

Физика

Научная статья

УДК: 537.622

ОРИЕНТАЦИЯ ДОПИРОВАННОГО ХЛОРОФИЛЛОМ НЕМАТИЧЕСКОГО
ЖИДКОГО КРИСТАЛЛА В МАГНИТНОМ ПОЛЕ

Александр Михайлович Паршин^{1,3*}, Татьяна Анатольевна Зотина^{2,3}

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

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

³Сибирский федеральный университет, Красноярск, Россия

ИНФОРМАЦИЯ

История статьи:

Поступила 28.07.2025

Одобрена 14.08.2025

Принята 20.08.2025

Ключевые слова:

нематический жидкий кристалл, магнитная поляризация, параметр ориентации

АННОТАЦИЯ

Исследованы ориентационные эффекты чистого и допированного хлорофиллом *b* (Chl. *b*) нематика 5CB 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 5CB, 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

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 FIELDAlexander M. Parshin^{1,3*}, Tatyana A. Zotina^{2,3}¹Kirensky Institute of Physics, Federal Research Center KSC SB RAS, Krasnoyarsk, Russia²Institute of Biophysics, Federal Research Center KSC SB RAS, Krasnoyarsk, Russia³Siberian Federal University, Krasnoyarsk, Russia

ARTICLE INFO:

ABSTRACT

Article history:

Received 28 July 2025

Approved 14 August 2025

Accepted 20 August 2025

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 MBVA 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: $Cr\ 21,5\ ^\circ C\ N\ 35\ ^\circ C\ Iso$. 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 $C_{chl.b} = 27,43A_{649} - 8,12 A_{665}$ [16], где A_{649} и A_{665} – величины оптической плотности на длине волны 649 и 665 нм.

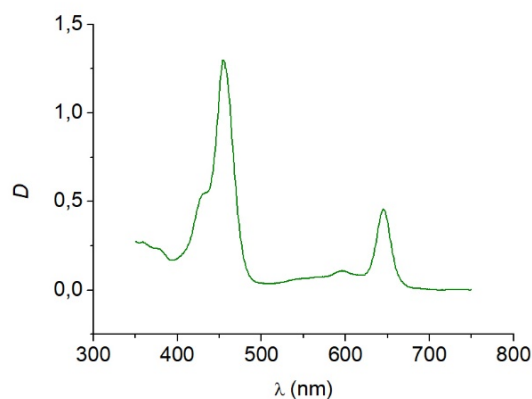


Рис. 1. Спектр оптической плотности Chl. *b*

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

Для изучения магнитных характеристик беспримесного и допированного хлорофиллом нематика регистрировались удельная χ_m и объемная χ магнитные восприимчивости веществ. Для получения χ_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 χ_m прописывались при взвешивании капсул с помощью весов *OHAUS DV215CD* с чувствительностью 5 мг. Для получения χ необходимо было знать плотности веществ, которые определялись с помощью этих же весов по специальной методике с использованием цилиндрической емкости объемом 6 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 °С до 36 °С помощью термостата и контролировались термопарой. В эксперименте измерялась параллельная директору ЖК n диамагнитная восприимчивость $\chi_{||m}$ при максимальном значении магнитного поля и различных температурах. Перпендикулярная 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 χ_{\perp} получались из значений $\chi_{||m}$ и $\chi_{\perp m}$, умноженных на плотность вещества.

Для определения параметров перехода Фредерикса изготавливались плоские ячейки с двумя стеклянными пластинами, 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 допированный хлорофиллом нематик вводился в изотропной фазе с торца в капиллярный промежут-

ток ячейки, и с помощью поляризационного микроскопа можно было наблюдать его однородную планарную ориентацию. Заполненные ячейки поочередно помещались в термостатируемую кювету между полюсами электромагнита, способного генерировать постоянное магнитное поле до 25 кЭ. Луч света от He-Ne лазера с длиной волны $\lambda = 0,633 \text{ мкм}$ последовательно пропусклся 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 капсуле между полюсов электромагнита N и S с наконечниками, формирующими градиентное магнитное поле H . Молекулы ЖК вследствие анизотропии магнитной поляризуемости ориентируются в поле H и одновременно смещаются под действием силы $F \sim dH/dz$.

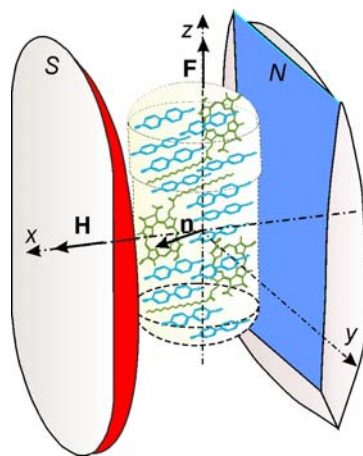


Рис. 2. Распределение молекул 5CB и Chl. b в градиентном магнитном поле H

Fig. 2. Distribution of 5CB and Chl. b molecules in a gradient magnetic field 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 ρ_1 , ρ_2 , V_1 , V_2 – плотности и объемные доли каждого компонента раствора.

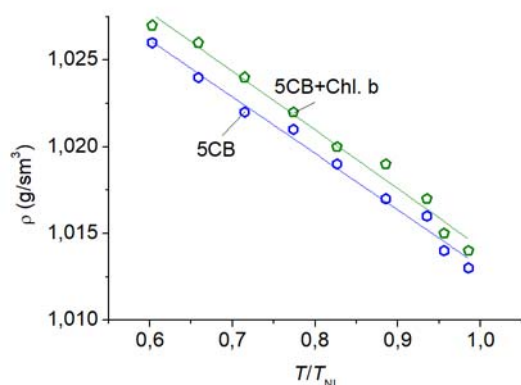


Рис. 3. Температурные зависимости плотности чистого (синие шестиугольники) и допированного Chl. b (зеленые пятиугольники) нематика 5CB. Сплошные линии – подгоночные прямые

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 χ_{\perp} , полученных в результате умножения экспериментальных значений компонент удельной восприимчивости $\chi_{||m}$ и $\chi_{\perp m}$ на значения плотностей ρ , 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_{CrN} 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.

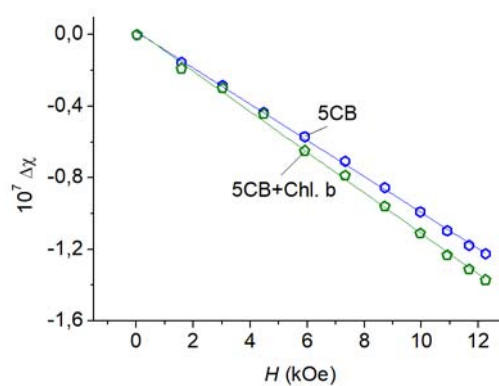


Рис. 4. Полевые зависимости диамагнитной анизотропии $\Delta\chi$ для чистого (синие шестиугольники) и допированного Chl. b (зеленые пятиугольники) 5CB. Сплошные линии – подгоночные прямые

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].

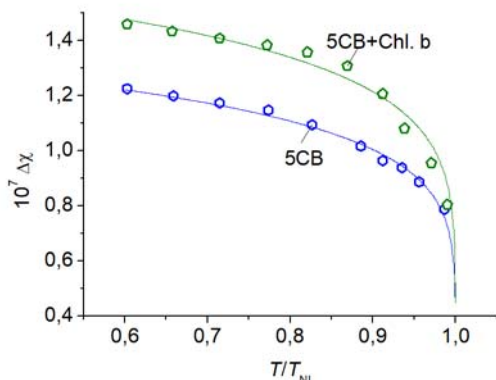


Рис. 5. Температурные зависимости диамагнитной анизотропии $\Delta\chi$ для чистого (синие шестиугольники) и допированного Chl. b (зеленые пятиугольники) 5CB. Сплошные линии – расчетные кривые

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 $T = 0$, α , β – 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 экстраполяции 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.

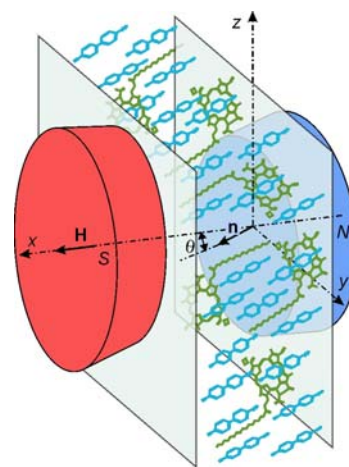


Рис. 6. Распределение молекул 5CB и Chl. b в однородном магнитном поле \mathbf{H}

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 δ/δ_m (1) между обыкновенной и необыкновенной световыми волнами и интенсивности (2) света, прошедшего через ячейку 5CB (δ_m , I_m – максимальные значения δ 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 δ 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 λ – длина волны света, n_o , n_e – показатели преломления для обыкновенной и необыкновенной волн, θ , θ_0 , θ_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.

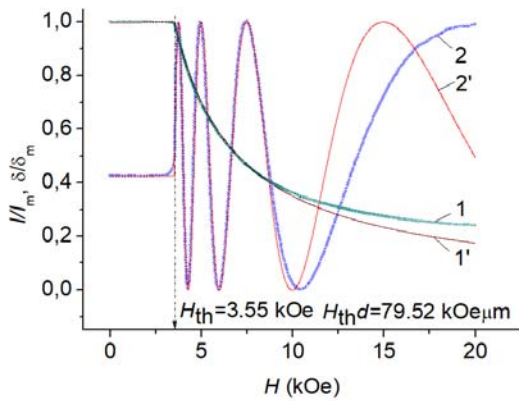


Рис. 7. Экспериментальные (1, 2) и расчетные (1', 2') полевые зависимости приведенных значений разности фаз δ/δ_m между обыкновенной и необыкновенной световыми волнами (1) и интенсивности света I/I_m (2) для 5CB

Fig. 7. Experimental (1, 2) and calculated (1', 2') field dependences of the reduced values of the phase difference δ/δ_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 $H = 10$ кОе. Расхождение зависимостей при $H > 10$ кОе 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 $H_{th} = 3,18$ кОе 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.

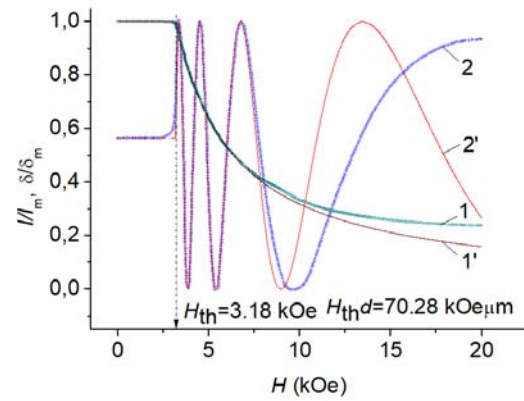


Рис. 8. Экспериментальные (1, 2) и расчетные (1', 2') полевые зависимости приведенных значений разности фаз δ/δ_m между обыкновенной и необыкновенной световыми волнами (1) и интенсивности света I/I_m (2) для допированного Chl. b 5CB

Fig. 8. Experimental (1, 2) and calculated (1', 2') field dependences of the reduced values of the phase difference δ/δ_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 $\chi_{||m}$ и $\chi_{\perp m}$, параллельные и перпендикулярные директору \mathbf{n} нематика. Для исследования ориентационных эффектов использовалась объемная диамагнитная анизотропия $\Delta\chi$, которая определялась из разности компонент объемной восприимчивости $\chi_{||}$ и χ_{\perp} , полученных в результате умножения $\chi_{||m}$ и $\chi_{\perp m}$ на значения плотностей ρ , 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_{NI} и появляющийся при спонтанном нарушении симметрии, когда система переходит в асимметричное нематическое состояние с директором \mathbf{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 δ между обыкновенной и необыкновенной волнами света, пропущенного через слой нематика от He-Ne лазера. Из экспериментов обнаружено снижение порогового поля для примесного нематика $H_{th} = 3,18$ kOe по сравнению со значением $H_{th} = 3,55$ kOe, 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-VCH 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. М. : Nauka, 1978, 384 p. (in Russ.). DOI: 10.1107/S0021889885009967].
7. Langevin P. Sur les birefringences electrique et magnetique. *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 одноосных жидких 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 жидких 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 Fredericksz 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. Текстурирование и структурная упорядоченность в жидких 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 жидких 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:

¹*Паршин А. М.* – разработка концепции научной работы, проведение исследований, подготовка иллюстраций, написание текста статьи.

²*Зотина Т. А.* – проведение исследований, подготовка иллюстраций, редактирование текста статьи.

Contribution of the authors:

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

²*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.

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

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

Поступила 28.07.2025, одобрена 14.08.2025, принята 20.08.2025
Received 28.07.2025, approved 14.08.2025, accepted 20.08.2025