ЧЕБЫШЕВСКИЙ СБОРНИК

Том 22. Выпуск 1.

УДК 621.785.539

DOI 10.22405/2226-8383-2021-22-1-378-389

Математические закономерности процесса трения скольжения пористого материала на основе железа, пропитанного смазочным маслом с дисперсными частицами фторированного графена¹

А. Д. Бреки, С. Г. Чулкин, Н. М. Добровольский, О. В. Кузовлева,
А. Е. Гвоздев, Е. В. Мазин

Александр Джалюльевич Бреки — кандидат технических наук, доцент, Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, Институт проблем машиноведения РАН (г. Санкт-Петербург).

e-mail: albreki@yandex.ru

Сергей Георгиевич Чулкин — доктор технических наук, профессор, Санкт-Петербургский государственный морской технический университет (г. Санкт-Петербург).

e-mail: sergej.chulkin@yandex.ru

Николай Михайлович Добровольский — доктор физико-математических наук, профессор, Тульский государственный педагогический университет им. Л.Н. Толстого (г. Тула).

Ольга Владимировна Кузовлева — кандидат технических наук, доцент, Российский государственный университет правосудия (г. Москва).

e-mail: kusovleva@yandex.ru

Александр Евгеньевич Гвоздев — доктор технических наук, профессор, Тульский государственный педагогический университет им. Л.Н. Толстого (г. Тула).

e-mail: gwozdew.alexandr2013@yandex.ru

Евгений Владимирович Мазин — ООО НПО «Графеновые материалы» (г. Санкт-Петербург).

e-mail: mazinev@mail.ru

Аннотация

В работе приведены результаты исследования процесса трения скольжения пористого материала на основе железа, пропитанного смазочным маслом с дисперсными частицами фторированного графена. Установлено, что закономерности кинетики внешнего трения скольжения имеют сигмоидальный и сигмоидально-линейный характер. Получены экспериментальные результаты, показывающие, что с увеличением концентрации агрегатов из чешуек фторированного графена в смазочном масле средняя сила и коэффициент трения снижаются, при этом наблюдается хороший антифрикционный эффект.

Ключевые слова: закономерности трения, математические закономерности, пористый материал, смазочная композиция, трение, фторированный графен.

Библиография: 23 названия.

Для цитирования:

А. Д. Бреки, С. Г. Чулкин, Н. М. Добровольский, О. В. Кузовлева, А. Е. Гвоздев, Е. В. Мазин. Математические закономерности процесса трения скольжения пористого материала на основе железа, пропитанного смазочным маслом с дисперсными частицами фторированного графена // Чебышевский сборник, 2021, т. 22, вып. 1, с. 378–389.

¹Исследование выполнено при финансовой поддержке Минобрнауки России в рамках реализации программы Научного центра мирового уровня по направлению "Передовые цифровые технологии" СПбПУ (соглашение от 17.11.2020 № 075-15-2020-934).

CHEBYSHEVSKII SBORNIK

Vol. 22. No. 1.

UDC 621.785.539

DOI 10.22405/2226-8383-2021-22-1-378-389

Mathematical regularities of the sliding friction process of a porous material based on iron impregnated with lubricating oil with dispersed particles of fluorinated graphene

A. D. Breki, S. G. Chulkin, N. M. Dobrovolsky, O. V. Kuzovleva, A. E. Gvozdev, E. V. Mazin

Alexander Dzhalyulyevich Breki — candidate of technical sciences, associate professor, Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University, Institute of Problems of Machine Science of the Russian Academy of Sciences (Saint Petersburg).

e-mail: albreki@yandex.ru

Sergey Georgievich Chulkin — doctor of technical Sciences, Professor, Saint Petersburg state marine technical University (Saint Petersburg).

e-mail: sergej.chulkin@yandex.ru

Nikolay Mikhaylovich Dobrovolsky — doctor of physical and mathematical Sciences, Professor, Professor, Tula state pedagogical University, Russia. L. N. Tolstoy (Tula).

Olga Vladimirovna Kuzovleva — candidate of technical Sciences, docent, docent, Russian State University of justice (Moscow).

e-mail: kusovleva@yandex.ru

Alexandr Evgenyevich Gvozdev — doctor of engineering, Professor, Professor, Tula state pedagogical University L.N. Tolstoy (Tula).

e-mail: gvozdev.alexandr2013@yandex.ru

Evgeny Vladimirovich Mazin — LLC NPO «Graphene materials» (Saint Petersburg).

e-mail: mazinev@mail.ru

Abstract

The paper presents the results of a study of the sliding friction process of a porous material based on iron impregnated with lubricating oil with dispersed particles of fluorinated graphene. It is established that the regularities of the kinetics of external sliding friction have a sigmoidal and sigmoidal-linear character. Experimental results have been obtained showing that with an increase in the concentration of aggregates from flakes of fluorinated graphene in the lubricating oil, the average force and coefficient of friction decrease, while a good anti-friction effect is observed.

Keywords: friction regularities, mathematical regularities, porous material, lubricant composition, friction, fluorinated graphene.

Bibliography: 23 titles.

For citation:

A. D. Breki, S. G. Chulkin, N. M. Dobrovolsky, O. V. Kuzovleva, A. E. Gvozdev, E. V. Mazin, 2021, "Mathematical regularities of the sliding friction process of a porous material based on iron impregnated with lubricating oil with dispersed particles of fluorinated graphene", *Chebyshevskii sbornik*, vol. 22, no. 1, pp. 378–389.

1. Введение

В различных областях промышленности для снижения энергетических потерь на трение и повышения работоспособности и долговечности трибосопряжений широко применяется целый ряд смазочных композиций на основе смазочных масел, содержащих присадки конкретного функционального назначения, в том числе [1]: кондиционеры металлов, реметаллизанты (восстановители) твёрдые смазочные материалы и т.п. Множество смазочных композиций постоянно увеличивается за счёт разработки новых составов, содержащих металлы, бинарные сплавы и химические соединения.

В 2010 г. А. Гейм и К. Новоселов получили Нобелевскую премию за открытие графена [2]. Графен — это слой углерода толщиной в один атом, состоящий из конденсированных шестичленных колец, атомы углерода в графене соединены sp^2 -связями в гексагональную двумерную решетку [3, 4]. Различные научные исследования показали, что однослойный графен обладает особым комплексом электрофизических, механических, оптических и тепловых свойств [4, 5, 6]. С другой стороны, появляются исследования как в области физики: «квантовое трение и графен» [7], так в области машиностроения [8, 9], в которых рассматриваются трибологические свойства графена. Антифрикционные свойства графена при трении стальных поверхностей показаны в работе [10]. Также графен исследуется как элемент жидких смазочных композиций [8, 11]. Это является актуальным в современных условиях функционирования техники.

При создании порошкообразного графена, в силу высокой поверхностной энергии однослойные чешуйки графена соединяются и образуют агрегаты различных размеров и формы, которые легко разрушаются при внешнем воздействии. Исследований жидких смазочных композиций, состоящих из современных смазочных масел, содержащих агрегаты графена в настоящее время мало. В связи с этим в данной работе реализовано исследование влияния агрегатов фторированного графена на трение пористых тел из железа, пропитанных смазочным маслом.

2. Материалы и методика исследования

В качестве дисперсионной среды для создания смазочных композиций с высокодисперсными агрегатами фторированного графена использовали базовое смазочное масло марки Kluber Constant GLY 2100.

Технические характеристики выбранного смазочного масла приведены в таблице 1.

Таблица 1: Технические характеристики базового масла

№	Технические характеристики изделия	CONSTANT GLY 2100
1.	Цвет	Светло-коричневый
2.	Структура	Гомогенное высоко-вязкозное
3.	Температурный диапазон использования, ° C	–40, +140
4.	Плотность при 20° C, г/мл	0,84
5.	Показатель преломления при 20° C	1,464
6.	Кинематическая вязкость при 40° C / мм/с ²	55
7.	Кинематическая вязкость при 100° C / мм/с ²	9

В качестве наполнителя для данного смазочного масла использовали высокодисперсные агрегаты из чешуек фторированного графена, произведённого в ООО НПО «Графеновые материалы» (рис. 1).

Рис. 1: Деформированные (снятые) чешуйки фторированного графена

Предварительно был проведён анализ исследуемой порошкообразной добавки. Спектры комбинационного рассеивания были записаны при комнатной температуре, в качестве источника монохроматического излучения использовался аргоновый лазер (514,5 нм, с мощностью 30 мВт).

Спектр комбинационного рассеяния графеновых агрегатов, представленных на рис. 2, показывают наличие пика при 1580 см^{-1} (графитовая G-линия), а так же характерный для графена симметричный пик при 2687 см^{-1} (2D линия). Высокое отношение IG/I2D свидетельствует о многослойности графена. Наличие пика с высокой интенсивностью при 1350 см^{-1} (D-линия), подтверждает присутствие дефектов (относится к неупорядоченным дезориентированным графитовым слоям) [12].

Рис. 2: Спектр КР графеновых агрегатов

Таким образом, углеродный продукт представляет собой многослойные графеновые агрегаты (дефектные слои).

Образцы для пропитки смазочной композицией с агрегатами фторированного графена были получены прессованием из химически чистого порошка железа (углерод — 0,001-0,02%,

окислы — 0,1-0,2%, железо — основа) марки АНС100.29 с размерами частиц 45-212 мкм. Пористость образцов составляла 30%. Геометрические размеры образцов прямоугольной формы составляли $10,5 \times 6 \times 3$ мм. Перед испытаниями чистые образцы погружались в базовое масло и смазочные композиции с концентрацией 0,01 и 0,1% по массе фторированного графена на 10 суток для пропитки.

Для реализации сравнительного исследования антифрикционных свойств пропитанных образцов, в условиях трения скольжения по круговой траектории по схеме «ролик – плоскость» была использована универсальная машина трения модели ИИ 5018 для получения математических зависимостей сил и коэффициентов трения.

Подвижный образец (ролик) состоял из стали ШХ15, пропитанные образцы были жёстко фиксированы и неподвижны в процессе трения. Трущиеся образцы предварительно приводились в контактное взаимодействие. Смазывание трибосистемы в процессе трения реализовывалось за счёт выдавливания смазочной композиции из пропитанного образца. Контактное взаимодействие подвижного и неподвижного образцов реализовывалось с нормальной силой $N = 40$ Н. Частота вращения подвижного образца составляла $n = 300$ мин⁻¹. Диаметр ролика (подвижного образца) составлял 50 мм. Время одного полного испытания составляло 10 минут. Пропитанные образцы прижимались к ролику стороной с площадью 18 мм².

При проведении статистических оценок и анализе экспериментальных данных применены авторские разработки [1, 13], а также псевдо-случайный поиск, основанный на использовании различных теоретико-числовых сеток [20, 21, 22], применение, которых показало свою эффективность при обработке геофизических данных [23].

3. Результаты исследований и их обсуждение

Графики зависимости силы трения от времени для образцов, пропитанных базовым смазочным маслом, не содержащим агрегатов деформированных чешуек фторированного графена, показаны на рис. 3.

Рис. 3: Зависимости от времени для базового масла: а) силы трения скольжения; б) средней силы трения скольжения

Представленная на рис. 3 б зависимость средней силы трения от времени аналитически выражается следующим образом:

$$F_f(t) = \frac{0,039t + 27}{1 + \exp(-0,3(t - 8))} - \frac{0,039t - 10}{1 + \exp(-0,3(t - 250))}, \quad (1)$$

где F_f — средняя сила трения, t — время. Средняя сила трения за некоторый интервал времени определяется по формуле:

$$F_f = \frac{\int_{t_0}^{t_k} F_f(t) dt}{t_k - t_0} = \frac{I_f}{\Delta t_f}, \quad (2)$$

где I_f — импульс силы трения за интервал времени длиной Δt_f , t_0, t_k — начальная и конечная точки интервала времени.

Соответственно средняя сила трения за весь интервал времени трения равна:

$$F_f = \frac{\int_0^{600} \left(\frac{0,039t + 27}{1 + \exp(-0,3(t - 8))} - \frac{0,039t - 10}{1 + \exp(-0,3(t - 250))} \right) dt}{600c} = \frac{20694Hc}{600c} \approx 34,5H. \quad (3)$$

Средний коэффициент трения в этом случае равен:

$$f = \frac{\int_{t_0}^{t_k} F_f(t) dt}{N(t_k - t_0)} = \frac{I_f}{N \Delta t_f} = \frac{34,5H}{40H} \approx 0,86, \quad (4)$$

где N — фиксированная нормальная нагрузка.

Графики зависимости силы трения от времени для образцов, пропитанных базовым смазочным маслом, содержащем 0,01% порошка фторированного графена, показаны на рис. 4.

Рис. 4: Зависимости от времени для масла с 0,01% графена: а) силы трения скольжения; б) средней силы трения скольжения

Представленная на рис. 4 b зависимость средней силы трения от времени при использовании масла, содержащего 0,01% порошка фторированного графена, аналитически выражается следующим образом:

$$F_f(t) = \frac{25}{1 + \exp(-0,35(t - 5))} - \frac{1,5}{1 + \exp(-0,35(t - 35))}. \quad (5)$$

Соответственно средняя сила трения за весь интервал времени трения равна:

$$F_f = \frac{\int_0^{600} \left(\frac{25}{1 + \exp(-0,35(t-5))} - \frac{1,5}{1 + \exp(-0,35(t-35))} \right) dt}{600c} = \frac{14016Hc}{600c} \approx 23,4H. \quad (6)$$

Средний коэффициент трения в этом случае равен:

$$f = \frac{I_f}{N \Delta t_f} = \frac{23,4H}{40H} \approx 0,58. \quad (7)$$

Графики зависимости силы трения от времени для образцов, пропитанных базовым смазочным маслом, содержащем 0,1% порошка фторированного графена, показаны на рис. 5.

Рис. 5: Зависимости от времени для масла с 0,1% графена: а) силы трения скольжения; б) средней силы трения скольжения

Представленная на рис. 5 б зависимость средней силы трения от времени при использовании масла, содержащего 0,1% порошка фторированного графена, аналитически выражается следующим образом:

$$F_f(t) = \frac{22,5}{1 + \exp(-0,21(t-10))} - \frac{0,8}{1 + \exp(-0,35(t-55))} + \frac{0,019t - 7}{1 + \exp(-0,35(t-370))} \quad (8)$$

Соответственно средняя сила трения за весь интервал времени трения равна:

$$F_f = \frac{\int_0^{600} \left(\frac{22,5}{1 + \exp(-0,21(t-10))} - \frac{0,8}{1 + \exp(-0,35(t-55))} + \frac{0,019t - 7}{1 + \exp(-0,35(t-370))} \right) dt}{600c} = \frac{13335,8HC}{600c} \approx 22H \quad (9)$$

Средний коэффициент трения в этом случае равен:

$$f = \frac{I_f}{N \Delta t_f} = \frac{22H}{40H} \approx 0,55. \quad (10)$$

Аппроксимация и анализ экспериментальных данных осуществлялись по аналогии с работами [13, 14, 15, 16, 17, 18, 19].

При анализе смазочного действия смазочной композиции следует отметить следующее:

1. При создании смазочной композиции полярно-активные молекулы масла адсорбируются на агрегаты из чешуек фторированного графена (рис. 6 *a*).

Рис. 6: Схематическое представление адсорбции полярно-активных молекул масла (1): а) между чешуйками (2) и на поверхности (3) агрегата графена; б) на поверхности поры

2. В процессе пропитки в поры проникают агрегаты фторированного графена с адсорбированными на них полярно-активными молекулами масла, часть которых адсорбируется на поверхность внутри пор (рис. 6 *b*).
3. При контактном взаимодействии пропитанного образца с цилиндром происходит выдавливание смазочной композиции с агрегатами графена, в результате чего происходит взаимодействие полярно-активных веществ адсорбированных на поверхности графена с поверхностью цилиндра (рис. 7).

Рис. 7: Схематическое представление взаимодействия агрегата графена с поверхностью твёрдого тела через слой полярно-активных молекул смазочного масла

4. При относительном перемещении трущихся тел трение снижается, с одной стороны, за счёт наличия полярно-активных молекул масла, а с другой стороны, за счёт слабых связей между чешуйками агрегатов фторированного графена.
5. В процессе изнашивания, наряду с частицами износа в зону трения попадают частицы графена, обладающие антифрикционным действием. В связи с этим, смазочные композиции снижают трение лучше, чем базовое смазочное масло.

6. Повышение концентрации в масле агрегатов фторированного графена не приводит к существенному снижению трения относительно меньшей концентрации, что может быть связано с выдавливанием из пор относительно равных объемов смазочного вещества в зону трения, с учётом повышения вязкости [19].

4. Выводы

На основе проведённого исследования трения скольжения пористого материала на основе железа, пропитанного смазочным маслом с дисперсными частицами фторированного графена, можно сделать следующие основные выводы:

1. Установлено, что кинетические закономерности характеристик процесса внешнего трения скольжения пористого материала на основе железа, пропитанного смазочным маслом с дисперсными частицами фторированного графена по поверхности цилиндра из стали ШХ15 имеют сигмоидальный и сигмоидально-линейный характер.
2. Показано, что с увеличением концентрации агрегатов из чешуек фторированного графена в смазочном масле средняя сила и коэффициент трения снижаются.
3. Выявлено, что средний коэффициент трения при добавлении в смазочное масло 0,01% агрегатов из чешуек фторированного графена уменьшается на 32,6%, а при добавлении 0,1% — на 36%.
4. Обосновано, что для пропитки экономически целесообразно использовать смазочное масло с 0,01% агрегатов из чешуек фторированного графена, поскольку существенное повышение концентрации не приводит к ощутимому антифрикционному эффекту.

СПИСОК ЦИТИРОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Бреки А. Д. Триботехнические свойства модифицированных смазочных масел. Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук / Институт проблем машиноведения Российской академии наук. Санкт-Петербург, 2011. 161 с.
2. Novoselov K. S., Geim A. K., Morozov S. V. et. al. Electric Field Effect in Atomically Thin Carbon Films // Science. 2004. V. 306. № 5696. P. 666–669.
3. Ткачев С. В. Графен – новый углеродный наноматериал / С. В. Ткачев, Е. Ю. Буслаева, С. П. Губин // Неорганические материалы. 2011. Т. 47. № 1. С. 5–14.
4. Ткачев С. В. Графен, полученный восстановлением оксида графена / С. В. Ткачев, Е. Ю. Буслаева, А. В. Наумкин, С. Л. Котова, И. В. Лауре, С. П. Губин // Неорганические материалы. 2012. Т. 48. № 8. С. 909.
5. Geim A. K., Novoselov K. S. The Rise of Graphene // Nature Mater. 2007. V. 6. № 3. P. 183–191.
6. Губин С. П., Ткачев С. В. Графен и родственные наноформы углерода / С. П. Губин, С. В. Ткачев. М.: Книжный дом «Либроком», 2012. 104 с.
7. Волокитин А. И. Квантовое трение и графен / А. И. Волокитин // Природа. 2011. № 9 (1153). С. 13–21.
8. Легконогих Н. И. Смазочная способность графена при использовании в парах трения «сталь-железо» и «сталь-бронза» / Н. И. Легконогих // Автоматизированное проектирование в машиностроении. 2020. № 8. С. 48–50.

9. Novikova A. A., Burlakova V. E., Varavka V. N., Uflyand I. E., Droган E. G., Irkha V. A. Influence of glycerol dispersions of graphene oxide on the friction of rough steel surfaces // Journal of Molecular Liquids, 2019, 284, 1-11.
10. Berman D., Erdemir A., Sumant A. V. Few layer graphene to reduce wear and friction on sliding steel surfaces // Carbon, 2013, 54, 454-459.
11. Restuccia P., Righi M. C. Tribochemistry of graphene on iron and its possible role in lubrication of steel // Carbon, 2016, 106, 118-124.
12. Obraztsova E. A., Osadchy A. V., Obraztsova E. D., Lefrant S., Yaminsky I. V. Statistical Analysis of Atomic Force Microscopy and Raman Spectroscopy Data for Estimation of Graphene Layer Numbers // Phys. Stat. Sol. B. 2008. V. 245 (№10) – P. 2055-2059.
13. Breki A., Nosonovsky M. Ultraslow frictional sliding and the stick-slip transition // Applied Physics Letters. 2018. T. 113. № 24. C. 241602.
14. Breki A. D., Gvozdev A. E., Kolmakov A. G. Semiempirical mathematical models of the pivoting friction of SHKH15 steel over R6M5 steel according to the ball-plane scheme with consideration of wear // Inorganic Materials: Applied Research. 2019. T. 10. № 4. C. 1008-1013.
15. Breki A. D., Vasilyeva E. S., Tolochko O. V., Didenko A. L., Nosonovsky M. Frictional properties of a nanocomposite material with a linear polyimide matrix and tungsten diselenide nanoparticle reinforcement // Journal of Tribology. 2019. T. 141. № 8. C. 082002.
16. Breki A. D., Kolmakov A. G., Gvozdev A. E., Sergeev N. N. Investigation of the pivoting friction of SHKH15 steel over R6M5 and 10R6M5-MP steel with the use of mathematical modeling // Inorganic Materials: Applied Research. 2019. T. 10. № 4. C. 927-932.
17. Breki A. D., Gvozdev A. E., Kolmakov A. G., Starikov N. E., Provotorov D. A., Sergeyev N. N., Khonelidze D. M. On friction of metallic materials with consideration for superplasticity phenomenon / Inorganic Materials: Applied Research. 2017. T. 8. № 1. pp. 126-129.
18. Breki A. D., Gvozdev A. E., Kolmakov A. G. Application of generalized pascal triangle for description of oscillations of friction forces / Inorganic Materials: Applied Research. 2017. T. 8. № 4. pp. 509-514.
19. Breki A. D., Nosonovsky M. Einsteins viscosity equation for nanolubricated friction // Langmuir: the ACS journal of surfaces and colloids. 2018. T. 34. № 43. C. 12968-12973.
20. Реброва И. Ю., Чубариков В. Н., Добровольский Н. Н., Добровольский М. Н., Добровольский Н. М. / О классических теоретико-числовых сетках // Чебышевский сборник. 2018. Т. 19. № 4 (68). С. 118-176.
21. Добровольский Н. Н., Добровольская Л. П., Серегина Н. К., Бочарова О. Е. Алгоритмы вычисления оптимальных коэффициентов: Монография / Под. ред. Н. М. Добровольского. Тула: Изд-во Тул. гос. пед. ун-та им. Л. Н. Толстого, 2016. 223 с.
22. Добровольская Л. П., Шелобаев С. И. Теоретико-числовой метод в эконометрике // Алгебра, теория чисел и дискретная геометрия: современные проблемы, приложения и проблемы истории: Материалы XVI Международной конференции, посвященной 80-летию со дня рождения профессора Мишеля Деза. Тула: Тул. гос. пед. ун-т им. Л. Н. Толстого, 2019. С. 280-283.

23. Nikitin A. N., Rusakova E. I., Parkhomenko Eh. I., Ivankina T. I., Dobrovol'skiy N. M., «Reconstruction of Paleotectonic Stresses Using Data on Piezoelectric Textures of Rocks», *Izvestiya Earth Physics*, 24:9 (1988), 728–734.

REFERENCES

1. Breki A. D., 2011, «Tribotechnical properties of modified luBrlicating oils. Dissertation for the degree of candidate of technical Sciences», *Institute of machine science problems of the Russian Academy of Sciences*, Saint Petersburg. 161 pp.
2. Novoselov K.S., Geim A.K., Morozov S.V. et. al. 2004, «Electric Field Effect in Atomically Thin Carbon Films», *Science*, V. 306. № 5696. pp. 666–669.
3. Tkachev S.V., Buslaeva E.Yu., Gubin S.P. 2011, «Graphene – a new carbon nanomaterial», *Inorganic material*, Vol. 47. No. 1. pp. 5-14.
4. Tkachev S.V., Buslaeva E.Yu., Naumkin A.V., Kotova S.L., Laure I.V., Gubin S.P. 2012, «Graphene obtained by reduction of graphene oxide», *Inorganic material*, Vol. 48. No. 8. pp. 909.
5. Geim A.K., Novoselov K.S. 2007, «The Rise of Graphene», *Nature Mater.* V. 6. № 3. P. 183–191.
6. Gubin S.P., Tkachev S.V. 2012, *Graphene and related carbon nanoforms*. Moscow. Book house «LiBr1ocom». 104 pp.
7. Volokitin A.I. 2011, «Quantum friction and grapheme», *Nature*. No. 9 (1153). pp. 13-21.
8. Legkonogikh N.I. 2020, «The luBrlicating ability of graphene when used in friction pairs «steel-iron» and «steel-Brlonze»», *Computer-aided design in mechanical Engineering*, No. 8. pp. 48-50.
9. Novikova A.A., Burlakova V.E., Varavka V.N., Uflyand I.E., Droган E.G., Irkha V.A. 2019, «Influence of glycerol dispersions of graphene oxide on the friction of rough steel surfaces», *Journal of Molecular Liquids*, 284, pp.1-11.
10. Berman D., Erdemir A., Sumant A.V. 2013, «Few layer graphene to reduce wear and friction on sliding steel surfaces», *Carbon*, 54, pp. 454-459.
11. Restuccia P., Righi M.C. 2016, «Tribiochemistry of graphene on iron and its possible role in luBrlication of steel», *Carbon*, 106, pp. 118-124.
12. Obraztsova E.A., Osadchy A.V., Obraztsova E.D., Lefrant S., Yaminsky I.V. 2008, «Statistical Analysis of Atomic Force Microscopy and Raman Spectroscopy Data for Estimation of Graphene Layer Numbers», *Phys. Stat. Sol. B*. V.245 (№10) pp. 2055-2059.
13. Breki A. D., Nosonovsky M. 2018, «Ultraslow frictional sliding and the stick-slip transition», *Applied Physics Letters*, T. 113. № 24. pp. 241602.
14. Breki A. D., Gvozdev A.E., Kolmakov A.G. 2019, «Semiempirical mathematical models of the pivoting friction of SHKH15 steel over R6M5 steel according to the ball-plane scheme with consideration of wear», *Inorganic Materials: Applied Research*, T. 10. № 4. pp. 1008-1013.
15. Breki A. D., Vasilyeva E.S., Tolochko O.V., Didenko A.L., Nosonovsky M. 2019, «Frictional properties of a nanocomposite material with a linear polyimide matrix and tungsten diselenide nanoparticle reinforcement», *Journal of Tribology*, T. 141. № 8. pp. 082002.

16. Breki A. D., Kolmakov A. G., Gvozdev A. E., Sergeev N. N. 2019, «Investigation of the pivoting friction of SHKH15 steel over R6M5 and 10R6M5-MP steel with the use of mathematical modeling», *Inorganic Materials: Applied Research*, T. 10. № 4. pp. 927-932.
17. Breki A. D., Gvozdev A. E., Kolmakov A. G., Starikov N. E., Provotorov D. A., Sergeyev N. N., Khonelidze D. M. 2017, «On friction of metallic materials with consideration for superplasticity phenomenon», *Inorganic Materials: Applied Research*, T. 8. № 1. pp. 126-129.
18. Breki A. D., Gvozdev A. E., Kolmakov A. G. 2017, «Application of generalized pascal triangle for description of oscillations of friction forces», *Inorganic Materials: Applied Research*, T. 8. № 4. pp. 509-514.
19. Breki A. D., Nosonovsky M. 2018, «Einstein's viscosity equation for nanobranched friction», *Langmuir: the ACS journal of surfaces and colloids*, T. 34. № 43. pp. 12968-12973.
20. Rebrova I. Yu., Chubarikov V. N., Dobrovolsky N. N., Dobrovolsky M. N., Dobrovolsky N. M. 2018, «On classical number-theoretic grids», *Chebyshev collection*, Vol. 19. No. 4 (68). pp. 118-176.
21. Dobrovolsky N. N., Dobrovolskaya L. P., Seregina N. K., Bocharova O. E. 2016, *Algorithms for calculating optimal coefficients*. Tula: publishing house of Tula state pedagogical University named after L. N. Tolstoy, 223 pp.
22. Dobrovolskaya L. P., Shelobaev S. I. 2019, «Number-theoretic method in econometrics», *Algebra, number theory and discrete geometry: modern problems, applications and problems of history: materials of the XVI International conference dedicated to the 80th anniversary of the birth of Professor Michel DEZ*. Tula: Tula state pedagogical University named after L. N. Tolstoy, pp. 280-283.
23. Nikitin A. N., Rusakova E. I., Parkhomenko E. I., Ivankina T. I., Dobrovolskiy N. M., 1988, «Reconstruction of Paleotectonic Stresses Using Data on Piezoelectric Textures of Rocks», *Izvestiya Earth Physics*, 24:9, pp. 728-734.

Получено 30.08.2020 г.

Принято в печать 21.02.2021 г.