

Научная статья

Статья в открытом доступе

УДК 665.76

doi: 10.30987/2782-5957-2024-3-12-19

ИССЛЕДОВАНИЕ ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКИХ И ПРОТИВОИЗНОСНЫХ СВОЙСТВ МОТОРНЫХ МАСЕЛ ПО ЗАВЕРШЕНИИ ПРОЦЕССА ЭКСПЛУАТАЦИИ

Михаил Геннадьевич Шалыгин¹, Сергей Павлович Ващишин², Анна Павловна Ващишина³✉

^{1,2,3} Брянский государственный технический университет, Брянск, Россия

¹ migshalygin@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0002-8102-9918>

² sxrzilla@gmail.com

³ vashhi.anya@yandex.ru, <http://orcid.org/0000-0002-1930-3912>

Аннотация

Исследованы вязкостные свойства моторного масла в зависимости от температуры до и после замены на современных отечественных автомобилях бензинового и дизельного типа, определение спектральных характеристик и рентгено-флуоресцентный анализ частиц износа после пробега. Оценена степень вязкости полусинтетических масел двух типов. Масла были охлаждены и нагреты до 150 °С. Использовался цифровой вискозиметр, динамическая вязкость всех масел уменьшалась с ростом температуры, что связано с процессами окисления в отработанном масле. Для оценки влияния моторного масла на работу двигателя был проведен ИК-спектрометрический анализ и определена толщина смазывающей пленки. Результаты испытаний показали качественное и количественное изменение характеристических частот нового моторного масла и отработанного после 10 000 км. Рентгено-флуоресцентный анализ дает возможность анализировать продукты износа и определять

какой механизм в двигателе наиболее сильно подвержен износу. Спектральные линии имеют характерные частоты поглощения и свидетельствуют об изменении физических и химических свойств моторного масла в двигателе. Увеличение загрязнений и повышение вязкости отработанных масел связано с наличием образовавшихся примесей в процессе окисления и полимеризации базового масла. Необходимо увеличить количество образцов и пробоотбор в различные периоды эксплуатации, чтобы можно было убедиться в аналогичном эффекте на протяжении всего режима работы двигателя. Полученные результаты свидетельствуют о том, что данные методы можно использовать для анализа и контроля режима работы моторных масел в двигателе, позволяющие определять механизмы износа и в дальнейшем применять соответствующие добавки в масло для повышения эксплуатационных свойств.

Ключевые слова: масло, динамическая вязкость, трение, частицы, износ, двигатель.

Ссылка для цитирования:

Шалыгин М.Г. Исследование физико-химических и противоизносных свойств моторных масел по завершении процесса эксплуатации / М.Г. Шалыгин, С.П. Ващишин, А.П. Ващишина // Транспортное машиностроение. – 2024. – №3. – С. 12-19. doi: 10.30987/2782-5957-2024-3-12-19.

Original article

Open Access Article

STUDY OF PHYSICO-CHEMICAL AND ANTI-WEAR PROPERTIES OF MOTOR OILS AT THE END OF OPERATION

Mikhail Gennadievich Shalygin¹, Sergey Pavlovich Vashchishin², Anna Pavlovna Vashchishin³✉

^{1,2,3} Bryansk State Technical University, Bryansk, Russia

¹ migshalygin@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0002-8102-9918>

² sxrzilla@gmail.com

³ vashhi.anya@yandex.ru, <http://orcid.org/0000-0002-1930-3912>

Abstract

There is given the study of viscous properties of engine oil, depending on the temperature before and after change on modern domestic gasoline and diesel cars, the determination of spectral characteristics and X-ray fluorescence analysis of wear particles after mileage. The degree of viscosity of semi-synthetic oils of two types is estimated. The oils were cooled and heated up to 150 °C. A digital viscometer was used, the dynamic viscosity of all oils decreased with increasing temperature, which is associated with oxidation in waste oil. To assess the effect of motor oil on engine operation, IR spectrometric analysis is performed and the thickness of the lubricating film is determined. The test results showed a qualitative and quantitative change in the characteristic frequencies of the new engine oil and the spent one after 10,000 km. X-ray fluorescence analysis makes it possible to analyze wear

products and determine which mechanism in the engine is most susceptible to wear. Lines have characteristic absorption frequencies and indicate a change in physico-chemical properties of oil in the engine. An increase in contamination and in the viscosity of used oils is associated with the presence of impurities formed during the oxidation and polymerization of the base oil. It is necessary to increase the number of samples and sampling during different periods of operation so that you can verify the same effect throughout the entire engine operation. The results obtained indicate that these methods can be used to analyze and control the mode of operation of oils in the engine, allowing to determine the wear and further apply appropriate additives to the oil to improve performance properties.

Keywords: oil, dynamic viscosity, friction, particles, wear, engine.

Reference for citing:

Shalygin MG, Vashchishin SP, Vashchishina AP. Study of physico-chemical and anti-wear properties of motor oils at the end of operation. *Transport Engineering*. 2024;3:12-19. doi: 10.30987/2782-5957-2024-3-12-19.

Введение

Система смазывания двигателя обеспечивает подачу моторного масла ко всем компонентам системы, что приводит к снижению коэффициента трения, уменьшению или подавлению коррозионных процессов. Срок службы моторных масел зависит от условий эксплуатации, качества топлива. Увеличение рабочей температуры сопровождается уменьшением вязкости, так как происходит ослабление химических связей, их разрыв и увеличение скорости колебаний молекул, что приводит к деградации моторного масла и истощению

защитной пленки на поверхности стенок двигателя. Одним из важных моментов является контроль качества моторного масла в процессе эксплуатации для прогнозирования его срока службы с помощью физико-химических методов исследования. Определение качественного состава моторного масла с помощью инструментальных методов исследований, включающих инфракрасную спектроскопию моторных масел, определение частиц износа, а также оценка вязкостных характеристик моторного масла до и после пробега.

Методы и материалы

Одним из методов оценки качества является инфракрасная спектроскопия на Фурье спектрометре ФСМ-1201. Данный метод используется для определения изменений в отработанном масле. Толщина пленки масла составляла 0,007 мкм. Спектральные характеристики показывают наличие молекулярных изменений, что связано с истощением присадок, процессами окисления, нитрования, образования сажи и разбавление топлива. Спектры использованных и неиспользованных образцов масла были измерены и сравнены для определения изменений поглощения между различными образцами, возникающих в результате разложения масла и любых хи-

мических реакций, которые происходят во время высокотемпературной смазки двигателя. Для определения частиц износа в отработанных образцах использовался рентгено-флуоресцентный метод (РФА) анализа СУР 01-РЕНОМ. РФА позволяет определять количество элементов в анализируемой пробе, при этом для анализа используется минимальный объем пробы – примерно 1...2 мл масла помещается в измерительную кювету, время анализа составляет 2...6 минут. В процессе износа двигателя в масло попадают отдельные элементы, алюминий, хром, железо и др.

В качестве образцов для исследований использовали моторное масло для бен-

зинового двигателя *LUKOIL LUXE 5W-40* и дизельного *LUKOIL LUXE TURBO DIESEL 10W-40*. Оба образца использовали в двигателях транспорта отечественного производителя после 10 000 км пробега. Важной характеристикой, влияющей на трибологические свойства материала, является вязкость масла. Измерение вязкости проводили на автоматическом вискозиметре *Vero Viscosimeter SV-100* (мПа·с). Масло, объемом 50 мл, было помещено в специальную

Результаты и обсуждение

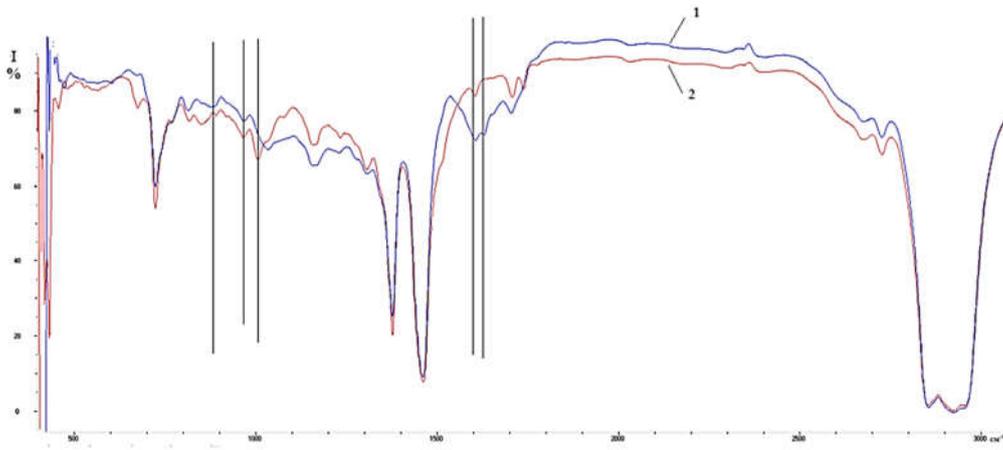
Смазочные масла подвергаются воздействию высоких температур в присутствии кислорода, что приводит к его окислению и деградации с образованием новых продуктов – кетоны и альдегиды [1, 2]. Образовавшиеся соединения растворяются в масле или остаются во взвешенном состоянии. Карбоновые кислоты повышают кислотность масла. Процесс окисления приводит к значительным изменениям характеристик и эффективности масла, повышая кислотность и вязкость масла, что приводит также к коррозии материала [3, 4]. Данные процессы приводят к тому, что смазочные масла становятся более агрессивными к металлическим поверхностям, уменьшается вероятность образования тонкой защитной пленки, что приводит к более высокому износу двигателя. На рис. 1 представлены ИК-спектры моторного масла для бензиновых и дизельных двигателей.

Как видно из рис. 1а и 1б, интенсивности характеристических частот значительно отличаются. Степень окисления масла определяется карбонильной группой в области 1670...1800 см^{-1} , что соответствует энергии поглощения углеродных связей и кислорода в окисленном масле. Помимо процессов окисления, в данной области наблюдается наличие продуктов нитрования – 1650 до 1600 см^{-1} . Сульфатные продукты разложения накапливаются в двигателе с течением времени, увеличивают образование нагара и ухудшают качество масла, в реакциях с водой могут давать побочные неорганические продукты, такие как серная кислота. Эти кислоты ис-

кювету, предварительно масло охлаждали и нагревали до 150 °С. Принцип работы вискозиметра основан на методе камертонной вибрации. Между сенсорными пластинами и образцом масла возникает амплитуда, которая колеблется в соответствии с величиной силы внутреннего трения. Мощность возбуждения пластин прямопропорциональна величине вязкости исследуемого образца.

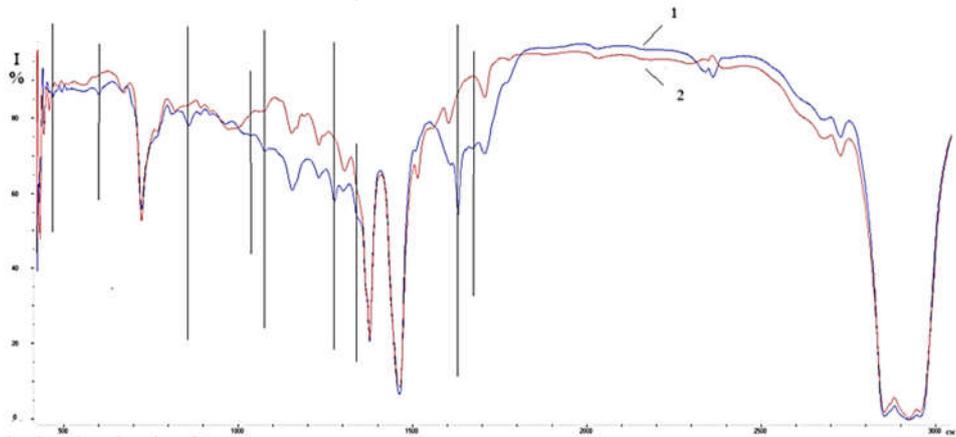
тощают запас пакета присадок. Характеристические частоты сульфатов находятся в области 1180-1120 см^{-1} . Важной является область 1032 см^{-1} , 967 см^{-1} и 1157 см^{-1} , которая относится к колебаниям связи С=С олефиновых углеводородов. Содержание ненасыщенных олефинов связано с вязкостью базового масла: чем выше содержание олефинов, тем более вязким является базовое масло [5]. Область колебаний 2920 см^{-1} соответствует колебаниям групп С-Н в алкильной цепи и определяет старение масла и его химические модификации. Из литературы известны противоизносные 970 см^{-1} , антиокислительные 1080 см^{-1} и присадки, улучшающие вязкость 1162 см^{-1} , диспергаторы 1232 см^{-1} [6].

На рис. 2 показана динамическая вязкость масел, содержащих различные примеси, при -20 °С и 120 °С. При увеличении температуры вязкость масла уменьшается. Значения динамической вязкости при 70-120 °С имеют постоянные близкие значения и не показывают существенных отличий, это может быть связано с защитными присадками. Необходимо отметить, что анализ вязкости масла до и после пробега показал, что использованное масло из-за процессов окисления имеет значительное повышение значения вязкости. Данный эффект связан с воздействием кислорода воздуха и повышенной температуры эксплуатации двигателя. Процесс окисления приводит к образованию соединений спиртов, альдегидов, органических кислот и к реакциям полимеризации, приводящими к образованию густых смол, нарушающих работу двигателя.



а) 1 –отработанное масло; 2 –новое масло.

a) 1 - used oil; 2 - new oil



б) 1 – отработанное масло; 2 – новое масло.

b) 1 - used oil; 2 - new oil

Рис. 1. ИК-спектры моторного масла до и после использования:
 а – LUKOIL LUXE 5W-40; б – LUKOIL LUXE TURBO DIESEL 10W-40
 Fig. 1. IR spectra of motor oil before and after use: a - LUKOIL LUXE 5W-40;
 b - LUKOIL LUXE TURBO DIESEL 10W-40

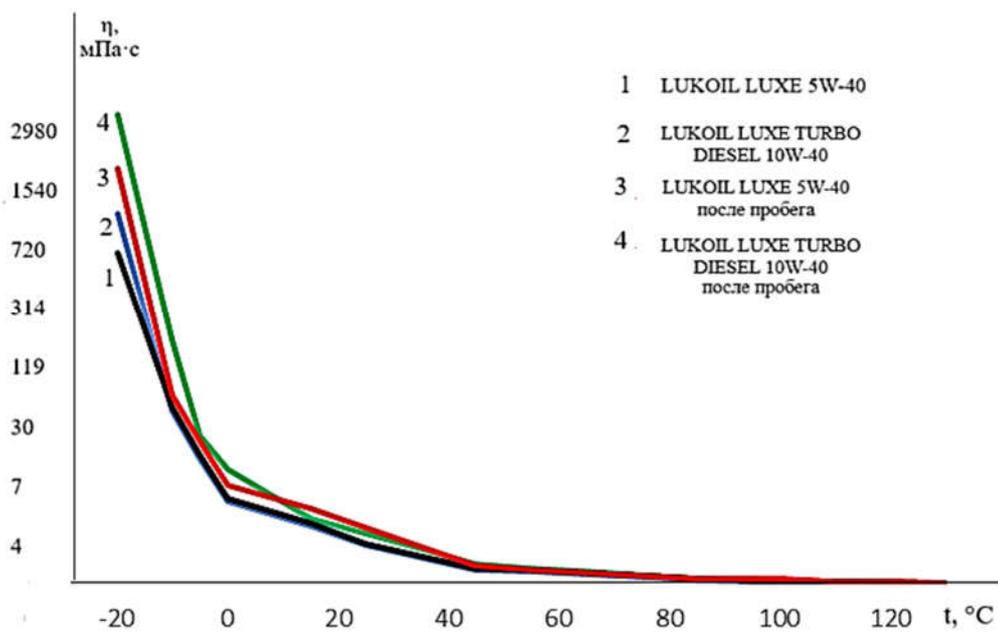


Рис. 2. Значение динамической вязкости моторных масел
 Fig. 2. Dynamic viscosity value of motor oils

Также в процессе эксплуатации моторных масел образуется сажа, отдельные частицы которой могут образовывать цепочечные структуры размером до 1 микрометра. Частицы сажи могут выступать абразивными частицами и нарушать работу компонентов двигателя. Сажа действует как загуститель масла, что приводит к увеличению вязкости масла (рис. 2, образцы № 3, 4)

На рис. 3 представлены спектры РФА отработанного масла двух образцов. Анализ показал (табл. 1), что моторные масла в целом отличаются друг от друга по содержанию титана, железа, алюминия, хрома. Наличие алюминия (96,7 %) свидетельствует о том, что в данном дизельном двигателе идет повышенный износ поршней, наличие хрома (3,028 %) говорит об износе поршневых колец.

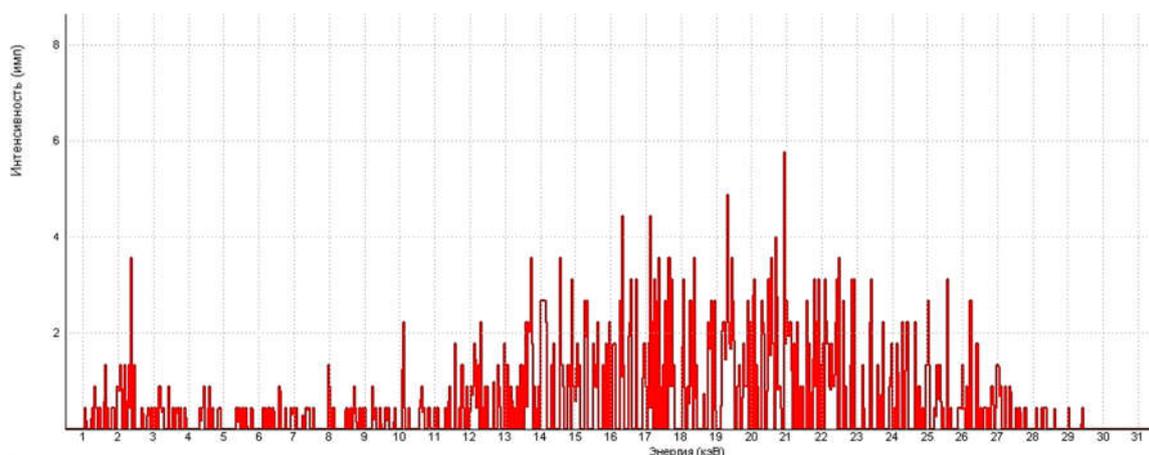
Таблица

Концентрация % элементов в образцах

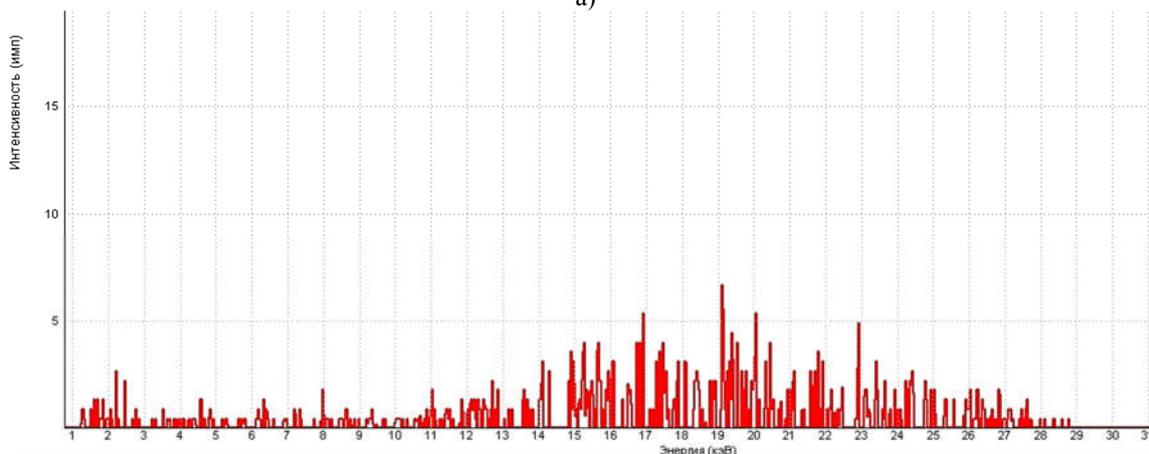
Table

Concentration of % elements in samples

Элемент	LUKOIL LUXE TURBO DIESEL 10W-40	LUKOIL LUXE 5W-40
	Концентрация, %	
Титан	0,241	65,22
Железо	0,030	23
Алюминий	96,7	10
Хром	3,028	1,78



а)



б)

Рис. 3. Результаты РФА отработанного моторного масла:
а – LUKOIL LUXE 5W-40; б – LUKOIL LUXE TURBO DIESEL 10W-40
Fig. 3. XRF results of used motor oil:
a – LUKOIL LUXE 5W-40; b – LUKOIL LUXE TURBO DIESEL 10W-40

Моторное масло бензинового двигателя показывает высокое содержание титана как добавки в масло, сополимер титана, который является отличной противоизносной присадкой. Как видно из таблицы, образец *LUKOIL LUXE 5W-40* приводит к износу гильз цилиндров в то время, как остальные показатели имеют более низкое значение из-за добавленной присадки.

Процесс окисления моторных масел сопровождается накоплением прилипших продуктов коррозии, которые быстро удаляются в процессе износа, тем самым образуется свежая металлическая поверхность, подвергающаяся дальнейшей коррозии. Данный процесс имеет большую скорость изнашивания на стенках цилиндра двигателя. В точке узла трения между

Выводы

Измеренные спектры отработанных и неиспользованных моторных масел показывают, что спектральные линии имеют характерные частоты поглощения и свидетельствуют об изменении физических и химических свойств моторного масла в двигателе. Что касается бензиновых и дизельных двигателей, то они имеют аналогичные характеристики у взятых новых образцов. Увеличение загрязнений и повышение вязкости отработанных масел связано с наличием образовавшихся примесей в процессе окисления и полимеризации базового масла, и условиями эксплуатации. Отработанные дизельные моторные масла показали значительно меньшую нитрацию по сравнению с бензиновыми аналогами. Выбросы оксидов азота у дизельных двигателей значительно выше. Поскольку как нитрование масла, так и выбросы оксидов азота напрямую связаны с процессом сгорания, эти различия также могут быть связаны друг с другом. Выбросы оксидов азота обычно объясняются бо-

кольцом и цилиндром вся смазочная пленка разрушается, и режим смазки является граничным, вследствие чего данный контакт очень чувствителен к загрязнениям [7]. Загрязнения, образующие масляную пленку между кольцом и цилиндром, приводят к абразивному износу. Истирание твердыми частицами также приводит к высокому трению и скорости износа при адгезионном режиме износа. Смазочное масло содержит в себе чрезвычайно мелкие частицы, которые могут закупоривать мелкие пространства между поверхностями и вызывать абразивный износ, а высокие температурный режим приводит к образованию нагара, вызывающего залипанию. Данные процессы приводят к неполному сгоранию продуктов [8].

более высокой степенью сжатия и температурой сгорания дизельных двигателей, что также может служить возможным объяснением различий в процессе нитрования. РФА отработанного масла показал значительные изменения в концентрациях элементов, относящихся к различным структурам в двигателе. Однако, изученный ряд образцов достаточно мал, поэтому необходимо увеличить количество образцов и пробоотбор в различные периоды эксплуатации, чтобы можно было убедиться в том, что аналогичный эффект наблюдается на протяжении всего режима работы двигателя.

Полученные результаты свидетельствуют о том, что данные методы можно использовать для анализа и контроля режима работы моторных масел в двигателе, что также позволяет определять механизмы износа и в дальнейшем применять соответствующие добавки в масло, чтобы повысить эксплуатационные свойства.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Adamczewska J. Z. and Love C. Oxidative Stability of Lubricant Measured by PDSC CEC L-85-T-99 Test Procedure // Journal of Thermal Analysis and Calorimetry. 2005. №80. pp.753-759.
2. Semin A. R. and Rosli A. B. Combustion Temperature Effect of Diesel Engine Convert to Com-

- pressed Natural Gas Engine. // American Journal of Engineering and Applied Sciences. 2009. № 2. pp. 212-216.
3. Owringa F., Mattsson H., Olsson J., and Pedersen J. Investigation of Oxidation of a Mineral and a

Synthetic Engine Oil. // *Thermochemica Acta*. 2004. №413. pp 241-248.

4. Шалыгин М.Г., Буяновский И.А., Самусенко В. Д., Ващишина А.П. Трибологические свойства полужидкого смазочного материала с присадками поверхностно-активных веществ // *Трение и износ*. 2023. Т. 44, № 5. С. 418-426. – DOI 10.32864/0202-4977-2023-44-5-418-426.
5. Totten G.E., Westbrook S.R., Shah R.J. *Fuels and Lubricants Handbook: Technology, Properties, Performance, and Testing*. ASTM International, Copyright by ASTM. 2014, ISBN of 978-0-8031-4551-1. 1087 p.

REFERENCES

1. Adamczewska JZ, Love C. Oxidative stability of lubricant measured by PDSC CEC L-85-T-99 test procedure. *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*. 2005;80:753-759.
2. Semin AR, Rosli AB. Combustion temperature effect of diesel engine convert to compressed natural gas engine. *American Journal of Engineering and Applied Sciences*. 2009;2:212-216.
3. Owra F, Mattsson H, Olsson J, Pedersen J. Investigation of oxidation of a mineral and a synthetic engine oil. *Thermochemica Acta*. 2004;413:241-248.
4. Shalygin MG, Buyanovsky IA, Samusenko VD, Vashchishina AP. Tribological properties of semi-fluid lubricant with surfactant additives. *Friction and Wear*. 2023;44(5):418-426. DOI 10.32864/0202-4977-2023-44-5-418-426.

Информация об авторах:

Шалыгин Михаил Геннадьевич – доктор технических наук, доцент, зав. кафедрой «Трубопроводные транспортные системы» Брянского государственного технического университета, тел. +7(4832)58-82-12.

Ващишин Сергей Павлович – аспирант кафедры «Трубопроводные транспортные системы» Брян-

Shalygin Mikhail Gennadievich – Doctor of Technical Sciences, Associate Professor, Head of the Department of Pipeline Transport Systems at Bryansk State Technical University; phone: +7(4832)58-82-12.

Vashchishin Sergey Pavlovich – Postgraduate Student of the Department of Pipeline Transport Systems at

6. M. Diaby, M. Sablier, A. Le Negrate, M. El Fassi, and J. Bocquet. Understanding carbonaceous deposit formation resulting from engine oil degradation // *Carbon*. 2009. №47(2). pp. 355-366.
7. Тихомиров В.П., Измеров М.А., Кузнецов С.В., Горностаева А.Г. Трение металл-металлических поверхностей // *Научные технологии в машиностроении*. 2022. № 3 (129). С. 40-48.
8. Шалыгин М.Г. Научная технология уменьшения водородного изнашивания рабочих поверхностей трения / М. Г. Шалыгин // *Научные технологии в машиностроении*. 2016. № 10(64). С. 3-6.

5. Totten GE, Westbrook SR, Shah RJ. *Fuels and lubricants handbook: technology, properties, performance, and testing*. ASTM International, Copyright by ASTM; 2014.
6. Diaby M, Sablier M, Le Negrate A, El Fassi M, Bocquet J. Understanding carbonaceous deposit formation resulting from engine oil degradation. *Carbon*. 2009;47(2):355-366.
7. Tikhomirov VP, Izmerov MA, Kuznetsov SV, Gornostaeva AG. Friction of MTL-metal surfaces. *Science Intensive Technologies in Mechanical Engineering*. 2022;3(129):40-48.
8. Shalygin M. G. High technology to reduce hydrogen wear of work surfaces of friction. *Science Intensive Technologies in Mechanical Engineering*. 2016;10(64):3-6.

ского государственного технического университета, 2.5.3. Трение и износ в машинах.

Ващишина Анна Павловна – старший преподаватель кафедры «Трубопроводные транспортные системы» Брянского государственного технического университета, тел. +7(4832)58-82-12.

Bryansk State Technical University, 2.5.3. Friction and Wear in Machines.

Vashchishina Anna Pavlovna – Senior Lecturer of the Department of Pipeline Transport Systems at Bryansk State Technical University; phone: +7(4832)58-82-12.

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 17.01.2024; одобрена после рецензирования 25.01.2024; принята к публикации 27.02.2024. Рецензент – Анцев В.Ю., доктор технических наук, профессор, Тульского государственного университета, член редсовета журнала «Транспортное машиностроение».

The article was submitted to the editorial office on 17.01.2024; approved after review on 25.01.2024; accepted for publication on 27.02.2024. The reviewer is Antsev V.Yu., Doctor of Technical Sciences, Professor of Tula State University, member of the Editorial Council of the journal *Transport Engineering*.