

ИССЛЕДОВАНИЕ НАДЕЖНОСТИ ТОПЛИВНЫХ НАСОСОВ ВЫСОКОГО ДАВЛЕНИЯ

Научная статья

Апажев А.К.¹, Шекихачев Ю.А.^{2*}, Дзуганов В.Б.³, Балкаров Р.А.⁴, Пазова Т.Х.⁵, Фиапшев А.Г.⁶

¹ ORCID : 0000-0002-5448-5782;

² ORCID : 0000-0001-6300-0823;

³ ORCID : 0000-0003-4286-1733;

⁴ ORCID : 0000-0002-8946-7867;

⁶ ORCID : 0000-0002-3080-0901;

^{1, 2, 3, 4, 5, 6} Кабардино-Балкарский Государственный Аграрный Университет имени В.М. Кокова, Нальчик, Российская Федерация

* Корреспондирующий автор (shek-fmep[at]mail.ru)

Аннотация

В статье приведены результаты оценки надежности топливных насосов высокого давления в реальных условиях эксплуатации. Установлено, что оптимальная величина межрегулировочного периода для исследованного топливного насоса высокого давления дизеля Д-240, обеспечивающая минимум затрат на эксплуатацию в условиях Кабардино-Балкарской Республики, составляет 3000 мото-ч. Проведены наблюдения за надежностью топливных насосов УТН-5А в условиях реальной эксплуатации в хозяйствах республики. Установлено, что наработка топливных насосов до их замены подчиняется закону распределения Вейбулла: вероятность совпадения составляет более 0,3 или более 30%. В результате проведенных исследований установлено, что средняя наработка топливных насосов УТН-5А до их замены в условиях реальной эксплуатации при доверительной вероятности, равной 0,9, находится в пределах от 2,94 до 4,24 тыс. мото-ч.

Ключевые слова: машины, оборудование, эксплуатация, наработка, надежность, отказ.

A STUDY OF RELIABILITY OF HIGH-PRESSURE FUEL PUMPS

Research article

Apazhev A.K.¹, Shekikhachev Y.A.^{2*}, Dzukanov V.B.³, Balkarov R.A.⁴, Pazova T.K.⁵, Fiapshev A.G.⁶

¹ ORCID : 0000-0002-5448-5782;

² ORCID : 0000-0001-6300-0823;

³ ORCID : 0000-0003-4286-1733;

⁴ ORCID : 0000-0002-8946-7867;

⁶ ORCID : 0000-0002-3080-0901;

^{1, 2, 3, 4, 5, 6} Kabardino-Balkarian State Agrarian University named after V.M. Kokov, Nalchik, Russian Federation

* Corresponding author (shek-fmep[at]mail.ru)

Abstract

The article provides the results of reliability evaluation of high-pressure fuel pumps in real operating conditions. It is established that the optimum value of the inter-adjustment period for the studied high-pressure fuel pump of the D-240 diesel engine, ensuring the minimum cost of operation in the conditions of the Kabardino-Balkarian Republic, is 3000 motor-hours. Observations on reliability of fuel pumps UTN-5A in conditions of real operation in the farms of the republic have been carried out. It has been established that the operating time of fuel pumps before their replacement obeys the Weibull distribution law: the probability of coincidence is more than 0.3 or more than 30%. As a result of the conducted research, it has been determined that the average operating time of UTN-5A fuel pumps before their replacement in the conditions of real operation under the confidence probability equal to 0.9 is within the range from 2.94 to 4.24 thousand motor-hours.

Keywords: machines, equipment, operation, run time, reliability, failure.

Введение

Один из основополагающих принципов развития АПК – повышение технического уровня машин и оборудования. Оно обусловлено соответствующей надежностью техники, обеспечивающей ресурсосбережение в сельском хозяйстве на основе элементно-агрегатной базы. Ее состав предопределяет на 70...80% надежность техники, материалоемкость – на 40% и эргономику – на 70% [1], [2], [3], [4].

Пути повышения технического уровня и качества машин и аппаратов можно объединить в следующие группы [6], [7], [8], [9]: конструктивные, связанные с разработкой изделий с высокими технико-экономическими параметрами; технологические, при которых уровень качества изделия обеспечивается за счет прогрессивных технологий; эксплуатационные, связанные с уменьшением трудоемкости и снижением затрат ресурсов при эксплуатации изделий; организационные, к которым можно отнести меры по стандартизации, экономическому стимулированию и ряд других мер, направленных на управление процессом формирования технического уровня и качества оборудования на всех стадиях его жизненного цикла от разработки до снятия с производства.

Снижению материалоемкости машин и повышению при этом их технического уровня способствует также переход от универсальных машин к специальным. Концентрация в одной машине нескольких функций, одновременно не использующих, приводит к завышению ее массы.

За последние годы более половины машин и аппаратов изготавливается с отступлением от технических условий, 30...35% не соответствуют требованиям безопасности, каждый четвертый имеет низкую наработку на отказ. Удельный

вес отказов по вине предприятий – изготовителей составляет 60%, в том числе тракторов – 67%, зерноуборочных комбайнов – 84% [10], [11], [12].

Цель исследования – оценка надежности топливных насосов высокого давления (ТНВД) при эксплуатации в условиях Кабардино-Балкарской Республики.

Методика исследования. Испытана партия ТНВД на тракторах МТЗ-80 с двигателем Д-240 до наработки 1000... 6000 мото-ч. В ходе испытаний после наработки каждого 1000 мото-ч осуществлялся контроль технического состояния ТНВД на безмоторных стендах.

Основные результаты

Вероятность безотказной работы топливной аппаратуры характеризуется произведением:

$$p(t) = \prod_{i=1}^K p_i(t), \quad (1)$$

где $p_i(t)$ – вероятность нахождения i -го параметра в момент t в пределах установленного допуска:

$$x_i^H < x_i < x_i^E,$$

где x_i^H, x_i^E – нижняя и верхняя границы установленного допуска на изменение параметра x_i .

Вероятность $p_i(t)$ в свою очередь для каждого из моментов времени определяется по формуле:

$$p_i(t) = p \{x_i^H < x_i(t) < x_i^E\} = \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma}} \int_{x_i^H}^{x_i^E} e^{-\frac{[x_i - m_{x_i}(t)]^2}{2D_{x_i}(t)}} \cdot dx_i, \quad (2)$$

где $m_{x_i}(t), D_{x_i}(t)$ – математическое ожидание и дисперсия случайного процесса изменения параметра $x_i(t)$; σ – среднеквадратическое отклонение.

Пользуясь результатами исследований и расчетов, можно решить задачу определения оптимальной периодичности контроля технического состояния ТНВД на безмоторных стендах в эксплуатации по экономическому критерию.

Вычисленные по формуле (2) вероятности нахождения параметров в пределах установленных допусков приведены в таблице 1.

Суммарные удельные затраты на эксплуатацию топливной аппаратуры складываются из затрат на контроль и регулировку при плановых технических обслуживаниях и потерь связанных с устранением последствий отказов:

$$C_{\Sigma} = \frac{C_{ГО}}{T_p} + \frac{C_{ОQ}(t)}{T_p}, \quad (3)$$

где $C_{ГО}$ – затраты на проведение одной проверки и регулировки; $C_{О}$ – затраты на устранение отказа; $q(t)$ – вероятность появления отказа за время $t = T_p$; T_p – межрегулирувочный период.

Таблица 1 - Вероятности нахождения параметров ТНВД дизеля Д-240 в пределах установленных допусков

Наименование параметров	Математическое ожидание, $m_{\Delta x}$	Дисперсия, $D_{\Delta x}$	Среднеквадратическое отклонение $\sigma_{\Delta x}$	Значение F – критерия
Изменение величины цикловой подачи топлива, %	+0,26 +0,06	0,76 0,53	0,87 0,73	0,02
Изменение частоты вращения кулачкового вала, %	-0,67 -0,04	0,83 0,86	0,91 0,93	0,12
Изменение неравномерности подачи топлива, %	-0,03 -0,03	0,22 0,59	0,47 0,77	0,01
Изменение цикловой подачи топлива на пуске, %	-0,46 -0,16	3,72 3,02	1,93 1,74	0,01

Результаты расчетов по изложенной методике (табл. 2) показали, что оптимальная величина межрегулирувочного периода для исследованного ТНВД дизеля Д-240, обеспечивающая минимум затрат на эксплуатацию в условиях КБР, составляет 3000 мото-ч.

Таблица 2 - Результаты расчета параметров ТНВД дизеля Д-240

Параметр	Вероятность	Интервал наработки					
		1000	2000	3000	4000	5000	6000
Изменение величин цикловой подачи топлива на номинальном режиме	$P_{xq}(t)$	0,999	0,999	0,999	0,999	0,992	0,981
	$q_{xq}(t)$	0,001	0,001	0,001	0,001	0,008	0,019
Изменение частоты вращения кулачкового вала насоса	$P_{xn}(t)$	0,999	0,999	0,996	0,980	0,946	0,896
	$q_{xn}(t)$	0,001	0,002	0,004	0,020	0,054	0,104
Изменение неравномерности подачи топлива	$P_{x\Delta}(t)$	0,993	0,954	0,925	0,872	0,783	0,701
	$q_{x\Delta}(t)$	0,007	0,046	0,075	0,128	0,217	0,299
Вероятность безотказной работы топливного насоса	$P(t)$	0,991	0,952	0,920	0,854	0,735	0,616
Вероятность отказа топливного насоса	$q(t)$	0,009	0,048	0,080	0,146	0,265	0,384

Проведены наблюдения за надежностью топливных насосов УТН-5А в условиях реальной эксплуатации в хозяйствах Кабардино-Балкарской республики, получены следующие исходные данные (табл. 3).

Таблица 3 - Результаты исследования топливных насосов УТН-5А в условиях реальной эксплуатации в хозяйствах Кабардино-Балкарской республики

№№ п/п	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
Наработки насоса в мото-ч	110	150	2350	2400	2640	2840	3780	3850	3950	4150	5430	5850	6880

Принимаем интервал наработки равным 1000 мото-ч и делим период наблюдения на интервалы, получим $n = 7$. Составляем сводную таблицу исходной информации и результатов ее обработки (табл. 4). Математическое ожидание находим по формуле:

$$t_{op} = \frac{\sum_{t=1}^n m_i \cdot t_{i \cdot cp}}{N} = 3,45 \text{ тыс. мото-ч,} \quad (4)$$

где $N = \sum_{i=1}^n m_i = 13$.

Дисперсию найдем по формуле:

$$D^*(t) = \frac{\sum_{i=t}^n m_i^* \cdot (t_{cp} - t_{i-cp})^2}{N} = 3,053. \quad (5)$$

Таблица 4 - Результаты обработки исходной информации

Определяемый показатель	Интервал наработки							
	1	2	3	4	5	6	7	
	0,1-1 тыс. мото-ч	0,1-2,1 тыс. мото-ч	2,1-3,1 тыс. мото-ч	3,1-4,1 тыс. мото-ч	4,1-5,1 тыс. мото-ч	5,1-6,1 тыс. мото-ч	6,1-7,1 тыс. мото-ч	
Середина интервала t_{i-cp}	0,6	1,6	2,6	3,6	4,6	5,6	6,6	
Опытная частота отказов	m_i	2	0	4	3	1	2	1
	$m_i \cdot t_{i-cp}$	1,2	0	10,4	10,8	4,6	11,2	6,6
	$(t_{cp} - t_{i-cp})^2 \cdot m_i$	16,245	0	2,890	0,068	1,323	9,245	9,923
Опытная вероятность	$P_i = \frac{m_i}{N}$	0,154	0	0,308	0,231	0,077	0,154	0,076
	ΣP_i	0,154	0,154	0,462	0,693	0,770	0,924	1,000
Интегральная функция распределения $F(t)$	0,075	0,256	0,474	0,672	0,820	0,912	0,962	
Теоретическая частота	m_i	0,975	2,353	2,834	2,582	1,920	1,196	0,650
	$\frac{(m_i - m_i^*)^2}{m_i^*}$	1,078	2,353	0,480	0,067	0,003	0,540	0,188

Среднеквадратическое отклонение определяем по формуле:

$$\sigma^*(t) = \sqrt{\frac{D^*(t) \cdot N}{N - 1}} = 1,82 \quad (6)$$

Находим коэффициент вариации:

$$V = \frac{\sigma^*(t)}{t_{cp} - t_{cm}^n} = 0,543, \quad (7)$$

где $t_{cm}^n = 0,1$ тыс. мото-ч.

Так как коэффициент вариации больше 0,33, то можно сделать заключение, что наработка топливных насосов до их замены подчиняется закону распределения Вейбулла.

Проверим информацию на выпадающие точки по критерию Ирвина, который в случае отсутствия выпадающих точек для объема выборки $N = 13$ должен быть не более 1,5. Для наименьшей (первой) точки информации $T_1 = 0,102$ тыс. мото-ч. и близлежащей к ней точки $T_5 = 0,456$ тыс. мото-ч., находим:

$$\hat{\lambda}_{on} = \frac{\hat{T}_5 - \hat{T}_1}{\sigma^*(t)} = 0,19, \quad (8)$$

что меньше 1,5.

Для наибольшей точки информации $\hat{T}_{is} = 6,879$ тыс. мото-ч и близлежащей к ней точки $\hat{T}_{is} = 5,848$ тыс. мото-ч имеет $\lambda_{on} = 0,56$, что также меньше 1,5. В соответствии с полученными данными выпадающих точек информации нет. Все точки являются достоверными.

Для того чтобы пользоваться законом распределения Вейбулла, который применяется к показателям надежности в тех случаях, когда коэффициент вариации больше 0,33, необходимо знать параметры этого распределения a и b .

Найдем параметры методом моментов. Суть его в следующем. По найденному коэффициенту вариации (0,543) по соответствующей таблице находим $b = 1,92$ и $K_B = 0,887$. Тогда:

$$\frac{1}{a} - \lambda = \frac{K_B}{t_{cp} - t_{cm}^*} = 0,2648. \quad (9)$$

По известным параметрам составляем интегральную функцию распределения, закона Вейбулла:

$$F(t) = 1 - e^{-\left(\frac{t_{i-cp} - t_{cm}^*}{a}\right)^b} = 1 - e^{-[0,2648 \cdot (t_{i-cp} - t_{cm}^*)]^{1,92}}. \quad (10)$$

По критерию χ^2 определим степень расхождения опытной и теоретической вероятностей:

$$X^2 = \sum_{[xx]}^{13} \frac{(m_i - m_i^*)}{m_i} = 4,709, \quad (11)$$

где m_t – теоретическая частота, которая подсчитывается по формуле:

$$m_t = [F(t_{i+1cp}) - F(t_{i \cdot cp})] \cdot N. \quad (12)$$

Определим число степеней свободы:

$$r = n - R, \quad (13)$$

где n – число интервалов; R – число обязательных связей.

Для распределения Вейбулла $R = 3$, тогда $r = 4$. По таблице «Критерий согласия X^2 » по $r = 4$ ($X^2 = 4,709$) находим, что вероятность совпадения закона Вейбулла составляет более 0,3 или более 30%. (выбранный закон считается недействительным, если вероятность совпадения меньше 0,1). Можно считать, что наработка до замены топливного насоса УТН-5 подчинена закону распределения Вейбулла. Определим доверительные границы средней наработки насоса до замены по уравнениям:

$$\begin{aligned} t_{cp}^H &= (t_{cp} - t_{cm}^*) \cdot \sqrt[r_3]{r_3 + t_{cm}^*}; \\ t_{cp}^H &= (t_{cp} - t_{cm}^*) \cdot \sqrt[r_1]{r_1 + t_{cm}^*}. \end{aligned} \quad (14)$$

Для доверительной вероятности $\alpha = 0,9$, $N = 13$ имеет $r_3 = 0,73$ и $r_1 = 1,5$.

Таким образом, средняя наработка топливных насосов УТН-5А до их замены в условиях реальной эксплуатации при $\alpha = 0,9$ – от 2,94 до 4,24 тыс. мото-ч.

Заключение

Оптимальная величина межрегулировочного периода топливного насоса высокого давления УТН-5А дизеля Д-240, обеспечивающая минимум затрат на эксплуатацию в условиях Кабардино-Балкарской Республики, составляет 3000 мото-ч. При этом их средняя наработка находится в пределах от 2,94 до 4,24 тыс. мото-ч.

Конфликт интересов

Не указан.

Рецензия

Все статьи проходят рецензирование. Но рецензент или автор статьи предпочли не публиковать рецензию к этой статье в открытом доступе. Рецензия может быть предоставлена компетентным органам по запросу.

Conflict of Interest

None declared.

Review

All articles are peer-reviewed. But the reviewer or the author of the article chose not to publish a review of this article in the public domain. The review can be provided to the competent authorities upon request.

Список литературы / References

1. Lebedev A.T. Improving the Reliability of Machine and Tractor Units in Technological Processes / A.T. Lebedev, R.V. Pavlyuk, A.V. Zakharin et al. // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science: Russian Conference on Technological Solutions and Instrumentation for Agribusiness. — 2022. — № 996. — URL: https://www.researchgate.net/publication/359035737_Improving_the_reliability_of_machine_and_tractor_units_in_technological_processes (accessed: 06.05.23). — DOI: 10.1088/1755-1315/996/1/012004.
2. Lebedev A.T. Methodology for Assessing the Efficiency of Measures for the Operational Management of the Technical Systems' Reliability / A.T. Lebedev, A.G. Arzhenovskiy, Ye.A. Chayka et al. // XIV International Scientific Conference "INTERAGROMASH 2021". — Springer, 2022. — Vol. 246. — P. 13-20. — URL: https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-3-030-81619-3_2 (accessed: 06.05.23). — DOI: 10.1007/978-3-030-81619-3_2.
3. Lebedev A.T. Operational Management of Reliability of Technical Systems in the Agro-Industrial Complex / A.T. Lebedev, A. Arzhenovskiy, V.V. Zhurba et al. // XIV International Scientific Conference "INTERAGROMASH 2021". — Springer, 2022. — P. 79-87. — URL: https://www.researchgate.net/publication/355794778_Operational_Management_of_Reliability_of_Technical_Systems_in_the_Agro-Industrial_Complex (accessed: 06.05.23). — DOI: 10.1007/978-3-030-81619-3_9.
4. Pavlyuk R.V. The Reliability Analysis of Combined Harvesters in the Usual Conditions of Operation / R.V. Pavlyuk, A.T. Lebedev, Y.I. Zhevorra et al. // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. — 2020. — Vol. 488. — № 1. — URL: https://www.researchgate.net/publication/341711296_The_reliability_analysis_of_combined_harvesters_in_the_usual_conditions_of_operation (accessed: 06.05.23). — DOI: 10.1088/1755-1315/488/1/012033.
5. Лебедев А.Т. Совершенствования методов оперативного управления надежностью технических систем в АПК / А.Т. Лебедев, А.А. Серегин, А.Г. Арженовский // Тракторы и сельхозмашины. — 2020. — № 1. — С. 71-76.
6. Lebedev A. Improving the Reliability of Plunger Pairs of Diesel Engines / A. Lebedev, P. Lebedev, A. Zakharin et al. // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. — 2019. — Vol. 403. — № 1. — URL: https://www.researchgate.net/publication/338049200_Improving_the_reliability_of_plunger_pairs_of_diesel_engines (accessed: 06.05.23). — DOI: 10.1088/1755-1315/403/1/012058.
7. Кузьмин В.В. Математическое моделирование технологических процессов сборки и механической обработки изделий машиностроения / В.В. Кузьмин. — М.: Высшая школа, 2008. — 279 с.
8. Лебедев А.Т. Технология и организация восстановления деталей и сборочных единиц при сервисном обслуживании / А.Т. Лебедев, П.А. Лебедев, А.В. Захарин и др. — Ставрополь, 2020. — 96 с.

9. Завражнов А.И. Входной контроль качества запасных частей как метод повышения надежности МТА / А.И. Завражнов, А.Т. Лебедев, П.А. Лебедев и др. // Наука в центральной России. — 2021. — № 3(51). — С. 68-78.

10. Shekikhachev Y. Probability-Theoretical Approach to the Accuracy of the Component Assembly of Multilink Mechanisms / Y. Shekikhachev, V. Batyrov, L. Shekikhacheva et al. // E3S Web of Conferences. — 2021. — Vol. 262. — URL: https://www.e3s-conferences.org/articles/e3sconf/abs/2021/38/e3sconf_iteea2021_01031/e3sconf_iteea2021_01031.html (accessed: 06.05.23). — DOI: 10.1051/e3sconf/202126201031.

11. Apazhev A.K. Technological Support for the Accuracy of the Assembly of Mechanisms / A.K. Apazhev, Y.A. Shekikhachev, V.I. Batyrov // Journal of Physics: Conference Series. — 2020. — Vol. 1679. — URL: <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1742-6596/1679/4/042062/pdf> (accessed: 06.05.23). — DOI: 10.1088/1742-6596/1679/4/042062.

12. Apazhev A.K. Improving the Durability of Machine Parts Connections / A.K. Apazhev, Y.A. Shekikhachev, A.M. Egozhev et al. // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. — 2020. — Vol. 862. — URL: <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1757-899X/862/3/032005/pdf> (accessed: 06.05.23). — DOI: 10.1088/1757-899X/862/3/032005.

Список литературы на английском языке / References in English

1. Lebedev A.T. Improving the Reliability of Machine and Tractor Units in Technological Processes / A.T. Lebedev, R.V. Pavlyuk, A.V. Zakharin et al. // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science: Russian Conference on Technological Solutions and Instrumentation for Agribusiness. — 2022. — № 996. — URL: https://www.researchgate.net/publication/359035737_Improving_the_reliability_of_machine_and_tractor_units_in_technological_processes (accessed: 06.05.23). — DOI: 10.1088/1755-1315/996/1/012004.

2. Lebedev A.T. Methodology for Assessing the Efficiency of Measures for the Operational Management of the Technical Systems' Reliability / A.T. Lebedev, A.G. Arzhenovskiy, Ye.A. Chayka et al. // XIV International Scientific Conference "INTERAGROMASH 2021". — Springer, 2022. — Vol. 246. — P. 13-20. — URL: https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-3-030-81619-3_2 (accessed: 06.05.23). — DOI: 10.1007/978-3-030-81619-3_2.

3. Lebedev A.T. Operational Management of Reliability of Technical Systems in the Agro-Industrial Complex / A.T. Lebedev, A. Arzhenovskiy, V.V. Zhurba et al. // XIV International Scientific Conference "INTERAGROMASH 2021". — Springer, 2022. — P. 79-87. — URL: https://www.researchgate.net/publication/355794778_Operational_Management_of_Reliability_of_Technical_Systems_in_the_Agro-Industrial_Complex (accessed: 06.05.23). — DOI: 10.1007/978-3-030-81619-3_9.

4. Pavlyuk R.V. The Reliability Analysis of Combined Harvesters in the Usual Conditions of Operation / R.V. Pavlyuk, A.T. Lebedev, Y.I. Zhevorra et al. // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. — 2020. — Vol. 488. — № 1. — URL: https://www.researchgate.net/publication/341711296_The_reliability_analysis_of_combined_harvesters_in_the_usual_conditions_of_operation (accessed: 06.05.23). — DOI: 10.1088/1755-1315/488/1/012033.

5. Lebedev A.T. Sovershenstvovaniya metodov operativnogo upravleniya nadezhnostyu tekhnicheskikh sistem v APK [Improving the Methods of Operational Management of the Reliability of Technical Systems in the Agro-Industrial Complex] / A.T. Lebedev, A.A. Seregin, A.G. Arzhenovskiy // Traktory i selkhoz mashiny [Tractors and Agricultural Machines]. — 2020. — № 1. — P. 71-76. [in Russian]

6. Lebedev A. Improving the Reliability of Plunger Pairs of Diesel Engines / A. Lebedev, P. Lebedev, A. Zakharin et al. // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. — 2019. — Vol. 403. — № 1. — URL: https://www.researchgate.net/publication/338049200_Improving_the_reliability_of_plunger_pairs_of_diesel_engines (accessed: 06.05.23). — DOI: 10.1088/1755-1315/403/1/012058.

7. Kuzmin V.V. Matematicheskoe modelirovaniye tekhnologicheskikh protsessov sborki i mekhanicheskoy obrabotki izdeliy mashinostroeniya [Mathematical Modeling of Technological Processes of Assembly and Mechanical Processing of Mechanical Engineering Products] / V.V. Kuzmin. — M.: Higher School, 2008. — 279 p. [in Russian]

8. Lebedev A.T. Tekhnologiya i organizatsiya vosstanovleniya detaley i sborchnykh edinit pri servisnom obsluzhivanii [Technology and Organization of Restoration of Parts and Assembly Units during Service Maintenance] / A.T. Lebedev, P.A. Lebedev, A.V. Zakharin et al. — Stavropol, 2020. — 96 p. [in Russian]

9. Zavrazhnov A.I. Vkhodnoy kontrol kachestva zapasnykh chastey kak metod povysheniya nadezhnosti MTA [Input Quality Control of Spare Parts as a Method of Improving the Reliability of MTA] / A.I. Zavrazhnov, A.T. Lebedev, P.A. Lebedev et al. // Nauka v tsentralnoy Rossii [Science in Central Russia]. — 2021. — № 3(51). — P. 68-78. [in Russian]

10. Shekikhachev Y. Probability-Theoretical Approach to the Accuracy of the Component Assembly of Multilink Mechanisms / Y. Shekikhachev, V. Batyrov, L. Shekikhacheva et al. // E3S Web of Conferences. — 2021. — Vol. 262. — URL: https://www.e3s-conferences.org/articles/e3sconf/abs/2021/38/e3sconf_iteea2021_01031/e3sconf_iteea2021_01031.html (accessed: 06.05.23). — DOI: 10.1051/e3sconf/202126201031.

11. Apazhev A.K. Technological Support for the Accuracy of the Assembly of Mechanisms / A.K. Apazhev, Y.A. Shekikhachev, V.I. Batyrov // Journal of Physics: Conference Series. — 2020. — Vol. 1679. — URL: <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1742-6596/1679/4/042062/pdf> (accessed: 06.05.23). — DOI: 10.1088/1742-6596/1679/4/042062.

12. Apazhev A.K. Improving the Durability of Machine Parts Connections / A.K. Apazhev, Y.A. Shekikhachev, A.M. Egozhev et al. // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. — 2020. — Vol. 862. — URL: <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1757-899X/862/3/032005/pdf> (accessed: 06.05.23). — DOI: 10.1088/1757-899X/862/3/032005.