

Научная статья
УДК 620.178.162

АДСОРБЦИОННАЯ МОДЕЛЬ МЕЗОМОРФНОГО ГРАНИЧНОГО СМАЗОЧНОГО СЛОЯ, ОБРАЗУЕМОГО НАНОРАЗМЕРНОЙ ПРИСАДКОЙ В ТРИБОСИСТЕМЕ С АБРАЗИВНЫМ ИЗНОСОМ

Александр Сергеевич Парфенов^{1*}, Алексей Владимирович Волков¹, Елена Владимировна Березина¹,
Владимир Александрович Годлевский²

¹Ивановская государственная медицинская академия, Иваново, Россия

²Ивановский государственный университет, Иваново, Россия

ИНФОРМАЦИЯ

АННОТАЦИЯ

История статьи:

Поступила 24.01.2022

Одобрена 14.02.2022

Принята 21.02.2022

Ключевые слова:

абразивный износ,
присадка,
углеродные нанотрубки,
адсорбция,
математическая модель

Статья посвящена физико-химическому механизму формирования мезогенного смазочного слоя, образуемого масляным смазочным материалом (СМ) с присадками нанотрубок в присутствии полидисперсного абразива. Ввиду пониженной поверхностной активности данного вида присадок трудно при малой концентрации присадки создать необходимую концентрацию трибоактивного компонента на поверхности и, как следствие, поддержание экранирующего действия смазочной пленки. Выдвинуто предположение, что наличие в СМ абразивных частиц (как попавших извне, так и появившихся в результате износа), обладающих развитой поверхностью, способно выполнять транспортную функцию по переносу нанодисперсной присадки из объема СМ на поверхности трения.

Были разработаны математическое описание граничного смазочного процесса, основанное на адсорбционной модели Фрейндлиха, а также модель изнашивания поверхности в зависимости от концентраций абразива и наноразмерной присадки. Испытывали модельные СМ с добавками искусственного абразива и наноприсадки «Таунит». Экспериментально установлена немонотонная зависимость интенсивности изнашивания от соотношения концентрации наноприсадки и привнесенного абразива, что может быть интерпретировано как то, что абразив не только непосредственно влияет на износ, как в монодисперсных суспензиях, но и противодействует износу путем влияния на кинетику формирования граничного слоя.

DOI:

10.18083/LCAppl.2022.1.76

Для цитирования:

Парфенов А. С., Волков А. В., Березина Е. В., Годлевский В. А. Адсорбционная модель мезоморфного граничного смазочного слоя, образуемого наноразмерной присадкой в трибосистеме с абразивным износом // Жидк. крист. и их практич. использ. 2022. Т. 22, № 1. С. 76–83.

*Автор для переписки: alsparf@gmail.com

© Парфенов А. С., Волков А. В., Березина Е. В., Годлевский В. А., 2022

Research Article

ADSORPTION MODEL OF MESOMORPHIC BOUNDARY LUBRICATING LAYER FORMED BY NANOSCALE ADDITIVE IN TRIBOSYSTEM WITH ABRASIVE WEAR

Alexander S. Parfenov^{1*}, Alexey V. Volkov¹, Elena V. Berezina¹, Vladimir A. Godlevskiy²

¹*Ivanovo State Medical Academy, Ivanovo, Russia*

²*Ivanovo State University, Ivanovo, Russia*

ARTICLE INFO:

Article history:

Received 24 January 2022

Approved 14 February 2022

Accepted 21 February 2022

Key words:

abrasive wear,
additive,
carbon nanotubes,
adsorption,
mathematical model

ABSTRACT

The article is devoted to the physical and chemical mechanism of mesogenic lubricating layer formation by oil lubricant (OL) with nanotube additives in the presence of polydisperse solid abrasive phase. Due to reduced surface activity of this type of additives, it is difficult to create a necessary concentration of triboactive component on a surface and, as a consequence, to maintain shielding effect of lubricating film at low concentrations of additive. It has been suggested that the presence of abrasive particles (appeared from outside as a result of wear) having a developed surface can transport nano-additive from OL volume to friction surfaces.

A mathematical description of the boundary lubrication process based on the Freundlich adsorption model as well as a model of surface wear depending on concentrations of abrasive and nanoscale additive were developed. Model OL with artificial abrasive and «Taunit» nano-additive were tested. A non-monotonic dependence of wear intensity on the concentration ratio of nano-additive and abrasive was established experimentally. The dependence evidence that the abrasive directly affects not only the wear as in monodisperse suspensions but also counteracts the wear by influencing the kinetics of the boundary layer formation.

DOI:

10.18083/LCAppl.2022.1.76

For citation:

Parfenov A.S., Volkov A.V., Berezina E.V., Godlevskiy V.A. Adsorption model of mesomorphic boundary lubricating layer formed by nanoscale additive in tribosystem with abrasive wear. *Liq. Cryst. and their Appl.*, 2022, **22** (1), 76–83 (in Russ.).

*Corresponding author: alsparf@gmail.com

© Parfenov A.S., Volkov A.V., Berezina E.V., Godlevskiy V.A., 2022

Введение

Вопрос о том, каковы особенности формирования и разрушения молекулярно упорядоченных смазочных слоев в условиях, когда в СМ присутствуют абразивные частицы, чрезвычайно актуален. Абразивное изнашивание широко распространено для машин и механизмов различного назначения. Особенно это важно для транспортной, сельскохозяйственной, горнодобывающей, нефтегазовой, дорожной, строительной и других распространенных видов техники. Существенную роль может играть абразивный износ, например, в технологии текстильных материалов, когда обрабатываемый природный волокнистый материал (например, хлопок) несет в себе частицы абразива, не полностью удаляемые на этапе очистки сырья [1–3].

Применение в узлах трения, подверженных абразивному изнашиванию, жидких и пластичных смазочных материалов (СМ) с функциональными присадками и наполнителями в целом помогает повысить ресурс сопряжений, хотя в последние десятилетия работа конструкторов в этом направлении была направлена в основном на совершенствование уплотнительных устройств, призванных изолировать контактную зону от проникновения частиц абразива [4–6]. Однако заметим, что даже полностью герметизировав трибосистему со смазочным материалом, трудно исключить абразивное истирание, которое в этих условиях будет поддерживаться вследствие накопления в СМ продуктов износа. В связи с этим важную роль в снижении абразивного износа играют также фильтрующие системы, включаемые в масляные коммуникации [6–8].

Нужно отметить, что в большинстве исследований, посвященных масляным СМ, не отражена специфика состава присадок, непосредственно связанная с данным видом изнашивания [8–15]. Пакеты присадок, как правило, компонуются согласно общим принципам для трибосистем с различными физико-механическими процессами изнашивания. Целью настоящей статьи является преодоление этого явно ущербного подхода для того, чтобы обосновать состав смазочных композиций, более функционально нацеленных на трибосистемы, работающие в той или иной мере в присутствии абразивного компонента.

Полидисперсное состояние супензий масляных СМ в процессе абразивного изнашивания

В общем случае трибосистема, работающая в условиях абразивного изнашивания, имеет следующий состав:

- базовое масло,
- трибоактивная присадка (или пакет активных присадок),
- частицы поступившего из внешней среды абразива,
- высокодисперсные продукты износа.

Естественно, в процессе эксплуатации пары трения происходит деградация трибосистемы, при которой меняются концентрации твердых компонентов и параллельно происходит деструкция рабочего компонента присадки.

В случае применения в качестве трибоактивного компонента классического коллоидного ПАВ ситуация с движением присадки в трибосистеме ясна: дифильные молекулы присадки адсорбируются на всех твердых внутренних поверхностях и при этом:

- образуют разделительные пленки граничной смазки,
- покрывают адсорбированными слоями частицы супензии,
- обеспечивают коллоидную устойчивость системы,
- проявляют моющее действие, унося абразивные компоненты из контакта (возможно, для последующего осаждения на фильтре).

Особенности применения наноразмерных присадок в трибосистемах с абразивом

В последнее время появляется все больше работ, в которых предлагается использование в качестве присадок нанодисперсных компонентов, которые могут представлять из себя как нанопорошки металлов [16–19], так и углеродные наночастицы различной структуры. В качестве углеродных нанокомпонентов СМ в настоящей работе были исследованы следующие его аллотропные модификации: графен и его производные, одностенные и многостенные нанотрубки, шунгит [20–21]. Следует отметить, что дисперсии углеродных наноматериалов, возможно рассматривать как анизотропные среды, которым

присущ эпитропный мезоморфизм ввиду присутствия развитой межфазной поверхности [22–24]. Стоит ожидать, что нанотрубки будут оказывать лучшее разделительное действие в зоне контакта: они прочны и, по-видимому, должны обладать большей несущей способностью и упругостью, чем адсорбционные слои граничной смазки, образуемые обычными анионными ПАВ [25]. Однако стоит ожидать, что нанотрубки без специально привитых им полярных групп не будут обладать способностью ПАВ даже в малых концентрациях концентрироваться на поверхности с образованием граничного слоя. (Разумеется, использовать нанокомпоненты в СМ в больших концентрациях было бы неприемлемым из экономических соображений). И в самом деле, накопленный опыт использования наноразмерных присадок в большинстве случаев не показывает значимого антиизносного эффекта) [26].

В настоящей работе мы выдвигаем гипотезу, что именно в трибосистеме, содержащей взвешенный абразив, нанодисперсная присадка сможет проявить антиизносную эффективность. Это происходит в условиях, когда СМ содержит большую внутреннюю удельную поверхность, обусловленную присутствием как внешнего абразива, так и частиц износа. В этом случае даже при присущей им малой поверхностной активности наночастицы будут адсорбироваться на зернах суспензии. Можно сказать, что твердые компоненты, взвешенные в СМ, будут (тем более в условиях механического перемешивания дисперсионной среды в смазочном слое) являться своеобразным микротранспортом, обеспечивающим принудительный транспорт наноразмерной присадки из объема СМ на поверхности трения.

В случае экспериментального подтверждения описанного механизма откроется путь для снижения износа в парах трения, сильно загрязненных абразивными частицами и продуктами износа, что позволит продлить ресурс сопряжений, подверженных абразивному типу изнашивания. Следует, впрочем, оговорить то обстоятельство, что изложенный выше подход может быть, по-видимому, реализован лишь в случае жидкотекучих СМ и вряд ли пригоден для трибосистем с пластичной смазкой.

В самом деле, для адсорбции активного компонента система должна быть свободно-дисперсной, обеспечивая массоперенос в субмикрообъемах под действием поверхностных сил.

Математическая модель адсорбции присадки

В условиях абразивного износа, близкого к равновесному, можно предположить, что износ стационарен, и чем быстрее происходит переход от приработки к состоянию установившегося износа, тем эффективнее должна работать присадка.

Если справедлива наша гипотеза о том, что абразивные частицы как внешней природы (твёрдые загрязнения смазочного материала), так и появившиеся в процессе трения (частицы износа поверхностей, представляющие собой оксиды металлов, чья твердость выше, чем твердость контактных поверхностей), выступают в роли транспорта присадки, логично предположить, что повышение концентрации присадки приводит к тому, что большее количество абразивных частиц в объеме адсорбируют на своей поверхности материалы присадки, что снижает износ.

Активность присадки можно сопоставить с градиентом ее концентрации в направлении к поверхностям трения (контакта) из объема. Если динамику износа сопоставить с динамикой адсорбции присадки в местах абразивного контакта, то в условиях стационарного процесса износа приток присадки к поверхностям контакта можно выразить скоростью адсорбции $\frac{\partial a}{\partial t}$.

Кинетика адсорбции присадки на твердом теле в трибосистеме определим уравнением

$$\frac{\partial a}{\partial t} = \beta(a_p - a) = \beta(k\sqrt{C} - a), \quad (1)$$

где β – коэффициент, который также может быть функцией концентрации.

Эту величину можно назвать «коэффициентом структурирования» (или агрегации) трибоактивной присадки, который отвечает за поведение трибоактивного компонента в объеме; $a_p = k\sqrt{C}$ – равновесная концентрация адсорбата, описываемая степенной моделью Фрейндлиха [27], или начальной линейной частью модели Лэнгмюра $a_p = kC$ [27]. Обе модели уместно применять тогда, когда рост концентрации трибоактивной присадки приводит к монотонному снижению интенсивности изнашивания.

Интегрируя (1) по времени, получим

$$a = k\sqrt{C}(1 - e^{-\beta(C)t}). \quad (2)$$

Время процесса фиксировано.

Как видно из рисунка (рис.), износ связан с поведением кривой адсорбции. На участках, где адсорбция растет, износ должен снижаться, в областях, где адсорбция падает, он увеличивается. Отсюда можно записать следующее:

$$\begin{cases} \frac{da}{dc} > 0, C < C_* \\ \frac{da}{dc} < 0, C > C_* \end{cases} \quad (3)$$

Здесь при $C \gg C_*$ $\frac{da}{dc} = 0$, где C_* – та концентрация, которая соответствует максимальному значению адсорбции присадки на твердых поверхностях трения и свободных частицах абразива.

В случае модели линейной зависимости износа от величины адсорбции присадки принимаем, что:

$$S(C) = S(0) - \alpha \cdot a(C), \quad (4)$$

где $S(C)$ – площадь изношенной поверхности как функция концентрации; $S(0)$ – износ в отсутствии адсорбции присадки.

Формула (4) согласуется с гипотезой о связи кривой адсорбции с кривой износа при выполнении условий (3). При $C = 0$, $a = 0$ и $S = S_0 = S(0)$, где

$$\begin{cases} \frac{\partial S(C)}{\partial C} < 0, \text{ при } C < C_* \\ \frac{\partial S(C)}{\partial C} > 0, \text{ при } C > C_* \\ \frac{\partial S(C)}{\partial C} = 0, \text{ при } C \gg C_* \end{cases}$$

Подставляя (2) в (4), получим:

$$\begin{aligned} S(C) &= S_0 - \alpha \cdot k \cdot \sqrt{C} (1 - e^{-\beta(C)t}) = \\ &= S_0 - A \cdot \sqrt{C} (1 - e^{-\beta(C)t}). \end{aligned} \quad (5)$$

Из уравнения (1) следует, что $\beta(C)$ имеет размерность обратного времени, которая имеет смысл характерного времени адсорбции присадки. Тогда

$$\beta(C) \sim \frac{1}{\tau(C)}, \quad (6)$$

где $\tau(C)$ – характерное время адсорбции.

Подставив (6) в (5), получим.

$$S(C) = S_0 - A \cdot \sqrt{C} (1 - e^{-\frac{t}{\tau(C)}}), \quad (7)$$

где t – время процесса.

В случае линейной зависимости характерного времени адсорбции от концентрации присадки

$$\tau(C) = \tau_0 + \gamma \cdot C,$$

где γ – коэффициент пропорциональности, параметр агрегации присадки

$$S(C) = S_0 - A \cdot \sqrt{C} (1 - e^{-\frac{t}{\tau_0 + \gamma C}}), \quad (8)$$

где A, τ_0, γ – параметры процесса, определяемые экспериментально.

Анализ экспериментальных кривых, полученных при вариациях состава наноразмерных присадок и искусственно введенных абразивных компонентов, должен позволить оптимизировать состав СМ, содержащего эти присадки, с учетом влияния присутствия в СМ внешнего абразива и продуктов износа. Применение уравнения (8) к условиям эксперимента позволяет рассчитать параметры модели и использовать их в дальнейших исследованиях по снижению абразивного изнашивания в СМ, содержащих наноразмерные трибоактивные компоненты.

Эксперимент

В качестве углеродной наноприсадки были выбраны многостенные углеродные нанотрубки «Таунит», производства ООО «НаноТехЦентр», Тамбов. Обладая высокой удельной поверхностью (более $160 \text{ м}^2/\text{г}$), достаточно высоким модулем упругости и отсутствием дополнительных активных химических групп, эта присадка может рассматриваться в качестве модельной для оценки описанного выше механизма массопереноса присадки в трибосистеме. В качестве абразивного материала-загрязнителя смазочного материала использовался Электрокорунд 25А 0,063-0,125 (F180) (ГОСТ 28818-90), который часто применяют в испытаниях на изнашивание незакрепленным абразивом.

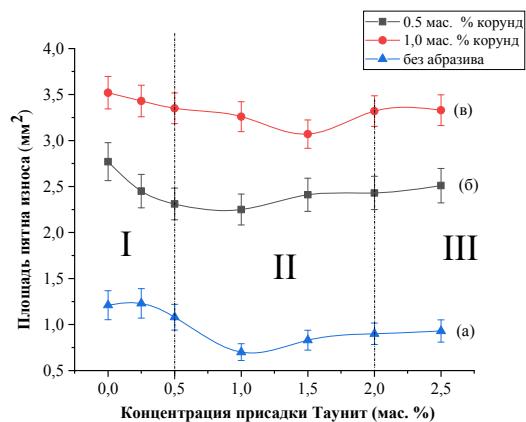


Рис. Зависимость площади износа от концентрации присадки «Таунит» и абразивного материала

Fig. Dependence of wear area on concentrations of «Taunite» additive and abrasive material

Благодаря высокому модулю микротвердости (до 20,9 ГПа) частицы корунда мало подвержены измельчению и изменению размеров, при этом эффективно выступая в роли абразивного агента. Присадка углеродных нанотрубок (УНТ) вводилась в загрязненный абразивом смазочный материал перед началом испытаний путем механического смешивания и последующего ультразвукового диспергирования.

Трибологические испытания проводились на модернизированной универсальной машине трения МТУ-01 (ТУ 4271-001-29034600-2004). Частота вращения шпинделя поддерживалась постоянной – 300 об/мин. Схема пары трения представляла собой три закрепленных шарика, скользящие без вращения по неподвижной плоскости. Шарики диаметром 12,7 мм были изготовлены из стали ШХ15 твердостью 60-62 HRC (ГОСТ 3722-2014), опорная пластина была изготовлена из стали Р6М5 (Ra 1,25 мкм, твердостью 65 HRC). Выбор материалов пары трения обусловлен широким применением шарикоподшипниковой стали ШХ15 в высоконагруженных узлах трения. Удельная нагрузка в паре трения была постоянной и составляла 200 Н.

Обсуждение результатов и выводы

По характеру происходящих в зоне трения процессов на экспериментальном графике можно выделить три области (см. рис.):

- I** – до 0,5 мас. % присадки;
- II** – от 0,5 мас. % до 2,0 мас. % присадки;
- III** – свыше 2,0 мас. % присадки.

В качестве характеристики эффективности присадки на малых концентрациях можно ввести параметр активности присадки при данных режимах изнашивания.

В случае отсутствия в смазочном материале абразивных частиц (рис., кривая *a*) наибольшим вкладом будет обладать адгезионный износ. Можно сделать предположение, что в области **I** активность присадки близка к нулю, в результате чего не происходит уменьшение интенсивности изнашивания. Образующихся в процессе трения частиц износа (которые выполняют роль абразивных частиц) в данном случае недостаточно, чтобы использовать их в качестве транспорта для присадки, малая концентрация присадки не позволяет ей эффективно поступать в зону трения.

При повышении концентрации присадки и переходе в область **II** достигается максимальное снижение интенсивности изнашивания вплоть до величины 40 %, при этом дальнейшее увеличение концентрации присадки и переход в область **III** приводит к снижению эффективности работы присадки, что может быть связано с эффектами агрегации наночастиц, увеличением их размеров и снижением вероятности поступления в зону трения.

В случае абразивного изнашивания (рис., кривые *b* и *v*) большую роль играет концентрация абразивного загрязнителя смазочного материала, внесенная извне. В области **I** при концентрации абразива 0,5 масс. % наблюдается высокая активность присадки и выраженная зависимость эффективности от концентрации (снижение износа до 17 %). Увеличение концентрации абразивных частиц до 1,0 масс. % снижает эту разницу до 5 % и ниже. Характер такого процесса можно описать активным увеличением числа частиц износа за счет абразивного воздействия на поверхности трения, а значит, более выраженным транспортным эффектом, способствующим переносу присадки.

При переходе в область **II** (аналогично адгезионному изнашиванию) наблюдается оптимум эффективности действия присадки. При этом можно рассмотреть здесь два конкурирующих процесса: экранирующий эффект присадки, вносимой в зону трения с абразивными частицами и частицами износа, и начало переходных процессов в объеме присадки, приводящих к агрегации наночастиц, увеличению их размеров и снижению активности. В области **III** происходит стабилизация процесса износа во всех трех случаях (одновременно реализуются адгезионный и абразивный износ). При достаточно больших массовых концентрациях наноразмерной присадки активность снижается за счет образования агрегатов наночастиц, что может подтверждаться ускоренной седиментацией дисперсных фаз коллоидной системы.

Выводы

Дана характеристика полидисперсного состояния СМ, работающих в условиях абразивного изнашивания, и показаны особенности применения наноразмерных присадок в трибосистемах, содержащих в СМ внешний абразив и продукты износа.

Подтверждена гипотеза о том, что твердые абразивные частицы, накапливаемые в СМ в процессе трения, могут способствовать молекулярному массопереносу нанодисперсной присадки в зону контакта и, соответственно, усиливать антиизносный эффект.

Построено математическое описание процесса адсорбции частиц нанодисперсной присадки на поверхностях трения и частицах абразивного загрязнителя. Определены физико-химические параметры СМ и условия трения, влияющие на интенсивность изнашивания в условиях полидисперсной смазочной среды.

Благодарность: работа выполнена с финансовой поддержкой РФФИ (Грант № 18-29-19150_мк).

Acknowledgments: this study was supported by the Russian Foundation for Basic Research (project № 18-29-19150 _mk).

Список источников / References

- Худых М. И. Эксплуатационная надежность и долговечность оборудования текстильных предприятий. М. : Легкая индустрия, 1980. 334 с. [Khudykh M.I. Operational reliability and durability of textile enterprises equipment. Moscow : Light Industry, 1980, 334 p. (in Russ.)].
- Bhatia S.C. Pollution control in textile industry. WPI Publishing, 2017, 342 p. DOI: 10.1201/9781315148588.
- Андреенков Е. В., Росляков Г. В., Гусейнов Г. Г. Экспериментальное исследование износа деталей трения швейных машин // Дизайн и технологии. 2009. Т. 55, № 13. С. 91–93. [Andreenkov E.V., Roslyakov G.V., Guseinov G.G. Experimental study of wear of friction parts of sewing machines. *Design and Technology*, 2009, **55** (13), 91–93. (in Russ.)].
- Сизов А. П., Топоров А. В., Палин Д. Ю., Топорова Е. А. Разработка конструкции комбинированного магнитожидкостного уплотнения для подшипниковых узлов текстильных машин // Изв. вузов. Технология текстильной промышленности. 2019. Т. 384, № 6. С. 208–212. [Sizov A.P., Toporov A.V., Palin D.Yu., Toporova E.A. Development of a combined magneto-fluid seal design for bearing units of textile machines. *Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii. Seriya: Teknologiya Tekstil'noi Promyshlennosti*, 2019, **384** (6), 208–212 (in Russ.)].
- Соколова Е. И., Розаренова Т. В., Пашковский И. Э. Технологические методы повышения надежности узлов трения машин и оборудования бытового обслуживания и коммунального хозяйства // Вестник МГУС. 2007. № 3. С. 17–22. [Sokolova E.I., Rozarenova T.V., Pashkovsky I.E. Technological methods of increasing the reliability of friction units of machines and equipment of domestic service and communal services. *Bulletin of Moscow State University of Service*, 2007, (3), 17–22 (in Russ.)].
- Bloch H.P., Bannister K.E. Practical lubrication for industrial facilities. New York: River Publishers, 2017, 450 p. DOI: 10.1201/9781003151357.
- Zhu J., Yoon J.M., He D., Qu Y., Bechhoefer E. Lubrication oil condition monitoring and remaining useful life prediction with particle filtering. *Int. J. Prognostics and Health Management. Special issue on wind turbine*. 2013, 4 (3), 15 p. DOI: 10.36001/ijphm.2013.v4i3.2151.
- Mang T., Bobzin K., Bartels T. Industrial tribology: Tribosystems, friction, wear and surface engineering, lubrication. John Wiley & Sons, 2011, 644 p. DOI: 10.1002/9783527632572.
- Крагельский И. В. Трение и износ. М. : Машиностроение, 1968. 480 с. [Kragelsky I.V. Friction and Wear. Moscow : Mashinostroenie, 1968, 480 p. (in Russ.)].
- Хрущев М. М., Бабичев М. А. Абразивное изнашивание. М. : Наука, 1970. 251 с. [Khrushchev M.M., Babichev M.A. Abrasive wear. Moscow : Nauka, 1970, 251 p. (in Russ.)].
- Добровольский А. Г., Кошеленко П. И. Абразивная износостойкость материалов. Киев : Техника, 1989. 128 с. [Dobrovolsky A.G., Kosheleko P.I. Abrasive wear resistance of materials. Kiev : Technique, 1989, 128 p. (in Russ.)].
- Badisch E., Varga M., Eder S.J. A Brief review of abrasive wear modelling using a numerical-experimental approach. *Key Eng. Mater.*, 2019, **799**, 83–88. DOI: 10.4028/www.scientific.net/kem.799.83.
- Meng H.C., Ludema K.C. Wear models and predictive equations: Their form and content. *Wear*, 1995, **181–183**, 443–457. DOI: 10.1016/0043-1648(95)90158-2.
- Beckmann G., Gotzmana I. Analytical model of the blast wear intensity of metals based on a general arrangement for abrasive wear. *Wear*, 1981, **73** (2), 325–353. DOI: 10.1016/0043-1648(81)90299-4.
- Soldatenkov I.A., Mezrin A.M., Sachek B.Y. Implementation of a wear model of rigid bodies for identifying the wear law based on the results of tribological tests. *Friction and Wear*, 2015, **36** (6), 528–533. DOI: 10.3103/S1068366615060148.
- Zhao J., Huang Y., He Y., Shi Y. Nanolubricant additives: A review. *Friction*, 2021, **9**, 891–917. DOI: 10.1007/s40544-020-0450-8.
- Singh A., Chauhan P., Mamatha T.G. A review on tribological performance of lubricants with nanoparticles additives. *Materials Today: Proceedings*, 2020, **25**, 586–591. DOI: 10.1016/J.MATPR.2019.07.245.

18. Gulzar M., Masjuki H.H., Kalam M.A., Varman M., Zulkifli N.W.M., Mufti R.A., Zahid R. Tribological performance of nanoparticles as lubricating oil additives. *J. Nanopart. Res.*, 2016, **18** (8), Article 223 (25 p.). DOI: 10.1007/S11051-016-3537-4.
19. Sviridenok A.I., Ihnatouski M.I., Khovatov P.A., Smurugov V.A., Chmykhova T.G. Tribological properties of lubricants modified by complexes of hard micro- and nanoparticles. *J. Friction and Wear*, 2012, **33** (4), 266–273. DOI: 10.3103/S1068366612040137.
20. Cursaru D.L., Ramadan I., Tanasescu C., Ripeanu R. Study of the tribological behavior of different carbonaceous nanomaterials such as antiwear additives for an environmentally friendly lubricant. *Dig. J. Nanomater. Biostructures*, 2013, **8** (2), 805–815.
21. Parfenov A.S., Berezina E.V., Smirnova A.I., Shilov M.A., Usol'tseva N.V., Gvozdev A.A., Dyachkova T.P., Rozhkova N.N., Savilov S.V. Tribological properties of plastic lubricants in compositions with various carbon nanostructures. *J. Friction and Wear*, 2019, **40** (5), 453–460. DOI: 10.3103/S1068366619050106.
22. Zakri C., Blanc C., Grelet E., Zamora-Ledezma C., Puech N., Anglaret E., Poulin P. Liquid crystals of carbon nanotubes and graphene. *Phil. Trans. R. Soc. A*, 2013, **371** (1988), Article 20120499 (15 p.). DOI: 10.1098/rsta.2012.0499.
23. Zhang S., Kumar S. Carbon nanotubes as liquid crystals. *Small*, 2008, **4** (9), 1270–1283. DOI: 10.1002/smll.200700082.
24. Сонин А. С., Чурочкина А. В., 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].
25. Шилов М. А., Смирнова А. И., Столбов Д. Н., Усольцева Н. В. Моделирование деформационных процессов углеродных нанотрубок // Жидк. крист. и их практич. использ. 2020. Т. 20, № 1. С. 85–91. [Shilov M.A., Smirnova A.I., Stolbov D.N., Usol'tseva N.V. Modelling of deformation processes of carbon nanotubes. *Liq. Cryst. and their Appl.*, 2020, **20** (1), 85–91 (in Russ.). DOI: 10.18083/LCAppl.2020.1.85].
26. Попова М. Н., Жарова М. А., Усольцева Н. В., Смирнова А. И., Богданов В. С. Реологические и триботехнические свойства индустриального масла с мезогенными присадками и углеродными нанотрубками // Жидк. крист. и их практич. использ. 2014. Т. 14, № 1. С. 52–61. [Popova M.N., Zharova M.A., Usol'tseva N.V., Smirnova A.I., Bogdanov V.S. Rheological and tribotechnical properties of industrial oil with mesogenic additives and carbon nanotubes. *Liq. Cryst. and their Appl.*, 2014, **14** (1), 52–61 (in Russ.)].
27. Tien C. Introduction to adsorption: Basics, analysis and applications. Elsevier, 2018, 216 p. DOI: 10.1016/C2018-0-00297-2.

Вклад авторов:

¹Парфенов А. С. – проведение исследований, подготовка иллюстраций, написание текста статьи.

²Волков А. В. – разработка математической модели, редактирование текста статьи.

³Березина Е. В. – проведение исследований, редактирование текста статьи.

⁴Годлевский В. А. – разработка концепции научной работы, консультация по вопросам планирования, методологии и реализации исследования, редактирование текста статьи.

Contribution of the authors:

¹Parfenov A. S. – conducting research, preparing illustrations, writing the text of the article.

²Volkov A. V. – development of the mathematical model, editing the text of the article.

³Berezina E. V. – conducting research, editing the text of the article.

⁴Godlevskiy V. A. – development of the concept of scientific work, consultation on planning, methodology and research implementation, editing the text of the article.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

The authors declare no conflicts of interests.

¹<https://orcid.org/0000-0002-5729-4121>

²<https://orcid.org/0000-0001-7502-3993>

³<https://orcid.org/0000-0002-6958-0619>

⁴<https://orcid.org/0000-0001-9948-8496>