

DOI: <https://doi.org/10.26896/1028-6861-2022-88-10-43-47>

ИССЛЕДОВАНИЕ ЭЛЕКТРОФИЗИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ПЛАСТИЧНЫХ СМАЗОЧНЫХ МАТЕРИАЛОВ

© **Антонина Игоревна Смирнова^{1*}, Леонтий Иванович Минеев¹, Илья Александрович Герасимов¹, Мария Андреевна Голубева¹, Михаил Александрович Шилов², Надежда Васильевна Усольцева¹**

¹ Ивановский государственный университет, Россия, 153025, г. Иваново, ул. Ермака, д. 39; *e-mail: antonia_smirnova@mail.ru

² Ивановский государственный энергетический университет имени В. И. Ленина, Россия, 153003, г. Иваново, ул. Рабфаковская, д. 34.

Статья поступила 31 марта 2022 г. Поступила после доработки 2 июня 2022 г. Принята к публикации 21 июня 2022 г.

Активно развивающийся электрический автомобильный транспорт предполагает создание токопроводящих смазок. В работе представлены установка и результаты исследования электрофизических свойств промышленно выпускаемых и модельных пластичных смазочных материалов, а также образцов аналогичной консистенции. Установка работает в диапазоне частот тока от 0,1 до 1 кГц и включает термоячейку, позволяющую варьировать толщину образцов и температуру в интервале 20 – 120 °С. Предложена методика определения вольт-амперных характеристик с дальнейшим расчетом удельной электропроводности. С помощью установки анализировали удельную электропроводность модельных пластичных смазочных материалов на основе вазелина медицинского с добавкой углеродных наноструктур — малослойных графитовых фрагментов и их модифицированных аналогов. Вазелин применяли в качестве модельной базовой основы, поскольку его реологические свойства подобны пластичным смазочным материалам, и он не содержит дополнительных присадок, влияющих на результат измерения. Установлено, что введение углеродных наноструктур в вазелин-диэлектрик превращает его в электропроводящий материал. Показано, что предложенная установка позволяет проводить исследования удельной электропроводности систем, моделирующих пластичные смазочные материалы, с достаточной точностью. Полученные результаты могут быть использованы при совершенствовании методики исследования удельной электропроводности модельных и промышленно выпускаемых пластичных смазочных материалов, в том числе с токопроводящими присадками.

Ключевые слова: измерительная термоячейка; удельная электропроводность; пластичный смазочный материал; углеродные наноструктуры.

STUDY OF THE ELECTROPHYSICAL CHARACTERISTICS OF PLASTIC LUBRICANTS

© **Antonina I. Smirnova^{1*}, Leonty I. Mineev¹, Ilya A. Gerasimov¹, Maria A. Golubeva¹, Mikhail A. Shilov², Nadezhda V. Usol'tseva¹**

¹ Ivanovo State University, 39, ul. Ermaka, Ivanovo, 153025, Russia; *e-mail: antonia_smirnova@mail.ru

² Ivanovo State Power Engineering University named after V. I. Lenin, 34, ul. Rabfakovskaya, Ivanovo, 153003, Russia.

Received March 31, 2022. Revised June 2, 2022. Accepted June 21, 2022.

Actively developing electric automobile transport assumes the creation of conductive lubricants. We present a setup designed to study the electrophysical properties of industrially produced and model plastic lubricants, as well as the samples of a similar consistency. The setup operates within the current frequency range from 0.1 to 1 kHz and includes a temperature-controlled measuring cell that allows changes in the sample thickness and temperature in the range from 20 to 120°C. A method for determination of current-voltage characteristics with subsequent calculation of the specific electrical conductivity is proposed. The specific electrical conductivity of model plastic lubricants based on medical vaseline added with carbon nanostructures (few-layer graphite fragments and their modified analogs) was studied using the developed setup. Vaseline was used as a base model lubricant, since its rheological properties are similar to that of plastic lubricants and it does not contain any additional additives that can affect the measurement result. The electrically conductive properties of the dispersions of carbon nanostructures and their modified analogs in vaseline were analyzed. It is shown that the introduction of carbon nanostructures into dielectric vaseline turns it into an electrically conductive material. The developed setup makes it possible to study the specific electrical conductivity of systems simulating plastic lubricants with a sufficient accuracy. The results obtained can be used to improve the methodology for studying the specific electrical conductiv-

ity of model and industrially produced plastic lubricants, including those with conductive additives.

Keywords: measuring temperature-controlled cell; specific electrical conductivity; plastic lubricant; carbon nanostructures.

Введение

В последнее время электромобили получают все большее распространение, чему способствуют глобальный энергетический кризис, неуклонное сокращение запасов невозобновляемых ископаемых источников энергии и загрязнение атмосферы выхлопными газами от транспортных средств с традиционными двигателями внутреннего сгорания [1 – 5].

Пластичные смазочные материалы (ПСМ) используются в 80 – 90 % всех вращающихся частей автомобиля (силовых агрегатах, колесных подшипниках, шасси и др.) [6]. Практика показала, что применение промышленно выпускаемых смазочных материалов в электромобилях невозможно без оптимизации их составов. Это связано с более высокими скоростями вращения элементов механических частей, существенно большими нагрузками, температурами и электрическими токами [1].

Когда напряжение между токопроводящими поверхностями превышает изолирующую способность смазочной пленки, возникают вихревые токи и электрический разряд — пробой [7, 8]. Изолирующая способность смазочной пленки зависит от ее толщины и напряженности поля пробоя смазки. Чтобы предотвратить нарастание напряжения на смазочной пленке и разрушение поверхности пары трения, необходимо использовать токопроводящие ПСМ [9 – 11].

В качестве основы для создания электропроводящих материалов применяют наночастицы, в том числе углеродные наноструктуры (УНС) [1, 11 – 13]. Вместе с тем стандарты или

утвержденные методы испытаний для определения электрофизических характеристик токопроводящих ПСМ (относительной диэлектрической проницаемости, удельной электропроводности, напряженности поля пробоя) отсутствуют [10].

Заметим, что в случае низковязких сред используют измерительную ячейку и методику определения удельной электропроводности для водных растворов электролитов [14, 15]. Однако разрешающая способность такой ячейки ограничена значениями кинематической вязкости (не более $0,1 \text{ м}^2/\text{с}$) и температурой (до $85 \text{ }^\circ\text{C}$). Для измерения удельной электропроводности ПСМ подобную ячейку применять нецелесообразно, поскольку вязкость ПСМ значительно превышает вязкость растворов электролитов. Твердые композиционные материалы исследуют с помощью цифрового моста переменного тока с частотой 1000 Гц [16]. В этом случае используют образцы определенной фиксированной толщины. Такой подход для ПСМ также не пригоден.

Цель работы — исследование электрофизических характеристик ПСМ с токопроводящими присадками с помощью установки с измерительной ячейкой, позволяющей варьировать толщину и температуру образцов.

Материалы, методика, оборудование

Использовали установку, которая включала: низкочастотный генератор сигналов ГЗ-112/1 (рабочие условия эксплуатации: температура — $-10 \dots 50 \text{ }^\circ\text{C}$, относительная влажность воздуха — до 80 %, атмосферное давление — $450 - 800 \text{ мм рт. ст.}$), два универсальных цифровых вольтметра В7-35 (один работал в режиме вольтметра, другой — в режиме миллиамперметра) и оригинальную измерительную термоячейку (рис. 1, 2). Диапазоны измерений и относительные погрешности элементов электрической схемы установки приведены в таблице (f_n — установленное по шкале значение частоты в герцах).

В основе измерительной ячейки помещали измерительные электроды, выполненные из нержавеющей стали. Площадь каждого электрода составляла $78,5 \text{ мм}^2$. Нижний электрод изолировали фторопластовой вставкой. Соосность электродов регулировали винтами. Толщину зазора между измерительными электродами устанавливали с помощью микрометра. Нагрев ячейки (до $120 \text{ }^\circ\text{C}$) осуществляли с помощью нагрева-

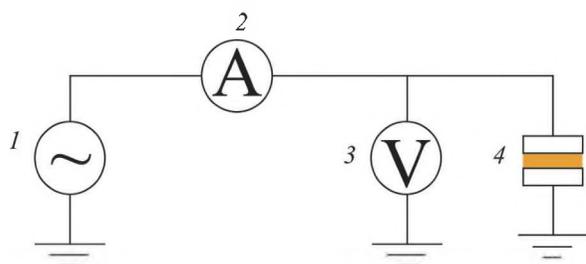


Рис. 1. Эквивалентная электрическая схема установки: 1 — низкочастотный генератор сигналов; 2 — миллиамперметр; 3 — вольтметр; 4 — измерительная ячейка

Fig. 1. Equivalent electrical circuit of the setup: 1 — low-frequency signal generator; 2 — milliammeter; 3 — voltmeter; 4 — measuring cell

теля. Нагревательный элемент с электронной системой терморегуляции позволял поддерживать температуру в измерительной ячейке с точностью $\pm 0,5^\circ\text{C}$.

Термокамеру тестировали стандартом электропроводности — раствором электролита KCl (производство США) — при температуре 25°C . Условия работы стандарта: температура — $0 - 31^\circ\text{C}$, диапазон удельной электропроводности — $0,064 - 0,094 \text{ мСм/см}$.

Чтобы исключить вклад граничных эффектов на электродах, на рис. 3 представлены линейные участки калибровочных кривых вольт-амперных характеристик (ВАХ) для стандарта KCl при разных толщинах образцов. Удельную электропроводность рассчитывали по формуле

$$\sigma = \frac{1}{S} l \frac{1}{R_{\text{ВАХ}}},$$

где S — площадь электрода; l — расстояние между электродами; $R_{\text{ВАХ}}$ — сопротивление эталонного раствора на линейном участке ВАХ.

Расчет импеданса не проводили, поскольку: 1) процессы трения в подшипниках качения описываются теорией гидродинамической смазки, что максимально увеличивает емкостную составляющую комплексного показателя электрического сопротивления, необходимую для расчета импеданса; 2) толщина исследуемых образцов превышает $0,1 \text{ мм}$, что также характерно для гидродинамического режима трения; 3) импеданс начинает работать при толщине смазочного слоя $0,01 \text{ мм}$ и менее и только в мегагерцовом диапазоне частоты тока, в данном случае использовались гораздо более низкие частоты ($0,1 - 1 \text{ кГц}$).

В качестве присадок углеродного наноструктурированного материала использовали мало-слойные графитовые фрагменты (МГФ) и их азот-допированные (N-МГФ) и окисленные (O-МГФ) аналоги [17]. В качестве модельного ПСМ применяли вазелин медицинский (VM) марки ЛСР-005886/08-230708, так как он обладает физическими свойствами ПСМ, но не содержит каких-либо присадок или загустителей, которые могли бы повлиять на результаты эксперимента [18, 19].

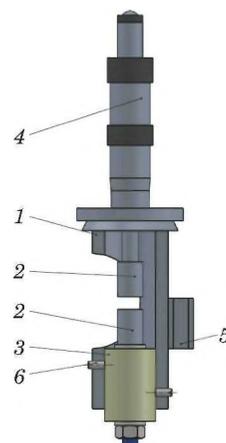


Рис. 2. Ячейка для измерения электрических свойств: 1 — основание; 2 — измерительные электроды; 3 — изолятор; 4 — микрометр; 5 — нагревательный элемент; 6 — регулирующие винты

Fig. 2. Temperature-controlled measuring cell: 1 — base; 2 — measuring electrodes; 3 — insulator; 4 — micrometer; 5 — heating element; 6 — adjusting screws

Обсуждение результатов

ВАХ образцов измеряются в контролируемых и воспроизводимых условиях (частота тока, напряжение, температура, толщина образца, концентрация УНС).

Определение ВАХ и последующий расчет удельной электрической проводимости промышленно выпускаемых ПСМ и их моделей, в том числе с дисперсиями токопроводящих присадок, проводили в статике. Это обеспечивало стабильное образование смазочной пленки постоянной толщины. Образцы различной толщины получали за счет регулирования микрометром (шаг — $0,01 \text{ мм}$).

На рис. 4 приведены ВАХ для дисперсий VM/МГФ с различным содержанием нанокремниевых компонентов. На их основе рассчитывали удельную электропроводность систем ПСМ/УНС при напряжениях 1 и 2 В (рис. 5).

Заключение

Таким образом, разработанная экспериментальная установка, включающая оригинальную измерительную термокамеру, низкочастотный ге-

Диапазоны измерений и относительные погрешности элементов электрической схемы установки

Ranges of measurement and relative errors of the elements of the electrical circuit of the developed setup

Элемент установки	Диапазон измерений	Относительная погрешность, %
Генератор сигналов ГЗ-112/1	Частота — $10 - 10^7 \text{ Гц}$	$2 + (30/f_n)$
Универсальный цифровой вольтметр В7-35	Переменный ток — $10^{-7} - 10 \text{ А}$	$0,4 - 3,0$
	Напряжение переменного тока — $10^{-4} - 10^3 \text{ В}$	$0,4 - 0,8$

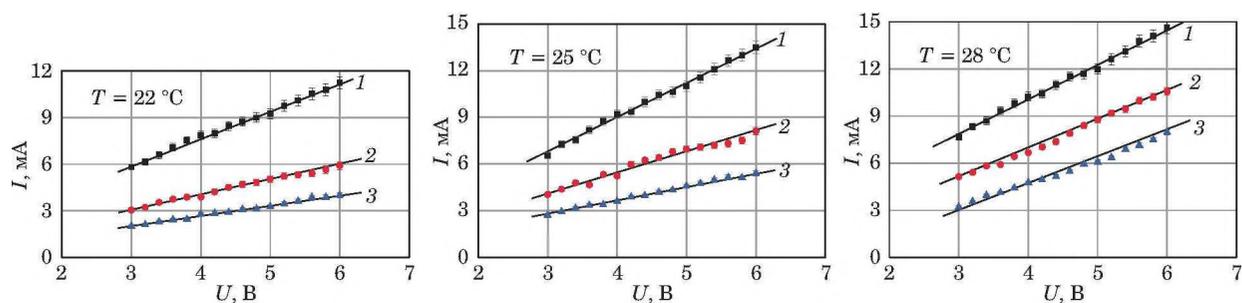


Рис. 3. Калибровочные кривые ВАХ для стандарта KCl при различных температурах и расстояниях между электродами (толщина образца) 0,3 (1), 0,5 (2) и 0,75 мм (3) (частота тока — 100 Гц)

Fig. 3. Calibration curves for KCl standard at different temperatures and distances between electrodes (sample thickness) 0.3 (1), 0.5 (2), 0.75 mm (3) (current frequency — 100 Hz)

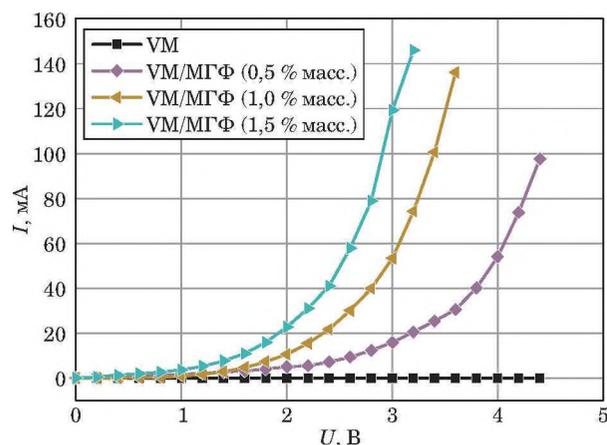


Рис. 4. Вольт-амперные характеристики для дисперсий VM/MGF с различным содержанием нанокarbonного компонента MGF (частота тока — 100 Гц, температура — 22 °C, толщина образца — 0,1 мм)

Fig. 4. Current-voltage characteristics (CVC) of VM/MGF dispersions with different content of the nanocarbon component MGF (current frequency — 100 Hz, temperature — 22°C, sample thickness — 0.1 mm)

нератор сигналов, миллиамперметр и вольтметр, позволяет исследовать электрофизические свойства ПСМ, допированных УНС, и других образцов аналогичной консистенции при различных их толщинах и температурах. Представлена методика определения ВАХ с дальнейшим расчетом удельной электропроводности анализируемых материалов. Показано, что модельная пластичная смазка (медицинский вазелин), не обладающая электропроводящими свойствами, становится токопроводящей при допировании малослойными графитовыми фрагментами.

Финансирование

Работа выполнена при финансовой поддержке Минобрнауки РФ (проект № FZZM-2020-0006 для ИвГУ) и Ивановского государственного университета (грант № 24-21-Д).

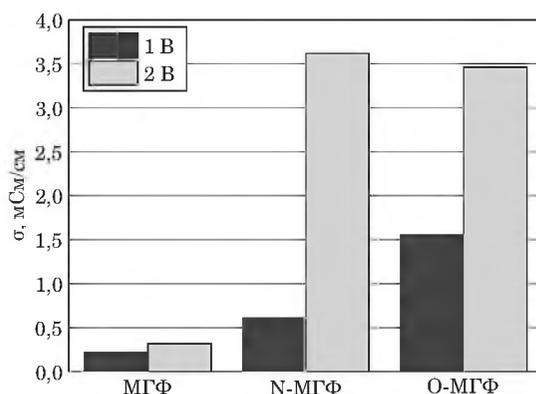


Рис. 5. Удельная электрическая проводимость σ систем на основе VM с добавкой 0,5 % масс. MGF, N-MGF и O-MGF (температура — 22 °C)

Fig. 5. Specific electrical conductivity of dispersions based on VM added with 0.5 wt. of MGF, N-MGF, O-MGF (temperature — 22°C)

Благодарности

Авторы выражают благодарность Д. Н. Столбову за предоставление для исследований образцов малослойных графитовых фрагментов.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Mustafa W., Dassenoy F., Sarno M., Senatore A.** A review on potentials and challenges of nanolubricants as promising lubricants for electric vehicles / *Lubrication Science*. 2022. Vol. 34. P. 1 – 29. DOI: 10.1002/lc.1568
2. **Farfan-Cabrera L. I.** Tribology of electric vehicles: A review of critical components, current state and future improvement trends / *Tribology International*. 2019. Vol. 138. P. 473 – 486. DOI: 10.1016/j.triboint.2019.06.029
3. **Karki A., Phuyal S., Tuladhar D., Basnet S., Shrestha B.** Status of pure electric vehicle power train technology and future prospects / *Appl. Syst. Innov.* 2020. Vol. 3. N 35. DOI: 10.3390/asi3030035
4. **He F., Xie G., Luo J.** Electrical bearing failures in electric vehicles / *Friction*. 2020. Vol. 8. N 1. P. 4 – 28. DOI: 10.1007/s40544-019-0356-5
5. **Holmberg K., Erdemir A.** The impact of tribology on energy use and CO₂ emission globally and in combustion engine and electric cars / *Tribol. Int.* 2019. Vol. 135. P. 389 – 396. DOI: 10.1016/j.triboint.2019.03.024

6. **Lugt P. M.** Modern advancements in lubricating grease technology / *Tribology International*. 2016. Vol. 97. P. 467 – 477. DOI: 10.1016/j.triboint.2016.01.045
7. **Мышкин Н. К., Кончиц В. В.** Граничная смазка электрических контактов / *Трение и износ*. 1980. Т. 1. № 3. С. 483 – 495.
8. **Suzumura J.** Prevention of electrical pitting on rolling bearings by electrically conductive grease / *QR of RTRI*. 2016. Vol. 57. N 1. P. 42 – 47. DOI: 10.2219/rtrriqr.57.1_42
9. **Dassenoy F.** Nanoparticles as additives for the development of high performance and environmentally friendly engine lubricants / *Tribology Online*. 2019. Vol. 14. N 5. P. 237 – 253. DOI: 10.2474/trol.14.237
10. **Мышкин Н., Кончиц В., Браунович М.** Электрические контакты. — Долгопрудный: Интеллект, 2008. — 560 с.
11. **Chen Y., Jha S., Raut A., Zhang W., Liang H.** Performance characteristics of lubricants in electric and hybrid vehicles: a review of current and future needs / *Frontiers in Mechanical Engineering*. 2020. Vol. 6. P. 571464. DOI: 10.3389/fmech.2020.571464
12. **Narita K., Takekawa D.** Lubricants technology applied to transmissions in hybrid electric vehicles and electric vehicles / *SAE Technical Paper*. 2019. N 01. P. 2338. DOI: 10.4271/2019-01-2338
13. **Строкова В. В., Фанина Е. А., Кальчев Д. Н.** Электропроводность и агрегация углеродных нанотрубок в гетерогенной системе / *Вестник ВГТУ*. 2017. № 8. С. 140 – 144. DOI: 10.12737/article_5968b451e2c695.06960306
14. **Christensen G., Yang J., Lou D., Hong G., Hong H., Tolle C., Widener C., Bailey C., Hrabe R., Younes H.** Carbon nanotubes grease with high electrical conductivity / *Synthetic Metals*. 2020. Vol. 268. P. 116496. DOI: 10.1016/j.synthmet.2020.116496
15. **Алексеев А. Н., Довгопола А. В., Ковалёв К. Н., Лазаренко М. М., Ткачев С. Ю.** Определение удельной электропроводности водных растворов электролитов / *Завод. лаб. Диагност. мат.* 2016. Т. 82. № 7. С. 40 – 42.
16. **Фанина Е. А., Лопанов А. Н.** Электропроводящие конструкционные материалы строительного назначения / *Вестник МГСУ*. 2009. № 4. С. 258 – 261.
17. **Черняк С. А., Столбов Д. Н., Маслаков К. И., Максимов С. В., Исайкина О. Я., Савилов С. В.** Влияние условий синтеза малослойных графитовых фрагментов на их морфологию, структуру и дефектность / *ЖФХ*. 2021. Т. 95. № 3. С. 452 – 458. DOI: 10.1134/S0036024421030109
18. **Stolbov D. N., Smirnova A. I., Savilov S. V., Shilov M. A., Burkov A. A., Parfenov A. S., Usol'tseva N. V.** Influence of different types of carbon nanoflakes on tribological and rheological properties of plastic lubricants / *Fullerenes, Nanotubes and Carbon Nanostructures*. 2022. Vol. 30. Issue 1. P. 177 – 184. DOI: 10.1080/1536383X.2021.1960315
19. **Парфенов А. С., Шилов М. А., Смирнова А. И., Берёзина Е. В., Ткачев А. Г., Бурков А. А., Рожкова Н. Н., 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. DOI: 10.32864/0202-4977-2021-42-3-338-349
3. **Karki A., Phuyal S., Tuladhar D., Basnet S., Shrestha B.** Status of pure electric vehicle power train technology and future prospects / *Appl. Syst. Innov.* 2020. Vol. 3. N 35. DOI: 10.3390/asi3030035
4. **He F., Xie G., Luo J.** Electrical bearing failures in electric vehicles / *Friction*. 2020. Vol. 8. N 1. P. 4 – 28. DOI: 10.1007/s40544-019-0356-5
5. **Holmberg K., Erdemir A.** The impact of tribology on energy use and CO₂ emission globally and in combustion engine and electric cars / *Tribol. Int.* 2019. Vol. 135. P. 389 – 396. DOI: 10.1016/j.triboint.2019.03.024
6. **Lugt P. M.** Modern advancements in lubricating grease technology / *Tribology International*. 2016. Vol. 97. P. 467 – 477. DOI: 10.1016/j.triboint.2016.01.045
7. **Myshkin N. K., Konchic V. V.** Boundary lubrication of electrical contacts / *Trenie i iznos*. 1980. Vol. 1. N 3. P. 483 – 495 [in Russian].
8. **Suzumura J.** Prevention of electrical pitting on rolling bearings by electrically conductive grease / *QR of RTRI*. 2016. Vol. 57. N 1. P. 42 – 47. DOI: 10.2219/rtrriqr.57.1_42
9. **Dassenoy F.** Nanoparticles as additives for the development of high performance and environmentally friendly engine lubricants / *Tribology Online*. 2019. Vol. 14. N 5. P. 237 – 253. DOI: 10.2474/trol.14.237
10. **Myshkin N., Konchic V., Brauнович M.** Electrical contacts. — Dolgoprudny: Intellect, 2008. — 560 p. [in Russian].
11. **Chen Y., Jha S., Raut A., Zhang W., Liang H.** Performance characteristics of lubricants in electric and hybrid vehicles: a review of current and future needs / *Frontiers in Mechanical Engineering*. 2020. Vol. 6. P. 571464. DOI: 10.3389/fmech.2020.571464
12. **Narita K., Takekawa D.** Lubricants technology applied to transmissions in hybrid electric vehicles and electric vehicles / *SAE Technical Paper*. 2019. N 01. P. 2338. DOI: 10.4271/2019-01-2338
13. **Strokova V. V., Fanina E. A., Kal'chev D. N.** Electrical conductivity and aggregation of carbon nanotubes in a heterogeneous system / *Vestn. BG TU*. 2017. N 8. P. 140 – 144 [in Russian]. DOI: 10.12737/article_5968b451e2c695.06960306
14. **Christensen G., Yang J., Lou D., Hong G., Hong H., Tolle C., Widener C., Bailey C., Hrabe R., Younes H.** Carbon nanotubes grease with high electrical conductivity / *Synthetic Metals*. 2020. Vol. 268. P. 116496. DOI: 10.1016/j.synthmet.2020.116496
15. **Alekseev A. N., Dvopgopola A. V., Kovalov K. M., Lazarenko M. M., Tkachev S. Yu.** Determination of the Specific Conductivity of Aqueous Electrolyte Solutions / *Zavod. Lab. Diagn. Mater.* 2016. Vol. 82. N 7. P. 40 – 42 [in Russian].
16. **Fanina E. A., Lopanov A. N.** Electrically conductive construction materials for building purposes / *Vestn. MGSU*. 2009. N 4. P. 258 – 261 [in Russian].
17. **Chernyak S. A., Stolbov D. N., Maslakov K. I., Maksimov S. V., Isaikina O. Ya., Savilov S. V.** Effect of Synthesis Conditions on Morphology, Structure, and Defectiveness of Few-Layer Graphene Nanoflakes / *Russian Journal of Physical Chemistry A*. 2021. Vol. 95. N 3. P. 558 – 564. DOI: 10.1134/S0036024421030109
18. **Stolbov D. N., Smirnova A. I., Savilov S. V., Shilov M. A., Burkov A. A., Parfenov A. S., Usol'tseva N. V.** Influence of different types of carbon nanoflakes on tribological and rheological properties of plastic lubricants / *Fullerenes, Nanotubes and Carbon Nanostructures*. 2022. Vol. 30. Issue 1. P. 177 – 184. DOI: 10.1080/1536383X.2021.1960315
19. **Parfenov A. S., Shilov M. A., Smirnova A. I., Berezi-na E. V., Tkachev A. G., Burkov A. A., Rozhkova N. N., Usol'tseva N. V.** Influence of various carbon allotropes on tribological and rheological characteristics of model lubricating systems / *Friction and Wear*. 2021. Vol. 42. N 3. P. 217 – 224. DOI: 10.3103/S1068366621030132

REFERENCES