

## Оригинальная статья / Original article

УДК 531.43.46(063):621.891:621.895

<https://doi.org/10.21869/2223-1528-2024-14-1-150-160>

## Мезоморфизм и триботехнические характеристики смазочных композиций с мезогенными присадками карбоксилатами меди (II)

Л. В. Ельникова<sup>1✉</sup>, А. Т. Пономаренко<sup>2</sup>, В. Г. Шевченко<sup>2</sup>

<sup>1</sup> НИЦ «Курчатовский институт»

ул. Большая Черемушkinsкая, д. 25, г. Москва 117218, Российская Федерация

<sup>2</sup> Институт синтетических полимерных материалов РАН им. Н. С. Ениколопова

ул. Профсоюзная, д. 70/2, г. Москва 117393, Российская Федерация

✉ e-mail: elnikova@itep.ru

### Резюме

**Целью** работы является характеристика смазочных композиций на основе Литола-24 и синтетического солидола с присадками типа карбоксилатов меди(II) при использовании их в узлах трения в условиях нагружения и температурного воздействия.

Смазочные композиции с добавками в виде карбоксилатов меди(II) на основе синтетического солидола и Литола-24 образуют колончатые мезофазы в зависимости от термодинамических условий и концентрации присадок.

**Методы.** Смазочные композиции исследуются методом диэлектрической спектроскопии и поляризационной оптической микроскопии. Исследуемые СК испытаны на машинах трения предшествующими авторами, выполнившими их синтез и численные оценки геометрических параметров. Показано, что колончатая мезофаза, образуемая композициями с КМ, создает благоприятные трибологические условия смазки (снижение коэффициента трения в определенном диапазоне концентраций добавок и уменьшение износа) и в отличие от кристаллических фаз проявляет ориентационные эффекты на поверхности трущихся деталей машин и устройств.

**Результаты.** В измерениях получены основные диэлектрические характеристики двух сортов СК: диэлектрическая проницаемость и потери, электропроводность, тангенс угла потерь, построены функции Аррениуса и вычислены энергии активации изучаемых СК. Получены микрофотографии текстуры СК в зависимости от температуры и их состава. Подтверждены отличия в мезоморфных свойствах смазочных композиций с присадками валератом и изовалератом меди(II).

**Заключение.** Состав смазочной композиции оптимизируется выбором концентрации присадки, длиной мезогенной цепочки молекулы КМ и ее конформацией.

**Ключевые слова:** смазочные композиции; солидол; присадки; карбоксилаты меди(II); дискотические мезогены; колончатая фаза.

**Финансирование:** Работа выполнена в рамках государственного задания Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (тема № FFSM-2021-0006). Измерения ИК-Фурье спектров выполнены на оборудовании Ресурсного центра электрофизических методов Курчатовского комплекса НБИКС-технологий НИЦ «Курчатовский институт», измерения по поляризационной оптической микроскопии выполнены в ЦКП «Центр исследования полимеров» ИСПМ РАН им. Н. С. Ениколопова.

**Благодарности:** Авторы благодарят профессоров О. Б. Акопову и В. В. Терентьева за предоставление образцов для измерений и полезные обсуждения.

**Конфликт интересов:** Авторы декларируют отсутствие явных и потенциальных конфликтов интересов, связанных с публикацией настоящей статьи.

**Для цитирования:** Ельникова Л. В., Пономаренко А. Т., Шевченко В. Г. Мезоморфизм и триботехнические характеристики смазочных композиций с мезогенными присадками карбоксилатами меди (II) // Известия Юго-Западного государственного университета. Серия: Техника и технологии. 2024. Т. 14, № 1. С. 150–160. <https://doi.org/10.21869/2223-1528-2024-14-1-150-160>.

Поступила в редакцию 10.01.2024

Подписана в печать 21.02.2024

Опубликована 26.03.2024

## Mesomorphism and Tribotechnical Characteristics of Lubricant Compositions with Mesogenic Additives Carboxylates Cu(II)

Lilia V. Elnikova<sup>1</sup>, Anatolii T. Ponomarenko<sup>2</sup>, Vitaly G. Shevchenko<sup>2</sup>

<sup>1</sup> NRC-Kurchatov institute

25 Bolshaya Chermushkinskaya Str., Moscow 117218, Russian Federation

<sup>2</sup> N. S. Enikolopov Institute of Synthetic and Polymer Materials of RAS

70/2 Profsoyuznaya Str., 117393 Moscow, Russian Federation

✉ e-mail: elnikova@itep.ru

### Abstract

**The purpose** of the work is to characterize the lubricants based on Litol-24 and synthetic solidol with additives copper(II) carboxylates when using them in friction nodes in loading conditions and temperature.

The lubricant compositions with additives copper(II) carboxylates based on synthetic solidol and Litol-24 form the columnar mesophases depending on thermodynamical conditions and concentration of additives.

**Methods.** We study the lubricant compositions with dielectric spectroscopy and u polarization light microscopy. The studies lubricant compositions are tested on the frictional machines by preceding authors, which performed their synthesis and numerical estimations for their geometry parameters. It is shown, that the columnar mesophase formed by the compositions with copper(II) carboxylates simulates favourable tribological conditions for lubrication (reduction of the friction coefficient at the appointed range of additive concentrations and reduction of wear) and unlike to crystalline phases, shows orientation effects at the surface of interacting surfaces of machine elements and devices. These facts motivate the study of influence of physicochemical properties and composition on mesomorphism of considered lubricant compositions.

**Results.** In our measurements, we found the main dielectric characteristics of two kinds of the lubricant compositions: dielectric constant and dielectric loss, electroconductivity, dissipation factor, the Arrhenius functions are plotted, and the activation energies of the lubricant compositions we study are calculated. The microphotogram for textures of the lubricant compositions depending on temperature and concentrations are received. The differences in mesomorphic properties of the lubricant compositions with additives Cu(II) valerate and isovalerate are confirmed.

**The conclusion** of the work is that the composition of the lubricant is optimized by the choice of additive concentration, the length of the mesogenic chain of the copper(II) carboxylate molecule and its conformation.

**Keywords:** lubricant compositions; solidol; additives; copper(II) carboxylates; discotic mesogens; columnar phase.

**Funding:** The work was carried out within the framework of the state assignment of the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation (topic No. FFSM-2021-0006). Measurements of IR-Fourier spectra were carried out on the equipment of the Resource Center for Electrophysical Methods of the Kurchatov Complex of NBICS Technologies of the National Research Center "Kurchatov Institute", measurements using polarization optical microscopy were carried out at the Shared Use Center "Polymer Research Center" of the Institute of Applied Mathematics and Mechanics of the Russian Academy of Sciences. N. S. Enikolopova.

**Acknowledgments:** The authors thank professors O. B. Akopov and V. V. Terentyev for providing samples for measurements and useful discussions.

**Conflict of interest:** The authors declare no apparent or potential conflicts of interest related to the publication of this article.

**For citation:** Elnikova L. V., Ponomarenko A. T., Shevchenko V. G. Mesomorphism and Tribotechnical Characteristics of Lubricant Compositions with Mesogenic Additives Carboxylates Cu(II). *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Tekhnika i tekhnologii = Proceedings of the Southwest State University. Series: Engineering and Technologies*. 2024; 14(1): 150–160. (In Russ.) <https://doi.org/10.21869/2223-1528-2024-14-1-150-160>

Received 10.01.2024

Accepted 21.02.2024

Published 26.03.2024

\*\*\*

## Введение

Использование в различных узлах трения смазочных композитов [1] с добавками класса дискотических мезогенов [2] способствует снижению коэффициента трения и износа трущихся поверхностей деталей [3]. Для установления количественных и качественных зависимостей трибологических свойств от состава и конформации присадок карбоксилатов меди(II) (КМ) проведены многочисленные исследования композиций на основе солидола [4] и литиевых пластичных смазочных композиций [5]. Доказано, что они проявляют лиотропный жидкокристаллический мезоморфизм, т. е. при изменении концентрации компонентов в этих системах протекают фазовые переходы, в частности с образованием колончатой мезофазы [6], а также обладают термотропным мезоморфизмом [7]. В работе трибосопряжений дискотические мезофазы демонстрируют также ориентационные эффекты молекул в зависимости от температуры и механического воздействия, что влияет на коэффициент трения и другие эксплуатационные характеристики СК.

Знания о мезоморфных свойствах используемых присадок улучшают оценки эффективности смазочного материала с помощью известных теоретических моделей граничного трения, адгезии к поверхности образа и способствуют оптимизации состава смесей для конкретного практического применения.

Целью работы является характеристика СК на основе Литола-24 и солидола с присадками типа КМ при использовании их в узлах трения в условиях нагружения и температурного воздействия.

## Материалы и методы

Объектами исследования являются композиты на основе синтетического солидола и Литола-24, допированные карбоксилатами меди(II). Их структурная формула приведена на (рис. 1). Число синтезированных гомологов  $n$  равно 4 (валерат, изовалерат, 10 (ундецилат), 13 (мири-стат), 17 (стеарат), 21 (бенегат) Cu(II) [4]. Для изучения состава синтезированных карбоксилатов меди привлекался метод инфракрасной ИК-Фурье спектроскопии [5]: использовался спектрофотометр инфракрасный с Фурье-преобразованием IRPRESTIGE-21 (Shimadzu) на базе Ресурсного центра электрофизических методов Курчатовского комплекса НБИКС-технологий НИЦ «Курчатовский институт» в подразделении Ю. М. Паруновой. Спектральный диапазон спектрометра от 7800 до 350 см<sup>-1</sup>, а его спектральное разрешение равно 0,125 см<sup>-1</sup> [6].

Из полученных ИК-спектров и на основании исследований Накамото [8] и Мирной [9] сделан вывод, что преобладающая бидентантная мостиковая координация валентных групп СОО предполагает образование столбчатых надмолекулярных упаковок при переходе в кристаллическую мезофазу.

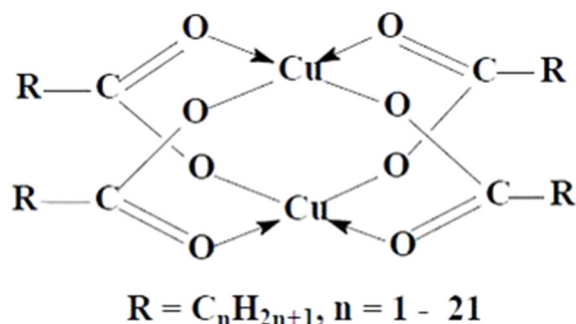


Рис. 1. Структурная формула карбоксилатов меди(II) [4]

Fig. 1. Structural formula of Cu(II) carboxylates [4]

Фазовые диаграммы с колончатыми мезофазами подробно изучены в литературе [10], установлена последовательность переходов между кристаллической, колончатой (дискотической) и изотропной фазами [11].

Состав базовых смазок Литола-24 и синтетического солидола описан в следующих документах: ГОСТ 4366-76 «Смазка солидол синтетический. Технические условия», ГОСТ 21150-87 «Смазка Литол-24. Технические условия». Преимущественно они состоят из смесей различных масел.

Смеси базовых смазок и присадок изготавливались методом механического смешивания в НИИ Наноматериалов Ивановского государственного университета и Ивановской государственной сельскохозяйственной академии им. ак. Д. К. Беляева, изучались на поляризационном оптическом микроскопе. Результаты численных расчетов геометрии молекул КМ проводились с использованием программы HyperChem и представлены в работе [4] для всех гомологов вплоть до  $n = 21$ .

Триботехнические испытания осуществлялись на машине трения 2070 СМТ-1 по схеме «вращающийся диск – неподвижный шар» (сталь 45 с твердостью

60 HRC, шар – сталь ШХ-15), частота вращения диска  $500 \text{ мин}^{-1}$ . Нагружение на образцы ступенчатое от 300 до 600 Н. Пробег при каждой нагрузке составлял 1 км [4]. Пятно износа на шаре измерялось с помощью микроскопа МПБ-2.

### Результаты и их обсуждение

На рисунке 2 приведены зависимости коэффициента трения и пятна износа на диске от концентрации КМ в Литоле-24, где выражена сильная зависимость основных трибологических параметров от конформации молекул КМ.

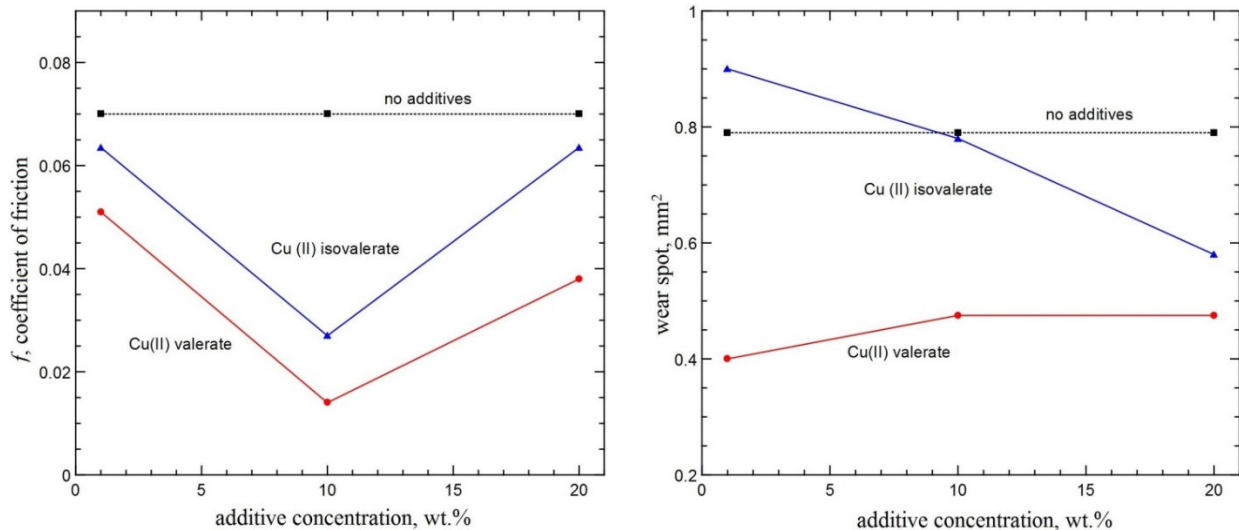
Данные диэлектрической спектроскопии. Диэлектрические величины исследуемых композиций: диэлектрическая проницаемость, потери, проводимость [12] – измерялись в диапазоне частот 100 Гц – 1 МГц с использованием установки [13], включающей в себя измерительную ячейку емкостью 7 пФ, измеритель емкости, сопротивления, индуктивности Fluke PM 6303 с точностью измерений  $0,1\%^1$ , блок термостатирования, включающий в себя термостат с регулятором температуры, персональный компьютер для сбора и записи данных [14]. Образцы в измерительных ячейках помещались в термостат. Объем исследуемого ве-

<sup>1</sup> Programmable Automatic RCL Meter PM 6306. User manual. FLUKE. 1996. URL: <http://www.download-servicemanuals.com/en/manual>.

[php?file=Fluke-4810.pdf](http://file=Fluke-4810.pdf) (дата обращения: 12.09.2023).

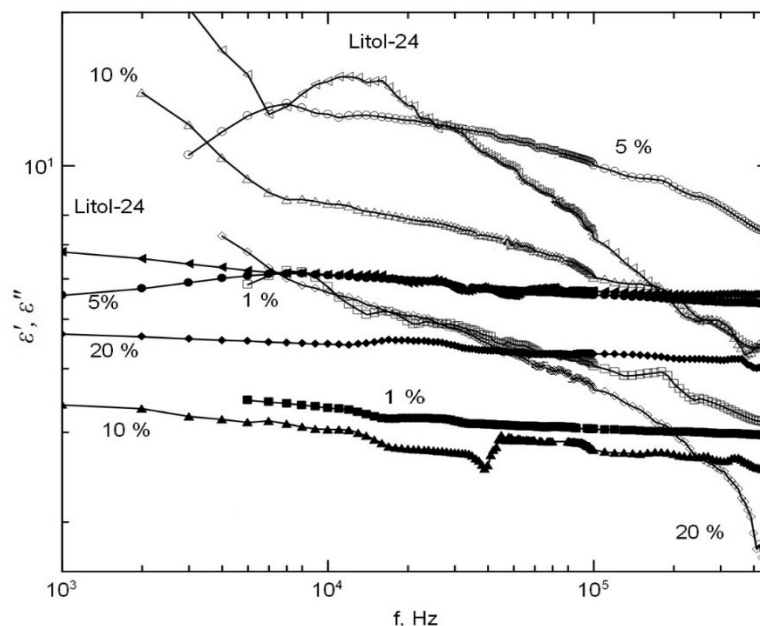
щества в ячейке составлял  $2,12 \text{ см}^3$ , площадь электрода  $7,07 \text{ см}^2$ . Температура образцов внутри термостата регистрировалась с помощью цифрового термометра

Актаком АТТ-2002 с погрешностью измерений, не превышающей  $0,5^\circ\text{C}$  [15]. Результаты диэлектрических измерений отображены на рисунках 3, 4.



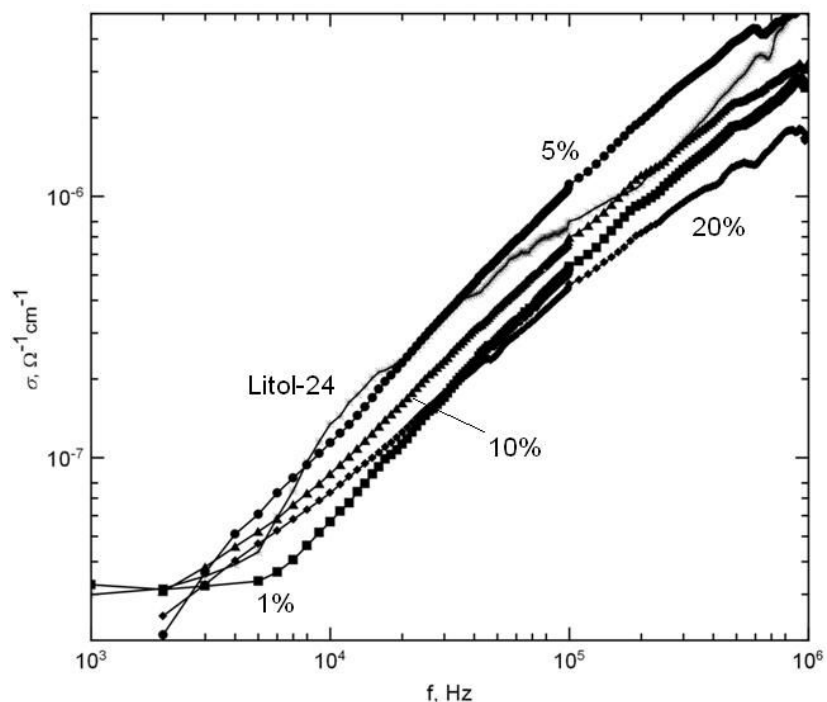
**Рис. 2.** Концентрационные зависимости коэффициента трения (слева) и пятна износа (справа) для смазочных композиций на основе Литола-24: без присадок (квадратики) и с добавлением валерата меди (кружки) и изовалерата меди (треугольники) согласно [4]

**Fig. 2.** Concentration dependencies of the friction coefficient (left) and the wear spot (right) for the Litol-24 based lubricant compositions: without additives (squares) and with additives Cu(II) valerate (circle) and Cu(II) isovalerate (triangles) due to [4]



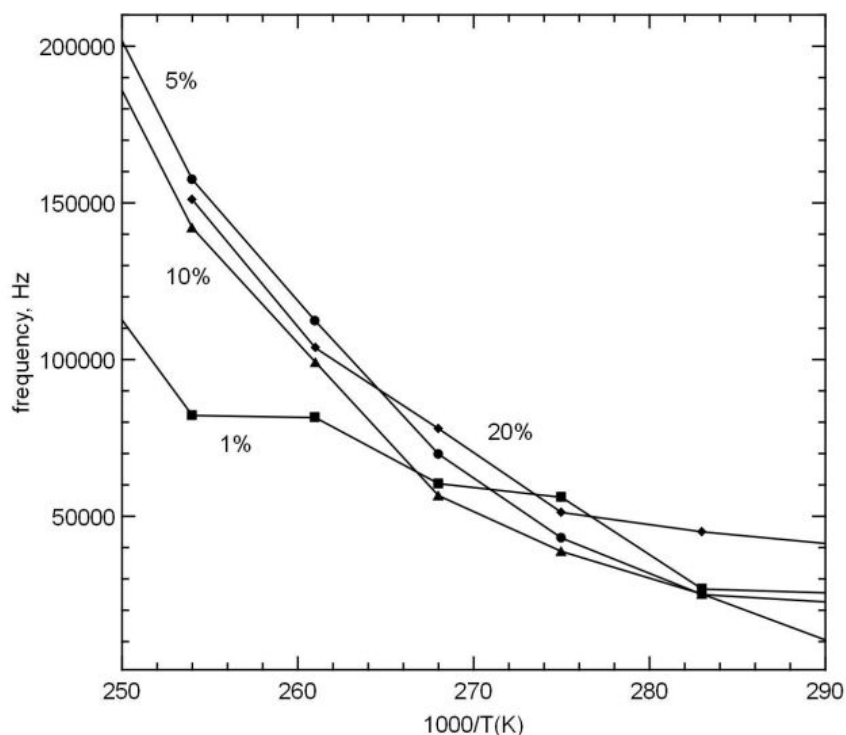
**Рис. 3.** Частотные зависимости диэлектрической проницаемости и диэлектрических потерь для Литола-24 и системы Литол-24 – валерат меди(II) при различных концентрациях (мас. %) при температуре 363 K

**Fig. 3.** Frequency dependencies of dielectric permeability and dielectric loss for Litol-24 and for the system Litol-24 - Cu(II) valerate at different concentrations (wt. %) at 363 K



**Рис. 4.** Удельная электропроводность Литол-24 и системы Литол-24 – валерат меди в различных концентрациях (мас. %) при температуре 363 К

**Fig. 4.** Specific electroconductivity of Litol-24 (curve 1) and of the system Litol-24 with different concentrations (wt. %) of Cu(II) valerate at 363 K



**Рис. 5.** Функции Аррениуса для смазочной композиции Литол-24- валерат меди (II) при различных концентрациях присадки, в мас. %

**Fig. 5.** The Arrhenius plot for the lubricant composition Litol-24 – Cu(II) valerate at different concentration of additives, in wt. %



В измерениях учитывалось, что температура плавления композиций на несколько градусов выше температуры плавления базовых смазок – Литола-24 и синтетического солидола.

Из полученных значений тангенса угла потерь  $\operatorname{tg} \delta = 1/\omega RC$  (где  $\omega/2\pi$ ,  $R$ ,  $C$  – частота переменного тока, измеренные сопротивление и емкость соответственно) в приближении Хавриляка – Негами

$$\epsilon_{HN}'' = \Im \left\{ \frac{\Delta \epsilon}{(1 + if / f_0^a)^b} \right\}, \quad (1)$$

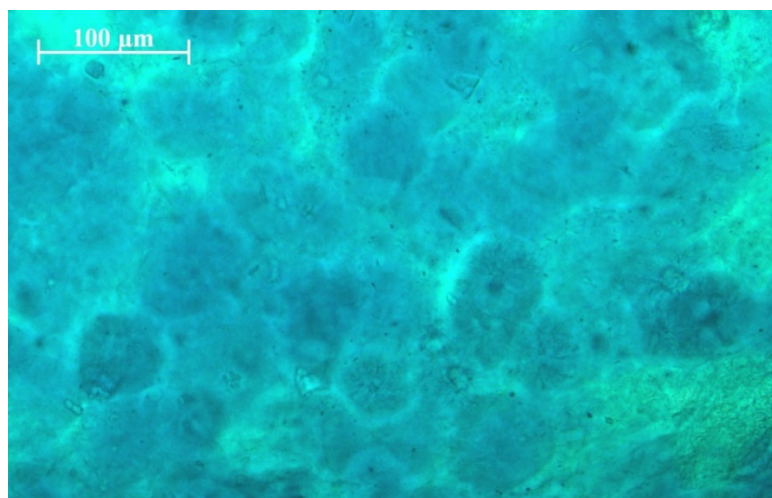
где  $\Delta \epsilon$  – проводимость, зависящая от температуры;  $f$  – частота;  $a$ ,  $b$  – параметры релаксации ( $a > 0$ ,  $b < 1$ ) Коула – Давидсона или Коула – Коула [14], найдены их пики и времена релаксации (например, для 1 мас.% изовалерата меди(II) в Литоле-24  $\sim 0,1$  мс) [16].

Энергия активации оценена в допущении релаксации Аррениуса (см. рис. 5), по формуле Аррениуса при концентрации 1 мас. % валерата меди(II) в Литоле-24 она равна  $\approx 1,132$  эВ, для изовалерата  $\approx 1,115$  эВ.

#### *Результаты поляризационной оптической микроскопии.*

Эксперименты по оптической микроскопии (рис. 6) осуществлялись с помощью поляризационно-оптического микроскопа Axioscop 40 A Pol (Carl Zeiss, Германия) в ЦКП «Центр исследования полимеров» ИСПМ им. Н. С. Ениколопова РАН для обоих типов СК в режимах нагрева и охлаждения.

Аналогичная текстура мезофаз наблюдается в солидоле с карбоксилатами меди(II) [12].



**Рис. 6.** Текстура мезофазы композиции Литол-24 – валерат меди(II) 20 мас. %, 96°C, стадия нагрева, x 200

**Fig. 6.** The mesophase texture in the composition Litol-24– Cu(II) valerate 20 wt. %, 96°C, heating step x 200

В моделях граничных слоев и механической активации типа [17] важно принимать во внимание наблюдаемые критические свойства СК, а также их вязкоупругие свойства.

В сельскохозяйственной технике также используются литиевые пластичные смазки [18], допированные другими

гомологами карбоксилата меди(II) с длиной цепи  $n = 10$  (ундецилат меди [19]) и  $n = 13$  (мирилат меди [20]), в частности, ундецилат меди – в приводе жатки зерноуборочного комбайна СК-5М «Нива». Интенсивность изнашивания трущихся поверхностей привода при использовании присадки снижалась в 1,54 – 3,39 раза.

При использовании миристата меди как присадки коэффициент трения снижался в 2,67 раза, а износ – 1,28 – 2,35 раза.

### Выводы

По характеру частотных изменений электрических величин при смене типа проводимости (например, для композитов при концентрации 1 мас. % валерата или 10 мас. % изовалерата меди(II) зонная проводимость сменяется прыжковой при увеличении частоты приложенного поля  $f$ ) можно ожидать фазовый переход, верифи-

цируемый другими структурными методами (например, оптическими).

Для изученных СК наблюдалась реализация минимум 2-х механизмов релаксации ( $\alpha$ -,  $\beta$ -типа).

Количественные показатели, полученные при испытаниях на машинах трения для СК с оптимизированным содержанием присадок, свидетельствуют об актуальности дальнейшей разработки присадочных СК и изучения их физико-химических свойств.

### Список литературы

1. Аكوпова О. Б., Бобров В. И., Калинин А. А. Влияние мезогенных присадок на трибологические характеристики смазочных композиций // Известия РАН. Серия физическая. 1991. Т. 55, № 9. С. 1752–1756.
2. Усольцева Н. В., Аكوпова О. Б. Трибология и мезоморфизм // Физика, химия и механика трибосистем. 2011. № 10. С. 14–23.
3. Жидкие кристаллы: дискотические мезогены / Н. В. Усольцева, О. Б. Аكوпова, В. В. Быкова, А. И. Смирнова, С. А. Пикин; под ред. Н. В. Усольцевой. Иваново: Иван. гос. ун-т, 2004. 546 с.
4. Карбоксилаты меди. Моделирование, синтез, мезоморфизм и трибологические свойства / О. Б. Аكوпова, В. Б. Лапшин, В. В. Терентьев, В. С. Богданов // Жидкие кристаллы и их практическое использование. 2012. Вып. 2 (40). С. 20–28.
5. Терентьев В. В., Аكوпова О. Б., Телегин И. А. Влияние карбоксилатов меди на основе валериановой и изовалериановой кислот на трибологические характеристики пластичных смазок // Жидкие кристаллы и их практическое использование. 2016. Т. 16, № 2. С. 100–105. <https://doi.org/0.18083/LCAppl.2016.2.100>.
6. Разработка и исследование антифрикционных и противоизносных дискотических мезогенных присадок для пластичных смазок машин и оборудования / В. В. Терентьев, О. Б. Аكوпова, А. М. Баусов, А. И. Герасимов, И. А. Телегин // Известия Самарской государственной сельскохозяйственной академии. 2014. № 3. С. 53–56.
7. Спектральные свойства карбоксилатов меди и опыт их применения в узлах трения сельскохозяйственной техники / В. В. Терентьев, О. Б. Аكوпова, И. А. Телегин, Л. В. Ельникова, Ю. М. Парунова // Аграрный вестник Верхневолжья. 2019. № 1 (26). С. 79–84.
8. Накамото К. ИК-спектры и спектры КР неорганических и координационных соединений / пер. с англ. Л. В. Христенко; под рук. Ю. А. Пентина. М.: Мир, 1991. 536 с.
9. Синтез, строение и некоторые свойства изовалератов 3d-переходных металлов / Т. А. Мирная, И. И. Токменко, Г. Г. Яремчук, А. А. Пономаренко // Украинский химический журнал. 2009. Т. 75(1). С. 16–19.
10. Kleman M., Oswald P. Columnar discotic mesophases: elasticity, dislocations, instabilities // J. Physique. 1982. Vol. 43. P. 655–662.
11. Кац Е. И., Монастырский М. И. Фазовые превращения в дискотических жидких кристаллах // Письма в журнал экспериментальной и теоретической физики. 1981. Т. 34 (1). С. 543–546.
12. Диэлектрические свойства смазочных композиций на основе солидола с присадками мезогенных карбоксилатов меди / Л. В. Ельникова, А. Т. Пономаренко, В. Г. Шевченко, В. В. Терентьев, О. Б. Аكوпова // Жидкие кристаллы и их практическое использование. 2019. Т. 19, № 1. С. 70–78. <https://doi.org/10.18083/LCAppl.2019.1.70>.



13. Ельникова Л. В., Пономаренко А. Т., Шевченко В. Г. Релаксационные и диэлектрические свойства смазочных композиций на основе литола-24 с мезогенными присадками // *Альтернативная энергетика и экология*. 2018. № 10/12. С. 60–69. <https://doi.org/10.15518/isjaee.2018.10-12.060-069>.
14. Блайт Э. Р., Блур Д. Электрические свойства полимеров. М.: Физматлит, 2008. 376 с.
15. Эме Ф. Диэлектрические измерения: для количественного анализа и для определения химической структуры / пер. с нем. Б. Н. Штиллера; под ред. И. И. Заславского. М.: Химия, 1967. 224 с.
16. Новик А., Берри Б. Релаксационные явления в кристаллах. М.: Атомиздат, 1975. 472 с.
17. Буяновский И. А., Самусенко В. Д. Граничная смазка как защита трибосопряжения от износа и заедания при жестком режиме работы // *Сборка в машиностроении, приборостроении*. 2019. Т. 20, № 8. С. 379–384.
18. Влияние строения дискотических мезогенных присадок-карбоксилатов меди на свойства синтетических кальциевых смазок / В. В. Терентьев, О. Б. Акопова, В. Б. Лапшин, К. В. Субботин // *Ремонт, восстановление, модернизация*. 2011. № 4. С. 31–33.
19. Повышение надежности сельскохозяйственной техники за счет использования пластичных смазочных материалов с мезогенными присадками – карбоксилатами меди / В. В. Терентьев, О. Б. Акопова, И. А. Телегин, Н. В. Боброва // *Жидкие кристаллы и их практическое использование*. 2014. Т. 14(4). С. 97–102.
20. Терентьев В. В., Акопова О. Б., Телегин И. А. Влияние присадок из смесей карбоксилатов меди на трибологические характеристики пластичных смазок // *Жидкие кристаллы и их практическое использование*. 2015. Т. 15(4). С. 96–101.

## References

1. Akopova O. B., Bobrov V. I., Kalinin A. A. Vliyanie mezogennykh prisadok na tribologicheskie kharakteristiki smazochnykh kompozitsii [Mesogenic additions effect on tribological characteristics of lubricant compositions]. *Izvestiya RAN. Seriya fizicheskaya = Bulletin of the Russian Academy of Sciences: Physics*, 1991, vol. 55, pp. 1752–1755.
2. Usol'tseva N. V., Akopova O. B. Tribologiya i mezomorfizm [Tribology and Mesomorphism]. *Physics, Chemistry and Mechanics of Tribosystems*, 2011, no. 10, pp. 14–23.
3. Usol'tseva N. V., Akopova O. B., Bykova V. V., Smirnova A. I., Pikin S. A. Zhidkie kristally: discoticheskie mesogeny [Liquid crystals: discotic mesogens]; ed. by N. V. Usol'tseva. Ivanovo, Ivanovo St. Univ. Publ., 2000. 546 p.
4. Akopova O. B., Lapshin V. B., Terentyev V. V., Bogdanov S. S. Karboksilyaty medi. Modelirovanie, sintez, mezomorfizm i tribologicheskie svoistva [Copper (II) carboxylates. Simulation, synthesis, mesomorphism and tribological properties]. *Zhidkie kristally i ikh prakticheskoe ispol'zovanie = Liquid Crystals and their Application*, 2012, is. 2(40), pp. 20–28.
5. Terentyev V. V., Akopova O. B., Telegin I. A. Vliyanie karboksilatov medi na osnove valerianovoi i izovalerianovoi kislot na tribologicheskie kharakteristiki plastichnykh smazok [Influence of valeric and isovaleric acids copper carboxylates on tribological characteristics of plastic greasings]. *Zhidkie kristally i ikh prakticheskoe ispol'zovanie = Liquid Crystals and their Application*, 2016, vol. 16(2), pp. 100–105. <https://doi.org/10.18083/LCAppl.2016.2.100>
6. Terentyev V. V., Akopova O. B., Bausov A. M., Gerasimov A. I., Telegin I. A. Razrabotka i issledovanie antifriktsionnykh i protivoznosnykh diskoticheskikh mesogennykh prisadok dlya plastichnykh smazok mashin i oborudovaniya [Development and research of anti-friction and anti-wear discotic mesogenic additives for grease lubricants of machines and equipment]. *Izvestiya Samarskoi gosudarstvennoi sel'skokhozyaistvennoi akademii = Bulletin Samara State Agricultural Academy*, 2014, no. 3, pp. 53–56.
7. Terentyev V. V., Akopova O. B., Telegin I. A., Elnikova L. V., Parunova Yu. M. Spektral'nye svoistva karboksilatov medi i opyt ikh primeneniya v uzlakh treniya sel'skokhozyaistvennoi tekhniki [Spectral properties of copper carboxylates and their application in friction units of agricultural machinery].

*Agrarnyi vestnik Verkhnevolzh'ya = Agrarian Journal of the Upper Volga Region*, 2019, vol. 1(26), pp. 79–84.

8. Nakamoto K. *Infrared and Raman Spectra of Inorganic and Coordination Compounds*. New York, John Wiley & Sons, 1986. 484 p.

9. Mirnaya T. A., Tokmenko I. I., Yaremchuk G. G., Ponomarenko A. A. Sintez, stroenie i nekotorye svoystva izovaleratov 3d-perekhodnykh metallov [Synthesis, structure and some properties of isovalerates of 3d-transition metals]. *Ukrainskii khimicheskii zhurnal = Ukrainian chemical journal*, 2009, vol. 75(1), pp. 16–19.

10. Kleman M., Oswald P. Columnar discotic mesophases: elasticity, dislocations, instabilities. *J. Physique*, 1982, vol. 43, pp. 655–662.

11. Kats E. I., Monastyrsky M. I. Fazovye prevrashcheniya v diskoticheskikh zhidkikh kristallakh. [Phase transitions in discotic liquid crystals]. *Pis'ma v zhurnal eksperimental'noi i teoreticheskoi fiziki = JETP Letters*, 1981, vol. 34(10), pp. 519–522.

12. Elnikova L. V., Ponomarenko A. T., Shevchenko V. G., Terentyev V. V., Akopova O. B. Dielektricheskie svoystva smazochnykh kompozitsii na osnove solidola s prisadkami mezogennykh karboksilatov medi [Dielectric properties of solidol-based lubricant compositions with mesogenic copper carboxylates additives]. *Zhidkie kristally i ikh prakticheskoe ispol'zovanie = Liquid Crystals and their Application*, 2019, vol. 19(1), pp. 70–78. <https://doi.org/10.18083/LCAppl.2019.1.70>

13. Elnikova L. V., Ponomarenko A. T., Shevchenko V. G. Relaksatsionnye i dielektricheskie svoystva smazochnykh kompozitsii na osnove litola-24 s mezogennymi prisadkami [Relaxation and dielectric properties of lubricant compositions based on litol-24 with mesogenic additives]. *Al'ternativnaya energetika i ekologiya = Alternative Energy and Ecology*, 2018, no. 10–12, pp. 60–69. <https://doi.org/10.15518/isjaee.2018.10-12.060-069>

14. Blythe A. R., Bloor D. *Electrical Properties of Polymers*. Cambridge, Cambridge University Press, 2005. 480 p.

15. Oekhme F. *Dielektrische Messungen: zur quantitativen Analyse und zur Bestimmung der chemischen Struktur*. Verlag Chemie, 1962. 186 p.

16. Nowick A. S., Berry B. S. *Anelastic relaxation in crystalline solids*. New York, Academic Press, 1972. 677 p.

17. Buyanovsky I. A., Samusenko V. D. Granichnaya smazka kak zashchita tribosopryazheniya ot iznosa i zaedaniya pri zhestkom rezhime raboty [Boundary lubrication as protection of tribocouplings from wear and jamming under severe operating conditions]. *Sborka v mashinostroenii, priborostroenii = Assembling in mechanical engineering, instrument-making*, 2019, vol. 20, no. 8, pp. 379–384.

18. Terentyev V. V., Akopova O. B., Lapshin V. B., Subbotin K. V. Vliyanie stroeniya diskoticheskikh mesogennykh prisadok-karboksilatov medi na svoystva sinteticheskikh kal'tsievykh smazok [Influence of the structure of discotic mesogenic additives-copper carboxylates on the properties of synthetic calcium lubricants]. *Remont, Vosstanovlenie, Modernizatsiya = Repair, restoration, modernization*, 2011, no. 4, pp. 31–33.

19. Terentyev V. V., Akopova O. B., Telegin I. A., Bobrova N. V. Povyshenie nadezhnosti sel'skokhozyaistvennoi tekhniki za schet ispol'zovaniya plastichnykh smazochnykh materialov s mezogennymi prisadkami – karboksilatami medi [Increasing reliability of agricultural machinery by using plastic lubricant additives with mesogenic copper carboxylates]. *Zhidkie kristally i ikh prakticheskoe ispol'zovanie = Liquid Crystals and their Application*, 2014, vol. 14(4), pp. 97–102.

20. Terentyev V. V., Akopova O. B., Telegin I. A. Vliyanie prisadok iz smesei karboksilatov medi na tribologicheskie kharakteristiki plastichnykh smazok [Influence of additives made of copper carboxylate mixtures on tribological characteristics of plastic greasings]. *Zhidkie kristally i ikh prakticheskoe ispol'zovanie = Liquid Crystals and their Application*, 2015, vol. 15(4), pp. 96–101.

---

**Информация об авторах / Information about the Authors**

**Ельникова Лилия Вячеславовна**, кандидат физико-математических наук, научный сотрудник, НИЦ Курчатовский институт, г. Москва, Российская Федерация, e-mail: elnikova@itep.ru, ORCID: 0000-0003-4525-5755

**Liliia V. Elnikova**, Candidate of Sciences (Physics and Mathematics), Scientific Researcher, NRC Kurchatov institute, Moscow, Russian Federation, e-mail: elnikova@itep.ru, ORCID 0000-0003-4525-5755

**Пономаренко Анатолий Тихонович**, доктор химических наук, профессор, главный научный сотрудник, Институт синтетических полимерных материалов им. Н. С. Ениколопова РАН, г. Москва, Российская Федерация, e-mail: anapon@ispm.ru, ORCID 0000-0002-0187-0951

**Anatolii T. Ponomarenko**, Doctor of Sciences (Chemistry), Professor, Principal Researcher, N. S. Enikolopov Institute of Synthetic Polymeric Materials, Russian Academy of Science, Moscow, Russian Federation, e-mail: anapon@ispm.ru, ORCID 0000-0002-0187-0951

**Шевченко Виталий Георгиевич**, доктор химических наук, ведущий научный сотрудник, Институт синтетических полимерных материалов им. Н. С. Ениколопова РАН, г. Москва, Российская Федерация, e-mail: shev@ispm.ru, ORCID 0000-0002-1895-9872

**Vitaliy G. Shevchenko**, Doctor of Sciences (Chemistry), Professor, Leading Researcher, N. S. Enikolopov Institute of Synthetic Polymeric Materials, Russian Academy of Science, Moscow, Russian Federation, e-mail: shev@ispm.ru, ORCID 0000-0002-1895-9872