

Научная статья

УДК 621.89.017

DOI: <https://doi.org/10.18721/JEST.29309>



М.Г. Евсин ✉

Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого,
Санкт-Петербург, Россия

✉ mark.evsin1995@yandex.ru

РЕОЛОГИЧЕСКИЕ И ТРИБОЛОГИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА СМАЗОЧНЫХ КОМПОЗИЦИЙ, МОДИФИЦИРОВАННЫХ ФТОРИДОМ ГРАФЕНА

Аннотация. В статье изучено влияние фторида графена на структуру и свойства пластичных смазок методами оптической микроскопии, ротационной вискозиметрии и трибологии. Трибологические свойства базовых и модифицированных смазочных композиций оценены с помощью четырехшариковой машины трения по основным показателям: среднему диаметру пятна износа, индексу задира, критической нагрузке и нагрузке сваривания. Реологические исследования показали, что введение фторида графена в исследованные базовые смазочные композиции повысило их вязкостные свойства и оказало положительное влияние на прочность каркасной структуры загустителя. Исследование микроструктуры образцов показало, что фторид графена является активным компонентом системы и участвует в процессе структурообразования пластичных смазок. Испытания показали улучшение трибологических свойств модифицированных смазочных композиций. Была подтверждена перспективность применения фторида графена в качестве модификатора трения для пластичных смазок.

Ключевые слова: фторид графена, пластичная смазка, ротационный вискозиметр, четырехшариковая машина трения.

Благодарности: Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 22-19-00178, <https://rscf.ru/project/22-19-00178/>.

Для цитирования:

Евсин М.Г. Реологические и трибологические свойства смазочных композиций, модифицированных фторидом графена // Глобальная энергия. 2023. Т. 29, № 3. С. 124–133. DOI: <https://doi.org/10.18721/JEST.29309>

Research article

DOI: <https://doi.org/10.18721/JEST.29309>

M.G. Evsin ✉

Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University,
St. Petersburg, Russia✉ mark.evsin1995@yandex.ru

RHEOLOGICAL AND TRIBOLOGICAL PROPERTIES OF GRAPHENE FLUORIDE MODIFIED LUBRICATING COMPOSITIONS

Abstract. The article studies the influence of graphene fluoride on the structure and properties of greases by optical microscopy, rotational viscometry and tribometry. The tribological properties of the basic and modified lubricating compositions were evaluated using a four-ball friction tester according to the main indicators: the average diameter of the wear spot, the load-wear index, the critical load and the welding load. Rheological studies showed that the introduction of graphene fluoride into the studied basic lubricating compositions increased their viscosity properties and had a positive effect on the strength of the frame structure of the thickener. The study of the microstructure of the samples showed that graphene fluoride is an active component of the system and participates in the process of structure formation of greases. Tests showed an improvement in the tribological properties of modified lubricating compositions. The prospects of using graphene fluoride as a friction modifier for greases was confirmed.

Keywords: Graphene fluoride, grease, rotary viscometer, four-ball friction tester.

Acknowledgements: Russian Science Foundation Grant No. 22-19-00178.

Citation:

M.G. Evsin, Rheological and tribological properties of graphene fluoride modified lubricating compositions, *Global Energy*, 29 (03) (2023) 124–133, DOI: <https://doi.org/10.18721/JEST.29309>

Введение. В настоящее время на заводах, занимающихся производством паровых турбин, наблюдается тенденция к переходу от гидравлических элементов парораспределения в сторону применения электромеханических приводов (ЭМП) [1]. К новым ЭМП предъявляются такие технические требования как: высокая скорость и точность перемещения рабочего органа (клапана), высокое усилие во всём диапазоне перемещения клапана и низкое энергопотребление. Достижению таких характеристик способствует применение новых смазочных композиций.

В технических системах, для которых характерен переменный режим работы с периодами простоя, целесообразно применять пластичные смазки (ПС), которые за счет каркасной структуры загустителя [2] способны длительное время удерживаться в зоне контакта. Помимо свойств базового масла и загустителя, важное влияние на эффективность применения ПС оказывают модификаторы трения – присадки [3, 4].

В последние годы одними из наиболее перспективных модификаторов трения являются вещества на основе графена. Со времени открытия способа получения графена было проведено множество исследований его физических и, в том числе, трибологических свойств. Исследования показали, что графен при использовании в качестве присадки, снижает коэффициент трения и повышает адгезионные свойства смазок. Также применение графена позволяет повысить теплопроводность смазки [5–9], что является важным фактором при работе высоконагруженных узлов трения.

На данный момент уже разработано множество технологий получения графена [10–12]. В основном для промышленного применения синтезируется оксид графена [6, 13, 14]. При этом своё развитие получают и альтернативные материалы на основе графена. Известен фторид графена, который, по многим параметрам превосходит оксид [15–18]. Предполагается, что содержание фтора в структуре позволяет повысить антифрикционные свойства материала, а также повысить водостойкость смазки [15].

Целью исследования являлось изучение влияния фторида графена на реологические и трибологические свойства пластичных смазочных композиций на базе Литола-24 и Солидола для применения в электромеханических приводах при производстве паровых турбин.

Методика и материалы

Для достижение высоких технических характеристик в указанных условиях эксплуатации были исследованы смазочные композиции на основе Литола-24 и Солидола (табл. 1).

Таблица 1

Состав исследованных пластичных смазочных композиций

Table 1

Composition of the investigated greases

Маркировка пластичной смазки		Базовое масло	Загуститель	Дисперсная добавка
I	Литол-24	минеральное масло, (85 мас. %)	литиевое мыло 12-оксистеариновой кислоты (15 мас. %)	–
II	Литол-24 + FG	минеральное масло, (85 мас. %)	литиевое мыло 12-оксистеариновой кислоты (15 мас. %)	фторид графена 0,3 масс. %
III	Солидол	минеральное масло (80 мас. %),	кальциевое мыло высших жирных кислот (20 мас. %)	–
IV	Солидол + FG	минеральное масло (80 мас. %),	кальциевое мыло высших жирных кислот (20 мас. %)	фторид графена 0,3 масс. %

Пластические смазки на основе литола-24 (I) и солидола (III), широко используются для высоконагруженных узлов и для узлов, подверженных контакту с водой, соответственно. Эксплуатационные свойства модифицированных фторидом графена пластических смазок на основе литола-24 (II) и солидола (IV), в настоящее время недостаточно изучены.

Образцы смазок были подготовлены механическим перемешиванием. Соотношение базовой смазочной композиции и модификатора определялось с помощью лабораторных весов с точностью до 1 мг.

Трибологические исследования проводились по ГОСТ 9410-75 и ГОСТ 32501-2013 на четырехшариковой машине трения ЧШМ – 3,2. Исследование методом оптической микроскопии проводилось с применением микровизора металлографического инвертированного μ Vizo-Met-221. Измерение температуры в зоне испытаний производилось с помощью цифрового мультиметра UT61B UNI-T и термопары типа К, а также встроенных датчиков использованных приборов. Реологические исследования проводились согласно методике ГОСТ 25271-93 с помощью ротационного вискозиметра Brookfield DV2T с применением встроенного программного обеспечения и сторонних программных комплексов.

При проведении испытаний на ЧШМ – 3.2, образцы ПС помещались в чашу таким образом, чтобы шарики полностью были погружены в смазочный материал. Испытания проводились в две серии. Испытания в первой серии длились 10 с и проводились в широком интервале нагрузок от

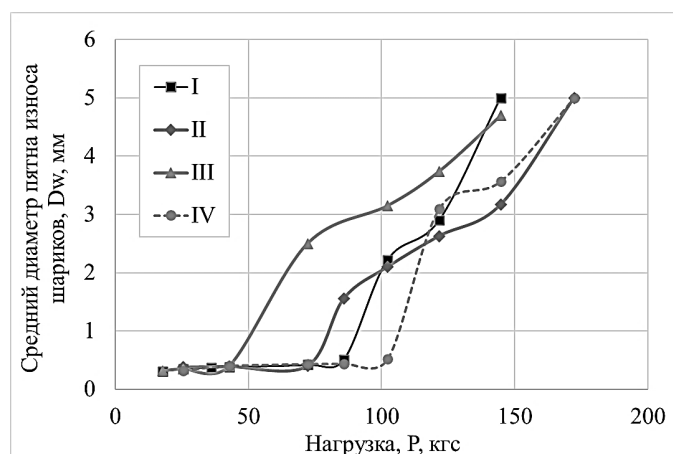


Рис. 1. Средний диаметр пятен износа шариков при испытании в течении 10 с в исследованных пластичных смазках I – IV

Fig. 1. Average diameter of the balls wear spots during a test for 10 seconds in the studied greases I – IV

20 до 200 кгс. Для каждой пробы ПС были проведены от 8 до 15 испытаний с увеличением нагрузки до момента сваривания шариков. Определялся индекс задира (I_3), критическая нагрузка ($P_{кр}$) и нагрузка сваривания ($P_{св}$). Во второй серии были проведены по 5 испытаний длительностью в 1 час при нагрузке 20 кгс. В результате был измерен средний диаметр пятна износа (D_w) и рассчитан показатель износа шариков (D_n).

При проведении испытаний на ротационном вискозиметре, образец ПС был помещен в химический стакан. Производилось термостатирование образца ПС и контактирующих с ним частей прибора до достижения температуры $25 \pm 0,2^\circ\text{C}$. Использовался шпиндель №7 по ГОСТ 25271-93, описанный в приложении Б. С образцами каждой смазочной композиции были проведены минимум по три серии испытаний. Для определения предела текучести был проведен анализ кривых «напряжение сдвига – угловая скорость». На основе полученных значений были вычислены скорости сдвига и соответствующие им значения вязкости.

Результаты и их обсуждение

В ходе трибологических испытаний исследовался средний диаметр пятна износа шариков. По результатам серии испытаний с последовательно увеличивающейся нагрузкой были построены графики зависимости значения диаметра пятна износа от прилагаемой нагрузки (рис. 1). Результаты двух серий испытаний показали (табл. 2), что наилучшим влиянием на износостойкость (D_n), наибольшим индексом задира (I_3), критической нагрузкой ($P_{кр}$) и нагрузкой сваривания ($P_{св}$) обладали образцы ПС, модифицированные графеном (II и IV). Это говорит о повышении предельной работоспособности модифицированных смазочных композиций.

Для определения влияния модификатора на структуру базовой смазочной композиции было проведено исследование методом оптической микроскопии. Результаты исследования представлены на рис. 2.

Добавление фторида графена (II) к базовой смазочной композиции (I) привело к уменьшению ячейки каркасной структуры, увеличению предела текучести и вязкости (табл. 2). Это показывает, что фторид графена является активным компонентом системы и участвует в процессе структурообразования ПС.

Для расширения теоретических знаний о механических свойствах исследованных образцов и прогнозирования их эксплуатационных характеристик было проведено исследование методом ротационной вискозиметрии (рис. 3).

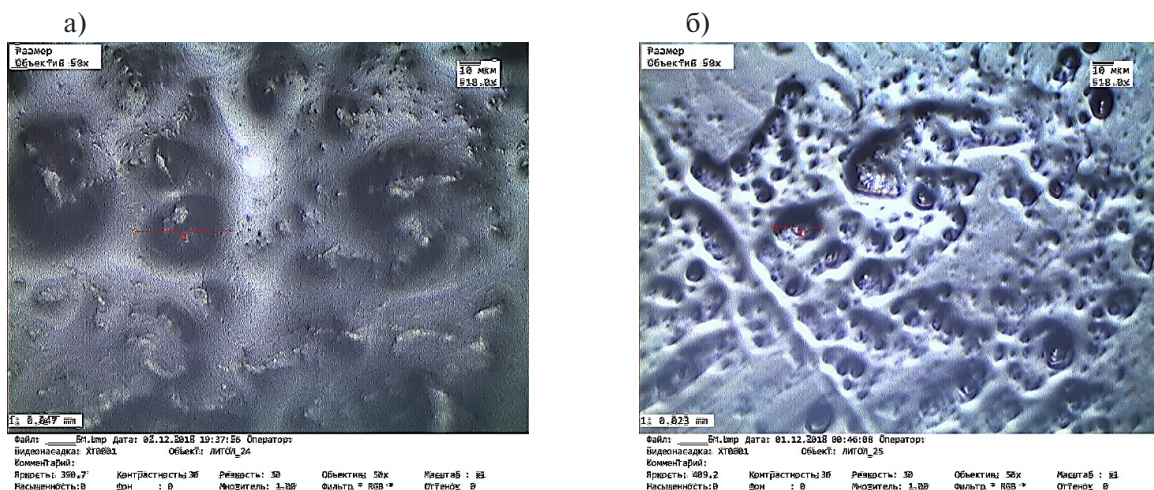


Рис. 2. Микроскопическое исследование каркасной структуры: а) базовая смазочная композиция (I); б) смазочная композиция, модифицированная фторидом графена (II)

Fig. 2. Microscopic investigation of the frame structure: a) basic lubricant composition (I); b) lubricant composition modified with graphene fluoride (II)

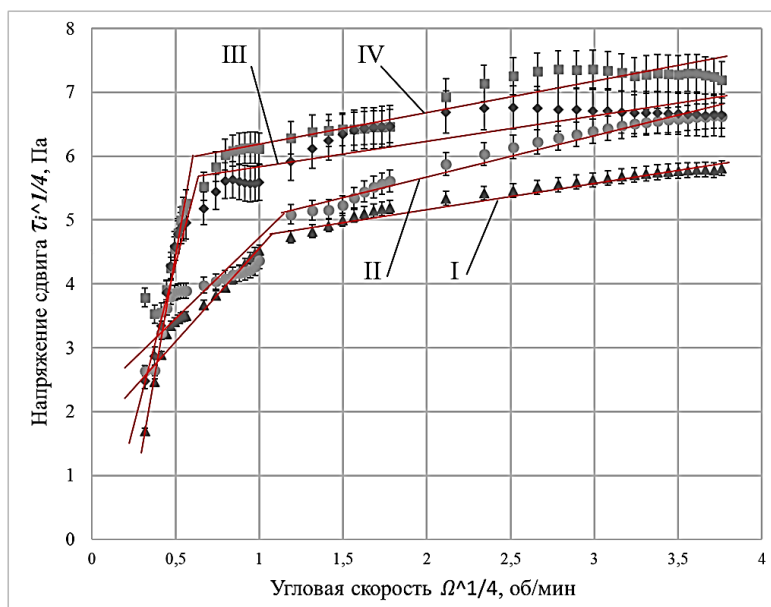


Рис. 3. Реологические кривые исследованных смазочных композиций

Fig. 3. Rheological curves of the investigated lubricating compositions

Полученные данные свидетельствуют о неньютоновских свойствах исследуемых образцов. Для проведения анализа полученных результатов были построены реологические кривые в системе напряжение сдвига – угловая скорость с показателем коэффициента нелинейности 0,25. Полученные кривые имели точки перегиба и были аппроксимированы в виде двух линейных отрезков. Продлив второй отрезок к оси сдвигового напряжения, были определены значения предела текучести для каждой ПС. Наибольшим пределом текучести (табл. 2) обладал образец IV, что говорит о высокой структурной прочности каркаса загустителя. Исследованные модифицированные смазочные композиции показали пределы текучести выше, чем у базовых образцов ПС.

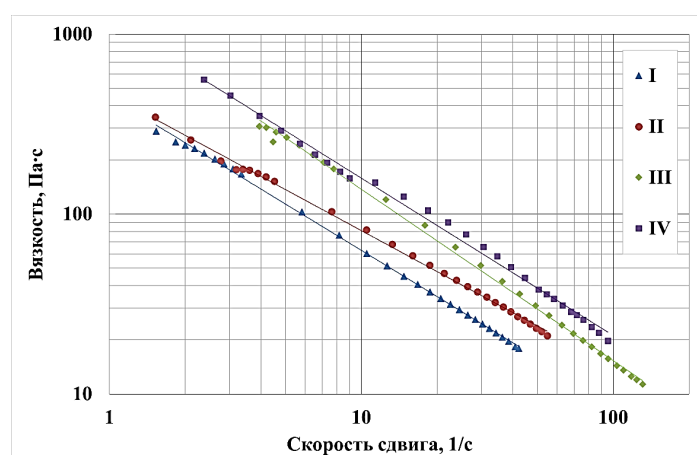


Рис. 4. Кривые вязкости в логарифмических координатах

Fig. 4. Viscosity curves in logarithmic coordinates

Применив полученные значения пределов текучести, были рассчитаны радиусы областей смазки, проявляющих жидкостные свойства. Это позволило рассчитать значения градиента скорости сдвига, соответствующие измеренным напряжениям сдвига. Для этих скоростей сдвига была вычислена вязкость. Полученные кривые вязкости в логарифмических координатах представлены на рис. 4.

На исследуемом интервале, вязкость модифицированных смазочных композиций была выше, чем у базовых. При этом в паре образцов I – II угол наклона логарифмической кривой к оси скорости сдвига уменьшился. В паре образцов III – IV угол наклона логарифмической кривой к оси скорости сдвига увеличился. Это может свидетельствовать об уменьшении и увеличении псевдопластичности, соответственно.

Таблица 2

Реологические и трибологические характеристики исследованных ПС

Table 2

Rheological and tribological characteristics of the investigated greases

Обозначение смазочной композиции	Предел текучести, τ_0 , Па	Вязкость ($D = 100 \text{ с}^{-1}$), Па·с	Показатель износа ($D_{и}$), мм	Индекс задира (I_3), кгс	Критическая нагрузка (P_k), кгс	Нагрузка сваривания ($P_{св}$), кгс
I	383	8,3	1,01	29	102	145
II	385	14,7	0,5	48	125	178
III	955	16,4	0,71	35	110	145
IV	1110	22,1	0,63	68	122	178

Данные, полученные в результате трибологических и реологических исследований (табл. 2), согласуются с предположением об увеличении несущей способности смазки при увеличении её вязкостных характеристик.

Выводы

Трибологические исследования показали, что модификации базовых пластичных смазочных композиций фторидом графена привели к снижению показателя износа на 50 и 13 % для пары

образцов I-II и III-IV соответственно. Индекс задира увеличился на 65% и 94% для пары образцов I-II и III-IV соответственно. Критическая нагрузка в первой паре образцов увеличилась на 23%, а во второй паре увеличилась на 11%. Нагрузка сваривания увеличилась на 23% для обеих пар образцов ПС.

Результаты исследования в целом показали повышение трибологических характеристик модифицированных смазочных систем по сравнению с базовыми. Это говорит о положительном влиянии фторида графена на реологические и трибологические свойства пластичных смазочных композиций на базе Литола-24 и Солидола для применения в электромеханических приводах паровых турбин.

Полученные результаты согласуются с результатами других исследований, а также с общепринятыми теоретическими моделями.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

[1] **Турецков А.В.** Разработка и совершенствование современной системы парораспределения теплофикационной турбины: диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук: 05.04.12: дис. – б. и., 2021.

[2] **Fan X., Li W., Li H., Zhu M., Xia Y., Wang J.** Probing the effect of thickener on tribological properties of lubricating greases // *Tribology International*. 2018. Vol. 118. P. 128–139.

[3] **Медведева В.В., Бреки А.Д., Крылов Н.А., Фадин Ю.А., Александров С.Е., Провоторов Д.А., Стариков Н.Е.** Противоизносные свойства консистентного смазочного композиционного материала, содержащего смесь гидросиликатов магния. // *Известия Юго-Западного государственного университета. Серия Техника и Технологии*. 2016. № 2 (19). С. 30–40.

[4] **Медведева В.В., Бреки А.Д., Крылов Н.А., Скотникова М.А., Фадин Ю.А., Александров С.Е., Агеев Е.В.** Исследование противоизносных свойств пластичного смазочного композиционного материала, содержащего дисперсные частицы слоистого модификатора трения // *Известия Юго-Западного государственного университета*. 2016. № 1 (64). С. 75–82.

[5] **Аль-Саади Д., Али Ю., Першин В. Ф., Дивин А.Г., Мозгова Г.В., Остриков В.В.** Определение коэффициента теплопроводности для пластичных смазок, модифицированных графеном // *Наука в центральной России*. 2017. № 5 (29). С. 75–83. EDN ZOLBRB.

[6] **Jyothirmayee Aravind S.S., Ramaprabhu S.** Surfactant free grapheme nanosheets based nanofluids by in-situ reduction of alkaline graphite oxide suspensions. *Journal of applied physics*, vol. 110, no. 12, pp. 124326–124326–5, dec. 2011.

[7] **Jha N., Ramaprabhu S.** Thermal conductivity studies of metal dispersed multiwalled carbon nanotubes in water and ethylene glycol based nanofluids. *Journal of applied physics*, vol. 106, no. 8, pp. 084317–084317–6, oct. 2009.

[8] **Chon C.H., Kihm K.D., Lee S.P., Choi S.U.S.** Empirical correlation finding the role of temperature and particle size for nanofluid (al₂o₃) thermal conductivity enhancement // *Applied physics letters*, vol. 87, no. 15, p. 153107, 2005.

[9] **Xie H., Chen L.** Adjustable thermal conductivity in carbon nanotube nanofluids/ *physics letters a*, vol. 373, no. 21, pp. 1861–1864, may 2009.

[10] **Lim J. Y., Mubarak N.M., Abdullah E.C., Nizamuddin S., Khalid M.** Recent trends in the synthesis of graphene and graphene oxide based nanomaterials for removal of heavy metals — A review // *Journal of Industrial and Engineering Chemistry*. 2018. T. 66. С. 29–44.

[11] **Smith A.T., LaChance A.M., Zeng S., Liu B., Sun L.** Synthesis, properties, and applications of graphene oxide/reduced graphene oxide and their nanocomposites // *Nano Materials Science*. 2019. T. 1. №. 1. С. 31–47.

- [12] Елецкий А.В., Искандарова И.М., Книжник А.А., Красиков Д.Н. Графен. Методы получения и теплофизические свойства // Успехи физических наук. 2011. Т. 181. №. 3. С. 233–268.
- [13] Шилов М.А., Смирнова А.И., Гвоздев А.А., Рожкова Н.Н., Дьячкова Т.П., Бурков А.А., Усольцева Н.В. Реология пластичных смазочных материалов с присадками углеродных наноструктур различного типа // Трение и износ. 2019. Т. 40. №. 6. С. 720.
- [14] Парфенов А.С., Шилов М.А., Смирнова А.И., Берёзина Е.В., Ткачев А.Г., Бурков А.А., Усольцева Н.В. Влияние различных аллотропов углерода на трибологические и реологические характеристики модельных смазочных систем // Трение и износ. 2021. Т. 42. №. 3. С. 338–349.
- [15] Васильев И.М., Агамирова Э.Э., Соколова В.А., Ореховская А.А., Загидуллин Р.Р., Киямов И.К., Сабитов Л.С. Исследование возможностей применения смазочных материалов на основе фторида графена в машиностроении и эксплуатации машин и механизмов // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. 2022. №. 8. С. 417–426.
- [16] Kouloumpis A., Chronopoulos D.D., Potsi G., Pykal M., Vlček J., Scheibe M., Otyepka M. One-step synthesis of Janus fluorographene derivatives // Chemistry—A European Journal. 2020. Т. 26. №. 29. С. 6518–6524.
- [17] Нагдаев В.К., Вязинкин В.С., Забродская А.В., Остриков В.В., Сафонов В.В., Першин В.Ф. Результаты исследований смазки, модифицированной многослойным графеном // Наука в центральной России. 2021. №. 2. С. 71–77.
- [18] Aghamohammadi H., Bakhtiari M., Eslami-Farsani R. An experimental investigation on the synthesis of fluorographene by electrochemical method in the mixture of sulfuric and hydrofluoric acid electrolytes // Ceramics International. 2020. Т. 46. №. 16. С. 25189–25199.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРЕ

ЕВСИН Марк Геннадьевич — аспирант, Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, без степени.
 E-mail: mark.evsin1995@yandex.ru
 ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2403-9386>

REFERENCES

- [1] A.V. Turetskov, Razrabotka i sovershenstvovaniye sovremennoy sistemy paroraspredeleniya teplofikatsionnoy turbiny: dissertatsiya na soiskaniye uchenoy stepeni kandidata tekhnicheskikh nauk (Development and improvement of a modern steam distribution system of a heating turbine: dissertation for the degree of Candidate of Technical Sciences): 05.04.12: dis. – b. i., 2021.
- [2] X. Fan, W. Li, H. Li, M. Zhu, Y. Xia, J. Wang, Probing the effect of thickener on tribological properties of lubricating greases // Tribology International. 2018. Vol. 118. P. 128–139.
- [3] V.V. Medvedeva, A.D. Breki, N.A. Krylov, Yu.A. Fadin, S.Ye. Aleksandrov, D.A. Provotorov, N.Ye. Starikov, Protivoiznosnyye svoystva konsistentnogo smazochnogo kompozitsionnogo materiala, sodержashchego smes gidrosilikatov magniya (Anti-wear properties of a lubricating composite material containing a mixture of magnesium hydrosilicates) // Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya Tekhnika i Tekhnologii. 2016. №2(19). S. 30–40.
- [4] V.V. Medvedeva, A.D. Breki, N.A. Krylov, M.A. Skotnikova, Yu.A. Fadin, S.Ye. Aleksandrov, Ye.V. Ageyev, Issledovaniye protivnoiznosnykh svoystv plastichnogo smazochnogo kompozitsionnogo materiala, sodержashchego dispersnyye chastitsy sloistogo modifikatora treniya (Investigation of anti-wear properties of a plastic lubricating composite material containing dispersed particles of a layered friction modifier) // Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta. 2016. № 1 (64). S. 75–82.

[5] **D. Al-Saadi, Yu. Ali, V. F. Pershin, A.G. Divin, G.V. Mozgova, V.V. Ostrikov**, *Opredeleniye koeffitsiyenta teploprovodnosti dlya plastichnykh smazok, modifitsirovannykh grafenom (Determination of the thermal conductivity coefficient for graphene modified greases) // Nauka v tsentralnoy Rossii. 2017. № 5 (29). S. 75–83. EDN ZOLBRB.*

[6] **S.S. Jyothirmayee Aravind, S. Ramaprabhu**, *Surfactant free grapheme nanosheets based nanofluids by in-situ reduction of alkaline graphite oxide suspensions. Journal of applied physics, vol. 110, no. 12, pp. 124326–124326–5, dec. 2011.*

[7] **N. Jha, S. Ramaprabhu**, *Thermal conductivity studies of metal dispersed multiwalled carbon nanotubes in water and ethylene glycol based nanofluids. Journal of applied physics, vol. 106, no. 8, pp. 084317–084317–6, oct. 2009.*

[8] **C.H. Chon, K.D. Kihm, S.P. Lee, S.U.S. Choi**, *Empirical correlation finding the role of temperature and particle size for nanofluid (al2o3) thermal conductivity enhancement // Applied physics letters, vol. 87, no. 15, p. 153107, 2005.*

[9] **H. Xie, L. Chen**, *Adjustable thermal conductivity in carbon nanotube nanofluids/ physics letters a, vol. 373, no. 21, pp. 1861–1864, may 2009.*

[10] **J.Y. Lim, N.M. Mubarak, E.C. Abdullah, S. Nizamuddin, M. Khalid**, *Recent trends in the synthesis of graphene and graphene oxide based nanomaterials for removal of heavy metals — A review // Journal of Industrial and Engineering Chemistry. 2018. T. 66. S. 29–44.*

[11] **A.T. Smith, A.M. LaChance, S. Zeng, B. Liu, L.Sun**, *Synthesis, properties, and applications of graphene oxide/reduced graphene oxide and their nanocomposites // Nano Materials Science. 2019. T. 1. №. 1. S. 31–47.*

[12] **A.V. Yeletskiy, I.M. Iskandarova, A.A. Knizhnik, D.N. Krasikov**, *Grafen. Metody polucheniya i teplofizicheskiye svoystva (Graphene. Methods of production and thermophysical properties) // Uspekhi fizicheskikh nauk. 2011. T. 181. №. 3. S. 233–268.*

[13] **M.A. Shilov, A.I. Smirnova, A.A. Gvozdev, N.N. Rozhkova, T.P. Dyachkova, A.A. Burkov, N.V. Usoltseva**, *Reologiya plastichnykh smazochnykh materialov s prisadkami uglerodnykh nanostruktur razlichnogo tipa (Rheology of plastic lubricants with additives of carbon nanostructures of various types) // Treniye i iznos. 2019. T. 40. №. 6. S. 720.*

[14] **A.S. Parfenov, M.A. Shilov, A.I. Smirnova, Ye.V. Berezina, A.G. Tkachev, A.A. Burkov, N.V. Usoltseva**, *Vliyaniye razlichnykh allotropov ugleroda na tribologicheskiye i reologicheskiye kharakteristiki modelnykh smazochnykh system (Influence of various carbon allotropes on tribological and rheological characteristics of model lubrication systems) // Treniye i iznos. 2021. T. 42. №. 3. S. 338–349.*

[15] **I.M. Vasilyev, E.E. Agamirova, V.A. Sokolova, A.A. Orekhovskaya, R.R. Zagidullin, I.K. Kiyamov, L.S. Sabitov**, *Issledovaniye vozmozhnostey primeneniya smazochnykh materialov na osnove fluorida grafena v mashinostroyenii i ekspluatatsii mashin i mekhanizmov (Investigation of the possibilities of using graphene fluoride lubricants in mechanical engineering and operation of machines and mechanisms) // Izvestiya Tul'skogo gosudarstvennogo universiteta. Tekhnicheskiye nauki. 2022. №. 8. S. 417–426.*

[16] **A. Kouloumpis, D.D. Chronopoulos, G. Potsi, M. Pykal, J. Vlček, M. Scheibe, M. Otyepka**, *One-step synthesis of Janus fluorographene derivatives // Chemistry—A European Journal. 2020. T. 26. №. 29. S. 6518–6524.*

[17] **V.K. Nagdayev, V.S. Vyazinkin, A.V. Zabrodskaya, V.V. Ostrikov, V.V. Safonov, V.F. Pershin**, *Rezultaty issledovaniy smazki, modifitsirovannoy mnogosloynym grafenom (Results of studies of a lubricant modified with multilayer graphene) // Nauka v tsentralnoy Rossii. 2021. №. 2. S. 71–77.*

[18] **H. Aghamohammadi, M. Bakhtiari, R. Eslami-Farsani**, *An experimental investigation on the synthesis of fluorographene by electrochemical method in the mixture of sulfuric and hydrofluoric acid electrolytes // Ceramics International. 2020. T. 46. №. 16. S. 25189–25199.*

INFORMATION ABOUT AUTHOR

Mark G. EVSIN – *Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University.*

E-mail: mark.evsin1995@yandex.ru

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2403-9386>

Поступила: 07.08.2023; Одобрена: 08.09.2023; Принята: 10.09.2023.

Submitted: 07.08.2023; Approved: 08.09.2023; Accepted: 10.09.2023.