

**Физика**

**Научная статья**

УДК: 537.622

**ОРИЕНТАЦИЯ ДОПИРОВАННОГО ХЛОРОФИЛЛОМ НЕМАТИЧЕСКОГО ЖИДКОГО КРИСТАЛЛА В МАГНИТНОМ ПОЛЕ**

Александр Михайлович Паршин<sup>1,3\*</sup>, Татьяна Анатольевна Зотина<sup>2,3</sup>

<sup>1</sup>Институт физики им. Л. В. Киренского, Федеральный исследовательский центр «Красноярский научный центр Сибирского отделения Российской академии наук», Красноярск, Россия

<sup>2</sup>Институт биофизики, Федеральный исследовательский центр «Красноярский научный центр Сибирского отделения Российской академии наук», Красноярск, Россия

<sup>3</sup>Сибирский федеральный университет, Красноярск, Россия

---

**ИНФОРМАЦИЯ**

**АННОТАЦИЯ**

**История статьи:**

Поступила 28.07.2025

Одобрена 14.08.2025

Принята 20.08.2025

---

**Ключевые слова:**

нематический жидкий кристалл,  
магнитная поляризация,  
параметр ориентации

Исследованы ориентационные эффекты чистого и допированного хлорофиллом *b* (Chl. *b*) нематика 5СВ с использованием метода Фарадея и перехода Фредерикса. Для анализа эффектов определялась объемная диамагнитная анизотропия  $\Delta\chi$ , которая рассматривалась как параметр ориентации, отсутствующий в симметричном состоянии системы выше температуры  $T_{NI}$  перехода нематика в изотропную жидкость и появляющийся при спонтанном нарушении симметрии, когда система переходит в асимметричное нематическое состояние. Найдено расхождение зависимостей  $\Delta\chi$  с увеличением магнитного поля  $H$ , обусловленное приращением  $\Delta\chi_{LC}$  жидкого кристалла (ЖК) благодаря вкладу  $\Delta\chi_{Chl}$  хлорофилла вследствие дополнительного тока, индуцированного в порфириновом кольце магнитным полем. Обнаружено снижение порогового поля для примесного нематика  $H_{th} = 3,18$  кОе по сравнению со значением  $H_{th} = 3,55$  кОе, полученным для беспримесного 5СВ, связанное с увеличением  $\Delta\chi$  за счет внедрения в ЖК порфиринового кольца хлорофилла. Ориентационные переходы рассмотрены при минимизации свободной энергии в слое чистого и допированного хлорофиллом нематика.

---

**DOI:**

[10.18083/LCAppl.2025.3.17](https://doi.org/10.18083/LCAppl.2025.3.17)

**EDN:**

<https://elibrary.ru/wooyfd>

---

**Для цитирования:**

Паршин А. М., Зотина Т. А. Ориентация допированного хлорофиллом нематического жидкого кристалла в магнитном поле // Жидк. крист. и их практич. использ. 2025. Т. 25, № 3. С. 17–25.

**Physics**

**Original Article**

**ORIENTATION OF CHLOROPHYLL-DOPED NEMATIC LIQUID CRYSTAL  
BY MAGNETIC FIELD**

Alexander M. Parshin<sup>1,3\*</sup>, Tatyana A. Zotina<sup>2,3</sup>

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

<sup>2</sup>*Institute of Biophysics, Federal Research Center KSC SB RAS, Krasnoyarsk, Russia*

<sup>3</sup>*Siberian Federal University, Krasnoyarsk, Russia*

**ARTICLE INFO:**

**Article history:**

Received 28 July 2025

Approved 14 August 2025

Accepted 20 August 2025

**ABSTRACT**

**Key words:**

nematic liquid crystal,  
magnetic polarization,  
orientation parameter

The orientation effects of pure and chlorophyll b (Chl. b)-doped nematic 5CB using the Faraday method and the Fredericksz transition have been investigated. To analyze these effects, the volume diamagnetic anisotropy  $\Delta\chi$ , which was considered as an orientation parameter, was determined. This parameter is absent in the symmetric state of the system above the temperature  $T_{NI}$  (transition of nematic phase into isotropic liquid) and it appears during spontaneous symmetry breaking, when the system passes to an asymmetric nematic state. A discrepancy between  $\Delta\chi(H)$  dependences with increasing of magnetic field  $H$  was found. The discrepancy is caused by an increase in  $\Delta\chi_{LC}$  of the liquid crystal due to the contribution  $\Delta\chi_{Chl}$  of Chl. b due to the additional current induced in the porphyrin ring by the magnetic field. A decrease in the threshold field for the chlorophyll-doped nematic 5CB  $H_{th} = 3.18$  kOe as compared with the value  $H_{th} = 3.55$  kOe of pure 5CB was obtained. It is associated with an increase in  $\Delta\chi$  due to the introduction of a chlorophyll porphyrin ring into the liquid crystal. Orientational transitions during minimization of free energy in a layer of pure and chlorophyll-doped nematic 5CB are considered.

**DOI:**

**10.18083/LCAppl.2025.3.17**

**EDN:**

<https://elibrary.ru/wooyfd>

**For citation:**

Parshin A. M., Zotina T. A. Orientation of chlorophyll-doped nematic liquid crystal by magnetic field. *Liq. Cryst. and their Appl.*, 2025, **25** (3), 17–25 (in Russ.).

## Введение

Ориентационные свойства жидких кристаллов (ЖК), основанные на переходе Фредерикса, широко используются в дисплеях и электрооптических устройствах [1–3]. Определение параметров ориентации, исследования структуры и степени упорядоченности беспримесных и допированных неорганическими или органическими веществами ЖК в большинстве случаев проводятся в магнитном поле [4–6]. Асимметричные молекулы мезофазы по-разному поляризуются во внешнем поле вдоль главной оси симметрии и в перпендикулярных к ней направлениях, что и приводит к ориентационному переходу [7, 8]. Выбор поля обуславливается тем, что при магнитной поляризации [9] нет необходимости учитывать значения поляризации окружающих молекул, как в случае использования электрического поля, что позволяет более достоверно интерпретировать результаты перехода.

Оптимальный способ расширения анизотропных свойств ЖК заключается в допировании нематиков растворяющимися в них веществами. Так, растворение в нематической матрице красителя с молекулами, изоморфными молекулам ЖК, усиливает оптические свойства мезофазы за счет появления в ней осциллятора поглощения, параллельного молекулярным осям [10]. Из анизотропии оптического поглощения можно определить степень упорядоченности молекул красителя и параметр порядка ЖК, связанного с его молекулярной поляризуемостью, если учесть анизотропию локального поля световой волны [11–12]. Параметры порядка молекул красителей, в качестве которых использовались хлорофиллы *a* и *b* в ЖК-матрицах MBBA и K15, определялись в работе [13].

С другой стороны, наличие большого порфиринового кольца в молекуле хлорофилла дает возможность увеличить диамагнитную анизотропию  $\Delta\chi$  примесного ЖК [14]. Ориентационные свойства органических молекул в магнитном поле  $H$  при температуре  $T$  описываются с помощью энергетического параметра ориентации,  $\Delta\chi H^2/kT$  [4, 15], равного отношению магнитной энергии к тепловой. В чистом ЖК при наличии кооперативного эффекта [15]  $\Delta\chi H^2 \gg kT$ , хотя  $\Delta\chi$ , связанная с магнитной поляризацией, зависит от температуры. Магнитная энергия  $\Delta\chi H^2$  входит в выражение для свободной энергии, и ее минимум с учетом упругой и поверхностной энергий в слое ЖК дает рас-

пределение поля директора. Однако для примесных ЖК оставался невыясненным вопрос, как влияет на ориентационные свойства нематика добавление к нему органического вещества, обладающего более высокой анизотропией магнитной поляризации, но не имеющего кооперативного эффекта.

В настоящей работе исследовано влияние анизотропии магнитной поляризуемости на ориентационные свойства ЖК, допированного хлорофиллом. Рассмотрены изменения диамагнитной анизотропии примесного нематика при варьировании магнитного поля и температуры. Определены ориентационные параметры магнитного перехода Фредерикса.

## Экспериментальная часть

В исследованиях применялся нематический ЖК 5CB с последовательностью фазовых переходов:  $Cr \rightarrow 21,5^\circ C \rightarrow N \rightarrow 35^\circ C \rightarrow Iso$ . В нематике растворялся хлорофилл *b* (Chl. *b*) в весовой доле  $\sim 2\%$ . Хлорофилл экстрагировался с помощью ацетона из тонко измельченной воздушно-сухой биомассы водного растения *Ceratophyllum demersum L* в процедуре выделения пигмента из экстракта и очищения его от примесей. Идентификация пигмента, заключенного в кварцевой кювете ( $L = 10$  мм), определялась из спектра оптической плотности в диапазоне 350–750 нм с шагом 1 (рис. 1) на спектрофотометре *Specord M400* (Carl Zeiss, Германия). Концентрация хлорофилла *b* ( $C_{Chl.b}$ ) рассчитывалась с помощью уравнения  $C_{Chl.b} = 27,43A_{649} - 8,12A_{665}$  [16], где  $A_{649}$  и  $A_{665}$  – величины оптической плотности на длине волны 649 и 665 нм.

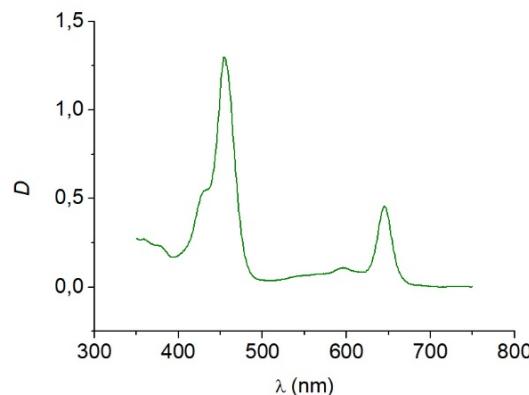


Рис. 1. Спектр оптической плотности Chl. *b*

Fig. 1. Optical density spectrum of Chl. *b*

Для изучения магнитных характеристик беспримесного и дopedированного хлорофиллом нематика регистрировались удельная  $\chi_m$  и объемная  $\chi$  магнитные восприимчивости веществ. Для получения  $\chi_m$  вещество вводилось в герметичную пластиковую капсулу в объеме  $\sim 0,6 \text{ см}^3$ , которая подвешивалась на тонкой кварцевой нити между полюсами электромагнита с градиентным магнитным полем, в соответствии с методом Фарадея [17]. Полевые и температурные зависимости  $\chi_m$  прописывались при взвешивании капсул с помощью весов *OHAUS DV215CD* с чувствительностью 5 мг. Для получения  $\chi$  необходимо было знать плотности веществ, которые определялись с помощью этих же весов по специальной методике с использованием цилиндрической емкости объемом 6  $\text{см}^3$ . Магнитное поле  $H$  сканировалось от 0 до 12,2 кЭ и регистрировалось с использованием датчика Холла, а значения температуры  $T$  устанавливались в диапазоне от 19 °C до 36 °C помощью термостата и контролировались термопарой. В эксперименте измерялась параллельная директору ЖК  $\mathbf{n}$  диамагнитная восприимчивость  $\chi_{||m}$  при максимальном значении магнитного поля и различных температурах. Перпендикулярная  $\mathbf{n}$  удельная магнитная восприимчивость  $\chi_{\perp m}$  вычислялась из средней восприимчивости  $\chi_l = 1/3(\chi_{||m} + 2\chi_{\perp m})$ , соответствующей температуре перехода нематика в изотропную жидкость  $T_{NI}$ . Диамагнитная анизотропия в объеме ЖК, обусловленная анизотропией магнитной поляризации, определялась как  $\Delta\chi = \chi_{||} - \chi_{\perp}$ , где безразмерные компоненты восприимчивостей  $\chi_{||}$  и  $\chi_{\perp}$  получались из значений  $\chi_{||m}$  и  $\chi_{\perp m}$ , умноженных на плотность вещества.

Для определения параметров перехода Фредерика изготавливались плоские ячейки с двумя стеклянными пластинаами, на внутренние поверхности которых наносились пленки из поливинилового спирта с последующей натиркой. Пластины складывались через полоски из тефлоновой пленки друг с другом так, чтобы направления натирки на верхней и нижней пластинах совпадали и склеивались эпоксидной смолой. Измерения капиллярного промежутка, соответствующего толщине слоя ЖК, проведенные интерференционным методом [18], показали значения 22,1 и 22,4 мкм. Чистый или дopedированный хлорофиллом нематик вводился в изотропной фазе с торца в капиллярный промежу-

ток ячейки, и с помощью поляризационного микроскопа можно было наблюдать его однородную планарную ориентацию. Заполненные ячейки поочередно помещались в терmostатируемую кювету между полюсами электромагнита, способного генерировать постоянное магнитное поле до 25 кЭ. Луч света от Не-Не лазера с длиной волны  $\lambda = 0,633 \text{ мкм}$  последовательно пропускался через поляризатор, ячейку и анализатор вдоль осевой линии полюсов и регистрировался с помощью фотодиода и измерительных приборов. Направления осей поляризатора и анализатора составляли 45° с направлениями директора ЖК.

## Результаты и их обсуждение

Структурное распределение молекул Chl. b в растворе между молекулами нематика 5CB представлено на рис. 2. Такое распределение наиболее вероятно, так как молекулы хлорофилла изоморфны молекулам ЖК вследствие наличия фитольного хвоста, сопоставимым по размеру с молекулой 5CB. Раствор находился в капсule между полюсами электромагнита  $N$  и  $S$  с наконечниками, формирующими градиентное магнитное поле  $\mathbf{H}$ . Молекулы ЖК вследствие анизотропии магнитной поляризуемости ориентируются в поле  $\mathbf{H}$  и одновременно смещаются под действием силы  $\mathbf{F} \sim dH/dz$ .

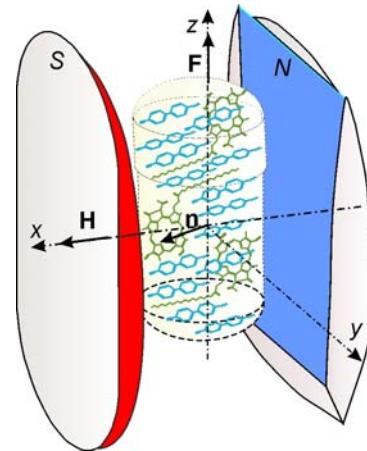


Рис. 2. Распределение молекул 5CB и Chl. b в градиентном магнитном поле  $\mathbf{H}$

Fig. 2. Distribution of 5CB and Chl. b molecules in a gradient magnetic field  $\mathbf{H}$

На рисунке 3 приведены зависимости плотностей чистого и допированного Chl. b нематика 5CB от приведенной температуры  $T/T_{NI}$ . Обе зависимости показывают линейное снижение плотности с температурой, что свидетельствует о хорошей растворимости хлорофилла в нематической матрице. Небольшие отклонения экспериментальных точек от подгоночной кривой с ростом температуры при приближении ее к  $T_{NI}$ , по-видимому, связаны с различной подверженностью температурным возбуждениям молекул ЖК и хлорофилла. Экспериментальные значения плотностей компонентов раствора 5CB+Chl. b соответствуют значениям, рассчитанным по формуле  $\rho = (V_1\rho_1 + V_2\rho_2)/(V_1 + V_2)$ , где  $\rho_1, \rho_2, V_1, V_2$  – плотности и объемные доли каждого компонента раствора.

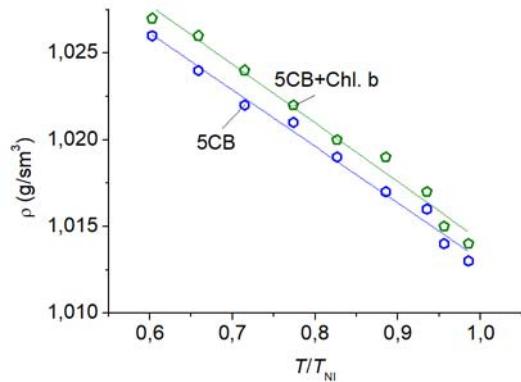


Рис. 3. Температурные зависимости плотности чистого (синие шестиугольники) и допированного Chl. b (зеленые пятиугольники) нематика 5CB. Сплошные линии – подгоночные прямые

Fig. 3. Temperature dependences of the density of pure (blue hexagons) and Chl. b-doped (green pentagons) nematic 5CB. Solid lines are fitted straight lines

Диамагнитная анизотропия  $\Delta\chi$  в объеме ЖК, обусловленная анизотропией магнитной поляризации, как функция магнитного поля  $H$  приведена на рис. 4. Значения  $\Delta\chi$  при температуре  $T/T_{NI} = 0,7$  определялись из разности компонент объемной восприимчивости  $\chi_{||}$  и  $\chi_{\perp}$ , полученных в результате умножения экспериментальных значений компонент удельной восприимчивости  $\chi_{||m}$  и  $\chi_{\perp m}$  на значения плотностей  $\rho$ , взятых из рис. 3 при той же температуре. Расхождение зависимостей  $\Delta\chi$  с увеличением  $H$  обусловлено приращением  $\Delta\chi_{LC}$  ЖК благодаря вкладу  $\Delta\chi_{Chl}$  хлорофилла вследствие дополнительного тока, индуцированного в порфири-

новом кольце магнитным полем [14]. Небольшие отклонения экспериментальных точек относительно подгоночной кривой можно объяснить присутствием доменных участков кристаллизации примесей в ЖК, которые можно наблюдать вблизи температуры перехода  $T_{Cn}$  с помощью поляризационного микроскопа. Тем не менее незначительность таких отклонений подтверждает хорошую растворимость Chl. b в 5CB и одновременно с этим свидетельствует об упорядочивающем влиянии молекул ЖК на растворенные молекулы хлорофилла, препятствующие температурным возбуждениям.

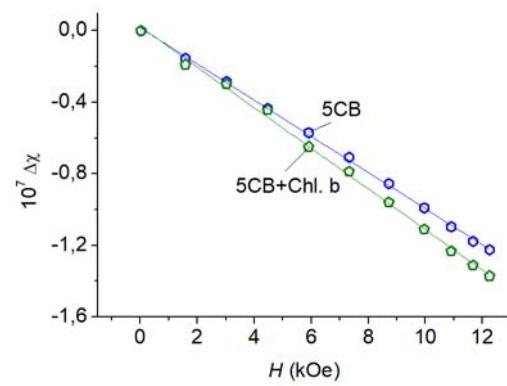


Рис. 4. Полевые зависимости диамагнитной анизотропии  $\Delta\chi$  для чистого (синие шестиугольники) и допированного Chl. b (зеленые пятиугольники) 5CB. Сплошные линии – подгоночные прямые

Fig. 4. Field dependences of diamagnetic anisotropy  $\Delta\chi$  for pure (blue hexagons) and Chl. b-doped (green pentagons) 5CB. Solid lines are fitted straight lines

Зависимости  $\Delta\chi$  от  $T/T_{NI}$  для чистого и допированного Chl. b нематика 5CB, полученные при  $H = 12,2$  kOe, представлены на рис. 5. Вдали от  $T_{NI}$  диамагнитные анизотропии чистого и примесного ЖК плавно снижаются с ростом  $T$ , переходя к более резкому снижению при приближении к  $T_{NI}$  и падая до нуля при  $T/T_{NI} = 1$ . Такое поведение характерно для параметра порядка  $S$  нематика, в качестве которого и могла бы быть использована диамагнитная анизотропия [6, 8, 19]. Однако попытки установить однозначную связь между  $\Delta\chi$  и  $S$  для нематиков не принесли желаемого результата [20, 21]. Значения  $S$ , определенные через  $\Delta\chi$ , оказываются завышенными по сравнению с полученными другими методами [22].

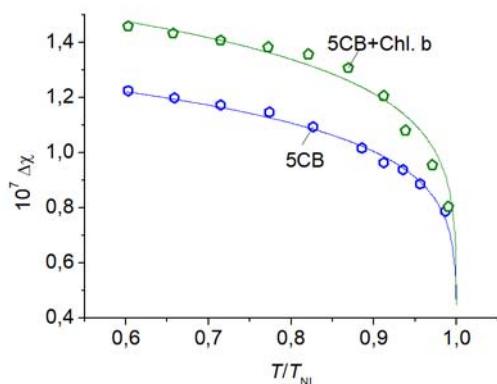


Рис. 5. Температурные зависимости диамагнитной анизотропии  $\Delta\chi$  для чистого (синие шестиугольники) и допированного Chl. b (зеленые пятиугольники) 5CB. Сплошные линии – расчетные кривые

Fig. 5. Temperature dependences of diamagnetic anisotropy  $\Delta\chi$  for pure (blue hexagons) and doped Chl. b (green pentagons) 5CB. Solid lines are calculated curves

По-видимому, это связано с неправомерным предположением о совпадении осей молекулярной и магнитной поляризуемости ЖК. Такое несовпадение может еще больше проявиться в случае использования примесного нематика. Поэтому в рамках данной работы мы ограничились рассмотрением температурного поведения  $\Delta\chi$ , тем более что именно этот параметр ответственен за переориентацию ЖК в магнитном поле. Величину  $\Delta\chi$  можно использовать как параметр ориентации, отсутствующий в симметричном состоянии системы выше критической температуры  $T_{NI}$  и появляющийся при спонтанном нарушении симметрии, когда система переходит в асимметричное нематическое состояние с директором  $\mathbf{n}$ , и представить как [21]

$$\Delta\chi = \Delta\chi_0 (1 - \alpha T / T_{NI})^\beta, \quad (1)$$

где  $\Delta\chi_0$  – значение  $\Delta\chi$  при  $T = 0$ ,  $\alpha$ ,  $\beta$  – поправочный и критический показатели, зависящие от особенностей магнитной поляризации. Заимствуя значения  $\alpha = 0,999$ ,  $\beta = 0,141$  из [21], мы получили расчетную кривую  $\Delta\chi(T/T_{NI})$  для 5CB, хорошо совпадающую с экспериментальной зависимостью. Аналогичная совпадающая кривая получена для нематика, допированного хлорофиллом при тех же значениях показателей, что свидетельствует об

отсутствии нарушения симметрии ЖК при введении в него двухпроцентного раствора примеси. Значения  $\Delta\chi_0 = 1,389$  для 5CB и  $\Delta\chi_0 = 1,679$  для 5CB+Chl. b определялись при экстраполировании зависимостей к значениям температуры  $T = 0$ .

Ориентация допированного хлорофиллом ЖК в плоскопараллельной ячейке, находящейся между наконечниками электромагнита, создающего однородное магнитное поле  $\mathbf{H}$ , вдоль которого директор  $\mathbf{n}$  ориентируется вследствие диамагнитной анизотропии, представлена на рис. 6.

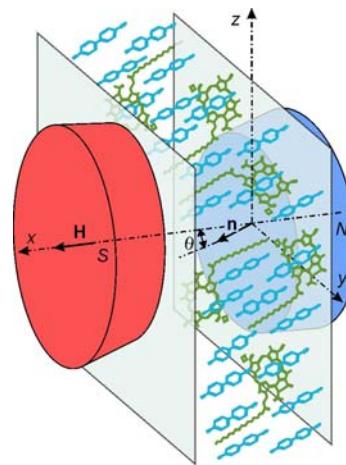


Рис. 6. Распределение молекул 5CB и Chl. b в однородном магнитном поле  $\mathbf{H}$

Fig. 6. Distribution of 5CB and Chl. b molecules in a uniform magnetic field  $\mathbf{H}$

На рисунке 7 показаны экспериментальные зависимости приведенных значений разности фаз  $\delta/\delta_m$  (1) между обычной и необычной световыми волнами и интенсивности (2) света, прошедшего через ячейку 5CB ( $\delta_m$ ,  $I_m$  – максимальные значения  $\delta$  и  $I$ , соответствующее гомеотропному слою ЖК), от магнитного поля  $H$ . Обе зависимости имеют пороговый характер, то есть их отклонения от постоянных начальных значений происходят от пороговых полей перехода Фредерикса  $H_{th} = 3,55$  кОе. На эти зависимости наложены теоретические кривые для  $\delta$  и  $I$ , полученные вариационным методом для планарного слоя нематика [23], в предположении бесконечно сильного сцепления его молекул с поверхностью [8], которые имеют вид

$$\delta = \frac{4\pi n_0}{\lambda \sqrt{\Delta\chi} H} \int_{\theta_0}^{\theta_m} \left( \frac{n_e}{n_e^2 \cos^2 \theta + n_o^2 \sin^2 \theta} - 1 \right) \sqrt{\frac{K_{11} \cos^2 \theta + K_{33} \sin^2 \theta}{\cos^2 \theta - \cos^2 \theta_m}} d\theta \quad (2)$$

$$I = I_m \sin^2 \delta / 2 , \quad (3)$$

где  $\lambda$  – длина волны света,  $n_o$ ,  $n_e$  – показатели преломления для обыкновенной и необыкновенной волн,  $\theta$ ,  $\theta_0$ ,  $\theta_m$  – углы между  $\mathbf{n}$  и  $\mathbf{H}$  внутри, на поверхности и в центре ЖК слоя,  $K_{11}$ ,  $K_{33}$  – модули упругости поперечного и продольного изгибов нематика.

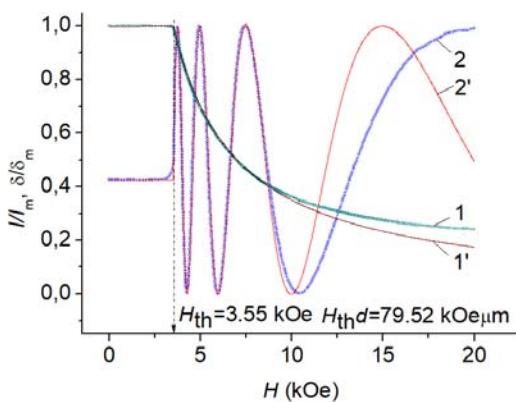


Рис. 7. Экспериментальные (1, 2) и расчетные (1', 2') полевые зависимости приведенных значений разности фаз  $\delta/\delta_m$  между обыкновенной и необыкновенной световыми волнами (1) и интенсивности света  $I/I_m$  (2) для 5CB

Fig. 7. Experimental (1, 2) and calculated (1', 2') field dependences of the reduced values of the phase difference  $\delta/\delta_m$  between ordinary and extraordinary light waves (1) and the light intensity  $I/I_m$  (2) for 5CB

Как следует из рисунка, при значениях, принятых на основании литературных данных  $n_o = 1,5271$ ,  $n_e = 1,7103$  [24],  $K_{11} = 6,2 \cdot 10^{-7}$  дин,  $K_{33} = 8,2 \cdot 10^{-7}$  дин,  $\Delta\chi = 1,16$  [25] при  $T = 25$  °C, расчетные и экспериментальные зависимости  $\delta(H)$  и  $I(H)$  хорошо совпадают вплоть до  $H = 10$  kOe. Расхождение зависимостей при  $H > 10$  kOe можно объяснить конечным сцеплением молекул нематика с поверхностью пленки поливинилового спирта в ЖК-ячейке. В условиях сильных деформаций с увеличением  $H$  происходит пространственная вариация параметра порядка с перенормировкой энергии сцепления ЖК с поверхностью, которую можно учесть, используя добавочные члены в разложении в ряд по-

верхностной энергии [26]. Однако в нашем случае нет необходимости учитывать градиентные поверхностные эффекты, так как одинаковые отклонения кривых, представленных на рис. 8, наблюдались и для слоя 5CB+Chl. b. Важным результатом оказалось то, что пороговое поле для примесного нематика  $H_{th} = 3,18$  kOe ниже значения  $H_{th}$ , полученного для чистого 5CB. С большой долей вероятности можно полагать, что увеличение  $\Delta\chi$  за счет внедрения в ЖК порфиринового кольца хлорофилла приводит к снижению порога Фредерикса.

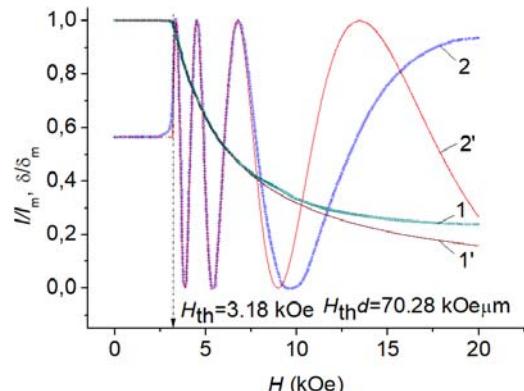


Рис. 8. Экспериментальные (1, 2) и расчетные (1', 2') полевые зависимости приведенных значений разности фаз  $\delta/\delta_m$  между обыкновенной и необыкновенной световыми волнами (1) и интенсивности света  $I/I_m$  (2) для допированного Chl. b 5CB

Fig. 8. Experimental (1, 2) and calculated (1', 2') field dependences of the reduced values of the phase difference  $\delta/\delta_m$  between ordinary and extraordinary light waves (1) and the light intensity  $I/I_m$  (2) for 5CB doped with Chl. b

## Выводы

В работе рассмотрено влияние на ориентационные свойства нематика 5CB добавления к нему хлорофилла *b*, обладающего более высокой анизотропией магнитной поляризации. Хлорофилл экстрагировался с помощью ацетона из тонко измельченной воздушно-сухой биомассы водного растения *Ceratophyllum demersum* L в процедуре

выделения пигмента из экстракта и очищения его от примесей. Для изучения магнитных характеристик допированного ЖК использовался метод Фарадея, при котором регистрировались удельные магнитные восприимчивости вещества  $\chi_{\parallel m}$  и  $\chi_{\perp m}$ , параллельные и перпендикулярные директору **n** нематика. Для исследования ориентационных эффектов использовалась объемная диамагнитная анизотропия  $\Delta\chi$ , которая определялась из разности компонент объемной восприимчивости  $\chi_{\parallel}$  и  $\chi_{\perp}$ , полученных в результате умножения  $\chi_{\parallel m}$  и  $\chi_{\perp m}$  на значения плотностей  $\rho$ , измеренных в отдельном эксперименте.

Мы исследовали поведение  $\Delta\chi$  беспримесного и допированного нематика в магнитном поле и при варьировании температуры  $T$ . В эксперименте было обнаружено расхождение зависимостей  $\Delta\chi$  с увеличением  $H$ , обусловленное приращением  $\Delta\chi_{LC}$  ЖК благодаря вкладу  $\Delta\chi_{Chl}$  хлорофилла вследствие дополнительного тока, индуцированного в порфириновом кольце магнитным полем. Проведено сравнение экспериментальной зависимости  $\Delta\chi(T)$  с расчетной кривой, рассматривая  $\Delta\chi$  как параметр ориентации, отсутствующий в симметричном состоянии системы выше критической температуры перехода нематика в изотропную жидкость  $T_N$  и появляющийся при спонтанном нарушении симметрии, когда система переходит в асимметричное нематическое состояние с директором **n**, и получили их хорошее совпадение.

Исследованы ориентационные переходы Фредерикса, для которых изготавливались ЖК-ячейки с двумя плоскопараллельными стеклянными пластинами, на внутренние поверхности которых наносились пленки из поливинилового спирта с последующей натиркой. Заполненные ЖК-ячейки помещались между полюсами электромагнита, и с помощью магнитооптической установки регистрировались интенсивность  $I$  и разность фаз  $\delta$  между обыкновенной и необыкновенной волнами света, пропущенного через слой нематика от He-Ne лазера. Из экспериментов обнаружено снижение порогового поля для примесного нематика  $H_{th} = 3,18$  кОе по сравнению со значением  $H_{th} = 3,55$  кОе, полученного для беспримесного 5CB, что с большой долей вероятности связано с увеличением  $\Delta\chi$  за счет внедрения в ЖК порфиринового кольца хлорофилла.

## Список источников / References

1. Brown C.V. Physical properties of nematic liquid crystals. *Handbook of Visual Display Technology* / Ed. by J. Chen, W. Cranton, M. Fihn. Cham: Springer, 2016, 1343–1361.  
**DOI:** 10.1007/978-3-540-79567-4\_5.
2. Jones J.C. Liquid crystal displays. *Handbook of optoelectronics* / Ed. by J.P. Dakin, R.G.W. Brown. Boca Raton: CRC press, 2018, 137–224.  
**DOI:** 10.1201/9781315156996.
3. Cristaldi D.J.R., Pennisi S., Pulvirenti F. Liquid crystal displays drivers. New York: Springer, 2009, 295 p.  
**DOI:** 10.1007/978-90-481-2255-4.
4. Маре Г., Дрансфельд К. Биомолекулы и биополимеры в сильных магнитных полях // Сильные и сверхсильные магнитные поля и их применение / под ред. Ф. Херлаха. М. : Мир, 1988. С. 180–262. [Maret G., Dransfeld K. Biomolecules and polymers in high steady magnetic fields. *Strong and ultrastrong magnetic field and their application* / Ed. by F. Herlach. New York : Springer-Verlag, 1985, 143–204. **DOI:** 10.1007/3-540-13504-9\_10].
5. Dunmur D., Toriyama K. Magnetic properties of liquid crystals. *Handbook of liquid crystals* / Ed. by D. Demus, J.W. Goodby, G.W. Gray, H.-W. Spiess. New York: Wiley-VCN Verlag GmbH, 1985, 143–204. **DOI:** 10.1002/9783527671403.HLC023.
6. Блинов Л. М. Электро- и магнитооптика жидких кристаллов. М. : Наука, 1978. 384 с. [Blinov L.M. Electro- and magneto optics of liquid crystals. M. : Nauka, 1978, 384 p. (in Russ.)].  
**DOI:** 10.1107/S002188985009967].
7. Langevin P. Sur les birefringences électrique et magnétique. *Le Radium*, 1910, 9, 250–260.  
**DOI:** 10.1051/radium:0191000709024900.
8. де Жен П. Физика жидких кристаллов. М. : Мир, 1977. 400 с. [de Gennes P.G. The Physics of liquid crystals. Oxford, 1974, 350 p.] [de Gennes P.G. and Prost J. The Physics of liquid crystals. Oxford: Clarendon press, 1993, 597 p.  
**DOI:** 10.1063/1.2808028].
9. Тикадзуми С. Физика ферромагнетизма. М. : Мир, 1983. 296 с. [Chikazumi S. The Physics of ferromagnetism. Oxford : University press, 1997, 655 p.].
10. Blinov L.M. Structure and properties of liquid crystals. New York : Springer, 1996, 439 p.  
**DOI:** 10.1007/978-90-481-8829-1.
11. Аверьянов Е. М. Эффекты локального поля в оптике жидких кристаллов. Новосибирск : Наука, 1999. 552 с. [Aver'yanov E.M. Effects of local field in optics of liquid crystals. Novosibirsk : Nauka, 1999, 552 p. (in Russ.). **DOI:** 10.13140/RG.2.1.4720.6882].

12. Аверьянов Е. М., Жуйков В. А., Зырянов В. Я., Шабанов В. Ф. Анизотропия локального поля в односных жидкых кристаллах // ЖЭТФ. 1984. Т. 86, № 6. С. 2111–2121. [Aver'yanov E.M., Zhuikov V.A., Zyryanov V.Ya., Shabanov V.F. Anisotropy of the local field in uniaxial liquid crystals. *Zh. Eksp. Teor. Fiz.*, 1984, **86** (6), 2111–2122].
13. Journeaux R., Viovy R. Orientation of chlorophylls in liquid crystals. *Photochem. Photobiol.*, 1978, **28**, 243–248. DOI: 10.1111/j.1751-1097.1978.tb07702.x.
14. Паршин А. М., Зотина Т. А., Диамагнитные свойства смесей нематического жидкого кристалла с хлорофиллами и каротиноидами // Жидк. крист. и их практич. использ. 2024. Т. 24, № 3. С. 71–81. [Parshin A.M., Zotina T.A. Diamagnetic properties of mixtures of nematic liquid crystal with chlorophylls and carotenoids. *Liq. Cryst. and their Appl.*, 2024, **24** (3), 71–81 (in Russ.). DOI: 10.18083/LCAppl.2024.3.71].
15. Капустин А. П. Электрооптические и акустические свойства жидкких кристаллов. М. : Наука, 1973. 232 с. [Kapustin A.P. Electro-optical and acoustic properties of liquid crystals. M.: Nauka, 1973. 232 p. (in Russ.)].
16. Lichtenthaler H.K. Chlorophylls and carotenoids: pigments of photosynthetic biomembranes. *Methods Enzymol.*, 1987, **148**, 350–382. DOI: 10.1016/0076-6879(87)48036-1.
17. Чечерников В. И. Магнитные измерения. М.: Изд-во МГУ 1969. 388 с. [Chechernikov V.I. Magnetic measurements. M. : University, 1969, 388 p. (in Russ.)].
18. Паршин А. М., Сутормин В. С., Зырянов В. Я., Шабанов В. Ф. Влияние ионного сурфактанта на энергию сцепления жидкого кристалла с поверхностью с использованием магнитных пороговых полей перехода фредерикса // Жидк. крист. и их практич. использ. 2018. Т. 18, № 3. С. 59–66. [Parshin A.M., Sutormin V.S., Zyryanov V.Ya., Shabanov V.F. Influence of ionic surfactant on the anchoring energy of liquid crystal with a surface investigated using magnetic threshold fields of Freedericksz transition. *Liq. Cryst. and their Appl.*, 2018, **18** (3), 59–66 (in Russ.). DOI: 10.18083/LCAppl.2018.3.59].
19. Де Жё В. Физические свойства жидкокристаллических веществ. М. : Мир, 1982. 152 с. [De Jeu W.H. Physical properties of liquid crystalline materials. New York : Gordon and Breach Science Publishers, 1980, 133 p.].
20. Haller J. Thermodynamic and static properties of liquid crystals. *Prog. Solid State Chem.* 1974, **10**, 103–118. DOI: 10.1016/0079-6786(75)90008-4.
21. Buka A., de Jeu W.H. Diamagnetism and orientational order of nematic liquid crystals. *J. Physique*, 1982, **43**, 361–367. DOI: 10.1051/jphys:01982004302036100.
22. Абдулин А. З., Безбородов В. С., Минько А. А., Рачкевич В. С. Текстурообразование и структурная упорядоченность в жидкких кристаллах. Минск : Университетское, 1987. 176 с. [Abdulin A.Z., Bezborodov V.S., Minko A.A., Rachkevich V.S. Texture formation and structural ordering in liquid crystals. Minsk : University, 1987, 176 p. (in Russ.)].
23. Пикин С. А. Структурные превращения в жидкких кристаллах. М. : Наука, 1981. 490 с. [Pikin S.A. Structural transformations in liquid crystals. M. : Nauka, 1981, 490 p. (in Russ.)].
24. Bunning J.D., Crellin D.A., Faber T.F. The effect of molecular biaxiality on the bulk properties of some nematic liquid crystals. *Liq. Cryst.*, 1986, **1**, 37–51. DOI: 10.1080/02678298608086488.
25. Bradshaw M.J., Raynes E.P., Bunning J.D., Faber T.E. The Frank constants of some nematic liquid crystals. *J. Physique*, 1985, **46**, 1513–1520. DOI: 10.1051/jphys:019850046090151300.
26. Barbero G., Durand G. Surface anchoring of nematic liquid crystals. *Liquid Crystals in Complex Geometries* / Ed. by G.P. Crawford and S. Zumer. Abingdon : Taylor and Francis, 1996, 21–53. DOI: 10.1201/9781482272796.

**Вклад авторов:**

<sup>1</sup>Паршин А. М. – разработка концепции научной работы, проведение исследований, подготовка иллюстраций, написание текста статьи.

<sup>2</sup>Зотина Т. А. – проведение исследований, подготовка иллюстраций, редактирование текста статьи.

**Contribution of the authors:**

<sup>1</sup>Parshin A. M. – development of the concept of scientific work, conducting research, preparing illustrations, writing the text of the article.

<sup>2</sup>Zotina T. A. – conducting research, preparing illustrations, editing the text of the article.

**Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.**

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

<sup>1</sup><https://orcid.org/0000-0002-5731-0523>

<sup>2</sup><https://orcid.org/0000-0002-4792-1582>