

УДК 621.431.72:621.892

© Т. Н. Замота, д-р техн. наук, профессор
© С. А. Сметана, канд. техн. наук, доцент
© А. С. Лошаков, аспирант
(Луганский государственный университет им. В. Даля,
Луганск, Россия)
E-mail: keksvruke@yandex.ru

DOI 10.23968/1999-5571-2026-23-1-109-115

© T. N. Zamota, Dr. Sci. Tech., Professor
© S. A. Smetana, PhD in Sci. Tech., Associate Professor
© A. S. Loshakov, post-graduate student
(Lugansk State University named after V. Dahl,
Lugansk, Russia)
E-mail: keksvruke@yandex.ru

ВЫБОР ОСНОВНЫХ ПАРАМЕТРОВ ДЛЯ КОНТРОЛЯ СОСТОЯНИЯ МАСЛА В ПРОЦЕССЕ ЭКСПЛУАТАЦИИ АВТОМОБИЛЯ

SELECTION OF THE MAIN PARAMETERS FOR OIL CONDITION MONITORING DURING VEHICLE OPERATION

Рассмотрены методы контроля моторного масла в процессе эксплуатации автомобиля. Предложен новый подход к оценке снижения работоспособности двигателя: путем контроля концентрации металлов деталей основных сопряжений, попадающих в масло, что дает возможность определять изменение интенсивности изнашивания трущихся поверхностей. Определено, что интенсивность изнашивания большинства деталей (в пределах одной смены масла) имеет линейный характер, и только повышение концентрации алюминия и железа в моторном масле экспоненциально. Значительное повышение интенсивности попадания этих металлов в моторное масло свидетельствует о необходимости его замены. Поэтому необходимо контролировать концентрацию алюминия и железа в режиме реального времени, что на практике позволит внедрить интеллектуальную систему технического обслуживания и значительно повысить технико-экономические показатели эксплуатации автомобилей.

Ключевые слова: техническое обслуживание и ремонт, интенсивность изнашивания, транспортные средства, поток отказов, ресурс.

This article discusses the methods of engine oil control during vehicle operation. A new approach is proposed to assess the reduction in the engine performance: by monitoring the concentration of metals of the parts of the main interfaces that get into the oil, which makes it possible to determine the change in the intensity of wear of rubbing surfaces. It is determined that the wear rate of most parts (within one oil change) is linear, and only an increase in the concentration of aluminum and iron in engine oil is exponential. Therefore, it is necessary to control the concentration of aluminum and iron in real time, which in practice will make it possible to introduce an intelligent maintenance system and significantly increase the technical and economic performance of vehicles.

Keywords: maintenance and repair, wear rate, vehicles, failure rate, resource.

Введение

Основными постоянно действующими причинами изменения технического состояния автомобиля, его агрегатов и механизмов являются: изнашивание, пластические деформации и усталостные разрушения, коррозия, физико-химические и температурные изменения материалов и деталей.

Поверхности трения не являются абсолютно ровными; они имеют микронеровности, величина которых зависит от точности обработки (точение — до 80 мкм, шлифование — от 2 до 20 мкм, полирование — от 0,8 до 1,3 мкм) [10]. При трении возникает взаимодействие микронеровностей трущихся поверхностей между собой и с абразивны-

ми частицами, попавшими в смазку. Разрушение нескольких слоев микронеровностей приводит к макроповреждениям — изменениям формы поверхности, размеров и формы деталей.

Анализ литературных источников

Изнашивание деталей двигателя происходит под действием трения и проявляется в изменении размеров и формы. Интенсивность изнашивания оценивается отношением износа к пути трения [7].

Диагностика двигателя по параметрам картерного масла позволяет выявить темп увеличения концентрации металлов, попадающих в масло, т. е. интенсивности изнашивания деталей, состояние фильтров, герметичность системы охлаждения и качество масла [3]. Концентрация продуктов износа в масле резко возрастает перед отказами. Превышение допустимых норм концентрации металлов, кремния или наличие воды указывают на неисправности сопряженных деталей, фильтров или системы охлаждения [5]. Пониженная вязкость масла свидетельствует о его непригодности.

Анализ спектра продуктов износа позволяет определить присутствие металлов изнашивающихся деталей и их концентрацию [12]. Для определения концентрации ферромагнитных продуктов износа, которые возникают при изнашивании основных деталей двигателя, авторы предлагают использовать электрический прибор, измеряющий текущее значение индуктивности масла в зависимости от находящихся в нем частиц изнашивания металлических деталей [1].

Целью данной работы является обоснование выбора основных параметров для контроля состояния масла в процессе эксплуатации автомобиля.

Методы

Эксплуатационные испытания двигателей КамАЗ-740 проводились с использованием моторного масла Neste Turbo LXE SAE 15W-40.

В процессе эксплуатационных испытаний выполняли анализ двигателей, обкатанных по стандартной технологии, определяли динамику изменения основных показателей работы двигателей и состояние масла. Концентрация металлов в масле использовалась для оценки остаточного ресурса двигателя [4, 9].

Для диагностики применялся спектральный анализ продуктов износа в картерном масле с использованием установки МФС-7. Отбор проб масла (200...250 мл) проводился на пробегах от 0 до 12 000 км с интервалом 1500 км. Пробы отбирались шприцем через маслобензостойкую трубку в чистую посуду с работающего дизеля или вскоре после его остановки [6, 11]. Подготовка установки МФС-7 проводилась по инструкции Ю-30.67.064 ИЭ [2].

Анализ проб масла включал перемешивание проб, установку угольных электродов и выполнение программы спектрального анализа масла. Горение дуги в штативе длилось 100 с: 50 с — прожиг электродов, 30 с — сжигание масла в дуге и 20 с — сжигание сухого остатка и спектральный анализ горения дуги [7].

Результаты

В ходе проведенного эксперимента были определены концентрации различных металлов деталей двигателей, которые попадали в масло в процессе изнашивания основных сопряжений (рис. 1). Анализ предельных показателей экспериментальных данных проводился с помощью сравнительной таблицы критических показателей (табл. 1¹), составленной согласно международному стандарту ASTM D664, D445, D8120 и ГОСТ 20799–2022 «Масла индустриальные. Технические условия».

Проведение аппроксимации полученных результатов и приведение их к полиному третьего порядка позволило получить высо-

¹ Таблица анализа отработанных масел: вязкость, TAN, Fe, Cu, Al, Si — нормативы. URL: <https://inner.su/articles/tablitza-analiza-otrabotannykh-masel-vyazkost-tan-fe-cu-al-si-normativy/?ysclid=mg92fx6ujd144635636>

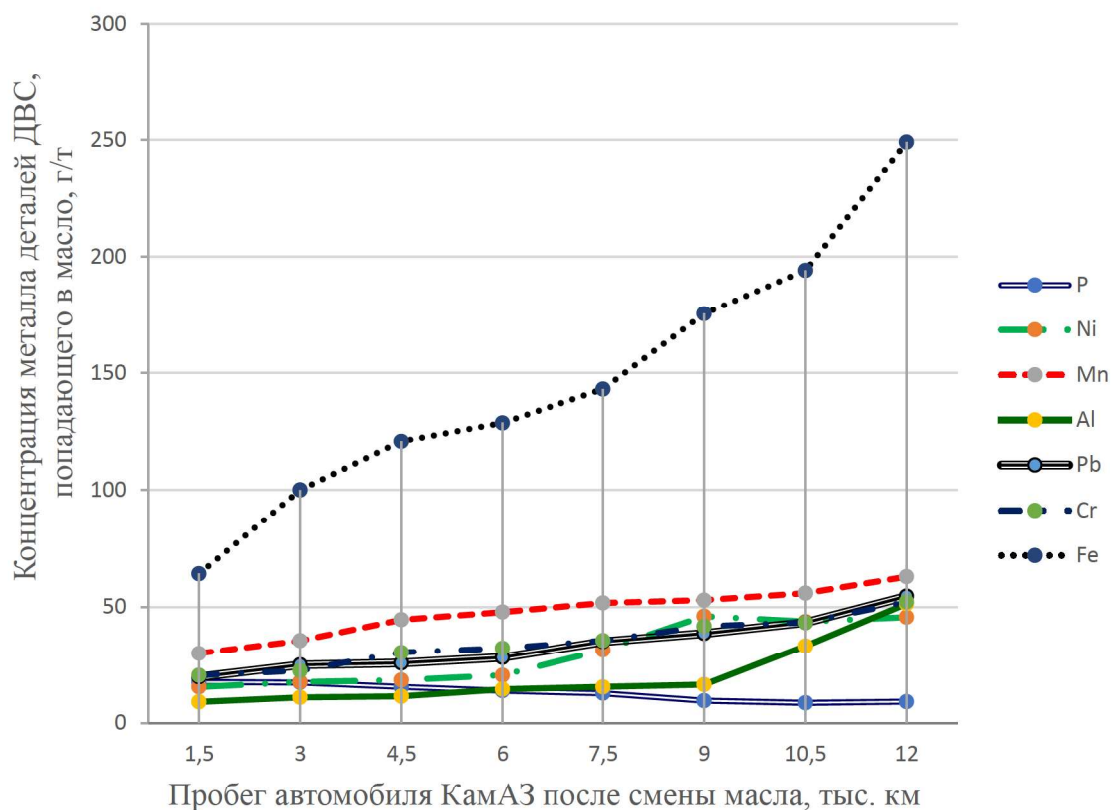


Рис. 1. Изменение концентрации основных металлов дизельного двигателя в пределах одной смены масла

кую сходимость зависимости концентрации металлов в масле при увеличении пробега после замены масла. Для детального анализа были выбраны данные по концентрации алюминия, хрома и железа в масле, которые прямо коррелируют с износом поршней, вкладышей, поршневых колец, а также гильз цилиндров, шатунных и коренных шеек ко-

ленчатого вала. Полученные данные концентрации металла деталей представлены на рис. 2.

Оценить полученные зависимости возможно с применением критерия относительной чувствительности (сенситива) исследуемых функций (см. рис. 2). Математическая сущность критерия заключается в постро-

Таблица 1

Сравнительная таблица критических показателей

Показатель	Единицы измерения	Свежее масло	Рабочее состояние	Требует внимания	Замена масла
Вязкость при 100 °С	мм ² /с	По спецификации	±10 % от нормы	±15 % от нормы	±20 % от нормы
ТАН (общее кислотное число масла)	мг КОН/г	1,5–3,0	3,0–4,0	4,0–5,0	>5,0
Концентрация железа общая	г/т	0–5	5–50	50–150	>200
Концентрация меди	г/т	0–3	3–30	30–100	>150
Концентрация алюминия	г/т	0–5	5–25	25–75	>100
Концентрация кремния	г/т	0–10	10–30	30–50	>50

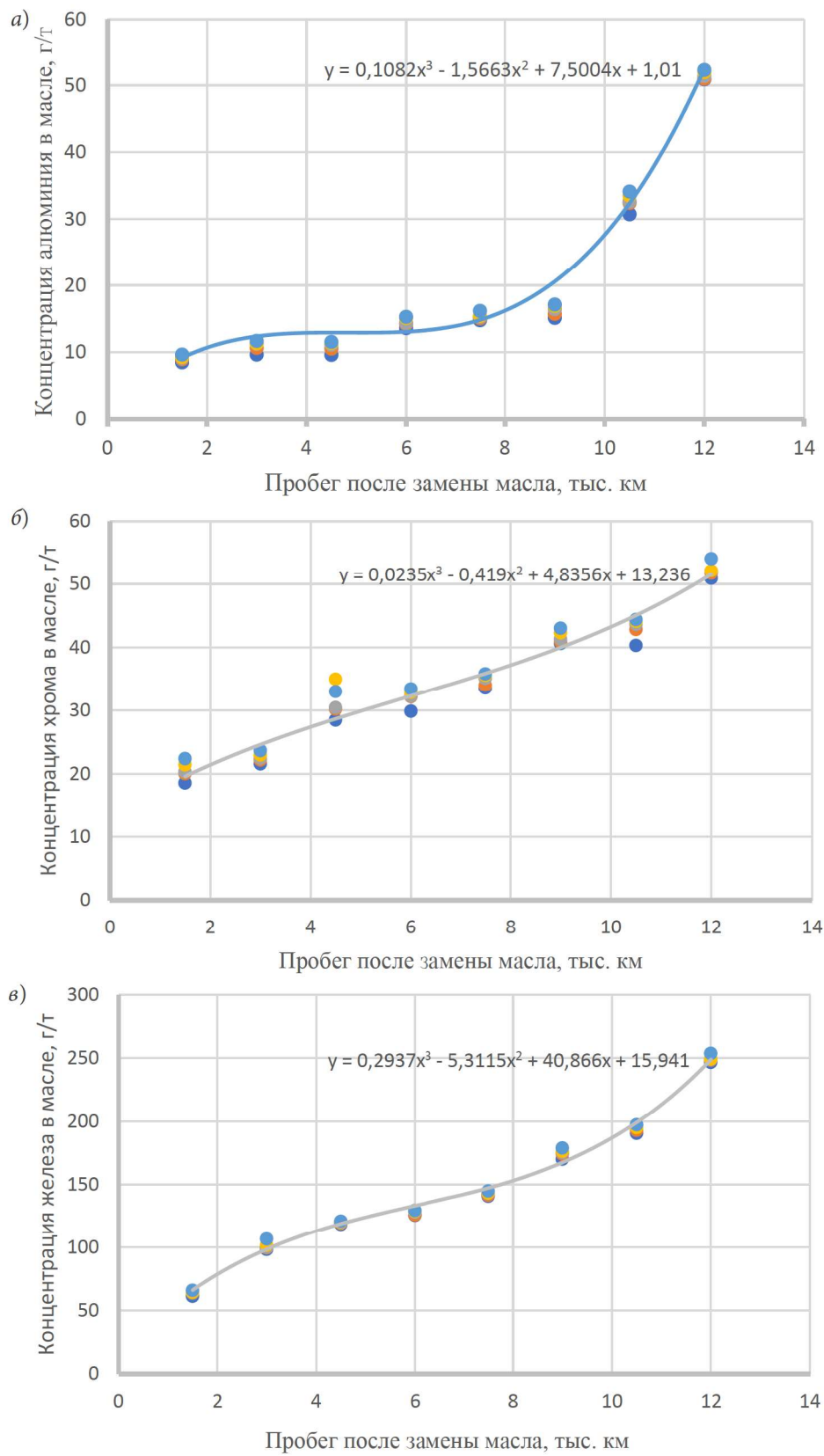


Рис. 2. Изменение концентрации элементов дизельного двигателя в пределах одной смены масла: а — алюминиевых; б — хромированных; в — железных

Таблица 2

Значение сенситива функции изменения концентрации металла в масле в зависимости от пробега

Наименование	Пробег после смены масла, тыс. км							
	1,5	3,0	4,5	6,0	7,5	9,0	10,5	12,0
$sen D_{алюм}(x)$	0,582	0,249	-0,008	0,180	1,147	2,456	3,376	3,811
$sen D_{хром}(x)$	0,162	-0,033	-0,199	-0,313	-0,35	-0,292	-0,132	0,116
$sen D_{желез}(x)$	0,609	0,515	0,412	0,398	0,547	0,892	1,393	1,941

нии отношения относительного прироста целевой функции состояния к относительному приросту фактора или параметра:

$$sen y_1(x) = \frac{dy_1(x)}{y_1(x)} \frac{x}{dx} = \frac{dy_1(x)}{dx} \frac{x}{y_1(x)}. \quad (1)$$

Эту форму представления критерия относительной чувствительности (сенситива) предлагается использовать для оптимальной оценки любого диагностического параметра, который необходимо подвергать контролю при определении технического состояния систем и агрегатов ТМ [7]. Взяв за основу выражение (1), критерий относительной чувствительности каждого диагностического параметра имеет вид

$$sen D_i(\alpha_i) = \frac{D'_i(\alpha_i)}{D_i} \alpha_i = f'_{\alpha_i}(\alpha_i, \beta_i, \gamma_i, \delta_i) \frac{\alpha_i}{f_{\alpha_i}(\alpha_i, \beta_i, \gamma_i, \delta_i)}. \quad (2)$$

Видим, что концентрация алюминия в масле начинает резко возрастать при пробеге в 7500 км ($sen D_{алюм}(x)$ с 0,18 на 6000 км увеличивается до 1,147 на 7500 км), что свидетельствует о необратимых изменениях в ходе работы сопряженных деталей двигателя. Хромированные поршневые кольца не показали значительного роста интенсивности изнашивания, что может быть связано с их повышенной износостойкостью. По результатам исследования изменения концентрации железа в масле отмечено, что $sen D_{желез}(x)$ начал увеличиваться с 9000 км пробега, что свидетельствовало о катастрофических процессах изнашивания

на масле со значительными концентрациями продуктов износа (табл. 2). Было выявлено резкое возрастание интенсивности изнашивания алюминия при пробегах свыше 7500 км, что может свидетельствовать об увеличении изнашивания поршней в загрязненном масле. Очевидно, что такое положение не является оптимальным и с учетом интенсивности изнашивания алюминиевых деталей масло должно быть заменено через 7500 км пробега.

Анализ попадания в масло химических элементов позволил построить зависимость износа металлов при возрастании пробега автомобиля. Общая тенденция — это увеличение концентрации износа исследуемых металлов и снижение наличия фосфора в масле. Наблюдается равномерный рост частиц износа магния, свинца и хрома на всем протяжении исследуемого пробега, зависимость линейная [8]. Значительно выше интенсивность изнашивания железа, которая повышается к концу интервала эксплуатации масла с 7500 до 12 000 км пробега. Это связано с превалирующим наличием железа в трущихся поверхностях исследуемого двигателя.

Определение количественных и качественных показателей износа двигателя является перспективным направлением в усовершенствовании методики поддержания работоспособного состояния. Существующие методы оценки качества масел могут контролировать один или несколько их параметров, но точные оценки выработки

масел может дать только анализ интегральных параметров, к которым относится интенсивность изнашивания основных ресурсоопределяющих сопряжений.

Выводы

1. Оценивать состояние масла возможно по изменению концентрации металлов трущихся поверхностей основных сопряжений двигателя, наиболее информативным является учет износа железных и алюминиевых деталей.

2. Резкое возрастание концентрации алюминия в масле наблюдалось при пробегах свыше 7500 км, что может свидетельствовать об увеличении интенсивности изнашивания поршней в загрязненном масле. Очевидно, что такое положение не является оптимальным и с учетом резкого увеличения интенсивности изнашивания алюминиевых деталей масло должно быть заменено через 7500 км пробега.

Библиографический список

1. Грехов Л. В., Марков В. А., Арсенов Н. А., Чжао Ц., Са Б. Определение констант уравнения состояния для расчета упругих свойств различных моторных топлив и технических жидкостей // Вестник МГТУ им. Н. Э. Баумана. Сер. Машиностроение. 2022. № 4 (143). С. 108–137. URL: <https://doi.org/10.18698/0236-3941-2022-4-108-137>.

2. Долгова Л. А., Жаткин С. А., Салмин В. В. Анализ параметров моторного масла и технических устройств, позволяющих контролировать процессы старения моторных масел // Молодой ученый. 2015. № 9 (89). С. 198–202.

3. Замота Т. Н., Панайотов К. К., Замота О. Н., Крупица О. В. Интеллектуальная стратегия технического обслуживания и ремонта транспортных средств. Луганск: ИП «Орехов Д. А.», 2025. 303 с.

4. Замота Т. Н., Лошаков А. С., Турушина Е. В. Оценка потока отказов транспортных средств по изменению параметра израсходованного ресурса // Инновационные транспортные системы и технологии. 2024. Т. 10, № 4. С. 618–629.

5. Замота Т. Н., Лошаков А. С. Тенденции усовершенствования системы технического обслуживания транспортных средств // Сб. науч. тр. Донбасского гос. техн. ин-та. 2022. № 29 (72). С. 107–112.

6. Иванов А. В., Селезнев М. В. К вопросу о периодичности смены трансмиссионных масел в процессе эксплуатации автомобилей // Вестник НГИЭИ. 2016. № 10 (65). С. 94–102. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/k-voprosu-o-periodichnosti-smeny-transmissionnyh-masel-v-protse-ekspluatatsii-avtomobiley> (дата обращения: 12.11.2025).

7. Колбашов М. А., Моисеев Ю. Н., Маслов А. В., Киселев В. В., Харламов Р. И. Изучение триботехнических свойств моторных масел с присадками жидких кристаллов // Пожарная безопасность: проблемы и перспективы. 2015. № 1 (6). С. 39–43. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/izuchenie-tribotekhnicheskikh-svoystv-motornykh-masel-s-prisadkami-zhidkikh-kristallov> (дата обращения: 15.11.2025).

8. Лошаков А. С., Пономаренко Е. В. Мониторинг качества масла в коробке передач в режиме реального времени // В мире научных открытий: материалы IX Междунар. студ. науч. конф. Ульяновск, 12–14 марта 2025 г. Ульяновск: Ульяновский гос. аграрный ун-т им. П. А. Столыпина, 2025. С. 4123–4126.

9. Максимов С. А., Рыжков Н. Р., Бойко Г. В. Исследование моторных масел и их влияние на работу автомобильного транспорта // Молодой ученый. 2017. № 14 (148). С. 98–101.

10. Петров О. Н., Шрам В. Г., Ковальский Б. И., Безбородов Ю. Н. Методы контроля и диагностики эксплуатационных свойств смазочных масел. Красноярск: СФУ, 2015. 152 с.

11. Романов Р. А., Зубкова С. Ю. Анализ масла в современной диагностике машинного оборудования // Экспозиция Нефть Газ. 2013. № 5 (30). С. 122–123. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/analiz-masla-v-svoevremennoy-diagnostike-mashinnogo-oborudovaniya> (дата обращения: 11.11.2025).

12. Хайдарьянов Р. Р. Методы контроля качества работавшего моторного масла // Вестник науки. 2021. Т. 3, № 5-1 (38). С. 167–172. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/metody-kontrolya-kachestva-rabotavshogo-motornogo-masla> (дата обращения: 18.11.2025).

References

1. Grekhov L. V., Markov V. A., Arsenov N. A., Chzhao Ts., Sa B. *Opredelenie konstant uravneniya sostoyaniya dlya rascheta uprugih svoystv razlichnykh motornykh topliv i tekhnicheskikh zhidkostey* [Determination of the constants of the equation of state for calculating the elastic properties of various motor fuels and technical liquids]. *Vestnik MGTU im. N. E. Bauman. Ser. Mashinostroenie – Bulletin of MSTU named after N. E. Bauman. Ser. Mechanical Engineering*, 2022,

no. 4 (143), pp. 108–137. Available at: <https://doi.org/10.18698/0236-3941-2022-4-108-137>

2. Dolgova L. A., Zhatkin S. A., Salmin V. V. *Analiz parametrov motornogo masla i tekhnicheskikh ustroystv, pozvolyayushchih kontrolirovat' protsessy stareniya motornykh masel* [Analysis of engine oil parameters and technical devices that allow monitoring the aging processes of engine oils]. *Molodoy ucheniy – Young Scientist*, 2015, no. 9 (89), pp. 198–202.
3. Zamota T. N., Panayotov K. K., Zamota O. N., Krupitsa O. V. *Intellektual'naya strategiya tekhnicheskogo obsluzhivaniya i remonta transportnykh sredstv* [Intellectual strategy for vehicle maintenance and repair]. Lugansk, Orekhov D. A. Publ., 2025, 303 p.
4. Zamota T. N., Loshakov A. S., Turushina E. V. *Otsenka potoka otkazov transportnykh sredstv po izmeneniyu parametra izrashchodovannogo resursa* [Assessment of the flow of vehicle failures by changing the parameter of the consumed resource]. *Innovatsionnye transportnye sistemy i tekhnologii – Innovative Transport Systems and Technologies*, 2024, vol. 10, no. 4, pp. 618–629.
5. Zamota T. N., Loshakov A. S. *Tendentsii usovershenstvovaniya sistemy tekhnicheskogo obsluzhivaniya transportnykh sredstv* [Trends in the improvement of the vehicle maintenance system]. *Trudy Donbasskogo gos. tekhn. in-ta – Proceedings of the Donbass State. Technological University*, 2022, no. 29 (72), pp. 107–112.
6. Ivanov A. V., Seleznev M. V. *K voprosu o periodichnosti smeny transmissionnykh masel v protsesse ekspluatatsii avtomobiley* [On the issue of the frequency of changing transmission oil during vehicles' operation]. *Vestnik NGIEI – Bulletin of NGIEI*, 2016, no. 10 (65), pp. 94–102. Available at: <https://cyberleninka.ru/article/n/k-voprosu-o-periodichnosti-smeny-transmissionnykh-masel-v-protsesse-ekspluatatsii-avtomobiley> (accessed: 12.11.2025).
7. Kolbashov M. A., Moiseev Yu. N., Maslov A. V., Kiselev V. V., Harlamov R. I. *Izuchenie tribotekhnicheskikh svoystv motornykh masel s prisadkami zhidkikh kristallov* [Study of tribochemical properties of motor oils with liquid crystal additives]. *Pozharnaya bezopasnost': problemy i perspektivy – Fire Safety: Challenges and Prospects*, 2015, no. 1 (6), pp. 39–43. Available at: <https://cyberleninka.ru/article/n/izuchenie-tribotekhnicheskikh-svoystv-motornykh-masel-s-prisadkami-zhidkikh-kristallov> (accessed: 15.11.2025).
8. Loshakov A. S., Ponomarenko E. V. *Monitoring kachestva masla v korobke peredach v rezhime real'nogo vremeni* [Real-time monitoring of the oil quality in the gearbox]. *V mire nauchnykh otkrytiy. Trudy IX Mezhdunar. studencheskoy nauch. konf. Ulyanovsk, 12–14 marta 2025 g.* [Proceedings of the IX International. student scientific. conf. Ulyanovsk, March 12–14, 2025]. Ulyanovsk, Ulyanovskiy gos. agrarniy un-t im. P. A. Stolypina Publ., 2025, pp. 4123–4126.
9. Maksimov S. A., Ryzhkov N. R., Boyko G. V. *Issledovanie motornykh masel i ih vliyanie na rabotu avtomobil'nogo transporta* [The study of engine oils and their impact on the operation of road transport]. *Molodoy ucheniy – Young Scientist*, 2017, no. 14 (148), pp. 98–101.
10. Petrov O. N., Shram V. G., Koval'skiy B. I., Bezborodov Yu. N. *Metody kontrolya i diagnostiki ekspluatatsionnykh svoystv smazochnykh masel* [Methods for monitoring and diagnosing the operational properties of lubricating oils]. Krasnoyarsk, Siberian Federal University Publ., 2015, 152 p.
11. Romanov R. A., Zubkova S. Yu. *Analiz masla v svoevremennoy diagnostike mashinnogo oborudovaniya* [Oil analysis in timely diagnostics of machinery]. *Ekspozitsiya Neft' Gaz – Exposure Oil Gas*, 2013, no. 5 (30), pp. 122–123. Available at: <https://cyberleninka.ru/article/n/analiz-masla-v-svoevremennoy-diagnostike-mashinnogo-oborudovaniya> (accessed: 11.11.2025).
12. Khaydar'yanov R. R. *Metody kontrolya kachestva rabotavshogo motornogo masla* [Methods of quality control of engine oil]. *Vestnik nauki – Science Bulletin*, 2021, vol. 3, no. 5-1 (38), pp. 167–172. Available at: <https://cyberleninka.ru/article/n/metody-kontrolya-kachestva-rabotavshogo-motornogo-masla> (accessed: 18.11.2025).