

Научная статья

УДК 538.956, 537.226.5

DOI: 10.18384/2949-5067-2025-3-76-89

## ДИСПЕРСИЯ АНИЗОТРОПИИ ПОКАЗАТЕЛЯ ПРЕЛОМЛЕНИЯ ЖИДКОГО КРИСТАЛЛА В НИЗКОТЕМПЕРАТУРНОЙ НЕМАТИЧЕСКОЙ ФАЗЕ

**Чекулаев И. С., Симушкина С. В., Ковалев Ю. В., Кулешова Ю. Д., Крюков А. И., Чигринов В. Г., Курилов А. Д.\***

Государственный университет просвещения, г. Москва, Российская Федерация

\*Корреспондирующий автор, e-mail: ad.kurilov@guppros.ru

Поступила в редакцию 01.09.2025

Принята к публикации 05.09.2025

### Аннотация

**Цель.** Исследовать дисперсию анизотропии показателя преломления  $\Delta n$  и параметр порядка  $S$  жидкокристаллической смеси ЖК-1289 в диапазоне  $-60\dots+60^\circ\text{C}$  и проверить соответствие модели Ландау-де Жена.

**Процедура и методы.** Применена интерференционная спектроскопия. Измерены спектры пропускания планарной ЖК-ячейки при температурах от  $-60^\circ\text{C}$  до  $+60^\circ\text{C}$ . Определена  $\Delta n$  по интерференционным максимумам. Рассчитана зависимость  $S(T)$  по  $\Delta n(T)$ .

**Результаты.** Установлены зависимости  $\Delta n(\lambda)$  во всем диапазоне существования нематической фазы. Анизотропия показателя преломления снижается с ростом температуры и длины волны. Параметр порядка падает от 0,75 при  $-40^\circ\text{C}$  до 0,26 при  $+60^\circ\text{C}$ . Критический показатель  $\beta = 0,23 \pm 0,01$  близок к 0,25, подтверждая модель.

**Теоретическая и/или практическая значимость.** Получены данные по  $\Delta n(\lambda, T)$  и  $S(T)$  в низкотемпературной нематической фазе ЖК-1289 и проверена модель Ландау-де Жена. Результаты важны для проектирования термостабильных ЖК-устройств.

**Ключевые слова:** анизотропия показателя преломления, дисперсия, жидкие кристаллы, параметр порядка

**Благодарности и источники финансирования.** Работа выполнена в рамках реализации научно-исследовательского проекта – победителя конкурса на получение гранта Федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Государственный университет просвещения» в 2025 году.

### Для цитирования:

Дисперсия анизотропии показателя преломления жидкого кристалла в низкотемпературной нематической фазе / И. С. Чекулаев, С. В. Симушкина, Ю. В. Ковалев, Ю. Д. Кулешова, А. И. Крюков, В. Г. Чигринов, А. Д. Курилов // Вестник Государственного университета просвещения. Серия: Физика-математика. 2025. № 3. С.76–89. <https://doi.org/10.18384/2949-5067-2025-3-76-89>

## Original research article

**DISPERSION OF THE ANISOTROPY OF THE REFRACTIVE INDEX OF A LIQUID CRYSTAL IN A LOW-TEMPERATURE NEMATIC PHASE****I. Chekulaev, S. Simushkina, Yu. Kovalev, Yu. Kuleshova, A. Krukov, V. Chigrinov, A. Kurilov\****Federal State University of Education, Moscow, Russian Federation**\*Corresponding author, e-mail: ad.kurilov@guppros.ru**Received by the editorial office 01.09.2025**Accepted for publication 05.09.2025***Abstract**

**Aim.** To study the dispersion of the refractive index anisotropy  $\Delta n$  and the order parameter  $S$  of the liquid crystal mixture ZhK-1289 in the temperature range of  $-60$  to  $+60^\circ\text{C}$  and to verify the applicability of the Landau-de Gennes model.

**Methodology.** Interference spectroscopy was employed. Transmission spectra of a planar LC cell were measured at temperatures ranging from  $-60^\circ\text{C}$  to  $+60^\circ\text{C}$ . The birefringence  $\Delta n$  was determined from the positions of interference maxima. The dependence  $S(T)$  was calculated based on  $\Delta n(T)$ .

**Results.** The dependences  $\Delta n(\lambda)$  were established throughout the entire existence range of the nematic phase. The refractive index anisotropy decreases with increasing temperature and wavelength. The order parameter decreases from 0.75 at  $-40^\circ\text{C}$  to 0.23 at  $+61^\circ\text{C}$ . The critical exponent  $\beta = 0.23 \pm 0.01$  is close to 0.25, confirming the model.

**Research implications.** Data on  $\Delta n(\lambda, T)$  and  $S(T)$  in the low-temperature nematic phase of ZhK-1289 were obtained, and the Landau-de Gennes model was validated. The results are important for designing thermally stable LC devices.

**Keywords:** dispersion, liquid crystals, order parameter, refractive index anisotropy

**Acknowledgments.** This work was supported by the grant from the Federal State University of Education in 2025, awarded to the winning research project in the competitive grant program.

**For citation:**

Chekulaev, I. S., Simushkina, S. V., Kovalev, Yu. V., Kuleshova, Yu. D., Krukov, A. I., Chigrinov, V. G. & Kurilov, A. D. (2025). Dispersion of the anisotropy of the refractive index of a liquid crystal in a low-temperature nematic phase. In: *Bulletin of the Federal State University of Education. Series: Physics and Mathematics*, 3, pp. 76–89. <https://doi.org/10.18384/2949-5067-2025-3-76-89>

**Введение**

Жидкие кристаллы (ЖК) занимают уникальное положение среди мягких конденсированных сред, обладая способностью к самоорганизации в упорядоченные мезофазы с характернымиnano- и микроструктурами [1–4]. Ключевой особенностью этих фаз, особенно нематической, является высокая чувствительность их оптических и диэлектрических свойств к внешним воздействиям (электрическому, магнитному полям, температуре, механическому напряжению). Эта особенность обусловила их доминирующую роль в качестве активных элементов современных оптоэлектронных устройств [5–7]. Широкий спектр применений варьируется от базовых компонентов, таких как жидкокристаллические затворы и дисплеи [8], до сложных адаптивных

систем, включая перестраиваемые градиентные линзы [9–11] и фазовые пластиинки, работающие в видимом, инфракрасном (ИК) и терагерцовом (ТГц) диапазонах длин волн [12–15].

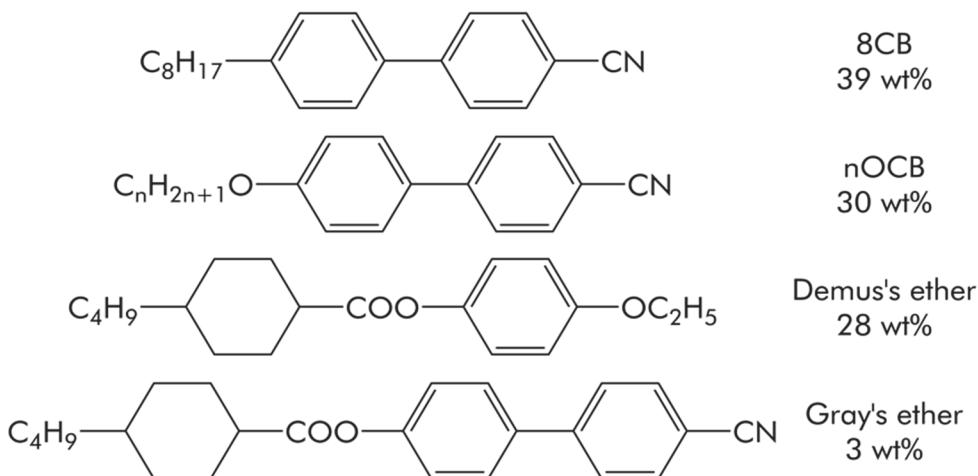
Точное прогнозирование рабочих характеристик ЖК-устройств критически зависит от глубокого понимания температурной зависимости их фундаментальных параметров, прежде всего анизотропии показателя преломления и связанного с ней параметра ориентационного порядка. Однако, несмотря на значительный объём исследований ЖК-материалов, их оптические свойства, в частности дисперсия  $\Delta n(\lambda)$  и поведение параметра порядка, систематически изучены преимущественно вблизи перехода нематик-изотропная жидкость (N-Iso) и при комнатных температурах. Низкотемпературная область нематической фазы, особенно вблизи перехода кристалл-нематик (Cr-N), остаётся значительно менее исследованной. Этот пробел в знаниях ограничивает возможности разработки ЖК-устройств, стабильно функционирующих в экстремальных условиях, таких как космические аппараты, криогенные системы или оборудование для арктических регионов, где температура может опускаться значительно ниже 0°C.

Таким образом, целью настоящей работы является комплексное экспериментальное исследование оптических свойств широко используемой нематической смеси ЖК-1289 в расширенном диапазоне температур, охватывающем как стандартные условия, так и низкотемпературную область (от -60°C до +60°C).

Научная новизна работы заключается в получении детальных данных по дисперсии  $\Delta n(\lambda, T)$  и параметру порядка  $S(T)$  для смеси ЖК-1289 в ранее малоизученной низкотемпературной области нематической фазы и в прямой экспериментальной проверке пределов применимости модели Ландау-де Жена в этих условиях. Практическая значимость полученных результатов связана с обеспечением надёжной фундаментальной базы данных ( $\Delta n(\lambda, T)$ ,  $S(T)$ ), необходимой для точного расчёта и проектирования термостабильных ЖК-устройств, таких как широкополосные компенсационные пластиинки или линзы с автоматической температурной коррекцией, предназначенных для работы в широком диапазоне условий, включая экстремально низкие температуры.

### **Материалы и методы**

В качестве объекта исследования выбрана коммерческая нематическая жидкокристаллическая смесь ЖК-1289 (производство НИОПИК, Россия), обладающая широким диапазоном существования нематической мезофазы (237–337 К) [16; 17]. Структурные формулы компонентов представлены на рис. 1. Данный состав обеспечивает высокую оптическую анизотропию и стабильность в широком температурном диапазоне.



**Рис. 1 / Fig. 1.** Структурная формула компонентов нематической смеси ЖК-1289 /  
Structural formula of the components of the nematic mixture LC-1289

Источник: составлено авторами

Жидкокристаллическая смесь заполнялась в планарную ячейку толщиной 55 мкм с помощью капиллярного эффекта в изотропной фазе ( $T > 65^{\circ}\text{C}$ ). Ячейка представляет собой две стеклянные подложки с напыленными прозрачными электродами из ITO, поверх которых нанесён полиамидный ориентант. Планарная ориентация достигается за счёт механической натирки полиамидных слоёв (антипараллельная натирка). Толщина зазора задаётся фторопластовыми спейсерами известной толщины и контролируется интерферометрически.

Экспериментальная часть работы проводилась на автоматизированном спектрополяриметрическом комплексе собственной разработки<sup>2</sup>. Установка включала галогеновую лампу с коллиматором в качестве широкополосного источника излучения (спектральный диапазон 420–780 нм). Образец помещался в терmostатируемый держатель с PID-регуляцией температуры (контроллер TCM-X107), обеспечивающий диапазон от  $-65^{\circ}\text{C}$  до  $+100^{\circ}\text{C}$  с точностью стабилизации  $\pm 0,05^{\circ}\text{C}$  и скоростью изменения температуры  $0,1^{\circ}\text{C}/\text{мин}$ . Регистрация спектров пропускания осуществлялась с помощью волоконного спектрометра Avantes AvaSpec-2048 (спектральный диапазон 200–1100 нм, оптическое разрешение 0,3 нм). Управление установкой и сбор данных производились с использованием специализированного программного обеспечения, написанного на Python.

<sup>2</sup> Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 202368839. Российская Федерация. Программа для автоматического измерения и расчёта электрооптических параметров жидкокристаллических материалов. № 2023687917; заявлено 15.12.2023; опубликовано 21.12.2023 / Парашук Н. С., Чекулаев И. С., Курилов А. Д., Чаусов Д. Н., Беляев В. В., Усачев В. В., правообладатель Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Государственный университет просвещения» (RU).

Методика измерений основывалась на анализе интерференционной картины в спектрах пропускания жидкокристаллической ячейки [18; 19]. В начале фиксировались базовые спектры: интенсивность источника  $I_0(\lambda)$  и спектр пропускания пустой ячейки  $I_i(\lambda)$ . Далее регистрировались спектры пропускания в конфигурации «поляризатор перпендикулярен анализатору, директор под 45°», позволяющей напрямую определять анизотропию показателя преломления  $\Delta n$  по положению интерференционных максимумов. Для расчёта  $\Delta n$  использовалось соотношение

$$\Delta n = \frac{\lambda_1 \lambda_2}{d(\lambda_2 - \lambda_1)}. \quad (1)$$

где  $\lambda_1$  и  $\lambda_2$  – длины волн соседних интерференционных максимумов,  $d$  – толщина ячейки.

Учёт дисперсионных эффектов производился с помощью итерационного алгоритма. Сначала порядок интерференции  $P$  определялся в длинноволновой области спектра ( $\lambda > 700$  нм), где дисперсия  $\Delta n$  пренебрежимо мала. Затем анизотропия показателя преломления  $\Delta n(\lambda)$  рассчитывалась для всего спектрального диапазона по формуле:

$$\Delta n = \frac{P_m \lambda_m}{d}, \quad (2)$$

где  $P_m = P + m$ ,  $m$  – целочисленный порядок интерференции,  $\lambda_m$  – длина волны соответствующего порядка интерференции. Полученные дисперсионные кривые аппроксимировались трёхчленным уравнением Коши

$$\Delta n(\lambda) = A + \frac{B}{\lambda^2} + \frac{C}{\lambda^4}. \quad (3)$$

где  $A, B, C$  – числовые параметры.

Протокол измерений включал следующие шаги. После установки заданной температуры образец выдерживался в течение 15 минут для достижения термического равновесия. Для каждой температуры регистрировалось 100 последовательных спектров пропускания с экспозицией 10 мс. Полученные спектры усреднялись, после чего к ним применялась цифровая фильтрация для подавления шумов. Положения интерференционных максимумов определялись с помощью автоматического алгоритма пикового анализа. На основании этих данных рассчитывались значения  $\Delta n$  для каждой температуры. Измерения проводились с шагом 1°C в диапазоне от -60°C до +60°C.

Параметр ориентационного порядка  $S$  рассчитывался на основе полученных экспериментальных данных  $\Delta n(T)$  по эмпирической формуле

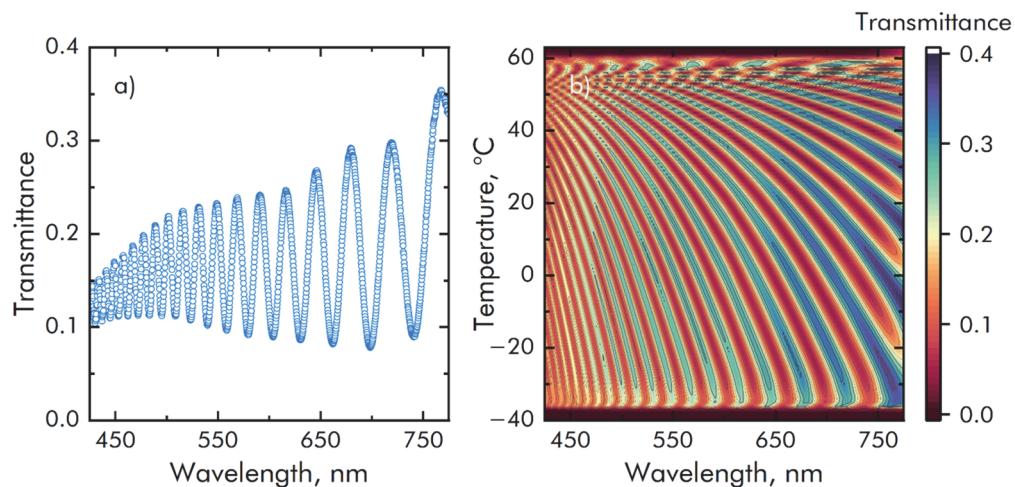
$$\Delta n = \Delta n_0 S = \Delta n_0 \left(1 - \frac{T}{T_{N-Iso}}\right)^{\beta}. \quad (4)$$

Величина  $\Delta n_0$  представляет собой экстраполированное значение анизотропии показателя преломления при  $T \rightarrow 0$  К. Температура фазового перехода нематик-изотропная жидкость  $T_{N-Iso}$  определялась независимо методом

дифференциальной сканирующей калориметрии по скачку теплоёмкости. Критический показатель  $\beta$ , полученный из экспериментальной зависимости  $S(T)$ , сравнивался с теоретическим значением 0,25, предсказываемым моделью Ландау-де Жена.

### Результаты и обсуждение

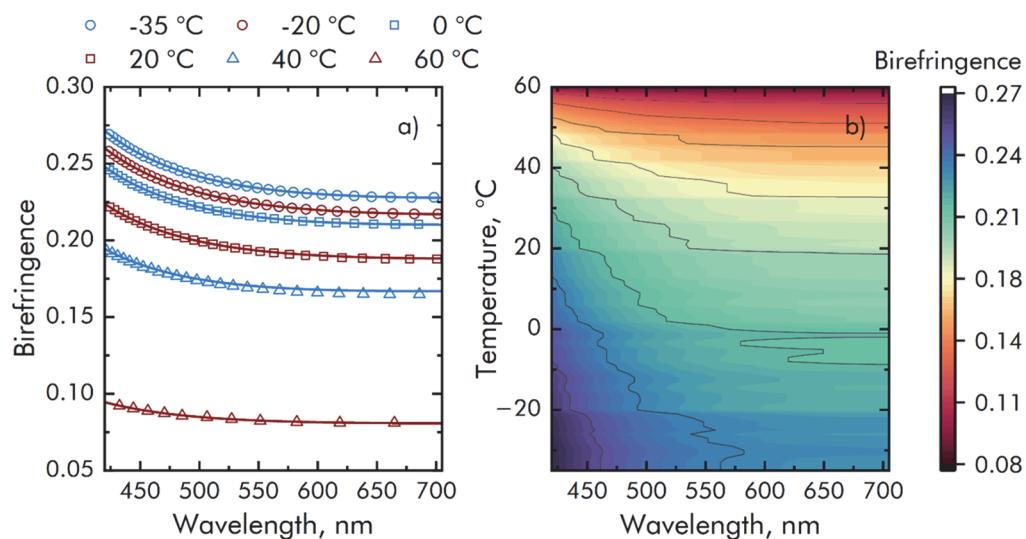
Экспериментально полученные спектры пропускания жидкокристаллической ячейки демонстрируют характерную картину многолучевой интерференции. На рис. 2а представлен типичный спектр при температуре  $-35^{\circ}\text{C}$ , где отчётливо наблюдаются периодические максимумы и минимумы. Смещение интерференционных полос в сторону больших длин волн при уменьшении порядка интерференции соответствует ожидаемому поведению. Более информативен контурный график (рис. 2и 2б), отображающий эволюцию спектров в диапазоне от  $-40^{\circ}\text{C}$  до  $+60^{\circ}\text{C}$ . Здесь явно прослеживается систематическое смещение интерференционной картины с изменением температуры, обусловленное температурной зависимостью анизотропии показателя преломления  $\Delta n$ . Важным дополнением является резкое снижение пропускания при температурах ниже  $-40^{\circ}\text{C}$  и выше  $+60^{\circ}\text{C}$ . Это связано с фазовыми переходами: при  $T < -40^{\circ}\text{C}$  происходит кристаллизация смеси (переход  $\text{N} \rightarrow \text{Cr}$ ), приводящая к сильному рассеянию света на границах кристаллитов, а при  $T > +60^{\circ}\text{C}$  – переход в изотропную фазу ( $\text{N} \rightarrow \text{Iso}$ ), сопровождающийся потерей дальнего ориентационного порядка и, как следствие, исчезновением анизотропии и самой интерференционной картины.



**Рис. 2 / Fig. 2.** Спектр ЖК ячейки при  $T = -35^{\circ}\text{C}$  (а); Контурный график спектров ЖК ячейки при  $T = -40..60^{\circ}\text{C}$  (б) / Spectrum of the LC cell at  $T = -35^{\circ}\text{C}$  (a); Contour plot of the spectra of the LC cell at  $T = -40..60^{\circ}\text{C}$  (b)

Источник: по данным авторов

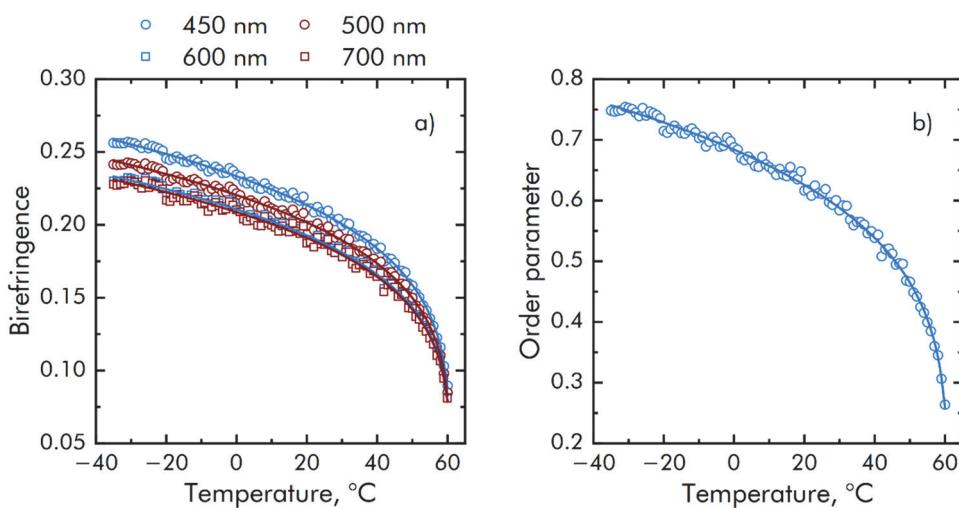
На основе анализа интерференционных спектров были построены дисперсионные зависимости анизотропии показателя преломления  $\Delta n(\lambda)$  для различных температур (рис. 3а). Во всём исследованном спектральном диапазоне (420–780 нм) наблюдается нормальная дисперсия: величина  $\Delta n$  монотонно уменьшается с увеличением длины волны света. Это поведение ожидаемо и обусловлено уменьшением вклада электронных переходов в поляризуемость молекул в длинноволновой области. Экспериментальные данные с высокой точностью аппроксимируются трёхчленным уравнением Коши  $\Delta n(\lambda) = A + B/\lambda^2 + C/\lambda^4$  (сплошные линии на рис. 3а). Значения коэффициентов  $A$ ,  $B$ ,  $C$  закономерно изменяются с температурой, отражая уменьшение общей величины анизотропии. Например, при длине волны 450 нм  $\Delta n$  составляет ~0,26 при -35°C и падает до ~0,10 при +60°C. Трёхмерное представление данных на контурном графике (рис. 3б) наглядно демонстрирует двойную зависимость  $\Delta n(\lambda, T)$ : анизотропия монотонно снижается как с ростом длины волны, так и с увеличением температуры. Последнее является прямым следствием уменьшения ориентационного порядка молекул при нагреве. Особенно важно, что полученные данные надёжно охватывают низкотемпературную область (до -40°C), где  $\Delta n$  достигает максимальных значений.



**Рис. 3. / Fig. 3.** Дисперсия двулучепреломления ЖК-1289 при разных температурах (а); Контурный график дисперсии двулучепреломления ЖК-1289 при  $T = -40..60^\circ\text{C}$  (б) / Birefringence dispersion of LC-1289 at different temperatures (a); Contour plot of birefringence dispersion of LC-1289 at  $T = -40..60^\circ\text{C}$

Источник: по данным авторов

Ключевым результатом работы является исследование поведения параметра ориентационного порядка  $S$  во всём диапазоне существования нематической фазы, включая низкотемпературную область. На рис. 4а представлены зависимости  $\Delta n(T)$  при фиксированных длинах волн (450, 500, 600, 700 нм). Кривая имеет характерный вид:  $\Delta n$  плавно уменьшается с ростом температуры, демонстрируя резкий спад вблизи температуры фазового перехода в изотропную фазу. Используя соотношение (4), была рассчитана температурная зависимость параметра порядка (рис. 4б). При температуре фазового перехода Cr-N параметр  $S$  достигает максимального значения  $\sim 0,75$ , что свидетельствует о высокой степени упорядоченности системы. По мере роста температуры  $S$  монотонно уменьшается, достигая значения  $\sim 0,26$  в непосредственной близости к  $T_{\text{N-Iso}}$ .



**Рис. 4 / Fig. 4.** Температурные зависимости анизотропии показателя преломления  $\Delta n$  (а) и параметра порядка  $S$  (б) ЖК-1289 / Temperature dependences of the refractive index anisotropy  $\Delta n$  (a) and the order parameter  $S$  (b) of LCD-1289

Источник: по данным авторов

Важным аспектом обсуждения является проверка применимости модели Ландау-де Жена, предсказывающей степенную зависимость  $S(T)$  с критическим показателем  $\beta \approx 0,25$ . Наша работа экспериментально исследует эту зависимость для смеси ЖК-1289 вплоть до границы с кристаллической фазой. Аппроксимация экспериментальных данных  $S(T)$  степенной функцией (голубая линия на рис. 4б) дала значение  $\beta = 0,23 \pm 0,01$ . Это значение очень близко к теоретическому предсказанию  $\beta = 0,25$ . Несмотря на незначительное отклонение  $\beta$ , полученные результаты убедительно подтверждают, что модель Ландау-де Жена адекватно описывает температурное поведение параметра порядка нематической фазы смеси

ЖК-1289 не только вблизи перехода N-Iso, но и в глубокой низкотемпературной области, вплоть до  $T_{Cr-N}$ .

Полученные значения  $\Delta n$  и  $S$  для смеси ЖК-1289 согласуются с известными данными для аналогичных широкотемпературных нематиков [19]. Наблюдаемая нормальная дисперсия  $\Delta n(\lambda)$  и её температурная зависимость соответствуют общим закономерностям для цианобифенильных смесей. Главная новизна работы заключается в получении количественных данных по  $\Delta n(\lambda, T)$  и  $S(T)$  в ранее малоизученной низкотемпературной области. Эти данные имеют непосредственное практическое значение для разработки термостабильных жидкокристаллических устройств.

### Заключение

Проведённое исследование заполнило существенный пробел в понимании оптических свойств нематических жидкких кристаллов в низкотемпературной области. Впервые для смеси ЖК-1289 экспериментально установлены комплексные термооптические зависимости, охватывающие весь диапазон существования мезофазы, включая критические области вблизи переходов кристалл-нематик и нематик-изотропная жидкость.

Важным вкладом работы является экспериментальное обоснование применимости фундаментальной модели Ландау-де Жена для описания параметра порядка в экстремальных условиях. Наблюданное соответствие экспериментального критического показателя ( $\beta \approx 0.23$ ) теоретическому предсказанию ( $\beta \approx 0.25$ ) подтверждает устойчивость степенных законов ориентационного упорядочения даже вблизи границы кристаллизации, несмотря на сложный состав смеси.

С практической точки зрения, полученные точные функциональные зависимости  $\Delta n(\lambda, T)$  и  $S(T)$  формируют основу для инженерных расчётов. Они позволяют перейти от эмпирического проектирования к прецизионному моделированию термокомпенсирующих элементов, где поддержание стабильного набега фазы критически зависит от учёта температурных вариаций анизотропии. Особую ценность данные представляют для разработки устройств, работающих в нестабильных или экстремальных условиях – от арктических сенсоров до космической оптики.

Перспективным направлением, выявленным в ходе работы, является изучение неравновесной динамики в низкотемпературной нематической фазе. Установленные статические свойства создают базис для исследования кинетики переключения, релаксационных процессов и влияния наноструктурирования на термооптическую стабильность в широком диапазоне условий эксплуатации.

### ЛИТЕРАТУРА

1. Transport of ions and electrons in nanostructured liquid crystals / T. Kato, M. Yoshio, T. Ichikawa, B. Soberats, H. Ohno, M. Funahashi // Nature Reviews Materials. 2017. Vol. 2. Iss. 4. Article no. 17001. DOI: 10.1038/natrevmats.2017.1.

2. Li Q. Functional Organic and Hybrid Nanostructured Materials: Fabrication, Properties, and Applications. New York: John Wiley & Sons, 2018. 632 p.
3. Tunable structure and dynamics of active liquid crystals / N. Kumar, R. Zhang, J. J. De Pablo, M. L. Gardel // Science Advances. 2018. Vol. 4. Iss. 10. Article: eaat7779. DOI: 10.1126/sciadv.aat7779.
4. Blinov L. M., Chigrinov V. G. Electrooptic effects in Liquid Crystal Materials. New York: Springer-Verlag, 1994. 459 p.
5. Synthesis and Optoelectronic Properties of Perylene Diimide-Based Liquid Crystals / S. Qiao, R. Liao, M. Xie, X. Song, A. Zhang, Y. Fang, C. Zhang, H. Yu // Molecules. 2025. Vol. 30. Iss. 4. Article no. 799. DOI: 10.3390/molecules30040799.
6. Core-Only Calamitic Liquid Crystals: Molecular Design and Optoelectronic Properties / J. G. Rothera, J. Yu, K. AlNajm, R. Butrus, E. Ahangari-Bashash, L. K. Watanabe, J. M. Rawson, A. Dmitrienko, V. N. Vukotic, S. H. Eichhorn // Chemistry – An Asian Journal. 2025. Vol. 20. Iss. 8. Article no. e202401543. DOI: 10.1002/asia.202401543.
7. Metallacycle-cored luminescent ionic liquid crystals with trigonal symmetry / L. Chen, Y. Cao, H. Huo, S. Lu, Y. Hou, T. Tan, X. Li, F. Liu, M. Zhang // Chemical Science. 2025. Vol. 16. Iss. 12. P. 4992–4997. DOI: 10.1039/D4SC07318E.
8. Köysal O., Gleeson H. F., Kocakülah G. A double-layer light shutter consisting of polymer dispersed liquid crystal and azo dye/quantum dot // Optical Materials. 2024. Vol. 154. Article no. 115645. DOI: 10.1016/j.optmat.2024.115645.
9. Chromatic aberration compensation using thin, transparent, large aperture, wide focal range, adaptive liquid crystal lens / J. Pereiro-García, M. Caño-García, O. Blanco-Fernández, R. Ramos-Uña, X. Quintana, M. A. Geday // Optics & Laser Technology. 2025. Vol. 180. Article no. 111532. DOI: 10.1016/j.optlastec.2024.111532.
10. Modin A., Leheny R. L., Serra F. Spatial Photo-Patterning of Nematic Liquid Crystal Pretilt and its Application in Fabricating Flat Gradient-Index Lenses // Advanced Materials. 2024. Vol. 36. Iss. 23. Article no. 2310083. DOI: 10.1002/adma.202310083.
11. Lin Y. H., Wang Y. J., Reshetnyak V. Liquid crystal lenses with tunable focal length // Liquid Crystals Reviews. 2017. Vol. 5. Iss. 2. P. 111–143. DOI: 10.1080/21680396.2018.1440256.
12. Voltage-controlled liquid-crystal terahertz phase shifter and quarter-wave plate / C.-F. Hsieh, R.-P. Pan, T.-T. Tang, H.-L. Chen, C.-L. Pan // Optics letters. 2006. Vol. 31. Iss. 8. P. 1112–1114. DOI: 10.1364/OL.31.001112.
13. Optimal design of quarter-wave plate with wideband and wide viewing angle for three-dimensional liquid crystal display / W. Seok Kang, B.-J. Mun, G.-D. Lee, J. Ho Lee, B. Koo Kim, H. Chul Choi, Y. Jin Lim, S. Hee Lee // Journal of Applied Physics. 2012. Vol. 111. Iss. 10. Article no. 103119. DOI: 10.1063/1.4723819.
14. Lavrentovich M. D., Sergan T. A., Kelly J. R. Switchable broadband achromatic half-wave plate with nematic liquid crystals // Optics letters. 2004. Vol. 29. Iss. 12. P. 1411–1413. DOI: 10.1364/OL.29.001411.

15. Optically switchable and axially symmetric half-wave plate based on photoaligned liquid crystal films / C.-C. Lin, T.-C. Huang, C.-C. Chu, V. K. S. Hsiao // Optical Materials. 2016. Vol. 57. P. 23–27. DOI: 10.1016/j.optmat.2016.04.006.
16. Electro-optical performance of nematic liquid crystals doped with gold nanoparticles / D. N. Chausov, A. D. Kurilov, R. N. Kucherov, A. V. Simakin, S. V. Gudkov // Journal of Physics: Condensed Matter. 2020. Vol. 32. No. 39. Article no. 395102. DOI: 10.1088/1361-648X/ab966c.
17. Concentration-dependent dielectric and electro-optical properties of composites based on nematic liquid crystals and CdS: Mn quantum dots / A. D. Kurilov, D. N. Chausov, V. V. Osipova, D. O. Sagdeev, I. S. Chekulaev, R. N. Kucherov, V. V. Belyaev, Y. G. Galyametdinov // Soft Matter. 2023. Vol. 19. Iss. 11. P. 2110–2119. DOI: 10.1039/D2SM01352E.
18. Interference method for determining dispersion of refractive indices of liquid crystals / E. Miszczyk, Z. Raszewski, J. Kędzierski, E. Nowinowski-Kruszelnicki, M. A. Kojdecki, P. Perkowski, W. Piecek, M. Oliferczuk // Molecular Crystals and Liquid Crystals. 2011. Vol. 544. Iss. 1. Article no. 22/[1010]-36/[1024]. DOI: 10.1080/15421406.2011.569262.
19. A direct assessment of refractive indices of nematic liquid crystals at broad VIS – MWIR range / E. Miszczyk, P. Morawiak, R. Mazur, M. Mrukiewicz, M. Oliferczuk, W. Piecek, Z. Raszewski, P. Kula, J. Kędzierski, J. Zieliński, P. Harmata // Liquid Crystals. 2018. Vol. 45. Iss. 5. P. 703–714. DOI: 10.1080/02678292.2017.1376125.

## REFERENCES

1. Kato, T., Yoshio, M., Ichikawa, T., Soberats, B., Ohno, H. & Funahashi, M. (2017). Transport of ions and electrons in nanostructured liquid crystals. In: *Nature Reviews Materials*, 2 (4), 17001. DOI: 10.1038/natrevmats.2017.1
2. Li, Q. (2018). *Functional Organic and Hybrid Nanostructured Materials: Fabrication, Properties, and Applications*. New York: John Wiley & Sons.
3. Kumar, N., Zhang, R., De Pablo, J. J. & Gardel, M. L. (2018). Tunable structure and dynamics of active liquid crystals. In: *Science Advances*, 4 (10), eaat7779. DOI: 10.1126/sciadv.aat7779.
4. Blinov, L. M. & Chigrinov, V. G. (1994). *Electrooptic effects in Liquid Crystal Materials*. New York: Springer-Verlag.
5. Qiao, S., Liao, R., Xie, M., Song, X., Zhang, A., Fang, Y., Zhang, C. & Yu, H. (2025). Synthesis and Optoelectronic Properties of Perylene Diimide-Based Liquid Crystals. In: *Molecules*, 30 (4), 799. DOI: 10.3390/molecules30040799.
6. Rothera, J. G., Yu, J., AlNajm, K., Butrus, R., Ahangari-Bashash, E., Watanabe, L. K., Rawson, J. M., Dmitrienko, A., Vukotic, V. N. & Eichhorn, S. H. (2025). Core-Only Calamitic Liquid Crystals: Molecular Design and Optoelectronic Properties. In: *Chemistry – An Asian Journal*, 20 (8), e202401543. DOI: 10.1002/asia.202401543.
7. Chen, L., Cao, Y., Huo, H., Lu, S., Hou, Y., Tan, T., Li, X., Liu, F. & Zhang, M. (2025). Metallacycle-cored luminescent ionic liquid crystals with trigonal symmetry. In: *Chemical Science*, 16 (12), 4992–4997. DOI: 10.1039/D4SC07318E.

8. Köysal, O., Gleeson, H. F. & Kocakülah, G. (2024). A double-layer light shutter consisting of polymer dispersed liquid crystal and azo dye/quantum dot. In: *Optical Materials*, 154, 115645. DOI: 10.1016/j.optmat.2024.115645.
9. Pereiro-García, J., Caño-García, M., Blanco-Fernández, O., Ramos-Uña, R., Quintana, X. & Geday, M. A. (2025). Chromatic aberration compensation using thin, transparent, large aperture, wide focal range, adaptive liquid crystal lens. In: *Optics & Laser Technology*, 180, 111532. DOI: 10.1016/j.optlastec.2024.111532.
10. Modin, A., Leheny, R. L. & Serra, F. (2024). Spatial Photo-Patterning of Nematic Liquid Crystal Pretilt and its Application in Fabricating Flat Gradient-Index Lenses. In: *Advanced Materials*, 36 (23), 2310083. DOI: 10.1002/adma.202310083.
11. Lin, Y. H., Wang, Y. J. & Reshetnyak, V. (2017). Liquid crystal lenses with tunable focal length. In: *Liquid Crystals Reviews*, 5 (2), 111–143. DOI: 10.1080/21680396.2018.1440256.
12. Hsieh, C.-F., Pan, R.-P., Tang, T.-T., Chen, H.-L. & Pan, C.-L. (2006). Voltage-controlled liquid-crystal terahertz phase shifter and quarter-wave plate. In: *Optics letters*, 31 (8), 1112–1114. DOI: 10.1364/OL.31.001112.
13. Seok Kang, W., Mun, B.-J., Lee, G.-D., Ho Lee, J., Koo Kim, B., Chul Choi, H., Jin Lim, Y. & Hee Lee, S. (2012). Optimal design of quarter-wave plate with wideband and wide viewing angle for three-dimensional liquid crystal display. In: *Journal of Applied Physics*, 111 (10), 103119. DOI: 10.1063/1.4723819.
14. Lavrentovich, M. D., Sergan, T. A. & Kelly, J. R. (2004). Switchable broadband achromatic half-wave plate with nematic liquid crystals. In: *Optics letters*, 29 (12), 1411–1413. DOI: 10.1364/OL.29.001411.
15. Lin, C.-C., Huang, T.-C., Chu, C.-C. & Hsiao, V. K. S. (2016). Optically switchable and axially symmetric half-wave plate based on photoaligned liquid crystal films. In: *Optical Materials*, 57, 23–27. DOI: 10.1016/j.optmat.2016.04.006.
16. Chausov, D. N., Kurilov, A. D., Kucherov, R. N., Simakin, A. V. & Gudkov, S. V. (2020). Electro-optical performance of nematic liquid crystals doped with gold nanoparticles. In: *Journal of Physics: Condensed Matter*, 32 (39), 395102. DOI: 10.1088/1361-648X/ab966c.
17. Kurilov, A. D., Chausov, D. N., Osipova, V. V., Sagdeev, D. O., Chekulaev, I. S., Kucherov, R. N., Belyaev, V. V. & Galyametdinov, Y. G. (2023). Concentration-dependent dielectric and electro-optical properties of composites based on nematic liquid crystals and CdS: Mn quantum dots. In: *Soft Matter*, 19 (11), 2110–2119. DOI: 10.1039/D2SM01352E.
18. Miszczyk, E., Raszewski, Z., Kędzierski, J., Nowinowski-Kruszelnicki, E., Kojdecki, M. A., Perkowski, P., Piecek, W. & Oliferczuk, M. Interference method for determining dispersion of refractive indices of liquid crystals. In: *Molecular Crystals and Liquid Crystals*, 2011, 544 (1), 22/[1010]-36/[1024]. DOI: 10.1080/15421406.2011.569262.
19. Miszczyk, E., Morawiak, P., Mazur, R., Mrukiewicz, M., Oliferczuk, M., Piecek, W., Raszewski, Z., Kula, P., Kędzierski, J., Zieliński, J. & Harmata, P. (2018). A direct assessment of refractive indices of nematic liquid crystals at broad VIS-MWIR range. In: *Liquid Crystals*, 45 (5), 703–714. DOI: 10.1080/02678292.2017.1376125.

## ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

*Чекулаев Игорь Сергеевич* (г. Москва) – младший научный сотрудник учебно-научной лаборатории теоретической и прикладной нанотехнологии Государственного университета просвещения;  
<https://orcid.org/0000-0002-6636-5876>; e-mail: chekulaev.i.s@yandex.ru

*Симушкина Софья Владимировна* (г. Москва) – студент физико-математического факультета Государственного университета просвещения;  
e-mail: simushkinasofa@gmail.com

*Ковалев Юрий Владимирович* (г. Москва) – студент физико-математического факультета Государственного университета просвещения;  
e-mail: lavur.40@gmail.com

*Кулешова Юлия Дмитриевна* (г. Жуковский, Московская обл.) – кандидат физико-математических наук, декан физико-математического факультета Государственного университета просвещения;  
<https://orcid.org/0000-0001-8556-9340>; e-mail: juliaybogdanova@mail.ru

*Крюков Алексей Игоревич* (г. Москва) – директор педагогического технопарка «Кванториум» им. И. В. Курчатова Государственного университета просвещения;  
e-mail: krykovai@gmail.com

*Чигринов Владимир Григорьевич* (г. Москва) – доктор физико-математических наук, старший научный сотрудник учебно-научной лаборатории теоретической и прикладной нанотехнологии Государственного университета просвещения;  
<https://orcid.org/0000-0003-0593-2555>; e-mail: eechigr@ust.hk

*Курилов Александр Дмитриевич* (г. Москва) – кандидат физико-математических наук, заведующий учебно-научной лабораторией теоретической и прикладной нанотехнологии Государственного университета просвещения;  
<https://orcid.org/0000-0001-8915-2411>; e-mail: ad.kurilov@guppros.ru

## INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

*Igor S. Chekulaev* (Moscow) – Research Assistant, Laboratory of Theoretical and Applied Nanotechnology, Federal State University of Education;  
<https://orcid.org/0000-0002-6636-5876>; e-mail: chekulaev.i.s@yandex.ru

*Sofia V. Simushkina* (Moscow) – Student, Faculty of Physics and Mathematics, Federal State University of Education;  
e-mail: simushkinasofa@gmail.com

*Yuriy V. Kovalev* (Moscow) – Student, Faculty of Physics and Mathematics, Federal State University of Education;  
e-mail: lavur.40@gmail.com

*Yulia D. Kuleshova* (Zhukovsky, Moscow region) – Cand. Sci. (Phys.-Math.), Dean, Faculty of Physics and Mathematics, Federal State University of Education;  
<https://orcid.org/0000-0001-8556-9340>; e-mail: juliaybogdanova@mail.ru

*Aleksey I. Kryukov* (Moscow) – Head, Pedagogical Technopark “Quantorium” named after I. V. Kurchatov, Federal State University of Education;  
e-mail: krykovai@gmail.com

*Vladimir G. Chigrinov* (Moscow) – Dr. Sci. (Phys.-Math.), Senior Researcher, Laboratory of Theoretical and Applied Nanotechnology, Federal State University of Education;  
<https://orcid.org/0000-0003-0593-2555>; e-mail: eechigr@ust.hk

*Aleksandr D. Kurilov* (Moscow) – Cand. Sci. (Phys.-Math.), Laboratory Head, Laboratory of Theoretical and Applied Nanotechnology, Federal State University of Education;  
<https://orcid.org/0000-0001-8915-2411>; e-mail: ad.kurilov@guppros.ru