

УДК 621.892

А. А. Гвоздев¹, А. И. Смирнова², Е. В. Березина³, А. В. Дунаев⁴, А. Г. Ткачев⁵, Н. В. Усольцева²

**ИССЛЕДОВАНИЕ ТРИБОТЕХНИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК
ПЕРСПЕКТИВНЫХ СМАЗОЧНЫХ МАТЕРИАЛОВ С УГЛЕРОДНЫМИ
НАНОЧАСТИЦАМИ**

¹Ивановская государственная сельскохозяйственная академия,
ул. Генерала Горбатова, д. 19, 153007 Иваново, Россия. E-mail: resurs1959@yandex.ru

²Ивановский государственный университет, НИИ Наноматериалов,
ул. Ермака, д. 39, 153025 Иваново, Россия. E-mail: nv_usoltseva@mail.ru

³Ивановский государственный университет, кафедра общей и теоретической физики,
ул. Ермака, д. 39, 153025 Иваново, Россия. E-mail: elena_berezina@mail.ru

⁴Федеральный научный агроинженерный центр ВИМ,
1-й Институтский проезд, д. 5, 109428 Москва, Россия. E-mail: dunaev135@mail.ru

⁵Тамбовский государственный технический университет
ул. Советская, д. 106, 392000 Тамбов, Россия. E-mail: nanotam@yandex.ru

Представлены результаты исследований влияния углеродных наночастиц (графена, одно- и многостенных нанотрубок, а также фуллерен-содержащих наноматериалов) на триботехнические характеристики промышленных пластичных смазок и моторных масел. Показано, что это влияние зависит не только от углеродных наночастиц, но и от базового материала, снижая или увеличивая момент сил трения. Введение наночастиц в пластичные смазки повышает предельную нагрузку до задира и позволяет использовать испытанные пластичные смазки с наночастицами избирательно, в зависимости от требований к узлам трения. Моторное масло с нанотрибосоставами, содержащими фуллерен, не оказывает заметного влияния на триботехнические свойства исследуемых систем.

Ключевые слова: триботехника, пластичная смазка, моторное масло, углеродные наночастицы, момент трения, коэффициент трения, износ.

DOI: 10.18083/LCAppl.2018.1.66

А. А. Гвоздев¹, А. И. Смирнова², Е. В. Бerezина³, А. В. Дунaeв⁴, А. Г. Tkachev⁵, N. V. Usol'tseva²

TRIBOTECHNICAL CHARACTERISTICS OF PROMISSING LUBRICANTS WITH CARBON NANOPARTICLES

¹Ivanovo State Agricultural Academy,

19 General Gorbатов St., Ivanovo, 153007, Russia. E-mail: resurs1959@yandex.ru

²Nanomaterials Research Institute, Ivanovo State University,

39 Ermak St., Ivanovo, 153025, Russia. E-mail: nv_usoltseva@mail.ru

³Department of General and Theoretical Physics, Ivanovo State University,

39 Ermak St., Ivanovo, 153025, Russia

⁴Federal State Budgetary Scientific Institution «Federal Scientific Agroengineering Center VIM»,

1st Institutskij pr., 5, Moscow, 109428, Russia

⁵Tambov State Technical University, 106 Sovetskaya St., Tambov, 392000, Russia

The effect of carbon nanoparticles (graphene, single-walled and multi-walled carbon nanotubes and fullerene-containing nanomaterials) on tribological characteristics of industrial greases and motor oils is studied and the obtained results are discussed. It is shown that this effect depends not only on the carbon nanoparticle nature but also on the base material, reducing or increasing the frictional moment. The introduction of nanoparticles into industrial greases increases the limiting load of seizure and allows to use the tested greases doped with nanoparticles selectively depending on the requirements applied to a tribotechnical system. An engine oil with nanotribological compositions containing fullerene do not influence on the tribotechnical properties of the studied systems.

Key words: tribology, grease, motor oil, carbon nanoparticles, frictional moment, friction coefficient, wear.

Введение

Теория и практика оптимизации триботехнических процессов привлекают все большее внимание как объекты междисциплинарных исследований, результаты которых оказывают серьезное влияние на мировую экономику. Так, показано, что обеспечение адекватных для уменьшения износа смазочных процессов экономит от 1,0 до 1,4 % валового национального продукта развитых стран [1].

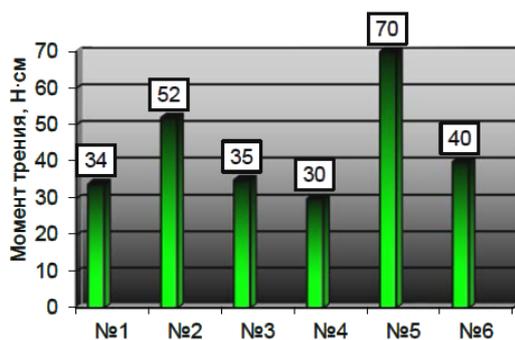
Приповерхностный слой смазочного материала, ориентированный силовым полем поверхностей трения, в поверхностно-ориентированных слоях образует эпитропную мезофазу [2], способствующую оптимизации процессов трения и износа. Это одна из причин пристального внимания к присадкам, смазкам и смазочно-охлаждающим технологическим средствам, направленным на их модификацию. Ранее для такой модификации проводился широкий круг исследований по включению мезогенных присадок к смазочным композициям. Рассматривались трибологические свойства технических масел с добавками каламитных мезо-

генов [3], в том числе изучалась зависимость их влияния как от химической структуры мезогена, так и типа формируемой мезофазы [4, 5]. Большое число исследований было посвящено изучению присадок холестерического типа, а также мезогенов с дискоидальной формой молекул [6, 7]. А выявленная в последние годы мезогенность углеродных нанотрубок [8] расширяет поиск новых наноматериалов в качестве присадок или добавок к техническим маслам и пластичным смазкам [9–11].

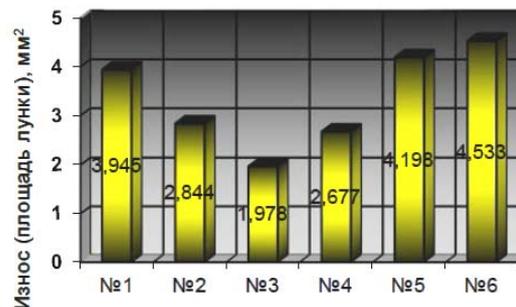
Целью настоящей работы было исследование возможности улучшения триботехнических характеристик серийно выпускаемых пластичных смазок и масел путем введения углеродных наноматериалов. Мотивацией такой постановки исследований явилось то, что углеродные наноматериалы обладают хорошей теплопроводностью (что может способствовать понижению температуры в зоне трибосопряжения), а также высокой механической и химической устойчивостью, что вероятно, даст синергетический эффект со смазочными материалами.

Результаты и обсуждение

На первом этапе исследований на машине трения 2070 СМТ-1 по схеме «ролик–ролик» были испытаны два отечественных и четыре зарубежных серийных смазочных материала. Результаты их испытаний показали, что смазки, проявляющие



a



b

Рис. 1. Момент трения (*a*) и износ (*b*) пары «ролик–ролик» в следующих смазочных материалах:

№ 1 – Rowe GREASEGUARD EP2 (1), № 2 – Rowe GREASEGUARD ALLTEMP-2 (2),
 № 3 – Claas AGRIGREASE EP2 (3), № 4 – «Газпромнефть» LX EP2 (4), № 5 – «Литол-24» (5), № 6 – Jd premium (6)

Fig. 1. Frictional moment (*a*) and wear (*b*) of the «roller–roller» friction pair in the following lubricants:

№ 1 – Rowe GREASEGUARD EP2 (1), № 2 – Rowe GREASEGUARD ALLTEMP-2 (2),
 № 3 – Claas AGRIGREASE EP2 (3), № 4 – «Gazpromneft» LX EP2 (4), № 5 – «Litol-24» (5), № 6 – JD premium (6)

Вывод сделан не только по моменту сил трения, но и по величине износа. В том числе широко применяемая в практике технического обслуживания машин смазка «Литол-24» (рис. 1, № 5) уже не отвечает возросшим современным требованиям и необходима ее замена или совершенствование. Хорошей альтернативой «Литолу-24» из испытанных нами отечественных и зарубежных аналогов может быть смазка производства «Газпромнефть» LX EP2 (рис. 1, № 4), содержащая новый пакет противоизносных, противоокислительных и загущающих присадок и обеспечивающая незначительный износ и минимальный момент сил трения.

В ходе следующего этапа исследований на универсальной машине трения МТУ-01 (ТУ 4271-001-29034600-2004) были изучены триботехнические характеристики композиций трех промышленных пластичных смазок: Claas AGRIGREASE EP2 (3), «Газпромнефть» LX EP2 (4) и «Литол-24» (5), содержащих 0,5 мас. % углеродных наночастиц различного строения: графена

меньшее значение силы трения, характеризуются увеличением износа и наоборот (рис. 1). Как видно из данных этого рисунка, не все представленные отечественные и зарубежные смазочные материалы обеспечивают высокую работоспособность узлов трения.

(графен многослойный окисленный, производства «ТТПН» ТГТУ и ООО «НаноТехЦентр», г. Тамбов), одностенных (SWNT) и многостенных (MWNT) углеродных нанотрубок производства фирмы *Arry GmbH Germany*.

Было установлено, что влияние углеродных наночастиц при концентрации 0,5 мас. % существенно зависит не только от их типа, но и от используемого смазочного материала, как снижая (смазка 3), так и увеличивая (смазки 4 и 5) силу трения. Тем не менее для всех испытанных составов введение наночастиц повышало предельную нагрузку до задира (рис. 2).

Наряду с пластичными смазками было проанализировано влияние введения углеродных наночастиц на триботехнические характеристики моторного масла М10-Г_{2К} (Новокуйбышевский завод масел и присадок). В качестве присадок испытаны углеродные нанокластеры от ЗАО «ИЛИП» (СПб) – разработчика фуллереновой продукции с высокими показателями чистоты:

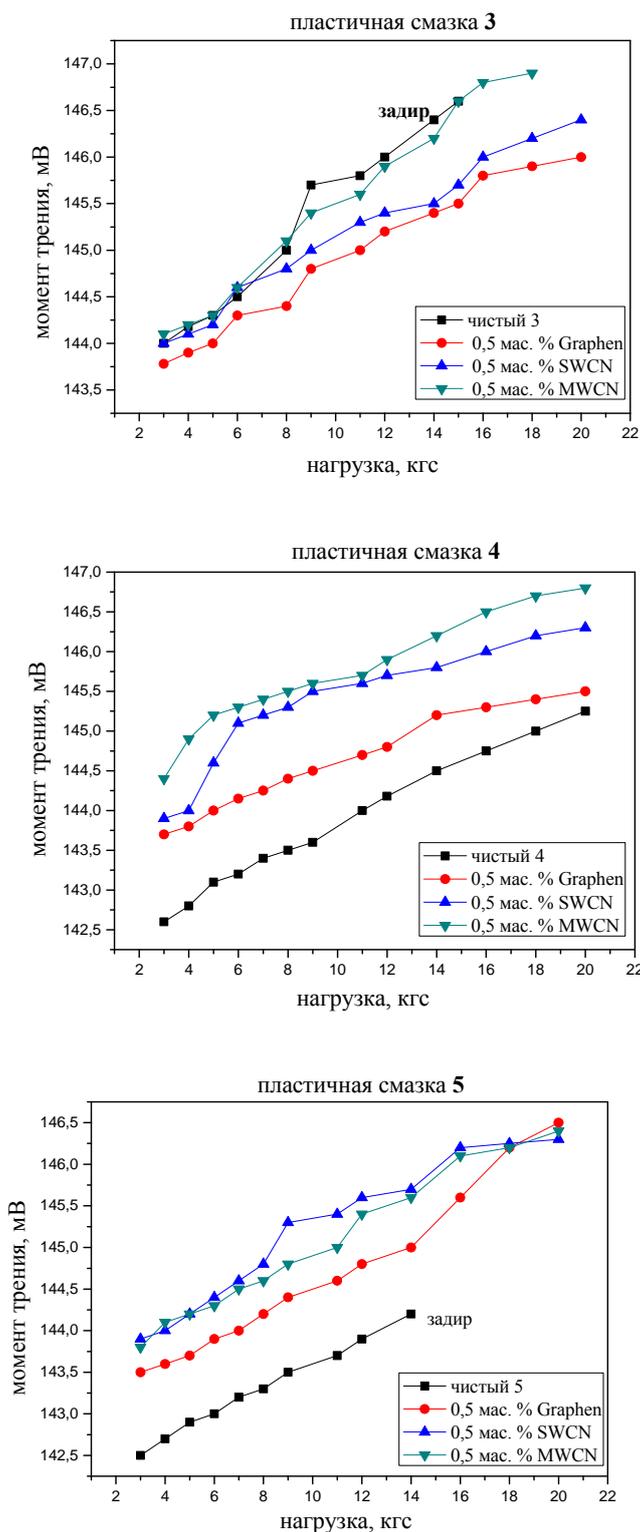
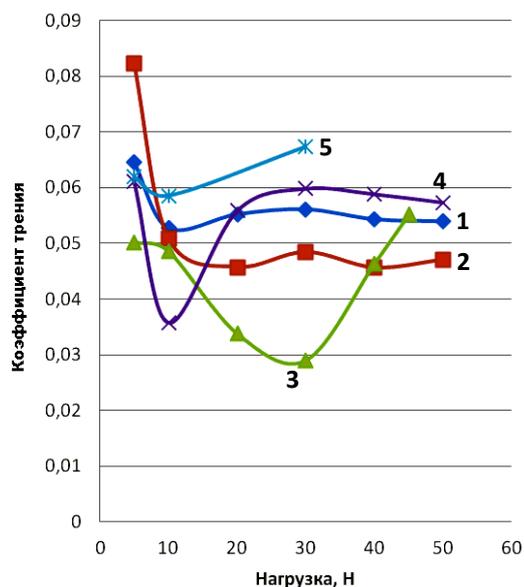


Рис. 2. Зависимости момента трения от нагрузки для пластичных смазок 3, 4, 5 и их композиций с углеродными наночастицами

Fig. 2. Dependences of the frictional moment on the load for the greases 3, 4, 5 and their compositions with carbon nanoparticles

фуллереновой сажи с содержанием фуллеренов не менее 10 %; смеси фуллеренов; фуллерена C_{60} с чистотой от 99 до 99,9 мас. %. По данным разработчика, фуллереновые материалы безопасны (не более взрыво-, пожаро- или токсикоопасны, чем графит) и при испытаниях особых мер безопасности не требуют.

Фуллереновую сажу вводили дважды до избытка, а фуллерен C_{60} ввели один раз. Условно названная растворимость фуллеренов (а скорее, концентрация по седиментационной устойчивости масляной суспензии) зависит от растворителя, температуры и составляет 20–40 мг на литр масла. Поэтому в моторное масло можно вводить от 0,005 до 0,1 мас. % фуллеренов.



В испытаниях стальной пары «палец–диск» в масле М-10Г_{2к} на трибометре *TRB-S-DE* Швейцарской фирмы *CSM Instruments* в режиме ступенчатого нагружения каждый этап занимал от 500–1500 сек до 25 мин, что было достаточно для турбулизации масла и достижения стабильного коэффициента трения. Результаты первых испытаний приведены на рис. 3.

Фуллереновая сажа в масле растворялась полностью и поэтому, даже введенная в масло дважды, не дала значительных результатов. А фуллерен C_{60} в концентрации 0,1 мас. % значительно уменьшил коэффициент трения. Но из-за большой плотности его частицы при центрифугировании оседали на стенку чаши трибометра, вращавшейся со скоростью 300–330 мин⁻¹, а после остановки – частицы осаждались.

Рис. 3. Коэффициенты трения пары «палец–диск» с фуллерен-содержащими нанопорошками:

- 1 – Масло М10-Г_{2к} 15,88 г + 0,068 г фуллереновой сажи
- 2 – Масло М10-Г_{2к} 17,93 г + 3,89 г смеси (1)
- 3 – Масло М10-Г_{2к} 15,68 г + 0,015 г фуллерена C_{60}
- 4 – Масло М10-Г_{2к} 15,38 г + 0,022 г фуллерена C_{60}
- 5 – Масло М10-Г_{2к} 15,38 г + 0,007 г фуллерена C_{60}

Fig. 3. Friction coefficients of the «finger–disk» friction pair obtained using fullerene-containing nanopowders:

- 1 – Oil M10-G_{2k} 15.88 g + 0.068 g of fullerene soot
- 2 – Oil M10-G_{2k} 17.93 g + 3.89 g of mixture (1)
- 3 – Oil M10-G_{2k} 15.68 g + 0.015 g of fullerene C_{60}
- 4 – Oil M10-G_{2k} 15.38 g + 0.022 g of fullerene C_{60}
- 5 – Oil M10-G_{2k} 15.38 g + 0.007 g of fullerene C_{60}

Свежеприготовленные ЗАО «ИЛИП» композиции фуллерен-содержащей сажи, фуллерена C_{60} , смеси фуллеренов и фуллеренола в масле М-10Г_{2к} при повторных испытаниях (рис. 4) не показали заметного влияния на триботехнические свойства систем. Так, коэффициент трения при небольших нагрузках (до 88 МПа) был снижен на 0,02–0,04 только высококонцентрированными смазочными композициями, содержащими фуллерен C_{60} или смеси фуллеренов, но они не повысили нагрузочную способность масла М-10Г_{2к}. Следует отметить, что в аналогичных испытаниях соли

сульфокислот лития, магния, алюминия и индия позволяли создавать в трибопаре нагрузку до 212 МПа [12].

Таким образом, испытания масляных нанотрибосоставов на основе масла и наночастиц от ЗАО «ИЛИП» не дали оснований считать их перспективными трибоматериалами. Кроме того, фуллерены в моторных маслах седиментационно не устойчивы. Это согласуется с данными о невысоких триботехнических свойствах фуллеренов, полученными в НИИ СО РАН [12].

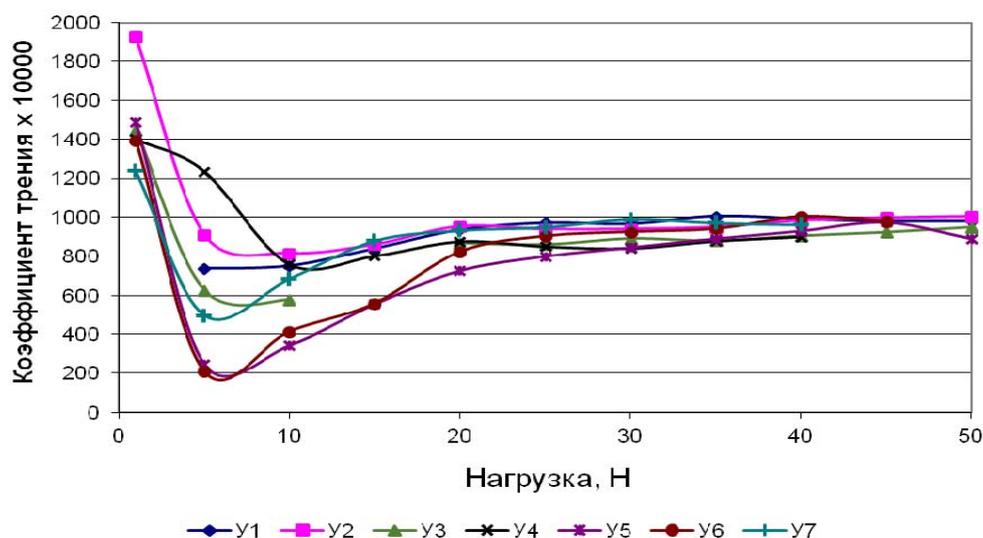


Рис. 4. Коэффициенты трения пары «палец–диск» в масле М-10Г_{2К} с углерод-содержащими нанодобавками: У1 – чистое масло М-10Г_{2К}; У2–У7 – масло с содержанием в его 45 мл углерод-содержащих нанодобавок: У2 – 30 мг смеси фуллеренов, У3 – 60 мг, У4 – 90 мг; У5 – 90 мг фуллерена С₆₀; У6 – 30 мг смеси фуллеренолов; У7 – 90 мг фуллерен-содержащей сажи

Fig. 4. Friction coefficients of the «finger–disk» friction pair obtained for the industrial oil M-10G_{2K} doped with carbon-containing nanoadditives: У1 – pure oil M-10G_{2K}; У2–У7 – the oil M-10G_{2K} containing carbon nanoadditives (45 ml of M-10G_{2K} oil contains: У2 – 30 mg, У3 – 60 mg, У4 – 90 mg of a mixture of fullerenes; У5 – 90 mg of fullerene C₆₀; У6 – 30 mg of a mixture of fullerenoils; У7 – 90 mg of fullerene-containing soot)

Заключение

Сопоставлены триботехнические характеристики пяти серийно выпускаемых пластичных смазок. Из серии испытанных нами отечественных аналогов зарубежных смазок может быть рекомендована смазка производства «Газпромнефть» LX EP2. Показано, что эффект введения углеродных наночастиц существенно зависит от типа смазки, как улучшая, так и ухудшая триботехнические показатели. В то же время на всех исследованных образцах при введении углеродных наночастиц получено увеличение нагрузки до задира, независимо от типа смазки-матрицы. Таким образом, полученные результаты позволяют использовать введение углеродных наночастиц в серийные пластичные смазки избирательно, в зависимости от требований к узлам трения. Вместе с тем требуются дальнейшие исследования для обоснования оптимальной концентрации новых добавок в перспективные пластичные смазки. Масляные нанотрибосоставы, содержавшие фуллерен, по результатам проведенных экспериментов, не проявили существенного отличия от свойств базового масла.

Работа поддержана программой Минобрнауки РФ «Наука будущего» (Грант Ивановскому государственному университету № 16.1037.2017/4.6).

Список литературы / References

1. Minami J. Ionic liquids in tribology. *Molecules*, 2009, **14** (6), 2286–2305. DOI: 10.3390/molecules14062286.
2. Usol'tseva N.V., Godlevsky V.A. Nanomaterials in tribological processes. *Proceedings of International scientific and technical Conference named after Leonardo da Vinci*. Berlin : Wissenschaftliche Welt e.V., 2013, (1), 227–233.
3. Bermudes M.-D., Martinez-Nicolas G., Carrion-Vilches F.-J. Tribological properties of liquid crystals as lubricant additives. *Wear*, 1997, **212** (2), 188–194. DOI: 10.1016/S0043-1648(97)00152-X.
4. Mori S., Iwata H. Relationship between tribological performance of liquid crystals and their molecular structure. *Tribology International*, 1996, **29** (1), 35–39. DOI: 10.1016/0301-679X(95)00032-Y.
5. Carrion F.-J., Martines-Nicolas G., Iglesias P., Sanes J., Bermudes M.-D. Liquid Crystals in Tribology. *Int. J. Mol. Sci.*, 2009, **10** (9), 4102–4115. DOI: 10.3390/ijms10094102.

6. Ермаков С. Ф. Трибология жидкокристаллических материалов и систем. Минск : Беларус. Навука, 2011. 380 с. [Ermakov S.F. Tribology of mesomorphic materials and systems. Minsk : Belarus. Science, 2011, 380 p. (in Russ.).]
7. Усольцева Н. В., Акопова О. Б., Быкова В. В. Физико-химические свойства дискотических мезогенов, определяющие их использование // *Жидкие кристаллы: дискотические мезогены* / под ред. Н. В. Усольцевой. Иваново : Иван. гос. ун-т, 2004. Гл. 6. С. 490–540. [Usol'tseva N.V., Akopova O.B., Bykova V.V. Physico-chemical properties of discotic mesogens, determining their application. *Liquid Crystals: Discotic mesogens* / Ed. N.V. Usol'tseva. Ivanovo : IvSU, 2004, Ch. 6, 575–572 (in Russ.).]
8. Сонин А. С., Чурочкина Н. А., Казначеев А. В., Голованов А. В. Жидкие кристаллы соединений углерода // *Жидк. крист. и их практич. использ.*, 2017, Т. 17, № 3. С. 5–28. [Sonin A.S., Churochkina N.A., Kaznacheev A.V., Golovanov A.V. Liquid crystals of carbon compounds. *Liq. Cryst. and their Appl.*, 2017, **17** (3), 5–28. (in Russ.).]
DOI: 10.18083/LCAppl.2017.3.5].
9. Usol'tseva N.V., Smirnova M.V., Kazak A.V., Smirnova A.I., Bumbina N.V., Il'in S.O., Rozhkova N.N. Rheological Characteristics of Different Carbon Nanoparticles in Cholesteric Mesogen Dispersions as Lubricant Coolant Additives. *J. Friction and Wear*, 2015, **36** (5), 380–385.
DOI: 10.3103/S1068366615050165.
10. Mungse H.P., Khatri O.P. Chemically Functionalized Reduced Graphene Oxide as Novel Material for Reduction of Friction and Wear. *J. Phys. Chem. C*, 2014, **118** (26), 14394–14402. **DOI:** 10.1021/jp5033614.
11. Ding Y., Xu B., Guo R., Shen M. The preparation of silver sulfide nanoparticles in lamellar liquid crystal and application to lubrication. *Materials Research Bulletin*, 2005, **40** (4), 575–582.
DOI: 10.1016/j.materresbull.2005.02.001.
12. Дунаев А. В., Филиппова Е. М. Нетрадиционная триботехника для повышения ресурса автотракторной техники: Итоги 25-летнего развития. М. : ГОСНИТИ, 2017. 256 с. [Dunaev A.V., Filippova E.M. Unconventional tribology for improving resource automotive engineering: The results of 25 years of development. М. : GOSNITI, 2017, 256 p. (in Russ.).]

Поступила в редакцию 12.11.2017 г.
Received 12 November 2017