

**ТЕХНИЧЕСКИЕ НАУКИ**  
**TECHNICAL SCIENCES**УДК 621.829+547.922  
DOI: 10.29235/1561-8323-2018-62-2-236-243Поступило в редакцию 18.10.2017  
Received 18.10.2017**С. Ф. Ермаков***Институт механики металлополимерных систем имени В. А. Белого  
Национальной академии наук Беларуси, Гомель, Республика Беларусь***ЭФФЕКТ ПОВЫШЕНИЯ АДсорбЦИОННОЙ АКТИВНОСТИ ХОЛЕСТЕРИЧЕСКИХ  
ЖИДКОКРИСТАЛЛИЧЕСКИХ СОЕДИНЕНИЙ В ПРОЦЕССЕ ТРЕНИЯ ТВЕРДЫХ ТЕЛ***(Представлено академиком Н. К. Мышкиным)*

**Аннотация.** Установлено, что при статическом контакте твердых тел с жидкими смазочными материалами, содержащими поверхностно-активные вещества и холестерические жидкокристаллические соединения, закономерности их адсорбции зависят от природы и химического состава адсорбента. При длительном контактировании порошков меди, стали и стекла с растворами олеиновой кислоты в вазелиновом масле концентрация присадки уменьшается, а в случае растворов жидкокристаллических соединений холестерического типа их концентрация в масле увеличивается. При динамическом контакте металлов (пара трения сталь–сталь) адсорбционные процессы с участием растворов жидкокристаллических соединений протекают по иным механизмам. Обнаружено увеличение адсорбционной активности холестерических жидкокристаллических соединений при трении твердых тел. Установлено, что изменение концентрации жидкокристаллической присадки в отработанном масле за счет трибоактивируемой адсорбции в процессе динамического контакта коррелирует со снижением и последующей стабилизацией коэффициента трения пары сталь–сталь.

**Ключевые слова:** холестерические жидкокристаллические соединения, адсорбционная активность, статический контакт, динамический контакт, поверхности трения, смазочные материалы

**Для цитирования:** Ермаков, С. Ф. Эффект повышения адсорбционной активности холестерических жидкокристаллических соединений в процессе трения твердых тел / С. Ф. Ермаков // Докл. Нац. акад. наук Беларуси. – 2018. – Т. 62, № 2. – С. 236–243. DOI: 10.29235/1561-8323-2018-62-2-236-243

**Sergey F. Ermakov***V. A. Belyi Metal-Polymer Research Institute of the National Academy of Sciences of Belarus, Gomel, Republic of Belarus***EFFECT OF INCREASING THE ADSORPTIVE ACTIVITY OF CHOLESTERIC LIQUID-CRYSTAL  
COMPOUNDS IN THE FRICTION OF SOLID BODIES***(Communicated by Academician Nikolai K. Myshkin)*

**Abstract.** It is found that, when solid bodies are in static contact with liquid lubricants containing surfactants and cholesteric liquid-crystal compounds, the behavior of their adsorption depends on the adsorbent nature and chemical composition. When copper, steel and glass powders are in long contact with oleic acid solutions in Vaseline oil, the additive concentration decreases, and in the case of solutions of cholesteric liquid-crystal compounds, their concentration in oil increases. When metals (friction pair steel–steel) are in dynamic contact, adsorption processes involving solutions of liquid crystal compounds occur by other mechanisms. The increase in the adsorption activity of cholesteric liquid-crystal compounds in the friction of solids is established. It is found that changing the concentration of liquid-crystal additives in the used oil due to the adsorption tribo-activity in the process of dynamic contact correlates with a decrease and a subsequent stabilization of the friction coefficient of the steel–steel pair.

**Keywords:** cholesteric liquid-crystal compounds, adsorption activity, static contact dynamic contact, friction surface, lubricants

**For citation:** Ermakov S. F. Effect of increasing the adsorptive activity of cholesteric liquid-crystal compounds in the friction of solid bodies. *Doklady Natsional'noi akademii nauk Belarusi = Doklady of the National Academy of Sciences of Belarus*, 2018, vol. 62, no. 2, pp. 236–243 (in Russian). DOI: 10.29235/1561-8323-2018-62-2-236-243

**Введение.** Для современной трибологии в последние годы характерен повышенный интерес к использованию в качестве присадок структурно упорядоченных органических соединений, в том числе и биологического происхождения. Среди таких материалов наибольший интерес представляют холестерические жидкокристаллические (ЖК) соединения, т. е. такие вещества, которые благодаря своему химическому строению при определенных термодинамических условиях способны структурироваться не только у опорной поверхности, но и на удалении от нее и одновременно обладают свойствами жидкости [1–3]. Подтверждением этого является тот факт, что под действием опорных поверхностей физико-механические свойства тонких граничных слоев молекул ЖК-соединений могут изменяться и намного отличаться от их объемных [4].

Таким образом, анализ успехов трибологии и физики конденсированного состояния показывает, что на современном этапе идея обеспечения ЖК-состояния структурно упорядоченных на наноуровне граничных слоев в зоне динамического контакта тел различной природы и изучение их свойств приобретает все более решающее значение. Реализация этой идеи может иметь весьма существенный практический выход, состоящий в использовании реологических и структурных моделей, разработанных в физике жидких кристаллов, для решения задач смазочного действия, а также разработки эффективных методов и средств управления фрикционным взаимодействием и топографией на наноуровне различных по природе поверхностей [1; 3; 5]. Она все также актуальна в условиях как статического, так и динамического контакта твердых тел, когда наличие в их микрозазоре граничных слоев с особой структурой определяет степень диссипации энергии трения.

Однако многочисленные данные, касающиеся взаимодействия жидкокристаллических материалов с твердой поверхностью, в частности, адсорбции их молекул, описывают поведение индивидуальных жидких кристаллов и в основном рассматривают сферу их электрооптического применения [4–6]. В то же время в трибологическом аспекте несомненный интерес представляют сведения о взаимодействии смазочных материалов, содержащих жидкокристаллические присадки, с динамически контактирующими поверхностями, поскольку в этом случае граничное смазывание определяется механизмом, при котором эффективность смазочного действия связана исключительно со свойствами адсорбируемых из молекул присадок – тонких полимолекулярных пленок, непосредственно примыкающих к твердым поверхностям.

Цель работы – установление закономерностей адсорбции в условиях статического и динамического контакта твердых тел со смазочными материалами, содержащими в качестве присадок холестерические жидкокристаллические соединения.

**Материалы и методы исследования.** Триботехнические испытания проводились на машине трения СМТ-1 по схеме «вал–частичный вкладыш» с парой трения сталь 45–сталь 45 при скорости скольжения 0,5 м/с и нагрузке 3,5 МПа. В качестве смазочного материала использовали инактивное медицинское вазелиновое масло с добавкой 1 мас. % ЖК-соединений. Смазка осуществлялась посредством нахождения части ролика в процессе испытаний в исследуемом смазочном материале.

Эксперименты по выявлению адсорбции ЖК-соединений из растворов на поверхностях в статических условиях контакта твердых тел основывались на методике, заключающейся в оценке концентрации исследуемой добавки в базовых составах до и после взаимодействия их с поверхностями порошков меди, железа и стекла. Базовым составом для растворов в данных экспериментах также служило инактивное медицинское вазелиновое масло. В качестве исследуемых растворов использовали 2 %-ные добавки с одной стороны поверхностно-активного вещества – олеиновой кислоты, а с другой – ее жидкокристаллической производной, содержащей смесь эфиров холестерина с мезофазой в области температур 16–40 °С. Таким образом, в диапазоне температур, при которых проводились опыты, указанная ЖК-композиция находилась в жидкокристаллическом состоянии.

Изменения концентрации исследуемых добавок в базовых составах оценивали методом ИК фурье-спектроскопии на спектрометре Specord 751R (Германия) Nicolet 5700. Концентрацию ЖК-соединений в растворах масла определяли по интенсивности поглощения линии спектра  $1740\text{ см}^{-1}$ , олеиновой кислоты –  $1712\text{ см}^{-1}$ . Предварительно готовили составы различной концентрации олеиновой кислоты и ЖК-соединений в вазелиновом масле и строили тарировочные графики зависимости интенсивности указанных линий спектра от содержания данных добавок в базовых составах. После этого к образцам 2 %-ных растворов масел (10 мл) добавляли порошки меди, железа и стекла.

Предполагалось, что изменения концентрации исследуемых растворов свидетельствуют об адсорбции их компонентов на поверхностях твердых тел и трения, а неизменность концентрации – о равной активности компонентов раствора по отношению к исследуемым твердым телам.

После добавления порошков в исследуемые растворы из них отбирали пробы и, отфильтровав, определяли концентрацию добавки в исследуемых составах. Поскольку процесс фильтрования занимал определенное время, то растворы олеиновой кислоты и ЖК-соединений в вазелиновом масле контактировали с указанными порошками в среднем около одного часа. Повторные пробы для определения содержания данных добавок в вазелиновом масле отбирали через сутки после смешивания. Кроме того, для сравнения оценивали концентрацию присадок в базовых маслах после пропускания исходных, т. е. 2 %-ных растворов через фильтр. В ходе экспериментов было отмечено, что последнее имело немаловажное значение, так как во всех случаях наблюдалась явная тенденция к изменению концентрации исходных растворов после фильтрования.

**Результаты и их обсуждение.** В настоящее время считается общепризнанным, что во время динамического контакта, например, металлов при наличии смазочных материалов, содержащих ПАВ, на трущихся поверхностях образуются тонкие полимолекулярные граничные смазочные слои [7–10]. Рядом исследователей установлено, что эти слои обладают специфическими физико-механическими свойствами, в частности, способны выдерживать очень большие нормальные нагрузки, а при сдвиге они деформируются подобно упругим телам [7; 11; 12]. Несомненно, что процессы образования таких слоев имеют конкурирующий характер и связаны с адсорбцией тех или иных компонентов смазочной среды.

В настоящее время можно считать доказанным, что устойчивое понижение коэффициента трения под влиянием смазки в основном определяется адсорбционным или химическим взаимодействием смазочной прослойки с поверхностями трения. Однако в случае содержания в базовых составах присадок традиционным является вопрос о том, какие компоненты смазки более активно участвуют при трении в адсорбционных процессах? Очевидно, что это могут быть как молекулы присадки, так и молекулы самой смазочной основы. С такой же степенью вероятности возможен и другой вариант, при котором адсорбционный процесс может носить аддитивный характер. В специфических условиях трения не исключается и тот случай, когда преобладающее действие тех или иных компонентов смазки в конкурирующем процессе может меняться при фрикционном взаимодействии трущихся тел с течением времени. Ниже описываются эксперименты, с помощью которых сделана попытка ответить на поставленные вопросы и разрешить отмеченные противоречия, причем как в статических, так и динамических условиях контакта твердых тел.

Результаты экспериментов по выяснению адсорбционной активности молекул олеиновой кислоты и ее ЖК-производной из растворов вазелинового масла на поверхностях твердых тел в статических условиях контакта, т. е. при их взаимодействии с порошками меди, железа и стекла, показаны на рис. 1 и рис. 2 соответственно.

Из результатов, представленных на рис. 1, видно, что общий характер взаимодействия растворов олеиновой кислоты в вазелиновом масле с порошками исследуемых твердых тел не отличается от того, который описан, например, в [7; 9–12]. Анализ экспериментальных данных показывает, что растворы указанного ПАВ, как и следовало ожидать, активно взаимодействуют с медью (рис. 1, *a*) и очень слабо – с железом и стеклом (рис. 1, *b*, *c*). Показано, что с течением времени для всех исследуемых твердых тел наблюдается тенденция к уменьшению содержания олеиновой кислоты в смазочном материале (рис. 1, *т. В*). Последнее указывает на то, что при вза-

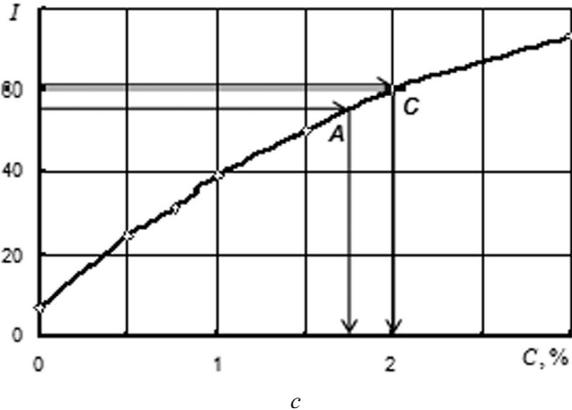
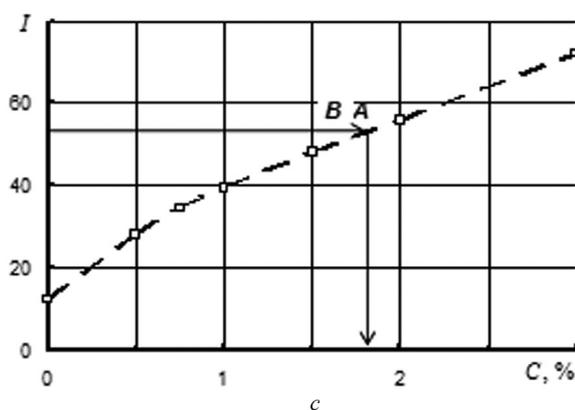
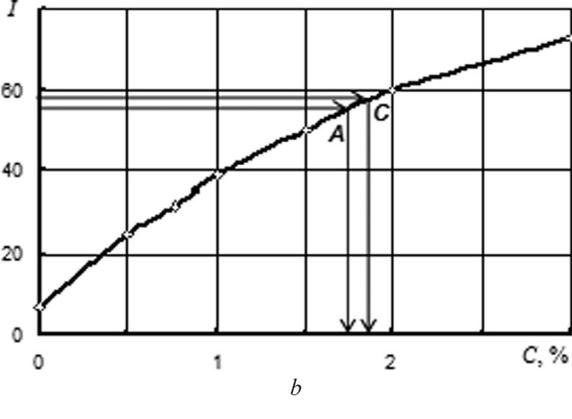
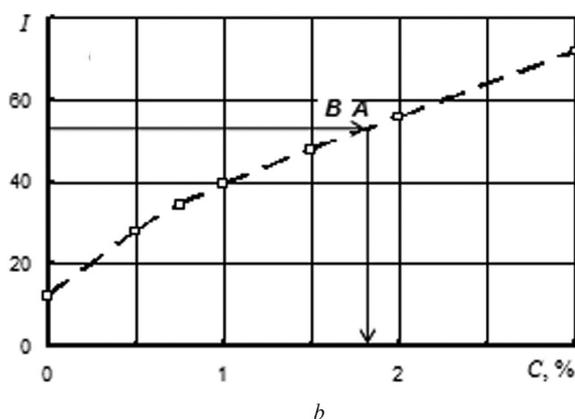
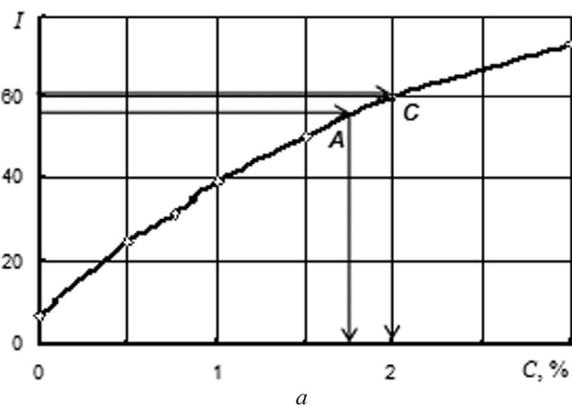
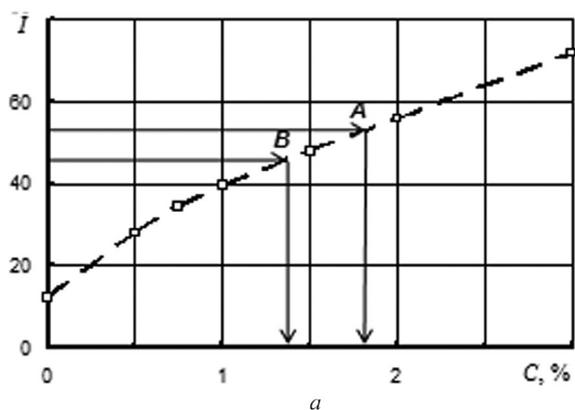


Рис. 1. Интенсивности поглощения характерных линий ИК-спектра и концентрации 2 %-ного раствора олеиновой кислоты в вазелиновом масле: *A* – исходного раствора после фильтрования; *B* – после пребывания в нем в течение 1 ч порошков меди (*a*), железа (*b*) и стекла (*c*)

Fig. 1. The intensity of absorption of the characteristic lines in the IR-spectrum and a concentrations of 2 % solution of oleic acid in Vaseline oil: *A* – the initial solution after filtration; *B* – after staying in it for 1 hour copper powders (*a*), iron (*b*) and glass (*c*)

Рис. 2. Интенсивности поглощения характерных линий ИК-спектра и концентрации 2 %-ного раствора ЖК-производной олеиновой кислоты в вазелиновом масле: *A* – исходного раствора после фильтрования; *C* – после пребывания в нем в течение 1 ч порошков меди (*a*), железа (*b*) и стекла (*c*)

Fig. 2. The intensity of absorption of the characteristic lines in the IR-spectrum and a concentrations of 2% solution of liquid crystalline derivative oleic acid in Vaseline oil: *A* – the initial solution after filtration; *C* – after staying in it for 1 hour copper powders (*a*), iron (*b*) and glass (*c*)

имодействии с поверхностями частиц меди молекулы олеиновой кислоты имеют более высокую адсорбционную способность, чем молекулы вазелинового масла. Здесь следует отметить, что такая закономерность характерна и для растворов олеиновой кислоты в других базовых составах, например, в кремнийорганической жидкости ПЭС-В-2.

В то же время если при контакте растворов олеиновой кислоты в этих средах с порошками меди наблюдается довольно существенное уменьшение содержания олеиновой кислоты в исследуемых составах, то при контакте этих растворов с порошками железа и стекла отмеченная тенденция в уменьшении концентрации исходных растворов становится менее заметной (рис. 1, *b*, *c*). Последнее, по-видимому, можно объяснить одинаковой конкурирующей способностью участвующих в данных процессах молекул базового масла и молекул ПАВ-присадки. Иначе говоря, на основании экспериментов можно заключить, что неизменность концентрации исходных растворов, наблюдаемая при их контакте с порошками железа и стекла, свидетельствует о практически одинаковой адсорбционной способности молекул олеиновой кислоты и молекул вазелинового масла на поверхностях этих твердых тел.

Опыты с растворами холестерических ЖК-соединений в смазочных жидкостях продемонстрировали совсем иной результат. Установлено, что концентрация ЖК-соединений в вазелиновом масле после контактирования с порошками указанных твердых тел во всех случаях повышалась (рис. 2). Аналогичная картина наблюдается и для растворов холестерических ЖК-соединений в кремнийорганических жидкостях. Это дает основание утверждать, что при контакте растворов холестерических ЖК-соединений с порошками меди, железа и стекла в статических условиях контакта адсорбционная способность молекул ЖК-соединений гораздо меньше, чем адсорбционная способность самих молекул базовых составов. Иначе говоря, проведенные исследования не подтверждают предположение об адсорбции молекул холестерических ЖК-соединений на поверхностях твердых тел из растворов смазочных материалов при статических условиях контакта.

Однако, как отмечается в работе [7], результаты подобных опытов в «статике» могут существенно отличаться от того, что можно ожидать в условиях динамического контакта. Поэтому были проведены дополнительные исследования, в которых сделана попытка оценить изменения в концентрации жидкокристаллической добавки в вазелиновом масле в условиях динамического контакта, а именно, при смазке гомогенной пары трения сталь 45–сталь 45. Результаты этих экспериментов представлены на рис. 3.

Хорошо известно, что разнообразные межфазные слои между поверхностями трения, разъединяя и препятствуя их сближению, могут значительно понижать силу трения, а вследствие этого и износ, снижая напряженное состояние в приповерхностных областях трущихся твердых тел [11–14]. Очевидно, что эти процессы могут быть непосредственно связаны с адсорбционным или химическим взаимодействием молекул смазочных материалов с поверхностями трения [11; 12; 15].

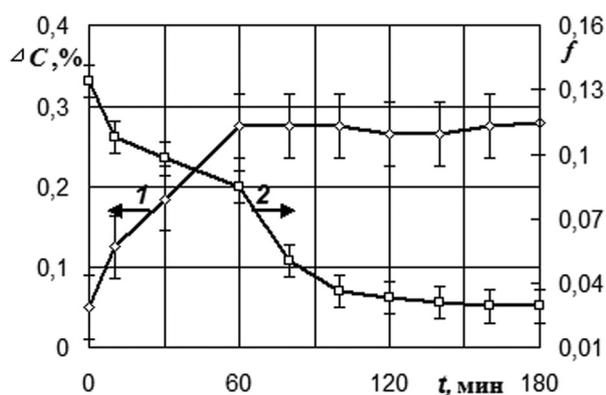


Рис. 3. Изменение концентрации холестерических ЖК-соединений в вазелиновом масле (1) и коэффициента трения (2) для пары сталь 45–сталь 45 с течением времени

Fig. 3. The change in the concentration of cholesteric liquid crystal compounds in Vaseline oil (1) and the coefficient of friction (2) for the couple of steel 45–steel 45 with time

При этом сам по себе динамический контакт при трении может интенсифицировать данные процессы. Вполне вероятно, что такое поведение может наблюдаться и в нашем случае.

Действительно, показано, что в условиях динамического контакта адсорбционные процессы для растворов ЖК-соединений холестерического типа в вазелиновом масле имеют принципиально иной характер. Экспериментально установлено, что при работе пары трения сталь–сталь наблюдается не увеличение, как было отмечено ранее при статическом контакте, а, наоборот, понижение содержания ЖК-соединений в отработанной смазке.

Таким образом, в ходе проведенных исследований обнаружен эффект повышения адсорб-

ционной активности молекул холестерических ЖК-соединений в базовом смазочном составе под воздействием процессов трения сопряженных тел. Установлено, что трибоактивированная при динамическом контакте поверхностей трения адсорбция молекул ЖК-соединений явно коррелирует с повышением, а затем и стабилизацией их трибологических характеристик (рис. 3).

На основании экспериментально обнаруженных изменений концентрации смазочных материалов, а также оценки площади поверхности трения можно утверждать, что толщина слоя молекул ЖК-соединений, адсорбирующихся в зоне динамического контакта, может составлять 20 нм. Последнее, с учетом размеров молекул холестерических ЖК-соединений (длина  $\approx 1,5$  нм; диаметр  $\approx 0,5$  нм), убедительно свидетельствует в пользу полимолекулярной организации адсорбированных слоев данных ЖК-соединений на поверхностях трения. Отмечено, что вследствие реализации эффекта «гость-хозяин» и достаточно сильного ориентирующего действия ЖК-соединений на молекулы базовой смазочной жидкости последние также могут непосредственно участвовать в формировании указанных выше полимолекулярных слоев. Очевидно, что толщина смазочных слоев, содержащих ЖК-соединения, может быть намного больше, чем рассчитанная без учета влияния, а следовательно, и участия в формировании полимолекулярных слоев молекул базового смазочного материала.

Таким образом, можно утверждать, что в процессе фрикционного взаимодействия происходит активация адсорбционной способности ЖК-соединений холестерического типа, позволяющая им адсорбироваться на поверхностях трения. Последнее способствует образованию двухуровневой регулярной организации профиля поверхностей трения, когда отдельные выступы плосковершинного микрорельефа приобретают специфический субмикрорельеф, с микронеровностями меньшего порядка, чем в случае использования других смазочных материалов (рис. 4). Отмечено, что такая топография поверхностей трения, несущих адсорбированную на них пленку ЖК-соединений, наиболее благоприятна для снижения локальных контактных напряжений в зоне трения и, как следствие, уменьшения тепловыделения и деформационных потерь при фрикционном взаимодействии, что и наблюдается экспериментально в снижении и стабилизации коэффициента трения со временем в течение испытаний (рис. 3).

Рассматривая возможные причины повышения адсорбционной активности молекул ЖК-соединений, можно предположить, что, вероятнее всего, к этому эффекту приводит «обновление» (удаление оксидов, пластическая деформация металлов и т. д.) поверхности трения в про-

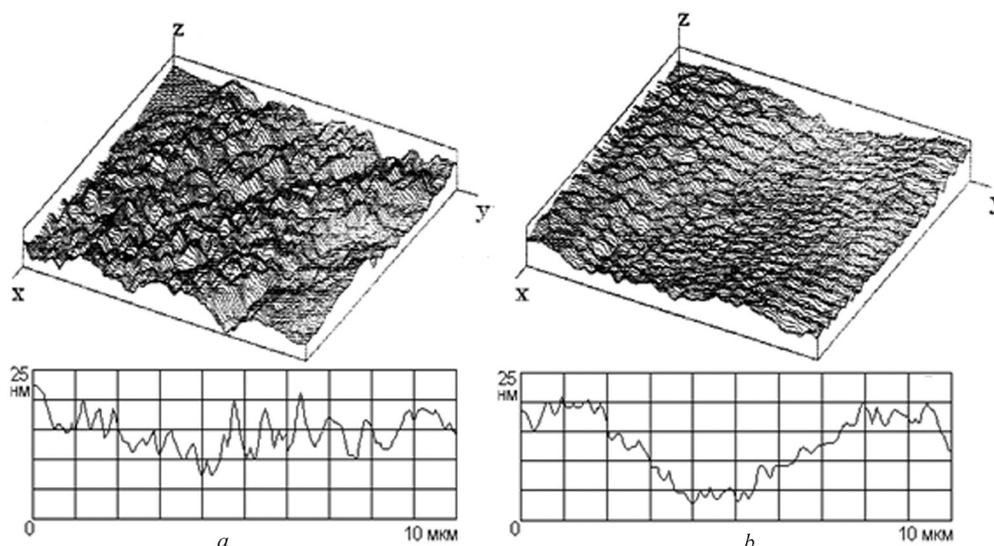


Рис. 4. Топография (верхняя часть) и профиль (нижняя часть) поверхностей трения стали после работы в вазелиновом масле без присадки (а) и с добавлением соединений холестерина жидких кристаллов (б) (сканирующая туннельная микроскопия; сканирующая величина 10 мкм)

Fig. 4. Topography (top) and profile (bottom) of the friction surfaces of steel after work in Vaseline oil without additive (a) and with the addition of cholesteric liquid crystal compounds (b) (scanning tunneling microscopy; scan size  $10 \times 10 \mu\text{m}$ )

цессе работы пары и непосредственный контакт компонентов смазки со свежееобразованными ее участками.

Повышение свободной поверхностной энергии локальных ювенильных областей динамически контактирующих поверхностей может быть источником аддитивного увеличения взаимодействия молекул смазочной жидкости и поверхностей трения. Важную роль в этих процессах может играть и возникновение при трении в смазочной прослойке двойного электрического слоя, который, оказывая поляризующее и ориентирующее действие на химически инактивные молекулы холестерических ЖК-соединений, также может влиять на их адсорбционную способность при фрикционном взаимодействии. Поэтому, на наш взгляд, именно суперпозицией всех этих факторов можно объяснить увеличение адсорбционной активности холестерических ЖК-соединений, наблюдаемое при данных условиях трения.

**Заключение.** Таким образом, при статическом и динамическом контакте твердых тел установлены закономерности адсорбции смазочных сред, содержащих в качестве присадки как олеиновую кислоту, так и ее ЖК-производную холестерического типа. Показано, что для холестерических ЖК-соединений адсорбция наблюдается только при динамическом контакте поверхностей. Для пары трения сталь–сталь установлена прямая связь между трибоактивируемой при динамическом контакте адсорбцией холестерических ЖК-соединений и антифрикционными характеристиками трибосопрежения.

**Благодарности.** Работа выполнена при поддержке Белорусского республиканского фонда фундаментальных исследований (проект T18P-072).

**Acknowledgements.** The work is supported by Belarusian Republican Foundation for Fundamental Research (project no. T18P-072).

### Список использованных источников

1. Жидкие кристаллы: дискотические мезогены / Н. В. Усольцева [и др.]; под ред. Н. В. Усольцевой. – Иваново: Иван. гос. ун-т, 2004. – 546 с.
2. Persson, B. N. J. *Sliding Friction: Physical Principles and Applications* / B. N. J. Persson. – Berlin; Heidelberg; New York: Springer-Verlag, 2000. – 516 p.
3. Жидкие кристаллы в технике и медицине / С. Ф. Ермаков [и др.]. – Минск: Асар; М.: ЧеРо, 2002. – 412 с.
4. Коньяр, Ж. Ориентация нематических жидких кристаллов и их смесей / Ж. Коньяр. – Минск: Университетское, 1986. – 104 с.
5. *Tribology and the liquid-crystalline state* / ed. G. Biresaw. – American Chemical Society, 1990. – Vol. 441. – 130 p. DOI: 10.1021/bk-1990-0441
6. Blinov, L. M. *Electrooptic Effects in Liquid Crystal Materials. Series: Partially Ordered Systems* / L. M. Blinov, V. G. Chigrinov. – New York: Springer-Verlag, 1994. – 465 p. DOI: 10.1007/978-1-4612-2692-5
7. Кутьков, А. А. О механизме трения полимеров, смазанных поверхностно-активными смазками / А. А. Кутьков // *Механика полимеров*. – 1965. – № 1. – С. 128–135.
8. Аэро, Э. Л. Микромеханика мехконтактных структурированных слоев жидкости / Э. Л. Аэро, Н. М. Бессонов // *Итоги науки и техники. Сер. Механика жидкости и газа*. – М., 1989. – С. 237–315.
9. Пинчук, Л. С. Основы трибологии / Л. С. Пинчук. – Гомель: Инфотрибо, 1996. – 78 с.
10. Богданович, П. Н. Трение и износ в машинах / П. Н. Богданович, В. Я. Прушак. – Минск: Высш. шк., 1999. – 374 с.
11. Ахматов, А. С. Молекулярная физика граничного трения / А. С. Ахматов. – М.: Физматгиз, 1963. – 472 с.
12. Фукс, Г. И. Адсорбция и смазочная способность масел / Г. И. Фукс // *Трение и износ*. – 1983. – Т. 4, № 3. – С. 398–414.
13. The role of tribochemical processes during friction of super high molecular polyethylene (shmpе) impregnated with a silver organic compound / A. P. Krasnov [et al.] // *Трение и износ*. – 2002. – Т. 23, № 1. – С. 72–77.
14. Исследование свойств поверхностей трения и способов, управляющих ими, в металлополимерном сопряжении / В. И. Колесников [и др.] // *Тр. ЮНЦ РАН*. – 2007. – Т. 2. – С. 20–35.
15. Трение, износ и смазка / под ред. А. В. Чичинадзе. – М.: Машиностроение, 2003. – 510 с.

### References

1. Usol'tseva N. V., Okopova O. B., Bikova V. V., Smirnova A. I., Pikin S. A. *Liquid Crystals: Discotic Mesogens*. Ivanovo, Ivanovo State University, 2004. 546 p. (in Russian).
2. Persson B. N. J. *Sliding Friction: Physical Principles and Applications*. Berlin, Heidelberg, New York, Springer-Verlag, 2000. 516 p.
3. Ermakov S. F., Rodnenkov V. G., Beloenko E. D., Kupchinov B. I. *Liquid Crystals in Engineering and Medicine*, Minsk, Asar Publ; Moscow, CheRo Publ., 2002. 412 p. (in Russian).

4. Congrad J. *Alignment of Nematic Liquid Crystals and Their Mixtures*. London, Gordon and Breach, 1982. 104 p.
5. Biresaw G. (ed.). *Tribology and the liquid-crystalline state*. American Chemical Society, 1990, vol. 441. 130 p. DOI: 10.1021/bk-1990-0441
6. Blinov L. M., Chigrinov V. G. *Electrooptic Effects in Liquid Crystal Materials. Series: Partially Ordered Systems*. New York, Springer-Verlag, 1994. 456 p. DOI: 10.1007/978-1-4612-2692-5
7. Kut'kov A. A. About the Mechanism of a Friction of the Polymers Greased with Surface-Active Greasings. *Mekhanika polimerov* [Mechanics of Polymers], 1965, no. 1, pp. 128–135 (in Russian).
8. Aero E. L., Bessonov N. M. Micromechanics of Structural Liquid Layers Between Solids in Contact. *Itogi nauki i tehniki. Seriya Mehanika zhidkosti i gaza* [Advances in Science and Technology. Series of Liquid and Gas Mechanics]. Moscow, VINITI, 1989, vol. 23, pp. 237–315 (in Russian).
9. Pinchuk L. S. *The basics of tribology*. Gomel, Infotribo Publ., 1996. 280 p. (in Russian).
10. Bogdanovich P. N., Prushak V. Ya *Friction and Wear in Machines*. Minsk, Vysheishaya Shkola Publ., 1999. 374 p. (in Russian).
11. Akhmatov A. S. *Molecular Physics of Boundary Friction*. Moscow, Fizmatgiz Publ., 1963. 472 p. (in Russian).
12. Fuks G. I. Adsorption and Lubricating Ability of Oils. *Trenie i iznos = Journal of Friction and Wear*, 1983, vol. 4, no. 3, pp. 398–414 (in Russian).
13. Krasnov A. P., Tokareva N. V., Popov V. K., Houdle S., Morley C., Afonicheva O. V. The role of tribochemical processes during friction of super high molecular polyethylene (shmp) impregnated with a silver organic compound. *Trenie i iznos = Journal of Friction and Wear Soviet*, 2002, vol. 23, no. 1, pp. 72–77 (in Russian).
14. Kolesnikov V. I., Kozakov A. T., Myasnikova N. A., Sidashov A. V. The study of the properties of friction surfaces and methods governing them, metal mate. *Trudy Juzhnogo nauchnogo centra Rossijskoj akademii nauk* [Proceedings of the southern scientific center of Russian Academy of Sciences], 2007, vol. 2, pp. 20–35 (in Russian).
15. Chichinadze A. V. *Friction, wear and lubrication*. Moscow, Mashinostroenie Publ., 2003. 510 p. (in Russian).

#### Информация об авторе

Ермаков Сергей Федорович – д-р техн. наук, профессор, заведующий лабораторией. Институт механики металлополимерных систем им. В. А. Белого НАН Беларуси (ул. Кирова, 32а, 246050, Гомель, Республика Беларусь). E-mail: erm-s@yandex.ru.

#### Information about the author

Ermakov Sergey Fedorovich – D. Sc. (Engineering), Professor, Head of the Laboratory. V. A. Belyi Metal-Polymer Research Institute of the National Academy of Sciences of Belarus (32-a, Kirov Str., 246050, Gomel, Republic of Belarus). E-mail: erm-s@yandex.ru.