

**Физика**

**Краткое сообщение**

УДК 532.783

DOI: 10.18083/LCAppl.2021.4.99

**ЖИДКОКРИСТАЛЛИЧЕСКИЕ МАТЕРИАЛЫ С КОНИЧЕСКИМИ  
ГРАНИЧНЫМИ УСЛОВИЯМИ**

***М. Н. Крахалев<sup>1,2\*</sup>, В. Ю. Рудяк<sup>3</sup>, В. С. Сутормин<sup>1,2</sup>, О. О. Прищепа<sup>1</sup>, Р. Г. Бикбаев<sup>1,2</sup>,  
И. В. Тимофеев<sup>1,2</sup>, К. А. Фейзер<sup>1</sup>, В. Я. Зырянов<sup>1</sup>***

<sup>1</sup>Институт физики им. Л. В. Киренского Сибирского Отделения Российской академии наук – обособленное подразделение ФИЦ КНЦ СО РАН, Красноярск, Россия

<sup>2</sup>Институт инженерной физики и радиоэлектроники Сибирского федерального университета, Красноярск, Россия

<sup>3</sup>Московский государственный университет им. М. В. Ломоносова, Москва, Россия

\*Адрес для переписки: kmn@iph.krasn.ru

**Аннотация.** Представлен краткий обзор работ по исследованию нематических и холестерических жидких кристаллов с коническими граничными условиями. Приведены наиболее важные результаты исследований ориентационных структур и оптических характеристик капель нематика и плоских слоев нематика и холестерика с тангенциально-коническими граничными условиями.

**Ключевые слова:** нематик, холестерик, конические граничные условия, ориентационная структура, нематическая капля, электрооптика, поляризация света

**Для цитирования:** Крахалев М. Н., Рудяк В. Ю., Сутормин В. С., Прищепа О. О., Бикбаев Р. Г., Тимофеев И. В., Фейзер К. А., Зырянов В. Я. Жидкокристаллические материалы с коническими граничными условиями // *Жидк. крист. и их практич. использ.* 2021. Т. 21, № 4. С. 99–102. DOI: 10.18083/LCAppl.2021.4.99.

**Short communication**

**LIQUID CRYSTAL MATERIALS UNDER CONICAL BOUNDARY CONDITIONS**

***M. N. Krakhalev<sup>1,2\*</sup>, V. Yu. Rudyak<sup>3</sup>, V. S. Sutormin<sup>1,2</sup>, O. O. Prishchepa<sup>1</sup>, R. G. Bikbaev<sup>1,2</sup>,  
I. V. Timofeev<sup>1,2</sup>, K. A. Feyzer<sup>1</sup>, V. Ya. Zyryanov<sup>1</sup>***

<sup>1</sup> Kirensky Institute of Physics, Federal Research Center KSC SB RAS, Krasnoyarsk, Russia

<sup>2</sup> Institute of Engineering Physics and Radio Electronics, Siberian Federal University, Krasnoyarsk, Russia

<sup>3</sup> Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russia

\*Corresponding author: kmn@iph.krasn.ru

**Abstract.** A brief review of studies on nematic and cholesteric liquid crystals under conical boundary conditions is presented. The most important results on the orientational structures and optical properties of nematic droplets and planar layers of nematic and cholesterics with tangential-conical boundary conditions are briefly described.

**Key words:** nematic, cholesteric, conical boundary conditions, orientational structure, nematic droplet, electro-optics, light polarization

**For citation:** Krakhalev M. N., Rudyak V. Yu., Sutormin V. S., Prishchepa O. O., Bikbaev R. G., Timofeev I. V., Feyzer K. A., Zyryanov V. Ya. Liquid crystal materials under conical boundary conditions *Liq. Cryst. and their Appl.*, 2021, **21** (4), 99–102 (in Russ.). DOI: 10.18083/LCAppl.2021.4.99.

## Введение

Жидкие кристаллы (ЖК) характеризуются дальним ориентационным порядком молекул, задающим анизотропию их свойств [1]. В ЖК одним из ключевых параметров, определяющих их свойства, являются граничные условия. Выделяют три вида сцепления: гомеотропные, при которых угол наклона директора на границе  $\theta = 90^\circ$ ; тангенциальные с  $\theta = 0^\circ$ ; наклонные с  $0^\circ < \theta < 90^\circ$  [2]. В случае наклонного сцепления азимутальная ориентация директора может быть фиксированной или вырожденной. При таком вырождении граничные условия называют коническими. Мы представляем результаты исследований капель нематика, капсулированных полимером (КПЖК), и слоя холестерика с коническим сцеплением.

## Результаты и их обсуждение

Исследования ЖК-систем с коническими граничными условиями нами были начаты с рассмотрения капель нематика ЛН-396, диспергированного в пленке полиизобутил метакрилат (ПиБМА) [3]. Было показано, что данный полимер задает для ЛН-396 коническое сцепление с  $\theta = 50^\circ$ . При этом в каплях формируется аксиал-биполярная структура с парой поверхностных точечных дефектов-буджумов, расположенных на противоположных полюсах капли, и поверх-

ностным кольцевым дефектом (рис. 1, *a*). В зависимости от размера капель возможно формирование закрученной структуры с парой буджумов и объемным точечным дефектом или аксиал-биполярной конфигурации со смещенным кольцевым дефектом [4]. Приложение электрического поля переориентирует капли с аксиал-биполярной конфигурацией биполярной осью вдоль поля, при этом требуется небольшое напряжение [5]. Это позволяет получить работающие на эффекте рассеяния электроуправляемые оптические затворы с низкими управляющими напряжениями (менее 14 В), высоким максимальным светопропусканием (80–90 %) и контрастным отношением более 1000 [6]. Высокое максимальное пропускание исследованных КПЖК пленок достигается вследствие достаточно однородной ориентации директора в объеме капли. Это обеспечивает значительную разницу в рассеянии света, поляризованного параллельно и перпендикулярно биполярной оси структуры. При приложении электрического поля вдоль плоскости КПЖК пленки биполярные оси капель ориентируются вдоль его направления и возникает поляризационно-чувствительное светорассеяние (рис. 1, *b*, *c*). Это позволяет использовать КПЖК пленки с коническим сцеплением в качестве поляризатора с электроуправляемым коэффициентом экстинкции [7, 8].

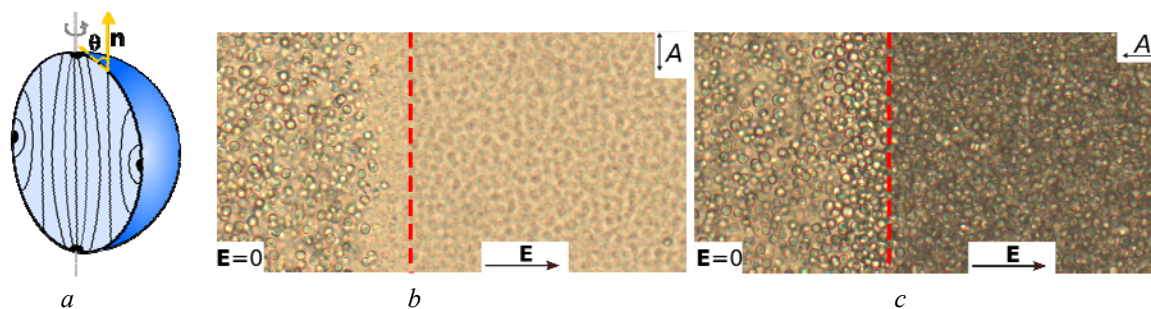


Рис. 1. *a* – Схематическое представление капли нематика с аксиал-биполярной конфигурацией директора. Фотографии КПЖК-пленки, в правой части которой приложено электрическое поле в плоскости образца, сделанные при ориентации анализатора  $A$  перпендикулярно (*b*) и параллельно (*c*) направлению поля. Граница электрода обозначена красной пунктирной линией

Fig. 1. *a* – Scheme of a nematic droplet with axial-bipolar director configuration. Photos of the PDLC film, on the right side of which an electric field is applied along the film plane, taken when the analyzer  $A$  is oriented perpendicular (*b*) and parallel (*c*) to the field direction. The electrode border is indicated by the red dashed line

В дальнейшем исследовались слои нематика и холестерика с тангенциально-коническим сцеплением. Образцы изготавливались из двух стеклянных подложек с ИТО покрытием, на одну из которых наносилась пленка поливинилового спирта (ПВС), а на вторую – пленка ПИБМА. Для получения холестерика нематик ЛН-396 допировался хиральной добавкой холестерил-ацетат (ХЗ). Натертая пленка ПВС задает тангенциальное сцепление для нематика ЛН-396, пленка ПИБМА – коническое. В результате в нематической ячейке формируется доменная структура с различным знаком угла  $\theta$  в соседних доменах [9]. В случае холестерика формирующаяся структура зависит как от соотношения толщины слоя  $d$  к шагу спирали холестерика  $p$ , так и от значения  $d$ . В случае относительно небольших значений  $d/p$  формируется закрученная структура, в которой вследствие вырождения азимутальной ориентации директора на подложке с коническим сцеплением, угол закрутки зависит от значения  $d/p$ . Для больших значений  $d/p$  формируется периодическая структура, состоящая из пар поверхностных линейных дефектов, характеризующихся большим и меньшим азимутальными углами директора. При промежуточных значениях соотношения  $d/p$  формируется закрученная структура с линейными дефектами, в том числе замкнутой формы. Под действием электрического поля происходит уменьшение азимутального угла директора на подложке с коническим сцеплением (раскрутка холестерической спирали) [10]. Бездефектную закрученную структуру холестерика можно использовать в качестве электроуправляемого ахроматического вращателя поляризации света [11]. «Раскрутка» холестерика в электрическом поле делает линейные дефекты неустойчивыми, что приводит к уменьшению длины и их полному исчезновению. При восстановлении периодической структуры ее ориентация зависит от величины приложенного напряжения  $U < 1,3$  В [12]. После выключения остаточного напряжения полученная периодическая структура сохраняется, что может быть использовано для получения электроуправляемых дифракционных решеток.

Исследования ЖК-систем с коническими граничными условиями показали, что они являются интересными как с фундаментальной, так и прикладной точки зрения. В работе [13] было реализовано управление углом наклона директора

в диапазоне от  $0^\circ$  до  $50^\circ$ , что в дальнейшем позволит исследовать влияние величины угла  $\theta$  на формирующиеся структуры, и может быть использовано для улучшения оптических и электрооптических характеристик ЖК-материалов с коническим сцеплением.

**Благодарности:** Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ, Правительства Красноярского края и Красноярского краевого фонда науки в рамках научного проекта № 20-42-240007.

**Acknowledgments:** This work was supported by a grant from the Russian Foundation for Basic Research, the Government of the Krasnoyarsk Territory and the Krasnoyarsk Regional Science Foundation within the framework of the scientific project No. 20-42-240007.

#### Список источников / References

1. Gennes P.G. de., Prost J. The physics of liquid crystals: 2 ed. Reprint. Oxford: Clarendon Press, 1998. 597 p.
2. Oswald P., Pieranski P. Nematic and cholesteric liquid crystals: Concepts and physical properties illustrated by experiments. The liquid crystals book series. Boca Raton, FL: Taylor & Francis, 2005. 618 p.
3. Krakhalev M.N., Prishchepa O.O., Sutormin V.S., Zyryanov V.Ya. Director configurations in nematic droplets with tilted surface anchoring. *Liq. Cryst.*, 2017, **44** (2), 355–363.  
**DOI:** 10.1080/02678292.2016.1205225.
4. Рудяк В. Ю., Крахалев М. Н., Прищепа О. О., Сутормин В. С., Емельяненко А. В., Зырянов В. Я. Ориентационные структуры в каплях нематика с коническими граничными условиями // *Письма в ЖЭТФ*. 2017. Т. 106, № 6. С. 358–364 **DOI:** 10.7868/S0370274X17180072. [Rudyak V.Yu., Krakhalev M.N., Prishchepa O.O., Sutormin V.S., Emel'yanenko A.V., Zyryanov V.Ya. Orientational structures in nematic droplets with conical boundary conditions. *JETP Lett*, 2017, **106** (6), 384–389.  
**DOI:** 10.1134/S0021364017180102].
5. Rudyak V.Yu., Krakhalev M.N., Sutormin V.S., Prishchepa O.O., Zyryanov V.Ya., Liu J.-H., Emel'yanenko A.V., and Khokhlov A.R. Electrically induced structure transition in nematic liquid crystal droplets with conical boundary conditions. *Phys. Rev. E*, 2017, **96**, 052701.  
**DOI:** 10.1103/PhysRevE.96.052701.
6. Патент РФ № 2736815. Электрооптический жидкокристаллический элемент с низким управляющим напряжением и высоким контрастом / Фейзер К. А., Крахалев М. Н., Прищепа О. О., Сутормин В. С., Зырянов В. Я.; Заявка № 2020114831 от 14.04.2020; Опубликовано 20.11.2020; Бюл. № 32.

- [Russian patent No. 2736815. Electro-optical liquid crystal element with low control voltage and high contrast / Feyzer K.A., Krakhalev M.N., Sutormin V.S., Prishchepa O.O., Zyryanov V.Ya.; publ. 20.11.2020; Bull. № 32; Right holders: Feyzer K.A., Krakhalev M.N., Sutormin V.S., Prishchepa O.O., Zyryanov V.Ya. (in Russ.)].
7. Krakhalev M.N., Prishchepa O.O., Sutormin V.S., Zyryanov V.Ya. Polymer dispersed nematic liquid crystal films with conical boundary conditions for electrically controllable polarizers. *Opt. Mater.*, 2019, **89**, 1–4. DOI: 10.1016/j.optmat.2019.01.004.
  8. Патент РФ № 2707424. Электрически управляемый поляризатор света на основе анизотропии светорассеяния / Крахалев М. Н., Прищепка О. О., Сутормин В. С., Зырянов В. Я.; Опубликовано 26.11.2019; Бюл. № 33; Заявка № 2019109816 от 02.04.2019. [Russian patent No. 2707424. Electrically controlled light polarizer based on light scattering anisotropy / Krakhalev M.N., Sutormin V.S., Prishchepa O.O., Zyryanov V.Ya.; Publ. 26.11.2019; Bull. № 33; Right holders: Krakhalev M.N., Sutormin V.S., Prishchepa O.O., Zyryanov V.Ya. (in Russ.)].
  9. Krakhalev M.N., Bikbaev R.G., Sutormin V.S., Timofeev I.V. and Zyryanov V.Ya. Nematic and cholesteric liquid crystal structures in cells with tangential-conical boundary conditions. *Crystals*, 2019, **9** (5), 249 (12 p.). DOI: 10.3390/cryst9050249.
  10. Krakhalev M.N., Prishchepa O.O., Sutormin V.S., Bikbaev R.G., Timofeev I.V., Zyryanov V.Ya. Electrically induced transformations of defects in cholesteric layer with tangential-conical boundary conditions. *Sci. Rep.*, 2020, **10** (1), 4907 (9 p.). DOI: 10.1038/s41598-020-61713-9.
  11. Sutormin V.S., Krakhalev M.N., Timofeev I.V., Bikbaev R.G., Prishchepa O.O., Zyryanov V.Ya. Cholesteric layers with tangential-conical surface anchoring for an electrically controlled polarization rotator. *Opt. Mater. Express*, 2021, **11** (5), 1527–1536. DOI: 10.1364/OME.425130.
  12. Prishchepa O.O., Krakhalev M.N., Rudyak V.Yu., Sutormin V.S., Zyryanov V.Ya. Electrically turning periodic structures in cholesteric layer with conical-planar boundary conditions. *Sci. Rep.*, 2021, **11** (1), 8409 (10 p.). DOI: 10.1038/s41598-021-87854-z.
  13. Kostikov D.A., Krakhalev M.N., Prishchepa O.O., Zyryanov V.Ya. Nematic structures under conical anchoring at various director tilt angles specified by polymethacrylate compositions. *Polymers*, 2021, **13**, 2993. DOI: 10.3390/polym13172993.

**Вклад авторов:**

<sup>1</sup>Крахалев М. Н. – экспериментальные исследования ориентационных структур капель нематика и слоев нематика и холестерика, измерение поляризационных

характеристик прошедшего излучения, написание исходного текста статьи. <sup>2</sup>Рудяк В. Ю. – численное моделирование капель нематика и периодической структуры холестерика. <sup>3</sup>Сутормин В. С. – экспериментальные исследования ориентационных структур слоев нематика и холестерика, измерение поляризационных характеристик прошедшего излучения. <sup>4</sup>Прищепка О. О. – экспериментальные исследования периодической структуры холестерика. <sup>5</sup>Бикбаев Р. Г. – численное моделирование структуры нематика и холестерика, расчет поляризационных характеристик прошедшего излучения. <sup>6</sup>Тимофеев И. В. – численное моделирование структуры нематика и холестерика, расчет поляризационных характеристик прошедшего излучения. <sup>7</sup>Фейзер К. А. – экспериментальные исследования электрооптического отклика КПЖК пленок. <sup>8</sup>Зырянов В. Я. – научное руководство; концепция исследования; написание исходного текста статьи.

**Contribution of the authors:**

<sup>1</sup>Krakhalev M.N. – experimental studies of orientational structures of nematic droplets and nematic and cholesteric layers; measurements of the polarization characteristics of transmitted radiation; writing the original text of the article. <sup>2</sup>Rudyak V.Yu. – numerical modeling of nematic droplets and periodic cholesteric structure. <sup>3</sup>Sutormin V.S. – experimental studies of the orientational structures of nematic and cholesteric layers; measurements of the polarization characteristics of transmitted radiation. <sup>4</sup>Prishchepa O.O. – experimental studies of the cholesteric periodic structure. <sup>5</sup>Bikbaev R. G. – numerical modeling of nematic and cholesteric structures, calculation of the polarization characteristics of transmitted radiation. <sup>6</sup>Timofeev I.V. – numerical modeling of the nematic and cholesteric structures, calculation of the polarization characteristics of transmitted radiation. <sup>7</sup>Feyzer K.A. – experimental studies of the electro-optical response of PDLC films. <sup>8</sup>Zyryanov V.Ya. – scientific guidance; research concept; writing the original text of the article.

**Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.**

**The authors declare no conflicts of interests.**

<sup>1</sup>orcid: 0000-0003-3519-9497

<sup>2</sup>orcid: 0000-0001-7930-9622

<sup>3</sup>orcid: 0000-0003-4695-5569

<sup>4</sup>orcid: 0000-0003-2433-2571

<sup>5</sup>orcid: 0000-0002-0549-5917

<sup>6</sup>orcid: 0000-0002-6558-5607

<sup>7</sup>orcid: 0000-0001-6940-5960

<sup>8</sup>orcid: 0000-0001-7373-3342

Поступила 30.09.2021, одобрена 25.10.2021, принята 29.10.2021  
Received 30.09.2021, approved 25.10.2021, accepted 29.10.2021