

---

---

## НАДЕЖНОСТЬ, ПРОЧНОСТЬ, ИЗНОСОСТОЙКОСТЬ МАШИН И КОНСТРУКЦИЙ

---

---

УДК 621.891

### СМАЗОЧНЫЕ СВОЙСТВА ГРАНИЧНЫХ ПЛЕНОК В КРИТИЧЕСКИХ УСЛОВИЯХ РАБОТЫ ТРИБОСИСТЕМЫ

© 2021 г. Р. Г. Мнацаканов<sup>1</sup>, О. А. Микосянчик<sup>1</sup>, А. Е. Якобчук<sup>1,\*</sup>, Б. Д. Халмурадов<sup>1</sup>

<sup>1</sup> *Национальный авиационный университет, Киев, Украина*

*\*e-mail: a-yak@ukr.net*

Поступила в редакцию 26.10.2020 г.

Принята к публикации 24.02.2021 г.

Рассмотрена кинетика изменения смазочных, антифрикционных и противоизносных свойств литиевых смазок Aero Shell Grease 33 и Эра ВНИИНП-286М в условиях прекращения подачи смазочного материала в зону фрикционного контакта. Установлена взаимосвязь между степенью нарушения самоорганизации диссипативных структур и удельной работой трения. Предложена эмпирическая зависимость прогнозирования линейного износа контактных поверхностей в критических условиях трения, учитывающая влияние контактной нагрузки, удельной работы трения и толщины смазочного слоя.

*Ключевые слова:* толщина смазочного слоя, коэффициент трения, износ, удельная работа трения, смазка

DOI: 10.31857/S0235711921030111

**Роль смазочного материала в повышении эксплуатационной надежности трибосистем.** Разрушение граничных смазочных слоев при трении происходит при критическом давлении в контакте. Управление процессами поверхностной активности контактных поверхностей в процессе их активации при трении, применение смазочного материала с поверхностно-активными веществами, противоизносными и антизадирными присадками, антифрикционными добавками может обеспечить значительное повышение критического давления и начальной температуры разрушения граничного слоя и вторичных структур, что будет способствовать продлению срока эксплуатации пар трения.

В работах [1, 2] исследовано, что существует оптимальный диапазон проявления эффективных смазочных свойств при формировании пленки смазочным материалом на контактных поверхностях, который зависит от внешних факторов и прочности сцепления пленки по отношению к поверхности. Исследование структуризации граничных пленок смазочного материала показали, что на скорость протекания окислительных реакций и полимеризационных процессов существенно влияет поверхность элементов трибосопряжений, которая является составной частью реагирующей системы [3, 4]. Процессу структуризации смазочного материала способствует также введение в него присадок, которые повышают противоизносные свойства смазочных материалов, что обусловлено образованием полимолекулярных мезоморфных эпитропно-жидкокристаллических структур [5, 6].

На природу сформированных граничных пленок смазочного материала существенное влияние оказывают условия работы триботехнических элементов. В работе [7] установлены закономерности формирования на контактных поверхностях граничных

слоев физической природы, которые характеризуются идентичностью реологических свойств с объемной жидкой фазой смазочного материала в условиях качения с проскальзыванием 3%. Однако, при увеличении степени проскальзывания с 10 до 40% создаются предпосылки для формирования на поверхностях трения хемосорбционных пленок.

Совершенствование контрольно-измерительных приборов и стремительное развитие вычислительной техники обеспечивают реальную возможность впервые исследовать трибологические процессы образования диссипативных структур при трении на атомарном и молекулярном уровнях. Например, комплекс SFA позволяет измерять толщину пленки до 0.1 нм и фиксировать крайне малые поверхностные силы [8, 9]. Значительные преимущества данного комплекса позволяют использовать его в качестве основного инструмента при исследовании реологических, смазочных и антифрикционных свойств трибоконтакта на наноуровне [10].

Возникает необходимость в разработке принципиально новых методик оценки кинетики изменения триботехнических характеристик смазочных материалов и вторичных структур (образование, изменение и разрушение) в процессе контактного взаимодействия. Внедрение автоматизированных методов и средств контроля триботехнических параметров и испытания контактных поверхностей в реальном масштабе времени в режимах, максимально приближенных к эксплуатационным, является составной частью задачи по повышению точности и достоверности при использовании полученных экспериментальных результатов в реальных узлах трения.

**Цель и задачи исследования.** Целью исследований являлось установление влияния контактного напряжения на триботехнические свойства литиевых смазок в нестационарных условиях трения при прекращении подачи смазочного материала в зону контакта.

Для достижения поставленной цели были решены следующие задачи: 1) разработка средств и методов контроля смазочной способности смазок непосредственно в процессе работы; 2) выявление закономерностей влияния толщины смазочного слоя на коэффициент трения и удельную работу трения в контакте; 3) установление влияния градиента скорости сдвига смазочных слоев на количество циклов наработки до схватывания пар трения; 4) установление факторов, влияющих на линейный износ контактных поверхностей в условиях прекращения подачи смазочного материала в зону контакта при переходе работы трибосистемы в режим масляного голодания.

**Методика определения триботехнических параметров контакта в критических условиях работы пар трения.** Эксперименты проводились на установке СМЦ-2 с регистрацией показателей трибоконтакта в режиме *online*. Момент трения, частота оборотов роликов, температура смазочного материала, падение напряжения в смазочном слое в контакте записываются и обрабатываются на ПК (программное обеспечение ProfiLab) в реальном масштабе времени с графическим изображением их изменений.

Разработанная программа приема данных по RS-232 каналу принимает коды изменения напряжения тока в триботехническом контакте при 2 и 4 А для вычисления толщины смазочного слоя, регистрирует коды для определения крутящего момента, частоты вращения образцов, объемной температуры масла. Принятые коды поступают на программный блок фильтрации и нормирования, предназначенный для блокировки ошибочно принятых сигналов, сглаживания и преобразования кодов в реальные физические величины.

Смазочные свойства (гидродинамическая и негидродинамическая составляющие толщины смазочной пленки) определяются методом падения напряжения в режиме нормального тлеющего разряда. Согласно этой методике, измеряется падение напря-

жения в смазочном слое при силе тока 2 и 4 А, затем по тарировочным таблицам проводится определение толщины смазочного слоя

$$h = \frac{2U_{2A} - U_{4A}}{k}, \tag{1}$$

где  $U_{2A}$  и  $U_{4A}$  – падение напряжения в смазочном слое при силе тока 2 и 4 А;  $k$  – коэффициент, зависящий от типа смазочного материала.

При частых пусках–остановках на контактных поверхностях формируются граничные адсорбционные слои смазочного материала негидродинамической природы, толщина которых определяется в момент остановки. В период пуска наблюдается прирост толщины смазочного слоя и его стабилизация при достижении заданного режима вращения за счет формирования общей толщины смазочного слоя в контакте, которая содержит гидро- и негидродинамическую составляющие.

Расчет коэффициента трения проводится по формуле

$$f = \frac{2M}{dN}, \tag{2}$$

где  $M$  – крутящий момент;  $d$  – диаметр образца;  $N$  – нагрузка.

Расчет удельной работы трения проводят путем интегрирования площади, ограниченной кривой момента трения, и выбора произвольного диапазона интегрирования по оси абсцисс по координате времени наработки элементов трибосопряжения, по которой определяется угол поворота контактных поверхностей с зафиксированной их частотой вращения в определенное выбранное время наработки, с учетом кинетической энергии вращающихся деталей по формуле

$$A = \left[ \int_0^{t_i} M_i(t) \cdot 2\pi n_i(t) d(t) - \frac{1}{2} \sum_0^{i=n_i} J n_i \cdot \omega_i^2 \right] / F, \tag{3}$$

где  $M$  – момент трения;  $n$ ,  $\omega$  – соответственно частота вращения и угловая скорость вращения элементов трибосопряжения;  $t$  – время длительности цикла;  $J_p$  – полярный момент инерции вращающихся деталей триботехнической установки, которые влияют на точность измерения момента трения в контакте;  $F$  – номинальная площадь контакта по Герцу.

Исследуемые нестационарные условия трения подразумевали цикличность проведения экспериментов в режиме “запуск (4 секунды)–стационарная работа (7 секунд)–торможение (3 секунды)–остановка (3 секунды)” (рис. 1). Воспроизводился режим качения с проскальзыванием 20%.

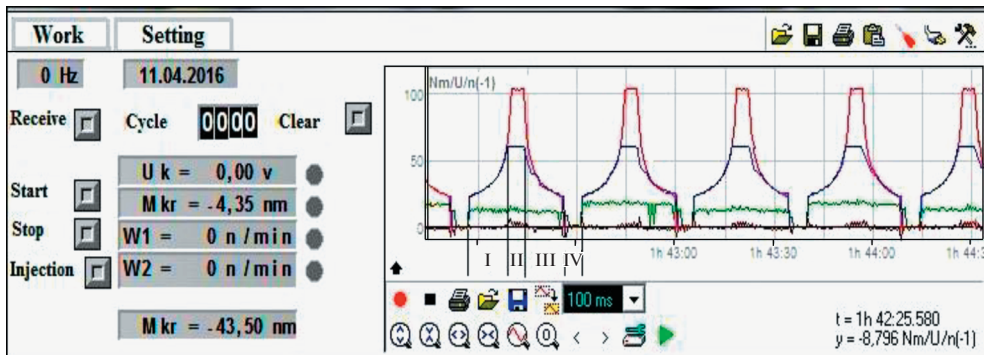


Рис. 1. Схема работы трибосистемы в нестационарных условиях трения: участок I – запуск; участок II – стационарная работа; участок III – торможение; участок IV – остановка.

Контактное напряжение по Герцу составляло 250, 400, 550 и 700 МПа. Первые 300 циклов работа пар трения осуществлялась путем окунания нижнего ролика в ванночку со смазкой и периодического намазывания смазки на ролик. Это способствовало достаточной подаче смазки в зону контакта и предохраняло переход трибосистемы в граничный режим смазочного действия. Дальнейшие исследования проходили в условиях, при которых подача смазочного материала прекращалась. С 300 цикла наработки ванночка убиралась, смазка удалялась с контактных поверхностей (вытиралась ветошью). Таким образом, триботехнические свойства смазки в созданных экспериментальных условиях масляного голодания обусловлены смазочными, антифрикционными и противоизносными свойствами граничных пленок, сформированных в процессе трения на активированных поверхностях металла.

Исследуемые образцы изготовлены из стали 30ХГСА (HRC 35). Смазывание поверхностей осуществлялось литиевыми смазками на синтетической основе Aero Shell Grease 33 и Эра ВНИИНП-286М.

**Результаты исследований и их обсуждение.** В настоящей статье представлены и проанализированы результаты исследований только после 300 цикла наработки, при переходе трибосистемы в режим масляного голодания. С повышением  $\sigma_{\max}$  с 250 до 700 МПа существенно снижается несущая способность смазочного граничного слоя, толщина которого уменьшается в 15 и 3.5 раза при смазывании поверхностей смазками ВНИИНП – 286М и Aero Shell Grease 33 соответственно (рис. 2).

Смазка Aero Shell Grease 33 характеризуется более эффективными смазочными свойствами, по сравнению с исследуемой смазкой Эра ВНИИНП-286М. Особенно это проявляется при нагрузках, превышающих 400 МПа. Если при  $\sigma_{\max}$  250 МПа толщина граничных пленок, сформированных компонентами синтетической смазки Aero Shell Grease 33, в 1.9 раза превышает толщину граничных пленок смазки Эра ВНИИНП-286М, то при  $\sigma_{\max}$  550–700 МПа этот показатель увеличивается в 8–10 раз.

Снижение толщины смазочного слоя обуславливает, прежде всего, корреляционное уменьшение антифрикционных свойств исследуемых смазочных материалов. Однако, изменения коэффициента трения с повышением нагрузки не столь существенны. В исследуемом диапазоне нагрузок коэффициент трения снижается в 3.4 и 2.5 раза для Эра ВНИИНП-286М и Aero Shell Grease 33 смазок соответственно (рис. 3).

Прежде всего, это обеспечивается за счет локального разрушения структурированных граничных смазочных слоев, уменьшения эффективной вязкости смазки и проявлением гидродинамических эффектов при механическом и термическом плавлении пленки в фрикционном контакте [11].

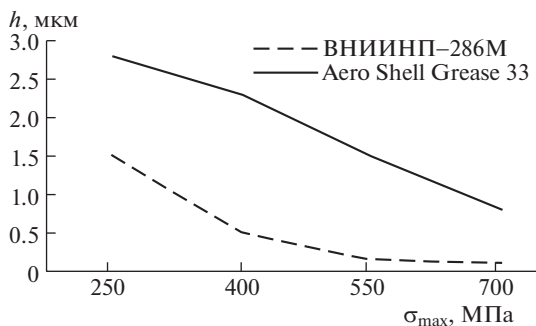


Рис. 2. Влияние контактной нагрузки на толщину граничных смазочных слоев.

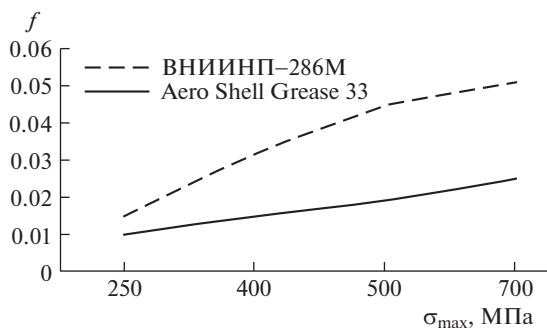


Рис. 3. Влияние контактной нагрузки на изменение коэффициента трения в условиях масляного голодания.

Механическая деструкция граничных слоев происходит вследствие резкого повышения градиента скорости сдвига смазочной пленки ( $\gamma$ ), который, согласно [12], представляет отношение скорости скольжения в контакте к толщине смазочной пленки. Если для смазки Эра ВНИИНП-286М с повышением нагрузки с 250 до 700 МПа градиент скорости сдвига смазочных слоев увеличивается в 20 раз, то для смазки Aero Shell Grease 33 данный параметр увеличивается в 3.5 раза (табл. 1).

Следовательно, смазка Aero Shell Grease 33 характеризуется более эффективными смазывающими свойствами, а ее синтетические компоненты по реологическим характеристикам являются более стабильными к увеличению градиента скорости сдвига, по сравнению с компонентами смазки Эра ВНИИНП-286М. Стойкость смазочной пленки к механической деструкции вследствие увеличения градиента скорости сдвига является определяющим фактором, обеспечивающим нормальную работоспособность пар трения в критических условиях. В табл. 1 указано количество циклов наработки трибоземента в условиях масляного голодания до проявления первых признаков схватывания, которые проявлялись визуально на дорожке трения, при этом наблюдалось повышение шума и остановка машины трения. Анализ полученных результатов показывает, что с увеличением нагрузки резко сокращается период наработки трибосистемы – в исследуемом диапазоне контактных нагрузок работоспособность пар трения снижается в 15 и 9 раз соответственно при смазывании контактных поверхностей Эра ВНИИНП-286М и Aero Shell Grease 33.

Разрушение смазочной пленки при трении является одним из ведущих факторов, обуславливающих интенсификацию энергетических процессов, происходящих в зоне

Таблица 1. Изменение градиента скорости сдвига смазочных слоев и количество циклов наработки пар трения до проявления признаков схватывания

Смазочный материал	Контактная нагрузка, МПа			
	250	400	550	700
	Градиент скорости сдвига смазочных слоев, $\text{с}^{-1}$			
Эра ВНИИНП-286М	$1.4 \times 10^5$	$4.2 \times 10^5$	$1.4 \times 10^6$	$2.9 \times 10^6$
Aero Shell Grease 33	$7.5 \times 10^5$	$9.1 \times 10^4$	$1.4 \times 10^5$	$2.6 \times 10^5$
	Количество циклов наработки до схватывания пар трения			
Эра ВНИИНП-286М	300	80	50	20
Aero Shell Grease 33	900	150	130	100

контакта. Прежде всего, это проявляется в нарушении структурной приспособляемости контактных поверхностей и смазочного материала в критических условиях трения, разрушением ранее образованных метастабильных структур. Переход трибосистемы в термодинамически неустойчивое состояние характеризуется, прежде всего, резкой активацией металла вследствие концентрации напряжений на локальных участках фрикционного контакта в местах разрушения экранирующей пленки смазочного материала, что проявляется в повышении удельной работы трения.

При  $\sigma_{\max}$  250 МПа, согласно расчетной зависимости оценки режима смазочного действия  $\lambda = h/\sqrt{R_{a1}^2 + R_{a2}^2}$ , в контакте реализуется эластогидродинамический ( $\lambda = 3.13$ ) и гидродинамический ( $\lambda = 5.83$ ) режимы смазочного действия при использовании смазок Эра ВНИИНП-286М и Aero Shell Grease 33 соответственно. Следовательно, контактные поверхности разделены достаточным слоем смазочного материала, обеспечивающим локализацию касательных напряжений сдвига в тонком граничном слое смазки, что способствует уменьшению как внешних силовых воздействий, так и поверхностной деформации тонких слоев металла. Показатели удельной работы трения ( $A_{\text{тр}}$ ) составляют, в среднем, 3200 и 1000 Дж/мм<sup>2</sup> при смазывании пар трения Эра ВНИИНП-286М и Aero Shell Grease 33 соответственно.

С повышением  $\sigma_{\max}$  до 700 МПа вследствие резкого уменьшения толщины смазочной пленки условия работы трибосистемы соответствуют полусухому ( $\lambda = 0.21$ ) и граничному ( $\lambda = 1.67$ ) режимам смазочного действия при исследовании Эра ВНИИНП-286М и Aero Shell Grease 33 соответственно. В таких условиях трения интенсифицируются механо-химические процессы в тонких поверхностных слоях металла, повышается степень их деформационных изменений. Такие процессы характеризуются неравновесными кинетическими переходами трибосистемы, нарушением самоорганизации диссипативных структур, что приводит к увеличению удельной работы трения. При смазывании стали смазкой Эра ВНИИНП-286М  $A_{\text{тр}}$  повышается в три раза при увеличении  $\sigma_{\max}$  с 250 до 700 МПа и составляет 10000 Дж/мм<sup>2</sup> (рис. 4). Применение синтетической смазки Aero Shell Grease 33 способствует снижению удельной работы трения, в среднем, в 2–3 раза.

Именно стабильность диссипативных структур при их самоорганизации в динамических условиях нагружения является определяющим фактором работоспособности трибосистемы. Толщина смазочной пленки на уровне 1.5–3 мкм, обеспечивающая эласто- и гидродинамические режимы смазочного действия, высокие антифрикцион-

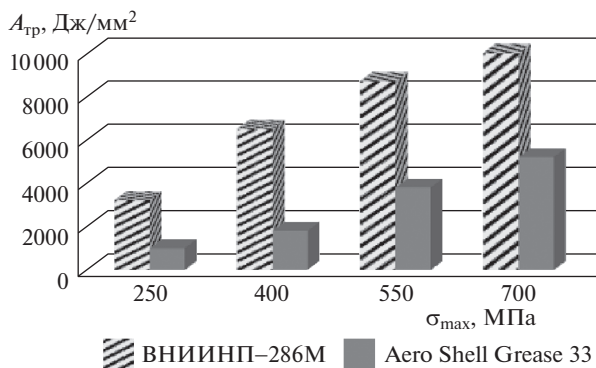


Рис. 4. Изменение удельной работы трения в контакте в условиях повышения контактной нагрузки.

ные свойства ( $f$  в пределах 0.01–0.015) и низкая удельная работа трения ( $A_{\text{тр}}$  составляет 1000–3200 Дж/мм<sup>2</sup>) при  $\sigma_{\text{max}}$  250 МПа обеспечивают наработку трибосистемы в условиях масляного голодания в пределах 300–900 циклов в зависимости от типа смазочного материала (табл. 1). С повышением  $\sigma_{\text{max}}$  до 700 МПа наблюдается снижение толщины смазочной пленки до 0.1–0.8 мкм, увеличение коэффициента трения до 0.03–0.05, повышение удельной работы трения до уровня 5000–10000 Дж/мм<sup>2</sup>, что приводит к резкому сокращению циклов наработки трибосистемы – первые признаки схватывания, в зависимости от типа смазки, проявляются на 20–100 циклах наработки.

Таким образом, только лишь за счет рационального выбора смазочного материала (замена смазки Эра ВНИИНП-286М на Aero Shell Grease 33) удалось увеличить количество циклов наработки трибосистемы до проявления первых признаков схватывания в 3 и 5 раз соответственно при  $\sigma_{\text{max}}$  250 и 700 МПа.

Помимо рассмотренных выше смазывающих и антифрикционных свойств смазки Aero Shell Grease 33, данный смазочный материал характеризуется более эффективными противоизносными свойствами, по сравнению со смазкой Эра ВНИИНП-286М аналогичного эксплуатационного назначения. Экспериментально установлено снижение общего линейного износа опережающей и отстающей поверхностей в 1.3 и 1.7 раза при  $\sigma_{\text{max}}$  250 и 700 МПа соответственно при смазывании пар трения смазкой Aero Shell Grease 33, по сравнению с Эра ВНИИНП-286М (рис. 5).

Анализ экспериментальных данных триботехнических характеристик исследуемых смазок показал наибольшее влияние на износ таких параметров, как контактная нагрузка  $\sigma_{\text{max}}$ , удельная работа трения  $A_{\text{тр}}$  и толщина смазочного слоя  $h$ . На основании этого получена эмпирическая зависимость линейного износа  $L_{\text{лин}}$  от указанных параметров

$$L_{\text{лин}} = \frac{\sigma_{\text{max}}^{0.1} A_{\text{тр}}^{0.1}}{h^{0.2}}. \quad (4)$$

Полученные расчетные значения  $L_{\text{лин}}$  по формуле (4) характеризуются высоким уровнем сходимости с измеренными показателями линейного износа с использованием метода искусственных баз (прибор ПМТ-3), что свидетельствует о качественной аппроксимации предложенной зависимости оценки линейного износа контактных поверхностей в критических условиях работы (рис. 6).

Таким образом, предложенная эмпирическая зависимость позволяет прогнозировать максимальный износ контактных поверхностей в критических условиях трения, к которым относятся условия прекращения подачи смазочного материала в зону кон-

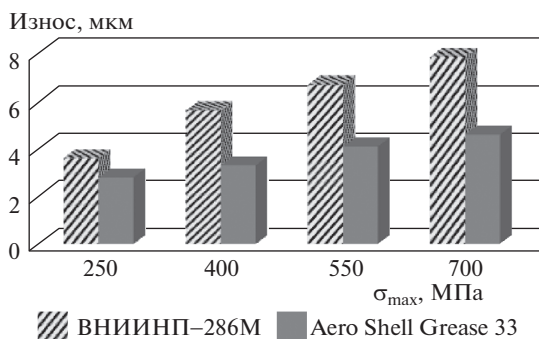
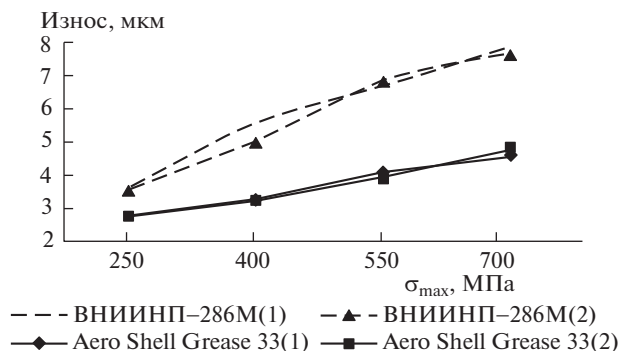


Рис. 5. Линейный износ опережающей и отстающей поверхностей в нестационарных условиях трения.



**Рис. 6.** Линейный износ поверхностей качения: 1 – экспериментальные значения (метод искусственных баз), 2 – расчетные значения по формуле (1).

такта и переход работы трибосистемы в режим масляного голодания. Качественная оценка данного процесса характеризуется интенсификацией деструкционных процессов в граничном слое смазочного материала и деформационных изменений тонких поверхностных слоев металла, приводящих к повышению энергонапряженности трибоконтакта и увеличению износа контактных поверхностей.

#### КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Hsu S.M., Klaus E.E., Cheng H.S. A mechano-chemical descriptive model for wear under mixed lubrication conditions // *Wear*. 1988. V. 128. № 3. P. 307.
2. Matveevsky R.M. Friction power as a criterion of seizure with sliding lubricated contact // *Wear*. 1992. V. 155. P. 1.
3. Lenahan P.M., Curry S.E. First observation of the (29) Si hyperfine spectra of silicon dangling bond centers in silicon nitride // *Appl. Phys. Lett.* 1990. V. 56. № 157. P. 207.
4. Warren O.L., Graham J.F., Norton P.R. et al. Nanomechanical properties of films derived from zinc dialkyldithiophosphate // *Tribology Letters*. 1998. V. 4. P. 189.
5. Ермаков С.Ф. Трибология жидкокристаллических наноматериалов и систем. Минск: Беларус. навука, 2011. 380 с.
6. Буяновский И.А., Игнатьева З.В., Левченко В.А. и др. Ориентационная упорядоченность граничных слоев и смазочная способность масел // *Трение и износ*. 2008. Т. 29. № 4. С. 375.
7. Mikosyanchyk O., Mnatsakanov R., Zaporozhets A., Kostynik R. Influence of the nature of boundary lubricating layers on adhesion component of friction coefficient under rolling conditions // *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2016. V. 4/1. N. 82. P. 24.
8. Israelachvili J. Adhesion forces between surfaces in liquids and condensable vapours // *Surface Science Reports*. 1992. V. 14. № 3. P. 109.
9. Israelachvili J.N. Intermolecular and surface forces, 3-rd ed., USA: Academic Press, 2011. 674 p.
10. Yoshizawa H., Israelachvili J. Fundamental mechanisms of interfacial friction. 2. Stick-slip friction of spherical and chain molecules // *J. Physical Chemistry*. 1993. V. 97. № 43. P. 11300.
11. Ляшенко Я.А., Хоменко А.В., Метлов Л.С. Феноменологическая теория плавления тонкой пленки смазки между двумя атомарногладкими твердыми поверхностями // *Журнал технической физики*. 2010. Т. 80. № 8. С. 120.
12. Порохов В.С. Трибологические методы испытания масел и присадок. М.: Машиностроение, 1983. 183 с.