

Перспективы использования достижений физики жидких кристаллов в биологии

Трашкеев С.^{1, 2*}, Стаценко П.¹, Хомяков М.¹, Швецов С.³

¹ Институт лазерной физики СО РАН, Новосибирск, Россия

² Институт химической кинетики и горения СО РАН, Новосибирск, Россия

³ Ереванский государственный университет, Ереван, Армения

* sitrskv@mail.ru

Ключевые слова: жидкий кристалл; ориентационная механика; дисклинация; тепловые структуры

Мотивация и цель: Планируется рассмотреть различные эффекты в жидких кристаллах (ЖК), которые обнаруживают аналогии с биологическими процессами [1–6]. В частности, в работе [6] предлагается ввести термин «биологические жидкие кристаллы». Более конкретно, в работе предлагается ряд подходов для исследования жидкокристаллических структурных объектов в микробиологии и других областях науки о живом.

В докладе приведены исследования жидкокристаллических структур, образованных под действием формы занимаемого или вытесненного объема, внешних электромагнитных полей, включая когерентные, тепловых потоков и ионизирующего излучения.

Жидкий кристалл (ЖК) – среда с дополнительными внутренними степенями свободы, определяемыми ориентацией длинных осей, взаимодействующих между собой молекул. Ориентационное упорядочивание может изменяться относительно слабыми внешними воздействиями. Это свойство приводит к представлению жидкокристаллической среды как мягкой или структурированной материи. Анизотропия физических свойств ЖК приводит к существенному усложнению механики и электродинамики анизотропных жидкостей и, как следствие, появлению многих свойств, не имеющих аналогов в обычных веществах.

Интерес к изучению подобных сред определяется современными тенденциями в изучении частично упорядоченных сред. В частности, рассматриваются аналогии между свойствами ЖК и их композитов с биологическими объектами. К научным и прикладным аспектам можно отнести принципы управления движением локализованных структур и включений в ЖК среде, реализуемых с помощью внешних полей или дистанционно, с использованием когерентного излучения. Механизмы динамического управления структурами в ЖК могут быть перенесены на биологические среды с включением микро- и наночастиц.

Методы и алгоритмы: В качестве методов исследования в основном рассматриваются оригинальные приемы и подходы, разработанные в ИЛФ СО РАН и других лабораториях (ФИРАН, Москва; ЕГУ, Ереван), которые, на наш взгляд, могут быть применены для изучения биологических объектов.

Из достаточно хорошо известных эффектов в ЖК следует отметить переход Фредерикса в постоянных магнитном и электрическом полях [1], более сложные ориентационные динамические эффекты [7] и их обобщение в виде светоиндуцированной переориентации [8]. Но более перспективными могут оказаться эффекты, при которых происходит образование дефектов, особых точек,

в которых ориентация ЖК не определена [4]. Источниками могут служить нанобъекты, такие как наночастицы, молекулы полимеров [9] и даже атомарные структуры от ионизирующего излучения [10]. Не менее интересными представляются процессы самоорганизации нано- и микрообъектов за счет регулярного расположения дефектов [11] в периодических электрических полях [4] или при воздействии лазерного излучения. Кроме механических включений, создающих дефект, предлагаются дистанционные методы генерации и управления структурами ЖК с использованием когерентных источников [4, 12]. Механизмом появления таких образований является обнаруженный термоориентационный эффект [13], обязанный переориентацией молекул ЖК тепловыми и гидродинамическими потоками. В работе рассмотрен ряд тепловых и ориентационных структур, появляющихся в поглощающих ЖК под действием локализованного излучения.

В качестве аналогий с процессами, происходящими в биологических системах, можно привести примеры из гидродинамики жидких кристаллов, являющиеся достаточно сложными явлениями из-за необходимости учета структурных особенностей анизотропной жидкости [14]. В частности, стоит отметить эффект Лемана, приводящий к вращению молекул холестерического ЖК под действием градиента температуры, а также явления, связанные с течением холестерика под действием слабых градиентов давления, приводящие к эффектам «просачивания» с резким увеличением эффективной вязкости и появлению азимутальных компонент скорости.

Для интерпретации эффектов, приводимых в работе, рассматривается теоретическая модель, основанная на представлении ЖК в виде распределенной среды [15]. Основные положения предлагаемого подхода позволяют сделать вывод о возможности описания жидкокристаллического состояния среды в электромагнитных полях на наноразмерных масштабах, включая особые точки ориентации и фазовых переходов в деформированных структурах [15, 16].

Результаты: Результатом настоящей работы могут служить перечисленные свойства жидкокристаллических сред и их композитов, рассматриваемые с точки зрения некоторой аналогии с живыми объектами и предложения более глубокого исследования этих аналогий, как некоторых биологических жидких кристаллов.

Выводы: В качестве заключения приводятся предполагаемые авторами направления для междисциплинарных исследований.

1. Визуализация в ЖК нано- и микрообъектов, включая биологические молекулы, а также визуализация микроструктур на поверхности.
2. Определение характера поверхностного взаимодействия биологических микрообъектов при контакте с ЖК.
3. Исследование характера взаимодействия между биологическими микрообъектами.

Возможные механизмы:

- а) Гидродинамический импульс с образованием канала передачи.
- б) Упругая деформация без течения.
- в) Электрический импульс, образующийся вследствие флексоэлектрического эффекта.
- г) Изменение параметра порядка. Энтропийная (?) форма.
- д) Комбинации предыдущих механизмов.

4. Управление микроразмерными биологическими структурами (образование, перемещение, вращение и т. п.) на основе приемов, разработанных для ЖК с использованием электрических полей, когерентного излучения (лазерный пинцет), акустики, тепловых потоков и (или) градиентов параметра порядка.
 5. Восстановление (реконструкция) формы объекта при его визуализации (п. 1) по ориентационному отклику ЖК. Определение степени корректности для обратной задачи.
 6. Адаптация и доработка теоретических моделей ЖК для описания частично-упорядоченных биологических сред при наличии внешнего воздействия.
- В заключение отметим, что эффекты в жидкокристаллических структурах или их аналогии могут быть эффективно использованы для исследований области биологии, медицины и других смежных науках.

Финасирование: Работа выполнена в рамках Программы фундаментальных научных исследований в Российской Федерации на долгосрочный период (2021–2030 годы), регистрационный номер темы 1021062211014-7-1.3.6.

Exploring the potential of liquid crystal physics in biology

Trashkeev S.^{1, 2*}, Statsenko P.¹, Khomyakov M.¹, Shvetsov S.³

¹ *Institute of Laser Physics, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Novosibirsk, Russia*

² *Institute of Chemical Kinetics and Combustion, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Novosibirsk, Russia*

³ *Yerevan State University, Yerevan, Armenia*

* *sitrskv@mail.ru*

Key words: liquid crystal; orientational mechanics; disclination; thermal structures

Motivation and Aim: Various effects in liquid crystals (LCs) that exhibit analogies with biological processes [1–6] are planned to be considered. In particular, the term "biological liquid crystals" is proposed in the work [6]. More specifically, the work proposes a range of approaches for studying liquid crystalline structural objects in microbiology and other areas of life science.

The report presents research on liquid crystalline structures formed under the influence of the shape of the occupied or displaced volume, external electromagnetic fields, including coherent ones, thermal fluxes, and ionizing radiation.

A liquid crystal (LC) is a medium with additional internal degrees of freedom determined by the orientation of the long axes of interacting molecules. Orientational ordering can be changed by relatively weak external influences. This property leads to the representation of a liquid crystalline medium as soft or structured matter. The anisotropy of the physical properties of LCs leads to a significant complication of the mechanics and electrodynamics of anisotropic liquids and, consequently, to the emergence of many properties without analogues in ordinary isotropic substances.

Interest in the study of such media is determined by modern trends in the study of partially ordered media. In particular, analogies between the properties of LCs and their composites with biological objects are considered. Scientific and applied aspects include principles of controlling the motion of localized structures and inclusions in the LC environment, implemented using external fields or remotely, using coherent radiation.

Mechanisms of dynamic control of structures in LCs can be transferred to biological media with the inclusion of micro- and nanoparticles.

Methods and Algorithms: The main methods of investigation primarily include original techniques and approaches developed at the Institute of Laser Physics, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, and other laboratories (LPI, Moscow; YSU, Yerevan), which, in our view, can be applied to the study of biological objects.

Among the well-known effects in LCs, it is worth noting the Fredericks transition in constant magnetic and electric fields [1], more complex orientational dynamic effects [7], and their generalization in the form of light-induced reorientation [8]. However, the effects, where defects, special points where the orientation of the LC is not defined, are formed, may be more promising [4]. Sources can include nano-objects such as nanoparticles, polymer molecules [9], and even atomic structures from ionizing radiation [10]. Equally interesting are the processes of self-organization of nano- and microobjects due to the regular arrangement of defects [11] in periodic electric fields [4] or under the influence of laser radiation. In addition to mechanical inclusions creating defects, remote methods of generating and controlling LC structures are proposed using coherent sources [4, 12]. The mechanism for the appearance of such formations is the discovered thermo-orientational effect [13], caused by the reorientation of LC molecules by thermal and hydrodynamic flows. This report also considers a range of thermal and orientational structures that appear in absorbing LCs under the influence of localized radiation.

As analogies with processes occurring in biological systems, some examples from the hydrodynamics of liquid crystals can be given, which are quite complex phenomena due to the need to take into account the structural features of anisotropic fluid [14]. In particular, it is worth noting the Lehmann effect, leading to the rotation of molecules of cholesteric LC under the influence of a temperature gradient, as well as phenomena related to the flow of cholesteric under the action of weak pressure gradients, leading to "leakage" effects with a sharp increase in effective viscosity and the appearance of azimuthal velocity components.

For the interpretation of the effects presented in the report, a theoretical model based on the representation of LC as a distributed medium is considered [15]. The main provisions of the proposed approach allow concluding the possibility of describing the liquid crystalline state of the medium in electromagnetic fields on nanoscale, including special orientation points and phase transitions in deformed structures [15, 16].

Results: The results of this work can serve as the listed properties of liquid crystalline media and their composites, considered from the point of view of some analogy with living objects, and the proposal for a deeper investigation of these analogies, such as biological liquid crystals.

Conclusion: The authors propose potential directions for interdisciplinary research.

1. Visualization of nano- and micro-objects in LCs, including biological molecules, as well as visualization of microstructures on the surface.
2. Determination of the nature of surface interaction of biological micro-objects upon contact with LC.
3. Investigation of the interaction between biological micro-objects.

Possible mechanisms:

- a) Hydrodynamic impulse with the formation of a transmission channel.
- b) Elastic orientation of signal without flow.
- c) Electric impulse formed due to the flexoelectric effect.
- d) Order parameter changes. Entropy (?) form.

e) Combinations of the previous mechanisms.

4. Control of biological micro-sized structures (formation, movement, rotation, etc.) based on techniques developed for LCs using electric fields, coherent radiation (laser tweezers), acoustics, thermal fluxes, and/or order parameter gradients.

5. Reconstruction of the object's shape during its visualization based on the orientational response of the LC. Determination of the degree of correctness for the inverse problem. Adaptation and refinement of LC theoretical models to describe partially ordered biological media in the presence of external influences.

In conclusion, it should be noted that effects in liquid crystalline structures or their analogies can be effectively utilized for research in the fields of biology, medicine, and other related sciences.

Funding: The research was supported by the Program of Fundamental Scientific Research in the Russian Federation for a long-term period (2021–2030), project No. 1021062211014-7-1.3.6.

Список литературы/References

1. Kleman M., Lavrentovich O. *Soft Matter Physics*. Springer, 2003
2. Lowe A.M., Abbott N.L. Liquid Crystalline Materials for Biological Applications. *Chem Mater*. 2012;24(5):746-758
3. Woltman S.J., Jay G.D., Crawford G.P. Liquid-crystal materials find a new order in biomedical applications. *Nat Mater*. 2007;6:929-938
4. Bagayev S.N., Klementyev V.M., Nyushkov B.N., Pivtsov V.S., Trashkeev S.I. New methods of highly efficient controlled generation of radiation by liquid crystal nanostructures in a wide spectral range. *J Phys Conf Ser*. 2012;345:012018. doi 10.1088/1742-6596/345/1/012018
5. Doostmohanmadi A., Ladoux B. Physics of liquid crystals in cell biology. *ArXiv*. 2021
6. Rey A.D. Liquid crystal models of biological materials and processes. *Soft Matter*. 2010;6:3402-3429
7. Trahkeev S.I., Klementev V.M., Statsenko P.A. Determinate and stochastic orientation dynamics of nematic liquid crystals in the cross electric fields with frequencies up to the megahertz range. *Liq Cryst*. 2006;33(4):417-438
8. Kitaeva V.F., Zolot'ko A.S., Sobolev N.N. Self-focusing of laser radiation in the case of a Fredericks transition. *Sov Phys. Usp*. 1982;25(10):758-760. doi 10.1070/PU1982v025n10ABEH004611
9. Trashkeev S.I., Grachev G.N., Pozdnyakov G.A. Nanostructures in a nematic liquid crystal. *Tech Phys*. 2007;52(9):1188-1194
10. Trashkeev S.I., Grachev G.N., Pozdnyakov G.A. Observation of the Electrostatic Defects Induced by Ionizing Radiation in a Liquid Crystal. *Tech Phys Lett*. 2007;33(5):438-440
11. Klementev V.M., Pozdnyakov G.A., Trashkeev S.I. Methods for visualization and ordering of nanoobjects in a liquid crystalline medium. *Zavodskaya Laboratoriya. Diagnostika Materialov*. 2008;74(3):32-38 (in Russian)
12. Shvetsov S.A., Zolot'ko A.S., Voronin G.A. et al. Light-induced umbilical defects due to temperature gradients in nematic liquid crystal with a free surface. *Opt Mater Express*. 2021;11(6):1705-1712. doi 10.1364/OME.425926
13. Trashkeev S.I., Britvin A.V. Thermal Orientation Effect in a Nematic Liquid Crystal. *Tech Phys*. 2011;56(6):747-753
14. Chandrasekhar S. *Liquid Crystals*. Cambridge University Press, 1993
15. Kudryavtsev A.N., Purtov P.A., Trashkeev S.I. Nonlocal tensor order parameter of the deformed state of liquid crystals. *arXiv*. 2017
16. Trashkeev S.I., Statsenko P.A., Khomyakov M.N., Shvetsov S.A. Non-local Q-tensor approach for description of elastic deformations of nematic liquid crystals at sub-micronscales. *Liq Cryst Their Appl*. 2023;23(3):66-76 (in Russian)