

УДК 532.783

Д. О. Рыбаков^{1,2}, В. В. Беляев^{1,3}

ДВОЙНЫЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ СЛОИ И ИХ ВЛИЯНИЕ НА НИЗКОЧАСТОТНУЮ ДИЭЛЕКТРИЧЕСКУЮ ПРОНИЦАЕМОСТЬ 4-*n*-ПЕНТИЛ-4'-ЦИАНОБИФЕНИЛА (5CB)

¹Московский государственный областной университет,
ул. Радио, д. 10-а, 105005 Москва, Россия.

²Федеральный научно-исследовательский центр «Кристаллография и фотоника» РАН,
Ленинский пр-т, д. 59, 119333 Москва, Россия.

³Российский университет дружбы народов,
ул. Миклухо-Маклая, д. 6, 117198 Москва, Россия. E-mail: vic_belyaev@mail.ru

*Построена эмпирическая модель, описывающая образование двойных электрических слоев (ДЭС) для ячеек с гомеотропной и планарной ориентацией на основе экспериментальных результатов диэлектрической спектроскопии 4-*n*-пентил-4'-цианобифенила (5CB). Представленная модель позволяет определить параметры ДЭС, такие как толщина и емкость, с учетом физических параметров жидкого кристалла, а также показать эмпирические зависимости паразитной емкости, обусловленной наличием ионов проводимости, от толщины этих слоев.*

Ключевые слова: нематический жидкий кристалл, двойной электрический слой, емкость и толщина двойного слоя.

DOI: 10.18083/LCAppl.2018.4.40

Д. О. Рыбаков^{1,2}, В. В. Беляев^{1,3}

ELECTRICAL DOUBLE LAYERS AND THEIR EFFECT ON THE LOW-FREQUENCY DIELECTRIC PERMITTIVITY OF 4-*n*-PENTYL-4'-CYANOBIPHENYL (5CB)

¹Moscow Region State University, 10-a Radio St., Moscow, 105005, Russia

²Shubnikov Institute of Crystallography of Federal Scientific Research Centre «Crystallography and Photonics» of Russian Academy of Sciences, 59 Leninsky Ave., Moscow, 119333, Russia

³RUDN University (Peoples' Friendship University of Russia),
6 Miklukho-Maklaya St., Moscow, 117198, Russia. E-mail: vic_belyaev@mail.ru

*On the basis of the dielectric spectroscopy experimental results of 4-*n*-pentyl-4'-cyanobiphenyl (5CB), an empirical model describing the formation of double electrical layers (DEL) for the cells with the homeotropic and planar orientation is constructed. The model allows to determine the parameters of DEL, such as thickness and capacity, taking into account physical parameters of liquid crystal. It is also shows the empirical dependence of the parasitic capacitance, which is due to the presence of conduction ions, on the thickness of these layers.*

Key words: nematic liquid crystal, electrical double layer, capacity and thickness of electrical double layer.

Введение

Вопросы эксплуатации жидкокристаллических устройств, в частности деградации, как самого материала, так и деградации изображения формирования материала, заставили выполнить фундаментальные исследования по изучению свойств жидкого кристалла (ЖК) с неоднородным распределением зарядов в его объеме, образующих двойные электрические слои (ДЭС) [1]. Эта проблема актуальна также при создании композитных материалов с компонентами, имеющими неплоскую поверхность раздела, например, на границе ЖК и полимерной матрицы [2–4]. Практическую значимость имеет учет параметров ДЭС при разработке и эксплуатации конденсаторов, аккумулирующих заряд, для систем электропитания [5].

Помимо этого, при разработке методик измерений диэлектрических констант ЖК необходимо обязательно учитывать зависимость паразитной емкости, дающей вклад в величину измеряемой емкости на низких частотах от величины этих частот и ориентации молекул ЖК [6–8].

Поэтому целью работы является построение эмпирической модели, описывающей образование двойных электрических слоев, для ячеек с гомеотропной и планарной ориентацией на основе экспериментальных результатов диэлектрической спектроскопии нематического жидкого кристалла с положительной анизотропией диэлектрической проницаемости [9] 4-*n*-пентил-4'-цианобифенила (5СВ). Данная модель позволяет определить параметры ДЭС, такие как толщина и емкость, с учетом физических параметров ЖК, а также позволяет показать эмпирические зависимости паразитной емкости, обусловленной наличием ионов проводимости, от толщины этих слоев.

Жидкие кристаллы можно рассматривать как слабые электролиты, в которых носителями заряда являются ионы. Очень часто примесные ионы могут остаться в жидком кристалле от недостаточной очистки вещества после его синтеза или появиться, к примеру, под длительным воздействием на вещество температуры или УФ-излучения.

Также ионизация нейтральных молекул может быть вызвана приложением к образцу достаточно сильного внешнего поля, в частности, вблизи электродов. Особенно это относится к тонким слоям ЖК.

Электроны или дырки могут быть инжектированы из электрода и почти немедленно (время за-

хвата порядка 10^{-5} – 10^{-18} с) захвачены нейтральными молекулами ЖК, образуя при этом отрицательно или положительно заряженные ионы, которые, прежде чем рекомбинировать, принимают участие в протекании тока через образец.

Эксперимент

Согласно [10, 11], прикладываемое электрическое поле разводит примесные ионы из объема диэлектрика к противоположно заряженным электродам конденсатора (измерительной ячейки). Емкость такой ячейки, заполненной диэлектриком, можно описать формулой:

$$C = \frac{(\sigma_0 + \sigma_P + \sigma_G)S}{U_0}, \quad (1)$$

где σ_0 – плотность зарядов на электродах в пустой ячейке, σ_P – плотность поляризационных зарядов, σ_G – плотность зарядов проводимости (примесных ионов), S – единица площади поверхности электродов, U_0 – прикладываемое напряжение.

Принимая во внимание, что прикладываемое к ячейке напряжение можно расписать как $U_0 = E_0 d$ и плотность поляризационных зарядов σ_P численно равна поляризации P , формула (1) принимает следующий вид:

$$C = \frac{\sigma_0 S}{E_0 d} + \frac{PS}{E_0 d} + \frac{\sigma_G S}{E_0 d}. \quad (2)$$

Преобразовывая (2), получаем, что емкость заполненного конденсатора равна:

$$C = C_0 \left(\varepsilon + \frac{\sigma_G}{\sigma_0} \right). \quad (3)$$

Учитывая то, что отношение емкости заполненной диэлектриком ячейки к емкости пустой ячейки имеет смысл диэлектрической проницаемости вещества, из формулы (3) можем сделать вывод о том, что получаемые в ходе опыта значения диэлектрической проницаемости есть сумма этой величины и ошибки, связанной с наличием в объеме ионов проводимости.

Как отмечалось выше, заряды проводимости начинают расходиться к поверхностям электродов. При этом ионы из объема ЖК доходят до электродов медленнее чем из приграничных областей. Иными словами, чем больше времени, тем из более дальних областей ионы успевают достичь электродов.

Исходя из этого, можно сделать заключение о том, что при воздействии поля синусоидальной

формы, как было в нашем эксперименте, плотность зарядов на электродах зависит от времени, в течение которого эти заряды разводятся.

Таким образом, получается, что плотность зарядов проводимости σ_G пропорциональна половине периода синусоидального напряжения $T/2$. Если принять, что этот период равен

$$T = \frac{1}{2f}, \quad (4)$$

где f – частота прикладываемого поля, то эффективную диэлектрическую проницаемость, измеренную в ходе опыта, можно выразить как сумму диэлектрической проницаемости и ошибки, связанной с зарядами проводимости

$$\varepsilon^{eff} = \varepsilon + \frac{\sigma_G}{\sigma_0} \approx \varepsilon + \frac{A}{\sigma_0 f}, \quad (5)$$

где ε^{eff} – эффективная диэлектрическая проницаемость, измеренная в эксперименте, $\frac{A}{\sigma_0 f}$ – ошибка,

характеризующая вклад в величину измеренной диэлектрической проницаемости, A – константа.

Возвращаясь к примесным ионам, отвечающим за проводимость ЖК-вещества, стоит сказать, что они образуют так называемые двойные электрические слои (ДЭС).

Воспользуемся теорией строения этих слоев, предложенной Перреном и Гельмгольцем (см. ее изложение в [12, 13]). Рассчитанные в соответствии с этой теорией значения емкости согласуются с опытными данными, используя которые можно получить правдоподобную толщину ДЭС [13]. Таким образом, теория Гельмгольца применима к нашей модели.

Согласно их представлениям, на границе соприкасающихся фаз (ориентирующий слой/жидкий кристалл) заряды располагаются в виде двух разноименных ионов. Первый вид ионов – сольватированные противоионы (ПИ). Второй вид представляют ряд потенциалопределяющих ионов (ПОИ), прилегающих к поверхности и определяющих ее знак. Их количество на единицу площади S определяет величину удельного заряда поверхности

$$q_s = z_i F S, \quad (6)$$

где z_i – заряд иона, $F = 96,5 \cdot 10^3$ Кл/моль – число Фарадея, S – площадь поверхности.

Эти слои противоположно заряженных и пространственно разделенных ионов и образуют двойной электрический слой. При этом ПОИ и ПИ являются его внутренней и внешней частью, соответственно.

Двойной электрический слой имеет свою толщину. Физически эта толщина ДЭС представляет расстояние, на котором его внешняя часть полностью нейтрализует поверхностный заряд, т. е. снижает потенциал до нуля, что согласно формулам:

$$\begin{aligned} \text{th}(u/4) &= \gamma((u_s) \exp(-kx)), \\ \psi &= \psi_s \exp(-kx) \end{aligned} \quad (7)$$

достигается при бесконечном удалении от поверхности. Таким образом, в реальной задаче ДЭС не имеет определенной физической толщины, и поэтому в качестве его геометрической характеристики приходится использовать эффективную толщину δ .

Эффективная толщина ДЭС δ близка к молекулярным размерам или размерам сольватированных ионов и определяется отношением:

$$\delta = \sqrt{\frac{\varepsilon^{eff} \varepsilon_0 R T}{2 F^2 I}}, \quad (8)$$

где ε^{eff} – диэлектрическая проницаемость среды (экспериментальное значение), $\varepsilon_0 = 8,85 \cdot 10^{-12}$ Ф/м – диэлектрическая постоянная, $R = 8,31$ Дж/моль·К – газовая постоянная, T – температура среды в кельвинах, $F = 96,5 \cdot 10^3$ Кл/моль – постоянная Фарадея, I – ионная сила раствора.

Принимая ионную силу раствора I за единицу, выражение (8) для расчета толщины ДЭС примет вид:

$$\delta = \sqrt{\frac{\varepsilon^{eff} \varepsilon_0 R T}{2 F^2}}. \quad (9)$$

При этом потенциал слоя снижается в пределах его толщины линейно до нуля. Таким образом, в соответствии с рассматриваемой теорией величина потенциала, определяемого по электротехническим измерениям, отождествляется с величиной электрохимического (термодинамического) потенциала.

В простейшем представлении ДЭС можно представить в виде плоского конденсатора. Используемая измерительная ячейка является системой из трех последовательно соединенных конденсаторов, два из которых являются двойными слоями с расстоянием между пластинами, равным толщине δ , и удельным поверхностным зарядом q_s на одной из пластин. Тогда объемный заряд q_V внешней части ДЭС (ПИ-ионы) следует приписать второй пластине конденсатора и считать, что он целиком сосредоточен на ней. В целом двойной слой электронейтрален, т. е. выполняется условие:

$$q_s + q_V = 0. \quad (10)$$

Емкость ДЭС равна отношению

$$C_{ДЭС} = \frac{\varepsilon^{eff} \varepsilon_0 S}{\delta}, \quad (11)$$

где ε^{eff} – значения диэлектрической проницаемости среды, полученные из эксперимента, $\varepsilon_0 = 8,85 \cdot 10^{-12}$ Ф/м – диэлектрическая постоянная, δ – толщина ДЭС, S – площадь поверхности.

Таким образом, измерительная ячейка представляет собой систему последовательно соединенных конденсаторов, суммарная емкость которых равна:

$$\frac{1}{C^{eff}} = \frac{1}{C_{ЖК}} + \frac{2}{C_{ДЭС}}, \quad (12)$$

где C^{eff} – емкость ячейки с ЖК, измеренная в опыте, $C_{ЖК}$ – емкость ЖК, $C_{ДЭС}$ – емкость двойного слоя. В рамках представленной модели были рассчитаны

некоторые характеристики двойных слоев: их толщина (δ) и емкость ($C_{ДЭС}$). Для расчета этих характеристик использовались значения диэлектрической проницаемости ЖК для ячеек с гомеотропной ($\varepsilon_{\parallel}^{eff}$) и планарной ориентациями ($\varepsilon_{\perp}^{eff}$), имеющими толщины порядка 15 мкм, полученные методом диэлектрической спектроскопии [11, 14–22] при амплитуде измерительного напряжения $U_{изм} = 0,1$ В и нормальном атмосферном давлении 10^5 Па. Площадь поверхности принималась равной 1 см^2 (рис. 1).

Полученные таким образом результаты согласуются с данными для этого вещества [23].

Для простоты расчета характеристик ДЭС в данной модели допускались некоторые приближения. Во-первых, ионная сила раствора ЖК (I) принималась равной единице. Во-вторых, не учитывалось влияние ориентирующих покрытий [24].

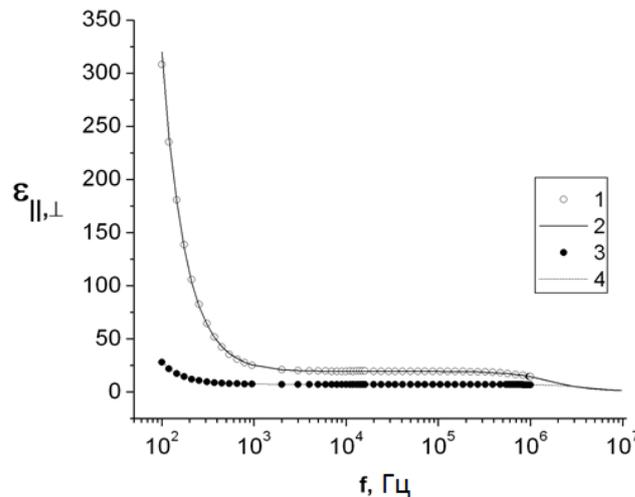


Рис. 1. Частотная зависимость действительных частей компонент диэлектрической проницаемости ε'_{\parallel} и ε'_{\perp} вещества 5CB при температуре $T = 298$ К, нормальном атмосферном давлении $p = 10^5$ Па, измерительном напряжении $U = 0,1$ В в интервале частот 100 Гц – 10 МГц; кривые 1 и 3 – экспериментальные значения ε'_{\parallel} и ε'_{\perp} , соответственно; 2 и 4 – соответствующие аппроксимационные кривые ε'_{\parallel} и ε'_{\perp} .

Fig. 1. Frequency dependences of the real parts of the components of the dielectric permittivity ε'_{\parallel} and ε'_{\perp} of the compound 5CB at $T = 298$ K, normal atmospheric pressure $p = 10^5$ Pa, the measuring voltage $U = 0,1$ В in the frequency range of 100 Hz – 10 MHz; the curves 1 and 3 show the experimental values of ε'_{\parallel} and ε'_{\perp} , respectively; the curves 2 and 4 are the corresponding approximation curves of ε'_{\parallel} and ε'_{\perp} .

Из графиков зависимости толщины двойных электрических слоев от частоты для ячеек с гомеотропной и планарной ориентацией в интервале частот от 100 Гц до 6 кГц, изображенных на рис. 2,

следует, что с ростом частоты толщина этих слоев уменьшается. При этом по величине толщина ДЭС на три порядка меньше толщины измерительной ячейки, равной 15 мкм.

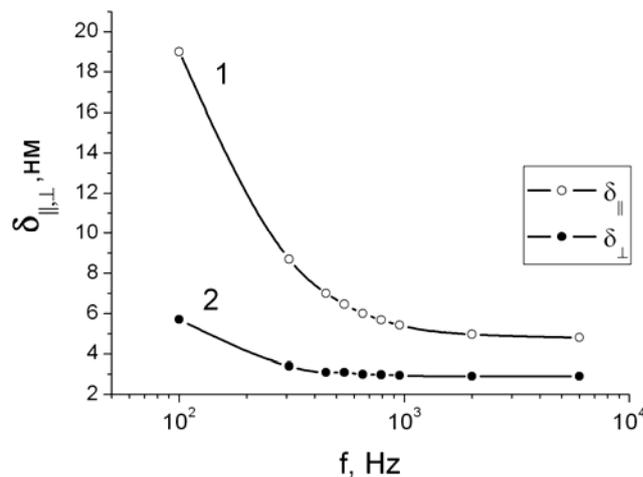


Рис. 2. Зависимость толщины ДЭС от частоты прикладываемого внешнего поля; кривые: 1 – для ячейки с гомеотропной ориентацией ($\delta_{||}$), 2 – для ячейки с планарной ориентацией (δ_{\perp})

Fig. 2. Dependence of the EDL thickness on the frequency of the applied external field; 1 – for the cell with the homeotropic orientation ($\delta_{||}$), 2 – for the cell with the planar orientation (δ_{\perp})

Такая толщина двойных электрических слоев определяет большую величину их емкости по сравнению с емкостью ячейки (C_{eff}), заполненной $5CB$, полученной в ходе эксперимента (рис. 3).

Если построить зависимость емкости ДЭС от их толщины, то можно увидеть, что эта зависимость является линейной и прямо пропорциональной, т. е. с увеличением толщины наблюдается рост емкости (рис. 4).

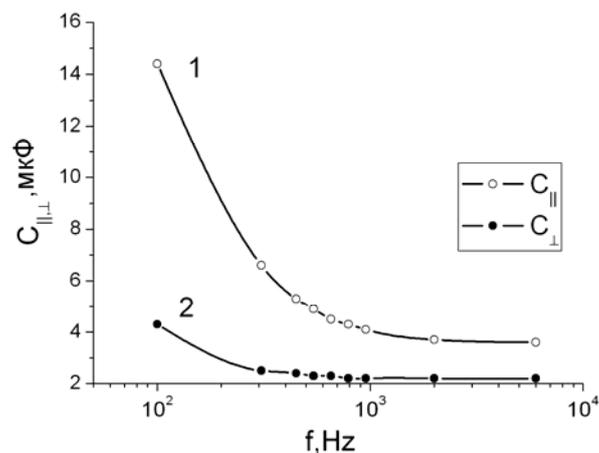


Рис. 3. Частотная зависимость емкости двойных электрических слоев: кривая 1 – для ячейки с гомеотропной ориентацией ($C_{||}$), 2 – для ячейки с планарной ориентацией (C_{\perp})

Fig. 3. Frequency dependence of the capacitance of double electrical layers: 1 – for the cell with the homeotropic orientation ($C_{||}$), 2 – for the cell with the planar orientation (C_{\perp})

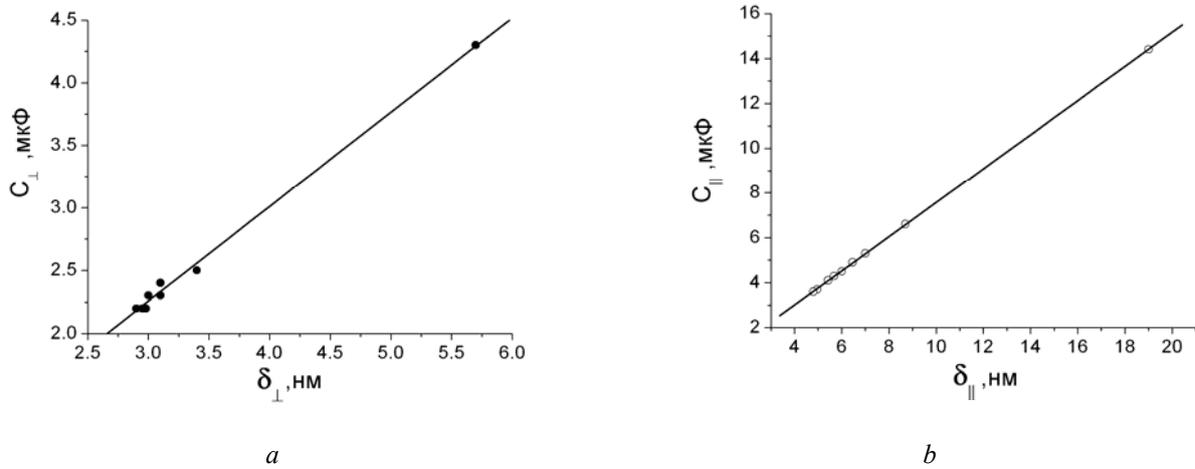


Рис. 4. Зависимость емкости ДЭС от их толщины: слева – для ячейки с планарной ориентацией, справа – для ячейки с гомеотропной ориентацией

Fig. 4. Dependence of the EDL capacity on the thickness: *a* – for the cell with the planar orientation, *b* – for a cell with the homeotropic orientation

С учетом теоретических расчетов выходит, что величина диэлектрической проницаемости вещества *5CB* должна быть много больше той, которая получилась в эксперименте. Однако на практике это не так.

Для объяснения этого следует сказать, что по своей сути измерительная ячейка, заправленная исследуемым веществом, представляет собой три последовательно соединенных плоских конденсатора. Следовательно, измеренная в ходе эксперимента

емкость является суммой емкостей двойных слоев и слоя ЖК и описывается формулой (12).

Таким образом, при существующей схеме соединения конденсаторов их суммарная емкость C^{eff} не может превышать меньшей из трех емкостей, что, в свою очередь, и позволяет избежать роста значения диэлектрической проницаемости, измеренной в эксперименте. Полученные в ходе расчетов данные представлены в таблице.

Таблица. Толщина и емкость ДЭС на основе экспериментальных данных по зависимости емкости от частоты электрического поля для ячеек с гомеотропной (C_{\parallel}^{eff}) и планарной (C_{\perp}^{eff}) ориентацией *5CB*, полученных при $T = 298$ К, давлении $p = 10^5$ Па и измерительном напряжении $U = 0,1$ В

Table. Thickness and capacitance of EDL obtained from the experimental dependence of the capacitance on the electric field frequency for the cells with homeotropic (C_{\parallel}^{eff}) and planar (C_{\perp}^{eff}) orientation of *5CB*, at $T = 298$ K, pressure $p = 10^5$ Pa and the measuring voltage $U = 0,1$ V

Частота, Гц	$\epsilon'_{\parallel}^{eff}$	δ_{\parallel} , нм	C_{\parallel} , мкФ	ϵ'_{\perp}^{eff}	δ_{\perp} , нм	C_{\perp} , мкФ	C_{\parallel}^{eff} , нФ	C_{\perp}^{eff} , нФ
100	308	19	14,4	28	5,7	4,3	18,9	2,1
308	64,6	8,7	6,6	9,6	3,4	2,5	4	0,7
449	42,1	7	5,3	8,3	3,1	2,4	2,6	0,63
542	35,5	6,46	4,9	7,9	3,1	2,3	2,3	0,6
655	30,7	6	4,5	7,7	3	2,3	1,9	0,59
790	27,4	5,68	4,3	7,5	2,98	2,2	1,7	0,57
954	25	5,42	4,1	7,4	2,95	2,2	1,5	0,56
2000	20,9	4,96	3,7	7,2	2,9	2,2	1,23	0,55
6000	19,6	4,8	3,6	7,1	2,9	2,2	1,2	0,5

Выводы

Предложена эмпирическая модель, описывающая образование двойных электрических слоев (ДЭС) в жидкокристаллических ячейках с гомеотропной и планарной ориентацией. Модель основана на теории Перрена и Гельмгольца и экспериментальных результатах диэлектрической спектроскопии НЖК 4-*n*-пентил-4'-цианобифенила (5CB). Использование модели позволяет определить параметры ДЭС, такие как толщина и емкость, с учетом физических параметров этого ЖК. Также получены эмпирические зависимости паразитной емкости, обусловленной наличием ионов проводимости, от толщины этих слоев. Впервые установлено, что толщина ДЭС зависит от ориентации молекул в слое ЖК. Толщина ДЭС в ячейках с гомеотропной ориентацией молекул имеет величину в 1,5–3 раза большую, чем в планарных ячейках. Для частоты 2 кГц эти значения составляют 19 нм и 5,7 нм для гомеотропной и планарной ориентации, соответственно.

Исследование выполнено в рамках научного проекта № 17-47-500752 при финансовой поддержке РФФИ и Правительства Московской области.

Список литературы/References

- Lo K.-Y., Shiah C.-C., Huang C.-Y. Actual Capacitance Function of Nematic Liquid Crystal Cell. *Japanese Journal of Applied Physics*, 2006, **45** (2A), 891–895. DOI: 10.1143/JJAP.45.891.
- Sato K., Mizuma T., Nishide H., Oyaizu K. Command Surface of Self-Organizing Structures by Radical Polymers with Cooperative Redox Reactivity. *Journal of the American Chemical Society*, 2017, **139** (39), 13600–13603.
- Sidiq S., Krishna Prasad G. V. R., Mukhopadhyaya A., Kumar Pal S. Poly(l-lysine)-Coated Liquid Crystal Droplets for Cell-Based Sensing Applications. *Journal of Physical Chemistry B*, 2017, **121** (16), 4247–4256.
- Коншина Е. А., Щербинин Д. П., Гавриш Е. О., Галин И. Ф., Курочкина М. А. Свойства нематических жидких кристаллов, допированных полупроводниковыми наночастицами CdSe/ZnS // *Жидк. крист. и их практич. использ.* 2015. Т. 15, № 3. С. 64–81. [Konshina E.A., Shcherbinin D.P., Gavrish E.O., Galin I.F., Kurochkina M.A. Properties of Nematic Liquid Crystals Doped with CdSe/ZnS Semiconductor Nanoparticles. *Zhidk. krist. ikh prakt. ispol'z. = Liq. Cryst. and their Appl.*, 2015, **15** (3), 64–81. DOI: 10.18083/LCAppl.2015.3.64 (in Russ.)].
- Kuzmin A.V., Yurtov E.V. Liquid Crystals of Lithium Dodecylbenzenesulfonate for Electric Double Layer Capacitors. *Electrochimica Acta*, 2016, **187**, 98–103. DOI: 10.1016/j.electacta.2015.10.132.
- Shah R.R., Abbott N.L. Coupling of the Orientations of Liquid Crystals to Electrical Double Layers Formed by the Dissociation of Surface-Immobilized Salts. *J. Phys. Chem. B*, **105** (21), 4936–4950. DOI: 10.1021/jp004073g.
- Муравский Ан., Муравский Ал., Агабеков В. Установка для одновременного измерения азимутальной и полярной энергии сцепления жидкого кристалла в одной ячейке в автоматическом режиме // *Вестник МГОУ. Серия: Физика-математика*. 2013. № 1. С. 51–56. [Murauski An., Muravsky Al., Afabekov V. Setup for simultaneous measurement of azimuthal and polar anchoring energy of liquid crystal within single cell in automatic regime. *Bulletin of the Moscow Region State University. Series: Physics-Mathematics*, 2013, **1**, 51–56 (in Russ.)].
- Чаусов Д. Н., Курилов А. Д., Константинов М. С., Беляев В. В., Богданов Д. Л. Анизотропия диэлектрической проницаемости смеси ЖК-1282 // *Жидк. крист. и их практич. использ.* 2015. Т. 15, № 2. С. 35–43. [Chausov D.N., Kurilov A.D., Konstantinov M.S., Belyaev V.V., Bogdanov D.L. The anisotropy of the dielectric constant of the mixture ZHK-1282. *Liq. Cryst. and their Appl.*, 2015, **15** (2), 35–43 (in Russ.)].
- Urban S. Static dielectric properties of nematics. *Physical Properties of Liquid Crystals: Nematics: Data Reviews Series* / ed. G.R. Luckhurst, D.A. Dunmur, A. Fukuda. Institution of Electrical Engineers, 2001, 267–276.
- Mrukiewicz M., Perkowski P., Garbat K. Dielectric behaviour of binary dual-frequency nematics with low crossover frequencies. *Liquid Crystals*, 2015, **42** (7), 1036–1042. DOI: 10.1080/02678292.2015.1020893.
- Mrukiewicz M., Perkowski P., Garbat K., Dabrowski R., Parka J. Dielectric properties of compounds creating dual-frequency nematic liquid crystals. *Acta Physica Polonica A*, 2013, **124** (6A), 940–945. DOI: 10.12693/APhysPolA.124.940.
- Воюцкий С. С. Курс коллоидной химии. М. : Химия, 1976. 512 с. [Voyutsky S.S. Course of colloid chemistry. M. : Chemistry, 1976, 512 p. (in Russ.)].
- Савицкая Т. А., Котиков Д. А., Шичкова Т. А. Коллоидная химия: строение двойного электрического слоя, получение и устойчивость дисперсных систем : пособие для студентов химического факультета. Минск : БГУ, 2011. 82 с. [Savitskaya T.A., Kotikov D.A., Shichkova T.A. Colloid chemistry: the structure of the double electric layer, obtaining and stability of dispersed systems. A manual for students of the faculty of chemistry. Minsk : BSU, 2011, 82 p. (in Russ.)].

14. Kaur S., Dierking I., Gleeson H.F. Dielectric spectroscopy of polymer stabilized ferroelectric liquid crystals. *Eur. Phys. J. E: Soft. Matter.*, 2009, **30** (3), 265–274.
15. Беляев Б. А., Дрокин Н. А., Шабанов В. Ф. Диэлектрическая релаксация жидкого кристалла транс-4-пропил(4-цианфенил) циклогексан // *Физика твердого тела*. 2004. Т. 46, № 3. С. 559–562. [Belyaev B.A., Drokin N.A., Shabanov V.F. Dielectric relaxation of trans-4-propyl-(4-cyanophenyl) cyclohexane liquid crystals. *Physics of the Solid State*, 2004, **46** (3), 579–583. DOI: 10.1134/1.1687882].
16. Gornitska O.P., Koval'chuk A.V., Koval'chuk T.N., Korčanský P., Timko M., Zavisova V., Koneracka M., Tomašovičová N., Jadzyn J., Studenyak I.P. Dielectric properties of nematic liquid crystals with Fe₃O₄ nanoparticles in direct magnetic field. *Semiconductor Physics, Quantum Electronics & Optoelectronics*, 2009, **12** (3), 309–314.
17. Koval'chuk A., Dolgov L., Yaroshchuk O. Dielectric studies of dispersions of carbon nanotubes in liquid crystals 5CB. *Semiconductor Physics, Quantum Electronics & Optoelectronics*, 2008, **11** (4), 337–341.
18. Ларионов А. Н., Богданов Д. Л., Ларионова Н. Н., Ефремов А. И., Тощенко К. А. Диэлектрическая релаксация и вязкоупругие свойства нематических жидких кристаллов // *Конденсированные среды и межфазные границы*. 2015. Т. 17, № 3. С. 364–370. [Larionov A.N., Bogdanov D.L., Larionova N.N., Efremov A.I., Toshchenko K.A. Dielectric relaxation and viscoelastic properties of nematic liquid crystals. *Condensed media and interphase boundaries*, 2015, **17** (3), 364–370 (in Russ.)].
19. Jadzyn J., Czechowski G., Mucha M., Nastal E. Dielectric relaxation in polymer dispersed nematic liquid crystal films. *Liq. Cryst.*, 1999, **26** (3), 453–456.
20. Singh G., Vijaya Prakash G., Kaur S., Choudhary A., Biradar A.M. Molecular relaxation in homeotropically aligned ferroelectric liquid crystals. *Physica B: Condensed Matter.*, 2008, **403** (18), 3316–3319. DOI: 10.1016/j.physb.2008.04.026
21. Беляев Б. А., Дрокин Н. А., Шабанов В. Ф., Баранова В. А. Диэлектрические свойства жидких кристаллов ряда цианопроизводных с различными фрагментами в остове молекул // *Физика твердого тела*. 2004. Т. 46, № 3. С. 554–558. [Belyaev B.A., Drokin N.A., Shabanov V.F., Baranova V.A. Dielectric properties of liquid crystals of the cyano derivative compounds with different fragments in the molecular core. *Physics of the Solid State*, 2004, **46** (3), 574–578. DOI: 10.1134/1.1687881].
22. Chaouov D.N., Kurilov A.D., Belyaev V.V., Kumar S. Parameters of LC molecules' movement measured by dielectric spectroscopy in wide temperature range. *Opto-Electronics Review*, 2018, **26** (1), 44–49. DOI: 10.1016/j.opelre.2017.12.001.
23. Захаров А. В., Миранцев Л. В. Динамические и диэлектрические свойства жидких кристаллов // *Физика твердого тела*. 2003. Т. 45, № 1. С. 174–179. [Zakharov A.V., Mirantsev L.V. Dynamic and dielectric properties of liquid crystals. *Physics of the Solid State*, 2003, **45** (1), 183–188. DOI: 10.1134/1.1537433].
24. Cognard J. Alignment of Nematic Liquid Crystals and Their Mixtures (Molecular Crystals and Liquid Crystals Supplement Series, Supplement 1). London; New York, 1982, **1**, 78 p.

Поступила в редакцию 1.10.2018 г.
Received 1 October 2018