Дмитриевна**, гл. специалист, НТЦ «Энергоавтоматизация».

### *Information about the authors*

**Karagodin Viktor I.**, Doctor of Sciences (Technical), professor, MADI.

**Gorelov Alexey Yu.**, Candidate of Sciences (Technical), Senior lecturer, MADI.

**Brovkina Maria D.**, Chief Specialist, STC "Energoautomation"

*Статья поступила в редакцию 01.02.2025; одобрена после рецензирования 10.03.2025; принята к публикации 20.03.2025.*

*The article was submitted 01.02.2025; approved after reviewing 10.02.2025; accepted for publication 20.03.2025.*