

УДК: 532.783;535.34; 535.5

Н. В. Каманина^{1,2*}, *С. В. Лихоманова*¹, *А. А. Каманин*³, *Ю. А. Зубцова*¹,
*A. Pawlicka*⁴, *G. Praveen*⁵, *Sabu Thomas*⁵

ОРИЕНТИРОВАНИЕ ЭРИТРОЦИТОВ И ДРУГИХ БИОБЪЕКТОВ В МОДИФИЦИРОВАННЫХ ЖИДКОКРИСТАЛЛИЧЕСКИХ ЯЧЕЙКАХ

¹ АО «Государственный оптический институт им. С. И. Вавилова»,
Кадетская линия В.О., д. 5, корп. 2, 199053 Санкт-Петербург, Россия.

² Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ»,
ул. проф. Попова, д. 5, 197022 Санкт-Петербург, Россия.

³ Первый Санкт-Петербургский государственный медицинский университет им. акад. И. П. Павлова,
ул. Льва Толстого, д. 6–8, 197022 Санкт-Петербург, Россия

⁴ Instituto de Química de São Carlos, av. Trab. São-Carlense, 400, Parque Arnold Schmidt,
13566-590, São Carlos, Brazil

⁵ International and Inter University Centre for Nanoscience and Nanotechnology (IUCNN).
Mahatma Gandhi University, Priyadarshini Hills P. O., Kottayam, 686 560 India

*E-mail: nvkamanina@mail.ru

В работе представлены результаты исследования по ориентированию, фиксации и визуализации биобъектов на примере клеток крови – эритроцитов. Рассмотрено влияние усовершенствованного рельефа на поверхности подложек модифицированных жидкокристаллических ячеек за счет применения ориентированных углеродных нанотрубок, а также при использовании межмолекулярного комплекса для ориентации клеток крови. Приведены микрофотографии заполненной ЖК-ячейки, демонстрирующие четкие области ориентации эритроцитов. Даны качественные рассуждения о механизмах ориентации эритроцитов и других биобъектов в объеме ЖК. Показано, что представленные данные согласуются с результатами по фиксации и визуализации клеток крови, полученными ранее при использовании полимерных ориентирующих покрытий.

Ключевые слова: биобъекты, эритроциты, жидкие кристаллы, углеродные нанотрубки, визуализация, ориентирование, межмолекулярный комплекс с переносом заряда, рельеф поверхности.

DOI: 10.18083/LCAppl.2017.1.74

N. V. Kamanina^{1,2*}, S. V. Likhomanova¹, A. A. Kamanin³, Yu. A. Zubtsova¹,
A. Pawlicka⁴, G. Praveen⁵, Sabu Thomas⁵

ERYTHROCYTES AND RELATIVE BIOOBJECTS ALIGNING IN MODIFIED LIQUID CRYSTAL CELLS

¹Joint-Stock Company «Vavilov State Optical Institute»,

5 Cadet line V.O., corpus 2, Saint Petersburg, 199053, Russia

²St. Petersburg State Electrotechnical University «LETI», 5 Prof. Popov St., Saint Petersburg, 197022, Russia

³Pavlov First Saint Petersburg State Medical University, 6–8 L'va Tolstogo St., Saint Petersburg, 197022, Russia

⁴Instituto de Química de São Carlos, av. Trab. São-Carlense, 400, Parque Arnold Schmidt,
13566-590, São Carlos, Brazil

⁵International and Inter University Centre for Nanoscience and Nanotechnology (IIUCNN).

Mahatma Gandhi University, Priyadarshini Hills P. O., Kottayam, 686 560 India

*E-mail: nvkamanina@mail.ru

The aligning, fixing and visualization investigation results of bioobjects such as blood cells erythrocytes are presented in the current paper. Both the improved relief on the modified liquid crystal cells interfaces and the intermolecular charge transfer complex influence have been considered. The photomicrography that shows the erythrocytes aligning area has been presented. The possible quantitative bio-objects aligning mechanisms in the liquid crystals have been discussed. It has been established that the obtained data have coincided with the one shown in the previous publications when the polymer orienting layers were used.

Key words: *bioobjects, erythrocytes, liquid crystals, carbon nanotubes, visualization, aligning, intermolecular charge transfer complex, surface relief.*

Введение

Развитие оптоэлектронной техники, а также широкое биомедицинское применение таковых устройств в системах изучения и диагностики биообъектов вызывает повышенный интерес ученых и инженеров различных научно-технических групп к проведению соответствующих исследований и разработок [1–10]. При этом среди материалов, используемых в качестве матричной основы, зачастую применяются жидкокристаллические (ЖК) среды в силу уникального сочетания физико-химических свойств ЖК и их ориентирующей способности [11–13]. Данные матричные среды используются в довольно широком спектральном диапазоне, функционируя вплоть до терагерцового диапазона, что актуально и своевременно для биомедицинского применения таковых сред [11–17].

При этом ведутся исследования свойств не только чистых матричных ЖК-структур, но также и ЖК, сенсibilизированных нано- (фуллерены, квантовые точки, полимерные и мономерные соединения, др.) и биообъектами. Отметим, что в последние 5–7 лет в области исследований и разработок, связанных с использованием нано- и

биообъектов для изменения спектральных, рефрактивных и проводниковых свойств, четко виден акцент на доминирование биообъектов за счет их нетоксичности и возобновляемости из Мирового океана. Биоструктурированные матрицы стали применяться при создании устройств солнечной энергетики, систем поглощения газов и примесей, общих схемных решений телекоммуникационных систем, в нелинейной оптике [18–23].

Наши исследования как рефрактивных особенностей ЖК при их нано- и биосенсibilизации, так и ориентирующей способности ЖК для ДНК занимают определенную нишу среди исследований других научно-технических групп, что показано в публикациях [24–27], а также позволяют возобновить и продолжить изучение ориентирующей способности ЖК-матрицы при внесении в нее клеток крови. Последний эффект был установлен и представлен для обсуждения в работах [28–30], где для исследования были использованы ЖК-ячейки толщиной 10 мкм, а в качестве ориентантов использовалось ориентирующее покрытие на основе фторопласта в смеси ацетона с амилацетатом, а также полиимиды с последующей натиркой. Натирка прозрачного полимера, нанесенного на стеклянную подложку,

создавала рельеф – тончайшие бороздки с распределенным потенциалом между горбами и впадинами натертой поверхности. Вытянутые молекулы ЖК в слое, непосредственно соприкасающемся с поверхностью, ориентировались вдоль такого рельефа, а межмолекулярные силы способствовали тому, что все остальные молекулы в объеме мезофазы принимали аналогичную ориентацию. Изготовленные указанным способом ячейки были заполнены смесью из ЖК с суспензией эритроцитов при близких значениях pH ЖК и раствора, стабилизирующего эритроциты. Проведенные с помощью микроскопа исследования продемонстрировали фиксацию и ориентацию клеток крови. Выстраивание эритроцитов вдоль директора ЖК объяснялось тем, что остаточная величина потенциала оболочки эритроцитов способствовала их эффективному взаимодействию с некомпенсированными ЖК-диполями. Кроме того, было показано, что не только ориентирующая способность ЖК влияет на упорядочение эритроцитов, но и введение эритроцитов способствует проявлению обратной связи, а именно: вызывает самоорганизацию ЖК с разбивкой последних на доменные области.

В настоящей работе вместо ориентирующих слоев, получаемых с применением токсичных растворителей и способа натирки, был использован разработанный нами способ нанесения углеродных нанотрубок (УНТ) на поверхность оптических материалов разных групп, в том числе на прозрачные проводящие покрытия, с последующей обработкой поверхностной электромагнитной волной (ПЭВ) [31–34]. Указанное усовершенствование позволило эффективно ориентировать эритроциты и выявлять их конфигурацию с помощью такого инновационного подхода.

Экспериментальные условия

В работе были использованы матричные ЖК-составы из класса цианобифенилов, куда вводился межмолекулярный комплекс на основе системы 2-циклооктиламин-5-нитропиридин (COANP)–C₇₀, а также биообъекты – эритроциты, стабилизированные в цитрате натрия. Соотно-

шение растворов ЖК к растворам цитрата натрия с эритроцитами составляло 5:1.

Как было замечено, для нивелирования токсичности ориентирующего покрытия на стеклянных подложках из материала крон К8 с нанесенным ИТО-слоем бесконтактным лазерным методом создавался рельеф с УНТ и дополнительной обработкой ПЭВ. УНТ типа *single-walled*, № 704121-250MG, *carbon 90 %*, диаметром 0,7–1,1 нм были приобретены от фирмы *Aldrich*. Для нанесения УНТ использовался щелевой CO₂-лазер с мощностью ~30 Вт, шириной пятна излучения ~5 мм, скоростью движения пучка ~3 см×с⁻¹, т. е. для модификации свойств ИТО была использована система лазерного осаждения углеродных нанотрубок (как одностенных, так и многостенных), которая включала вакуумный пост УВР-2 (УВР-4) и лазер ИК-диапазона на длине волны 10,6 мкм. Лазер функционировал в непрерывном режиме, сформированное пятно имело сложную форму – «гребенку». При нанесении УНТ использовалось дополнительное их ориентирование в электрическом поле напряженностью 100, 200 и 600 В×см⁻¹. Блок-схема используемой установки была показана в публикации [34]; на рис. 1 приведен вид получаемого рельефа; рельеф поверхности изучался с применением атомно-силового микроскопа *Solver Next* (Зеленоград), АСМ-сканирование проводилось в полу-контактном режиме.

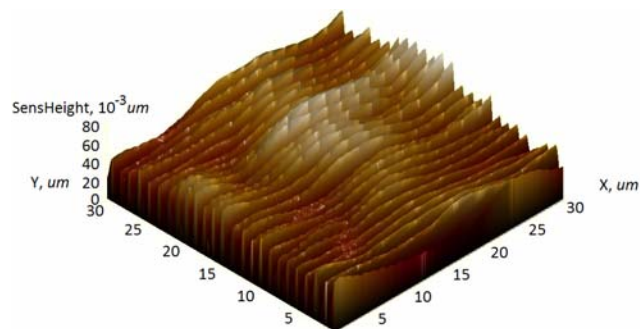


Рис. 1. АСМ-фотография рельефа поверхности, используемой для ориентации ЖК-мезофазы с эритроцитами

Fig. 1. AFM-image of the surface relief used in order to orient LC-mesophase with the erythrocytes

Заметим, что ориентация ЖК-молекул с введенными эритроцитами осуществлялась без применения прямого ориентирующего полимерного покрытия, рельеф, созданный вышеуказанным способом, способен выполнять эффективную функцию проводящих контактов, позволяя существенно снизить сопротивление проводящих слоев, уровень приложенного напряжения питания, повысить прозрачность ЖК-элемента и сдвинуть спектр пропускания ячейки в целом в ИК-область. К примеру, последний эффект влияния инновационного рельефа на ЖК с лантаноксидными наночастицами показан нами в публикации [33]; на рис. 2 приведены зависимости пропускания структурированных проводящих контактов при условии применения разной величины напряженности электрического поля, а на рис. 3 представлены данные квантово-химического моделирования картины расположения УНТ на поверхности ИТО-контакта при организации связи между углеродными атомами и атомарными ИТО-слоями.

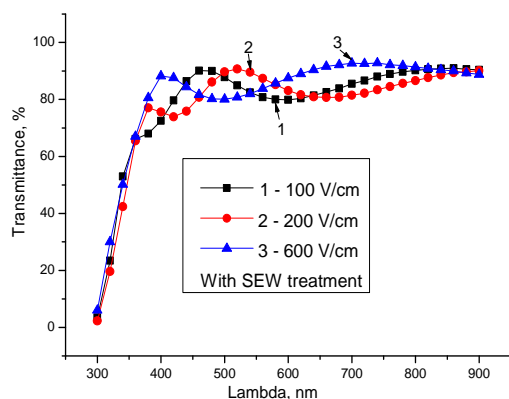


Рис. 2. Спектральная зависимость пропускания структурированных подложек при использовании для осаждения УНТ электрического поля разной напряженности

Fig. 2. Spectral dependence of the transmission of the structured substrates with the CNTs under the conditions when the electric field has been changed

Квантово-химическое моделирование было выполнено с помощью LAMMPS-программы. Также получена зависимость глубины проникновения УНТ от скорости их «разлета» при учете диаметра УНТ. При увеличении скорости от 100

до $500 \text{ м} \times \text{с}^{-1}$ глубина проникновения может меняться от 1 до 5 нм для УНТ с диаметром 0,64 нм и от 1 до 2 нм для углеродных трубок с диаметром 3,35 нм.

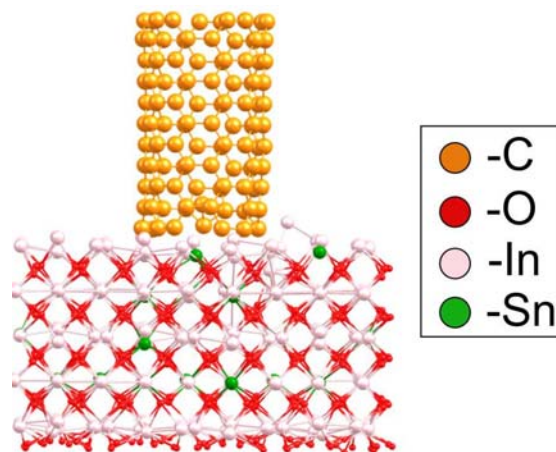


Рис. 3. Модельное представление «привязки» УНТ к поверхности прозрачных проводящих контактов

Fig. 3. Model presentation of the possible bonding of CNT to the surface of the transparent conductive contacts

Таким образом, вполне обоснованно было сделано предположение о реальности применения такого ориентационного рельефа для ориентирования ЖК-мезофазы с введенными в нее эритроцитами. Уточним, что первые эксперименты по исследованию рефрактивных параметров ЖК с такими биообъектами, как ДНК и проводящего покрытия с углеродными нанотрубками, выполняющего роль ориентанта, были выполнены в работах [26, 34], а эффективность применения межмолекулярного комплекса на основе системы COANP-C₇₀, повышающего поляризационные свойства композитов, была показана в публикациях [35–37].

Изучение объема ЖК с клетками крови было осуществлено посредством использования окулярного микрометра МОВ-1-16х, входящего в комплектацию микротвердомера ПМТ-3М (разработки АО «ЛОМО», Санкт-Петербург).

Результаты и их обсуждение

При исследовании ориентации ЖК-молекул и эритроцитов в ячейке были получены следующие изображения, представленные на рис. 4.

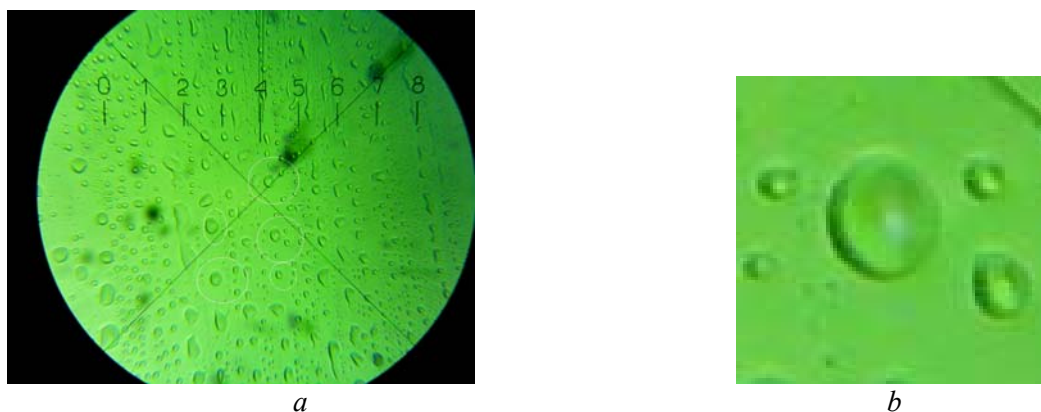


Рис. 4. Микрофотография объема ЖК-ячейки, цена деления 31 мкм (a) и выделенные клетки крови для визуализации их формы (b)

Fig. 4. The full liquid crystal cell photomicrography with the dimension of 31 microns (a) and erythrocytes cells in order to check their form (b)

На микрофотографии видна четкая ориентация содержимого ЖК-ячейки. Размер выделенных наблюдаемых объектов (~8–10 мкм), а также дисковидная вогнутая форма позволяют идентифицировать их как эритроциты. Напомним, что кровь реагирует на различные внешние факторы, проявляя изменение числа и активности циркулирующих красных кровяных клеток. При этом могут изменяться как цвет и содержание гемоглобина, так и конфигурация эритроцитов. Увеличение числа трансформированных клеток определяет негативную динамику, поэтому тестирование формы клеток актуально. На рис. 4, b показана в увеличенном масштабе конфигурация клеток в форме дисковидных частиц размером 5–8 микрометров, что соответствует нормальным, не трансформированным клеткам крови.

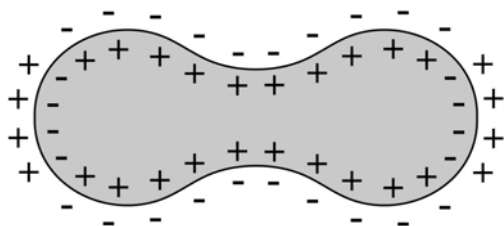


Рис. 5. Распределение мембранного потенциала эритроцита [38]

Fig. 5. Erythrocyte membrane potential distribution [38]

Обсуждая механизмы ориентации эритроцитов, необходимо указать, что на их мембране за счет содержания большого количества остатков *сиаловой (N-ацетилнейраминовой) кислоты* преобладают отрицательные заряды (рис. 5, [38]), которые отвечают за взаимодействие эритроцитов как между собой, так и с окружающими молекулами и частицами.

В качестве механизма ориентации эритроцитов в работе [29] было рассмотрено притяжение между нескомпенсированным дипольным моментом валентного колебания связи $C \equiv N$, расположенной вдоль длинной оси жесткого ядра ЖК-молекулы, и заряженной клеточной мембраны. Данное взаимодействие можно описать модельной схемой, представленной на рис. 6.

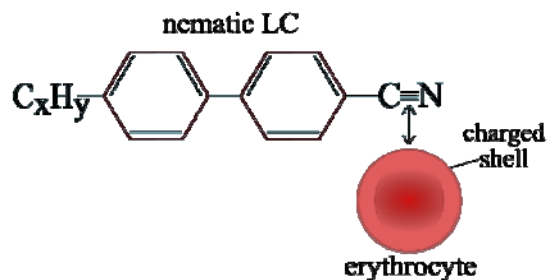


Рис. 6. Возможная модель взаимодействия эритроцита и молекулы нематического ЖК

Fig. 6. Possible model of the erythrocyte attraction with a nematic LC molecule

Как было указано выше, рассматриваемая ЖК-ячейка была модифицирована за счет нового способа создания ориентирующего покрытия, а также внесением в саму ЖК-структуру, помимо красных кровяных телец, межмолекулярного комплекса с переносом заряда (КПЗ) COANP-C₇₀. [35, 37]. Влияние фуллеренсодержащих комплексов на изменение кубичной нелинейности и уменьшение скорости разворота ЖК-молекулы показано в работе [36], где была предложена модель и высказано предположение о том, что образование межмолекулярного КПЗ приводит к изменению поляризации системы в связи с увеличением безбарьерного пути переноса носителей заряда и увеличенным количеством делокализованного заряда на межмолекулярном акцепторе, что подтверждалось существенным влиянием создаваемого большего дипольного момента на изменение рефрактивных и динамических параметров сенсibilизированных ЖК-систем. Данная модель также позволяла предположить, что внесенный межмолекулярный КПЗ в ЖК способствует ускоренной ориентации молекул ЖК и переходу их в квазисмектическую структуру с повышенным параметром порядка без условия приложенного электрического поля. Естественно, что изучение сенсibilизированного межмолекулярным комплексом ЖК в настоящей работе предполагает влияние увеличенной поляризации мезофазы на ориентационную укладку и эритроцитов крови за счет проявления зарядового состояния оболочки красных кровяных частиц.

Выводы

Таким образом, анализируя проведенные исследования, можно сделать следующие выводы:

- в описанном эксперименте по визуализации клеток крови ориентация молекул ЖК реализуется посредством созданного инновационного рельефа из ориентированных УНТ, осажденных лазерным способом с учетом дополнительного влияния электрического поля разной напряженности и обработки ПЭВ;
 - в описанном эксперименте по визуализации клеток крови ориентация молекул ЖК реализуется посредством введенного межмолекулярного КПЗ COANP+C₇₀, способствующего увеличению поляризационных свойств сенсibilизированной ЖК-мезофазы;
- проведенные исследования позволяют сделать вывод о возможности использования модифицированных ЖК-ячеек с целью фиксации и ориентации биообъектов на примере эритроцитов в качестве перспективного тест-анализа конфигурации красных кровяных частиц.

Благодарности

Работа выполнена в отделе «Фотофизика сред с нанообъектами» АО «ГОИ им. С. И. Вавилова» и была поддержана грантом РФФИ № 13-03-00044 (2013–2015), проектом «BIOMOLEC» по FP7 Program, Marie Curie Action (2011–2015), а также ОКР «Нанокоатинг-ГОИ» (2012–2015). Авторы выражают глубокую признательность своим коллегам Д. Г. Квашинину (Институт биохимической физики им. Н. М. Эмануэля РАН, Москва; Национальный исследовательский технологический университет «МИСиС», Москва) и П. Б. Сорокину (ФГБНУ «Технологический институт сверхтвердых и новых углеродных материалов», Москва, Троицк) за помощь с квантово-химическим расчетами.

Список литературы / References

1. Krafft Ch., Dietzek B., Schmitt M., Popp J. Raman and coherent anti-stokes Raman scattering microspectroscopy for biomedical applications. *J. Biomed. Opt.*, 2012, **17** (4), 040801, 15 p. DOI: 10.1117/1.JBO.17.4.040801
2. Garner A.L., Deminsky M., Neculaes V.B., Chashihin V., Knizhnik A., Potapkin B. Cell membrane thermal gradients induced by electromagnetic fields. *Journal of Applied Physics*, 2013, **113**, 214701, 11 p. DOI: 10.1063/1.4809642
3. Sharma Anuj K. Plasmonic biosensor for detection of hemoglobin concentration in human blood: Design considerations. *Journal of Applied Physics*, 2013, **114**, 044701, 8 p. DOI: 10.1063/1.4816272
4. Drexler W., Liu M., Kumar A., Kamali T., Unterhuber A., Leitgeb R.A. Optical coherence tomography today: speed, contrast, and multimodality. *J. Biomed. Opt.*, 2014, **19** (7), 071412, 34 p. DOI: 10.1117/1.JBO.19.7.071412.
5. Li M., Zhao F., Zeng J., Qi Ji, Lu J., Shih W.-Ch. Microfluidic surface-enhanced Raman scattering sensor with monolithically integrated nanoporous gold disk arrays for rapid and label-free biomolecular detection. *J. Biomed. Opt.*, 2014, **19** (11), 111611, 8 p. DOI: 10.1117/1.JBO.19.11.111611.
6. Manakasettharn S., Hsu T.-H., Taylor J.A., Krupenkin T. Interplay between iridescent and non-iridescent coloration in bio-inspired electrically-tunable nanostructures. *Optical Materials Express*, 2014, **4** (4), 681–688. DOI: 10.1364/OME.4.000681.

7. Vdovichev A.A., Sych T.S., Reveguk Z.V., Smirnova A.A., Maksimov D.A., Ramazanov R.R., Kononov A.I. Structure of fluorescent metal clusters on a DNA template. *Journal of Physics: Conference Series*, 2016, **741**, 012069, 4 p.
DOI:10.1088/1742-6596/741/1/012069.
8. Bagraev N.T., Chernov A.L., Klyachkin L.E., Malyarenko A.M., Emel'yanov A.K., Dubina M.V. Terahertz response of DNA oligonucleotides on the surface of silicon nanostructures. *Semiconductors*, 2016, **50** (9), 1208–1215.
DOI:10.1134/S1063782616090037.
9. Pasechnik S.V., Semina O.A., Shmeliova D.V., Dubtsov A.V., Chigrinov V.G., Sun J. Photo Controlled Surfaces in Rheology of Liquid Crystals. *Mol. Cryst. Liq. Cryst.*, 2015, **611** (1), 81–93.
DOI: 10.1080/15421406.2015.1027998.
10. Mlalila N.G., Swai H.Sh., Hilonga A., Kadam D.M. Antimicrobial dependence of silver nanoparticles on surface plasmon resonance bands against *Escherichia coli*. *Nanotechnology, Science and Applications*, 2017, **10**, 1–9. DOI: 10.2147/NSA.S123681
11. Васильев А. А., Касасент Д., Компанец И. Н., Парфенов А. В. Пространственные модуляторы света. М.: Радио и связь, 1987. 320 с. [Vasilyev A.A., Kasasent D., Kompanets I.N., Parfenov A.V. Spatial light modulators. M.: Radio and Communication, 1987, 320 p. (in Russ.)].
12. Kelker H. History of Liquid Crystals. *Mol. Cryst. Liq. Cryst.*, 1973, **21**, 1–48.
13. Жаркова Г. М., Коврижина В. Н., Хачатурян В. М. Экспериментальное исследование дозвуковых течений методом жидкокристаллической термографии // *Прикладная механика и техническая физика*. 2002. Т. 43, № 2. С. 122–128. [Zharkova G.M., Kovrizhina V.Y., Khachaturyan V.M. Experimental study of subsonic flows by liquid-crystal thermography. *Journal of Applied Mechanics and Technical Physics*, 2002, **43** (2), 274–279].
14. Wang L., Lin X.-W., Liang X., Wu J.-b., Hu W., Zheng Zh-g., Jin B.-b., Qin Yi-q., Lu Y.-q. Large birefringence liquid crystal material in terahertz range. *Optical Materials Express*, 2012, **2** (19), 1314–1319.
DOI: 10.1364/OME.2.001314.
15. Ould-Moussa N., Blanc Ch., Zamora-Ledezma C., Lavrentovich O.D., Smalyukh I.I., Islam M.F., Yodh A.G., Poulin P., Anglaret E., Nobili M. Dispersion and orientation of single-walled carbon nanotubes in a chromonic liquid crystal. *Liquid Crystals*, 2013, **40** (12), 1628–1635.
DOI: 10.1080/02678292.2013.772254
16. Саутина Н. В., Галяметдинов Ю. Г. Влияние пропиленгликоля на образование самоорганизующихся структур в системе вода/лецитин/вазелиновое масло // *Жидк. крист. и их практич. использ.* 2016. Т. 16, № 1. С. 83–89. [Sautina N.V., Galyametdinov Yu.G. Influence of propylene glycol on the formation of self-organizing structures in water/lecithine/vaseline oil systems. *Zhidk. krist. ikh prakt. ispol'z = Liq. Cryst. and their Appl.*, 2016, **16** (1), 83–89 (in Russ.)]. DOI: 10.18083/LCApp.2016.1.83.
17. Guo C., Wang J., Cao F., Lee R.J., Zhai G. Lyotropic liquid crystal systems in drug delivery. *Drug Discov. Today*, 2010, **15** (23/24), 1032–1040.
DOI: 10.1016/j.drudis.2010.09.006.
18. Li Y., Zhu Ka-Di. Tunable optical Kerr effects of DNAs coupled to quantum dots. *Nanoscale Research Letters*, 2012, **7**, 660, 6 pages.
DOI: 10.1186/1556-276X-7-660.
19. Chevrier D.M., Chatt A., Zhang P. Properties and applications of protein-stabilized fluorescent gold nanoclusters: short review. *Journal of Nanophotonics*, 2012, **6**, 064504-1–064504-16.
DOI: 10.1117/1.JNP.6.064504.
20. Dancus I., Vlad V.I., Petris A., Raub I., Kajzarb F., Megheab A., Tane A. Nonlinear optical properties of Rh610 sensitized DNA-CTMA characterized by Z-Scan. *Proc. of SPIE*, 2013, **8882**, 88820D-1, 5 pages.
DOI: 10.1117/12.2032352.
21. Zhang R., Zhang X., Li X., Yang P. Synthesis, phase transfer and surface modification of hydrophobic quantum dots for bioapplications. *Funct. Mater. Lett.*, 2013, **6** (3), 1330003-1–1330003-9.
DOI: 10.1142/S179360471330003X.
22. Robles-Vazquez O., Orozco-Avila I., Sánchez-Díaz J. C., Hernandez E. An overview of mechanical tests for polymeric biomaterial scaffolds used in tissue engineering. *Journal of Research Updates in Polymer Science*, 2015, **4**, 168–178.
DOI: 10.6000/1929-5995.2015.04.04.1
23. Backer A.S., Lee M.Y., Moerner W.E. Enhanced DNA imaging using super-resolution microscopy and simultaneous single-molecule orientation measurements. *Optica*, 2016, **3** (6), 659–666. DOI: 10.1364/OPTICA.3.000659
24. Каманина Н. В., Зубцова Ю. А., Шурпо Н. А., Серов С. В., Кухарчик А. А., Кужаков П. В. Структурные, спектральные и фоторефрактивные свойства нано- и биоструктурированных органических материалов, включая жидкие кристаллы // *Жидк. крист. и их практич. использ.* 2014. Т. 14, № 1. С. 5–12. [Kamanina N.V., Zubtsova Yu.A., Shurpo N.A., Serov S.V., Kukharchik A.A., Kuzhakov P.V. Structural, spectral and photorefractive properties of nano- and biostructured organic materials including liquid crystals. *Zhidk. krist. ikh prakt. ispol'z = Liq. Cryst. and their Appl.* 2014, **14** (1), 5–12 (in Russ.)].

25. Kamanina N.V., Serov S.V., Kukharchik A.A., Zubtsova Yu.A., Studeonov V.I., Andraud Ch. Nano- and Bio-Structured Materials and their Photorefractive Features. *Proceed. 5th International Conference on Bioscience and Bioinformatics (ICBB'14)*. Gdansk, Poland, 2014. Abstract book, Part I. P. 95–97. ISBN: 978-960-474-381-0.
26. Kamanina N.V., Serov S.V., Zubtsova Yu.A., Bretonniere Y., Andraud Ch., Baldeck P., Kajzar F. Photorefractive properties of some nano- and bio-structured organic materials. *Journal of Nanotechnology in Diagnosis and Treatment*, 2014, **2** (1), 2–5. Available at: <http://savvysciencepublisher.com/downloads/jndtv2n1a1/>
27. Kamanina N.V., Serov S.V., Bretonniere Y., Andraud Ch. Organic systems and their photorefractive properties under the nano- and biostructuration: scientific view and sustainable development. *Journal of Nanomaterials*, 2015, **2015**, Article ID 278902, 5 p. DOI: 10.1155/2015/278902.
28. Каманина Н. В., Кидалов В. Н. Изучение эффекта выравнивания эритроцитов в нематической жидкокристаллической среде // *Письма в ЖТФ*. 1996. Т. 22, вып. 14. С. 39–42. [Kamanina N.V., Kidalov V.N. A study of the lining up of red blood cells in a nematic liquid crystal medium. *Tech. Phys. Lett.*, 1996, **22** (7), 571–572].
29. Каманина Н. В. Отличие (и взаимосвязь) эффекта ориентирования эритроцитов от электрических вибраций Fröhlich'а // *Письма в ЖТФ*. 1997. Т. 23, вып. 23. С. 7–15. [Kamanina N.V. Similarities and differences between the effect of orientation of red blood cells in a nematic liquid-crystal medium and the Fröhlich electrical vibrations, *Tech. Phys. Lett.*, 1997, **23** (12), 902–905. DOI: 10.1134/1.1261926].
30. Kamanin A.A., Kamanina N.V. Self-organization of liquid crystals induced by aligning of human erythrocytes. *Mol. Cryst. Liq. Cryst.*, 2008, **486** (1), 50–56. DOI: 10.1080/15421400801917379.
31. Пат. России № 2355001 (RU 2355001 C2). Оптическое покрытие на основе углеродных нанотрубок для оптического приборостроения и наноэлектроники / Каманина Н. В., Васильев П. Я.; приор. от 09.01.2007; Зарегистр. в гос. реестре изобретений РФ 10.05.2009. [RU Patent 2355001 C2. Optical coating based on CNTs for the optical devises and nanoelectronics / Kamanina N.V., Vasil'ev P.Ya.; priority on 09.01.2007; Registered on the State inventory on 10.05.2009 (in Russ.)].
32. Пат. России № 2405177 (RU 2405177 C2). Оптическое покрытие на основе ориентированных в электрическом поле углеродных нанотрубок для оптического приборостроения, микро- и наноэлектроники при нивелировании границы раздела сред: твердая подложка – покрытие / Каманина Н. В., Васильев П. Я., Студёнов В. И.; приор. от 23.12.2008; Зарегистр. в гос. реестре изобретений РФ 27.11.2010 г. [RU Patent 2405177 C2. Optical coating based on oriented in the electric field CNTs for the optical devises, micro- and nanoelectronics under the conditions when the interface: solid substrate-coating can be eliminated / Kamanina N.V., Vasil'ev P.Ya., Studenov V.I.; priority of 23.12.2008; Registered on the State inventory on 27.11.2010 (in Russ.)].
33. Kamanina N.V., Zubtsova Yu.A., Kukharchik A.A., Lazar C., Rau I. Control of the IR-spectral shift via modification of the surface relief between the liquid crystal matrixes doped with the lanthanide nanoparticles and the solid substrate. *Optics Express*, 2016, **24** (2), 6 p. DOI:10.1364/OE.24.00A270.
34. Каманина Н. В., Кухарчик А. А., Кужаков П. В., Зубцова Ю. А., Степанов Р. О., Барышников Н. В. Модификация углеродными нанотрубками проводящего ИТО-слоя для ориентирования жидких кристаллов в электрооптических устройствах преобразования оптической информации // *Жидк. крист. и их практич. использ.* 2015. Т. 15, № 3. С. 109–118. DOI: 10.18083/LCAppl.2015.3.109. [Kamanina N.V., Kukharchik A.A., Kuzhakov P.V., Zubtsova Yu.A., Stepanov R.O., Baryshnikov N.V. Carbon nanotubes modification of the conductive ITO-layer for orientation of liquid crystals used in electro-optical devices for information processing. *Zhidk. krist. ikh prakt. ispol'z = Liq. Cryst. and their Appl.*, 2015, **15** (3), 109–118. (in Russ.)].
35. Каманина Н. В., Плеханов А. И. Механизмы ограничения оптического излучения в фуллеренсодержащих π -сопряженных органических структурах на примере молекул полиимида и COANP // *Оптика и спектроскопия*. 2002. Т. 93, № 3. С. 443–452. [Kamanina N.V., Plekhanov A.I. Mechanisms of optical limiting in fullerene-doped π -conjugated organic structures demonstrated with polyimide and COANP molecules. *Optics and Spectroscopy*, 2002, **93** (3), 408–415. DOI: 10.1134/1.1509823].
36. Каманина Н. В. Фуллеренсодержащие диспергированные нематические жидкокристаллические структуры: динамические характеристики и процессы самоорганизации // *Успехи физических наук*. 2005. Т. 175, № 4. С. 445–454. DOI: 10.3367/UFNr.0175.200504f.0445. [Kamanina N.V. Fullerene-dispersed nematic liquid crystal structures: dynamic characteristics and self-organization processes. *Phys. Usp.*, 2005, **48**, 419–427. DOI: 10.1070/PU2005v048n04ABEH002101].

37. Kamanina N.V. Optical investigations of a C₇₀-doped 2-cyclooctylamino-5-nitropyridine–liquid crystal system. *Journal of Optics A: Pure and Applied Optics*, 2002, **4** (4), 571–574.

DOI: 10.1088/1464-4258/4/5/313.

38. Лукашев Е. А. Асимптотическое решение модели форм эритроцита как автоволнового процесса // *Биофизика*. 1991. Т. 36, вып. 1. С. 83–89. [Luka-

shev E.A. Asymptotic solution of a model of erythrocyte forms as autowave process. *Biophysics*, 1991, **36** (1), 83–89 (in Russ.)].

*Поступила в редакцию 19.01.2017 г.
Received 19 January 2017*