

Научная статья

УДК 538.91; 53.091; 53.097

<https://doi.org/10.15828/2075-8545-2022-14-5-419-429>

CC BY 4.0

## Жидкокристаллический оптический затвор для витражей и окон

Ольга Аркадьевна Денисова 

Уфимский государственный нефтяной технический университет, Уфа, Россия

Автор, ответственный за переписку: e-mail: denisovaolga@bk.ru

**АННОТАЦИЯ: Введение.** Жидкий кристалл как наноматериал нашел применение в науке, технике и технологиях. Уникальные физические свойства жидких кристаллов делают их чувствительными к внешним воздействиям. В статье представлены результаты экспериментального исследования флексоэлектрического эффекта в жидком кристалле при возникновении сдвиговых деформаций, тонкие слои которых могут служить оптическим затвором для витражных окон зданий. **Материалы и методы.** Использовались нематические жидкие кристаллы с гомеотропной ориентацией молекул толщиной  $10 \div 100$  мкм методом двойного лучепреломления. Частота сдвигового воздействия 1 кГц. **Методы.** Экспериментальная ячейка собиралась из двух стеклянных пластин в виде плоского конденсатора, между стеклами помещались прокладки, которые и задавали толщину образца. Сбоку от предметного столика микроскопа располагался источник сдвиговых колебаний, который соединялся с ЖК-ячейкой при помощи тонкого волновода. **Результаты и обсуждение.** Согласно геометрии задачи, директор направлен вертикально параллельно оси  $Z$ , вектор скорости колебаний пластины – горизонтально по оси  $X$ . Ориентация молекул жидкого кристалла в объеме характеризуется углом  $\theta$ . Между подвижной и неподвижной подложками ЖК-ячейки распространяется упруго-вязкая волна, которая приводит к возмущению начальной гомеотропной ориентации поля директора. Получены зависимости первой и второй гармоник ЭДС, индуцируемой сдвигом, а также оптического сигнала от скорости колебания пластины. Они имеют пороговый характер возникновения при критической скорости  $u_c \sim 8$  мм/с, при этом молекулы жидкого кристалла ориентируются под углом  $\theta_c$ . Температурные зависимости гармоник ЭДС вдали от фазового перехода нематик – изотропная жидкость показали, что при приближении к фазовому переходу регрессия сигнала  $U_{1\omega}$  прекращается, а затем его значение возрастает вплоть до температурного перехода нематик – изотропное состояние  $T_{NI}$ . Величина оптического сигнала  $I_{2\omega}/I_0(T)$ , приближаясь к фазовому переходу, возрастает, что объясняется ростом амплитуды колебания директора  $\Theta_d$ . **Заключение.** В статье рассмотрен флексоэлектрический эффект, наблюдаемый в тонких слоях нематических жидких кристаллов с гомеотропной ориентацией молекул, помещенных между двумя стеклянными пластинами. Возникновение эффекта имеет пороговый характер, критическая скорость деформации около 8 мм/с. Рассмотрены условия и параметры воздействия (амплитуда сдвига, температура образца) на ячейку-конденсатор для различных жидких кристаллов. Предлагается использовать полученные результаты для создания оптического затвора (шторка) для витражей или окон зданий и сооружений.

**КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА:** жидкие кристаллы, флексоэлектрический эффект, акустооптический эффект, флексоэлектрическая поляризация, ориентационный переход.

**ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ:** Денисова О.А. Жидкокристаллический оптический затвор для витражей и окон // Нанотехнологии в строительстве. 2022. Т. 14, № 5. С. 419–429. <https://doi.org/10.15828/2075-8545-2022-14-5-419-429>. – EDN: LDSHDO.

### ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время разнообразие материалов, используемых в производстве, промышленности, а также в технологиях, трудно переоценить. Ученые и инженеры работают над созданием новых материалов, которые смогут расширить технические возможности и позволят создать принципиально новые

приборы, которые можно применить в различных отраслях человеческой деятельности [1–26]. К таким материалам относятся и наноматериалы. Как известно, наноматериалы – это материалы, которые были созданы на основе наночастиц или с использованием нанотехнологий. Их характерные размеры лежат в пределах от 1 до 100 нанометров. С приставкой нано- известны трубки, волокна, кластеры, ленты,

© Денисова О.А., 2022

## РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ УЧЕНЫХ И СПЕЦИАЛИСТОВ

дисперсии, пленки, и этот ряд можно продолжить. Отдельный огромный пласт задач решается с использованием углеродных материалов (фуллеренов, графенов, трубок, алмазов, волокон). Разработка и поиск новых наноматериалов ведется не одно десятилетие, что открывает перспективы развития технологий. Упомянутые выше наноматериалы имеют кристаллическую структуру.

В строительстве, а также в декоре широко используется, например, жидкое стекло. Это очень плотная и вязкая субстанция при рабочей температуре 95–98°C, после нанесения на поверхность твердеет. Применяется для гидроизоляции, например, фундамента, имеет хорошие адгезионные характеристики, материал устойчив к термическим воздействиям, не восприимчив к влаге, нетоксичен, огнеупорный, имеет антистатические и антисептические свойства, обработанная поверхность имеет долгий срок службы. К недостаткам можно отнести возможность получения ожогов при контакте с кожей из-за наличия в составе щелочи; быстро высыхает, поэтому необходимо иметь навык работы с ним; эффектив-

но применяется для бетона и дерева, но разрушает структуру кирпича.

Одним из материалов, который относят к наноматериалам из-за малости размеров молекул (от 5 до 30 Å) и который нашел применение в науке, технике, в разработке различных инженерных решений, является жидкий кристалл (ЖК). Жидкий кристалл имеет свойства одновременно твердого тела и жидкости. Он вязок и текуч, как жидкость, но при этом имеет строгий ориентационный порядок молекул, как твердое тело. Это органические вещества, которые содержатся в живом организме (например, холестерин), и поэтому жидкие кристаллы успешно применяются в медицине для создания приборов и методов ранней диагностики болезней, тонкие пленки ЖК рассматривают как модели мембран клеток [19]. Жидкие кристаллы используют в технике для создания мониторов, табло, различных датчиков, сенсоров, как для систем отображения информации, так и в качестве «рабочего вещества» для контроля давления, вибраций, уровней жидких или сыпучих веществ [1–24].

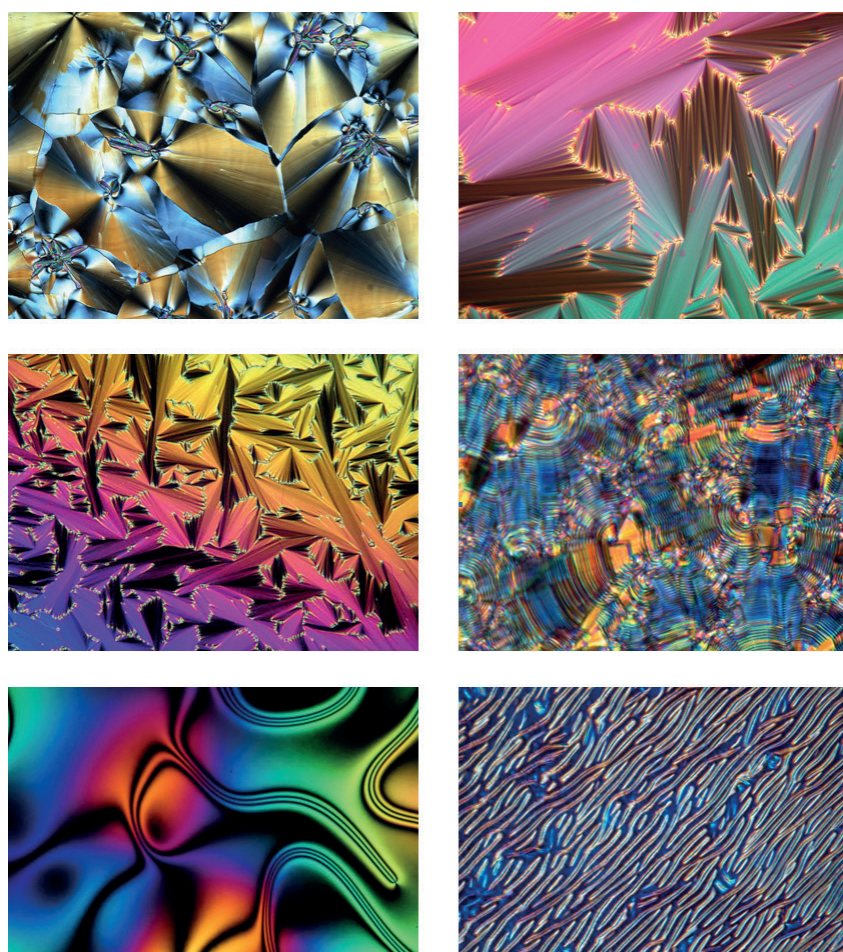


Рис. 1. Текстуры в жидких кристаллах, наблюдаемые под микроскопом

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ УЧЕНЫХ И СПЕЦИАЛИСТОВ

Уникальные физические свойства жидких кристаллов делают их чувствительными к внешним воздействиям. Так, при нагревании, подключении электрического или магнитного полей, различного рода механических действиях (сдвиг, изгиб, кручение) жидкие кристаллы демонстрируют множество различных эффектов, на принципах которых основана работа уже созданных приборов, а перспективы их использования безграничны.

Жидкие кристаллы демонстрируют очень необычные и красивые картины, которые можно использовать для декора и дизайна интерьера (рис. 1, фотографии взяты из открытых источников).

Автор статьи имела опыт творческого сотрудничества с кафедрой дизайна Уфимского государственного университета экономики и сервиса. Фотографии, полученные при проведении физического экспери-

мента с жидкими кристаллами, были использованы при оформлении интерьера. В результате такой совместной работы были проведены выставки в г. Уфе в художественной галерее «Academia» («Творчество жидких кристаллов»), а также в Государственном центре современного искусства в г. Москве («Физическая картина мира: визуальные образы жидких кристаллов»).

Дизайнеры и архитекторы находятся в постоянном поиске новых решений в архитектуре и цвете. Черпать идеи можно, в частности, изучая строение вещества, вооружившись микроскопом (рис. 2, фотографии взяты из открытых источников).

Жидкие кристаллы имеют анизотропию физических свойств, т.е. они проявляются по-разному при воздействии на кристалл в различных направлениях. Анизотропия свойств обусловлена также строением

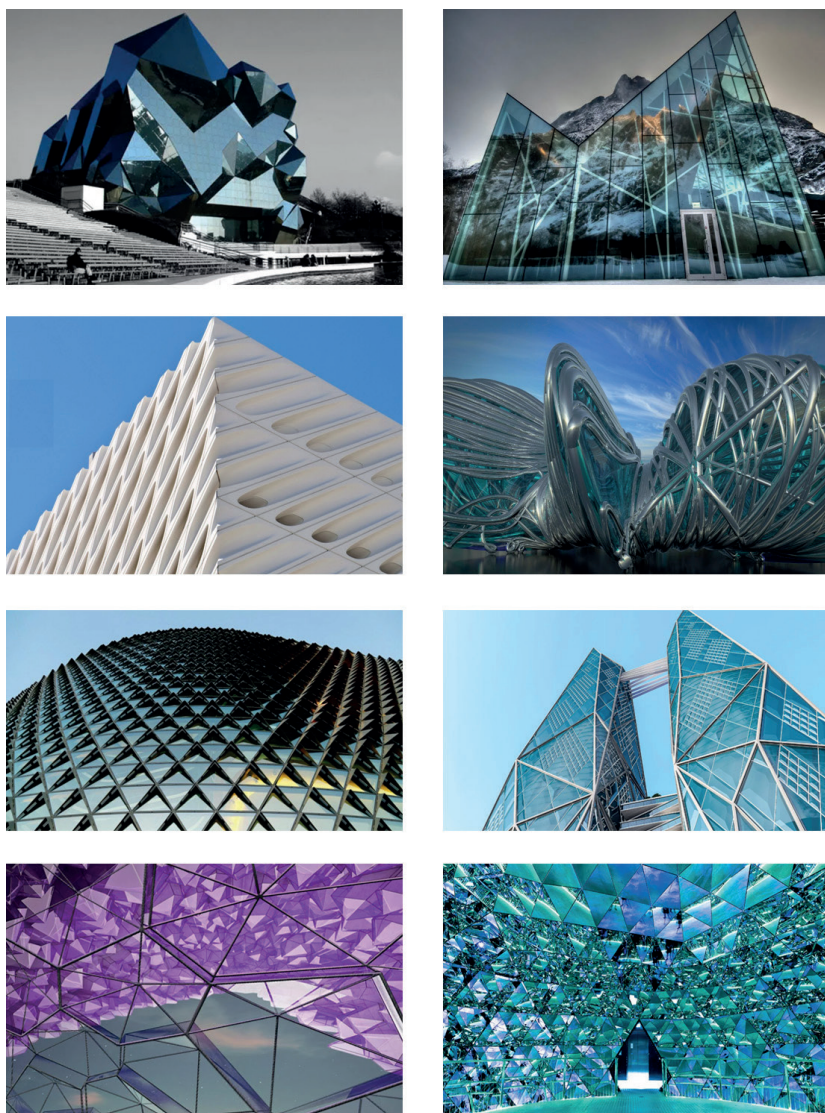


Рис. 2. Футуристические архитектурные и цветовые решения

молекул ЖК. По форме молекулы жидкого кристалла можно аппроксимировать в виде банана, диска или палочки [25, 26]. Мы будем рассматривать жидкие кристаллы с молекулами вытянутой формы в диаметре порядка 5 Å, длиной порядка 30 Å.

Вследствие анизотропии физических свойств и формы молекул жидкие кристаллы демонстрируют многообразие различных эффектов, которые не наблюдаются в жидкостях или твердых кристаллах. В твердых телах наблюдается эффект двойного лучепреломления при механической деформации двутавровой балки. Если взять тонкий слой жидкого кристалла, помещенного между стеклами, посмотреть в окуляр микроскопа, поляриды которого скрещены, то мы увидим темное поле. При действии на кристалл внешним полем можно добиться того, что слой кристалла будет пропускать световой пучок. То есть при определенных условиях ячейка с жидким кристаллом либо пропускает свет, либо нет, таким образом, она может использоваться как оптический затвор.

В твердых кристаллах известен пьезоэлектрический эффект [25, 26], который заключается в возникновении электрического поля при механической деформации. Аналогичный эффект имеет место в жидком кристалле, он наблюдается при возникновении, например, сдвиговых деформаций, и называется флексоэлектрическим эффектом («флексо» – изгиб). В результате изгибных деформаций в жидком кристалле появляется поверхностная поляризация, кроме того, клиновидная или серповидная форма молекул ЖК приводит к возникновению локальной деформации поля директора  $\vec{n}$  (директор – вектор, характеризующий преимущественное направление ориентации молекул ЖК).

Если молекулы кристалла ориентированы в горизонтальной плоскости, то такая ориентация называется планарной; если молекулы ориентированы вертикально, то такая ориентация называется гомеотропной.

В данной статье представлены результаты экспериментального исследования эффекта, наблюдаемого в жидких кристаллах, тонкие слои которых могут служить оптическим затвором (шторкой или жалюзи) для витражей или окон зданий и сооружений.

## МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

### Материалы

Для экспериментального исследования флексоэлектрического эффекта использовались жидкие кристаллы нематического типа (НЖК), основные параметры которых приведены в табл. 1.

### Методы

Исследовались образцы с гомеотропной ориентацией молекул толщиной  $h$  от 10 до 100 мкм методом двойного лучепреломления. Частота сдвигового воздействия порядка 1 кГц.

Ячейка с жидким кристаллом была изготовлена из двух стеклянных пластин в виде плоского конденсатора (рис. 3), между стеклами помещались прокладки, которые и задавали толщину образца.

На подложки нанесено проводящее покрытие из металлического хрома, оно позволяло получить необходимую ориентацию молекул ЖК. Для поддержания нужной температуры существования ме-

Таблица 1

Физические параметры жидких кристаллов

Жидкий кристалл	Температура мезофазы, °С	$e_{11}$ , $10^{-4}$ ед. СГСЕ/см	$e_{33}$ , $10^{-5}$ ед. СГСЕ/см	Дипольный момент, $p$ , D	Диэлектрическая анизотропия, $\epsilon_{\alpha}$
цианофениловый эфир гептилбензойной кислоты (ЦФЭГБК)	$K \frac{45^{\circ}}{N} \frac{56^{\circ}}{I}$	5,5	3	~4,5	~19
нитрофенилоктилоксибензоат (НФООБ)	$K \frac{45^{\circ}}{A} \frac{61^{\circ}}{I}$ $\frac{68^{\circ}}{I}$	5,0	1	~4,1	> 0
n-метоксибензиден-n-бутиланилин (МБА)	$K \frac{18^{\circ}}{N} \frac{42^{\circ}}{I}$	4,5	102	~2,6	< 0
будетилгептаноилазоксibenзол (БГАОБ)	$K \frac{20^{\circ}}{N} \frac{71^{\circ}}{I}$	4,0	30	~3	> 0

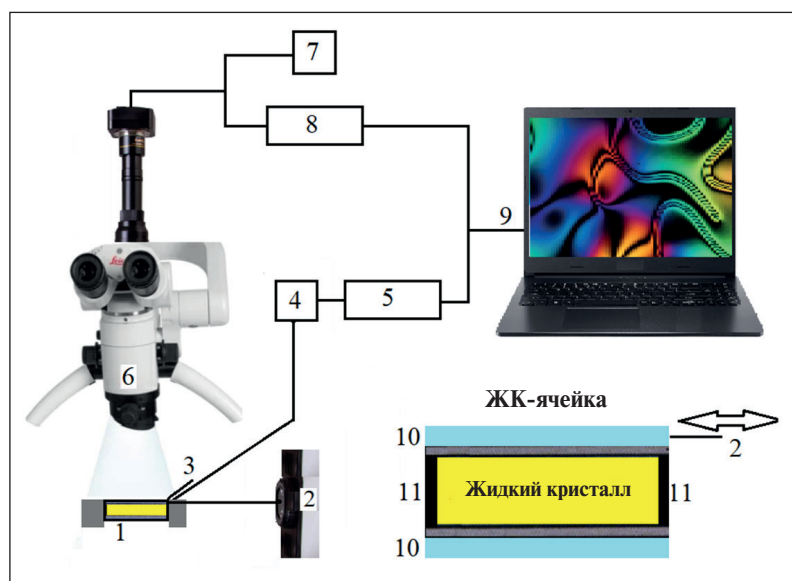


Рис. 3. Элементарная установка для экспериментального детектирования флексоэлектрического эффекта в ЖК:

- 1 – ячейка-конденсатор с ЖК;
- 2 – источник колебаний (сдвиг);
- 3 – термопара; 4 – милливольтметр постоянного тока; 5 – аналого-цифровой преобразователь;
- 6 – микроскоп; 7 – вольтметр постоянного тока; 8 – селективный усилитель; 9 – компьютер;
- 10 – стеклянные подложки;
- 11 – прокладки

зофазы ячейка нагревалась, температура контролировалась термопарой.

Образцы помещали на предметный столик оптического микроскопа. Луч света проходил через экспериментальную ячейку, и его переменная компонента регистрировалась спектрофотометрической приставкой. Для регистрации постоянной компоненты оптического сигнала использовали милливольтметр постоянного тока. Сбоку от предметного столика микроскопа располагался источник сдвиговых колебаний, который соединялся с ЖК-ячейкой при помощи тонкого волновода. Методика экспериментальных исследований подробно описана в работах [6, 8].

## РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Будем исследовать флексоэлектрический отклик ЖК системы на возмущение сдвигового типа, при котором одна из ограничивающих поверхностей слоя совершает периодические колебания со скоростью  $\vec{v}$ . Будем также рассматривать ЖК слои только с однородной ориентацией молекул.

Согласно геометрии задачи директор направлен вертикально параллельно оси  $Z$ , вектор скорости колебаний пластины – горизонтально по оси  $X$ . Ориентация молекул жидкого кристалла в объеме характеризуется углом  $\theta$ . Уравнение, описывающее распределение угла  $\theta$  вдоль оси  $Z$  в общем виде, можно записать [26]:

$$\theta \cong \frac{\rho v_0}{\eta_1 q} \exp \left[ -\frac{\sqrt{2}}{2} b(z - \delta) \right] \cos \left[ \frac{\sqrt{2}}{2} b(z - \delta) \right] \cos \omega t, \quad (1)$$

где  $\eta_1$ ,  $\eta_4$  – коэффициенты вязкости;  $\delta$  – расстояние, на котором директор имеет отклонение от первоначальной ориентации; реальная часть

корней характеристического уравнения:  $b \sim [(\eta_4 \rho \omega^2) / (\eta_3 K_{33})]^{1/2}$ ;  $K_{33}$  – коэффициент упругости;  $\omega$  – частота периодического сдвига.

Согласно уравнению (1), между подвижной и неподвижной подложками ЖК-ячейки распространяется упруго-вязкая волна, которая приводит к возмущению начальной гомеотропной ориентации поля директора (рис. 4 б).

Причем профиль искажения директора в плоскости, образуемой вектором скорости и волновым вектором  $\vec{q}$ , представляет из себя деформацию В-типа (bend), а значит в объеме нематического жидкого кристалла может индуцироваться флексоэлектрическая поляризация также только В-типа, вектор которой лежит в плоскости ЖК слоя. Отсюда непосредственно вытекает, что разность потенциалов между обкладками ячейка-конденсатор должна быть равна нулю, т.к. проекция поляризации на нормаль к слою равна нулю. Однако в действительности между проводящими подложками при возмущении начальной ориентации сдвигом регистрируется переменная ЭДС, в которой можно выделить как первую, так и вторую гармоники  $U_{1\omega}$  и  $U_{2\omega}$  (рис. 4 а, в).

Рассмотрим зависимость первой гармоники  $U_{1\omega}$  от величины скорости сдвига (рис. 4 а,  $\omega = 1$  кГц), например, в НЖК МББА при заданной температуре  $T = 25^\circ\text{C}$ . В этой зависимости по оси абсцисс выделим две области, характерные для поведения  $U_{1\omega}$ :  $0 < v < v_c$  и  $v > v_c$ , где  $v_c$  – значения скорости, при которой происходит скачок величины  $U_{1\omega}$  и изменение тангенса угла наклона  $U_{1\omega}$  относительно оси  $v$ . В первой области первая гармоника слабо зависит от величины скорости или, что то же самое, от амплитуды смещения  $a$ . При  $v \approx v_c$  испытывает скачок. Поляризационно-оптические исследования показали, что при этом в слое индуцируется стационарный

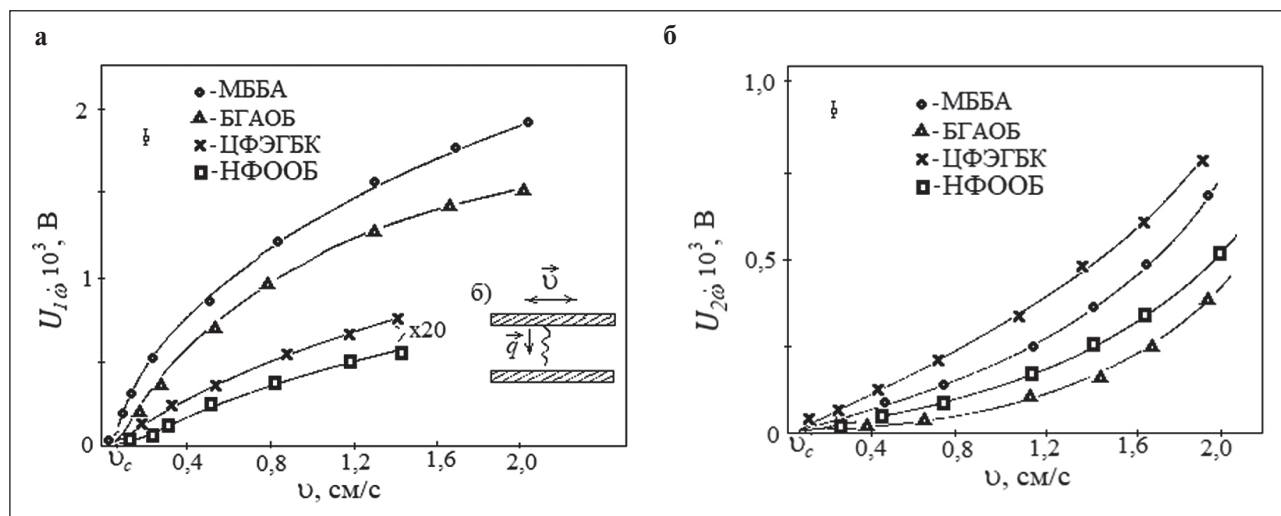


Рис. 4. Зависимость первой гармоники  $U_{1\omega}$  от скорости осцилляций: а) иллюстрация ориентационного искажения в объеме ЖК под действием периодического сдвига; б) зависимость второй  $U_{2\omega}$  гармоники от скорости осцилляций (температуры существования нематической фазы  $T_N$  ЖК: 25°C (МББА), 25°C (БГАОБ), 48°C (ЦФЭГБК), 3°C (НФООБ))

наклон молекул НЖК  $\theta_c$ , который, по-видимому, и приводит к резкому возрастанию величины гармоники.

Не уточняя подробности, укажем, что причины появления стационарного распределения угла директора  $\theta_c$  в такой геометрии могут быть разнообразными, например, из-за нелинейности уравнений, описывающих поведение жидких кристаллов по скорости движения [25], или из-за нестрого линейного движения подвижной пластины в одной плоскости, которое становится эллиптическими [26]. В данном случае будем опираться на экспериментальный факт наличия такого распределения и покажем, что при этом появляется компонента поляризации, перпендикулярная слою ЖК.

Рассмотрим случай, когда направление оси  $X$  совпадает с направлением колебания пластины,

ось  $Z$  перпендикулярна слою НЖК. Тогда можно воспользоваться уравнением (2), и поляризация по оси  $Z$  при малом наклоне директора  $\vec{n}$  к оси будет выражаться:

$$P_z = e_{33} [\text{rot} \vec{n} \times \vec{n}]_z \approx e_{33} \sin \theta_c \frac{\partial \theta_d}{\partial z} \exp(i\omega t), \quad (2)$$

где  $\theta_d$  – амплитуда колебаний директора. Из этого выражения следует, что при ненулевом значении стационарного угла наклона молекул жидкого кристалла  $\theta_c$  между проводящими подложками возникает переменная разность потенциалов, связанная с флексоэлектрическим эффектом. Для определения величины наклона  $\theta_c$  в слое исследовались акустооптические эффекты – модуляция поляризованного света ориентационными возмущениями в ячейке с ЖК (рис. 5).

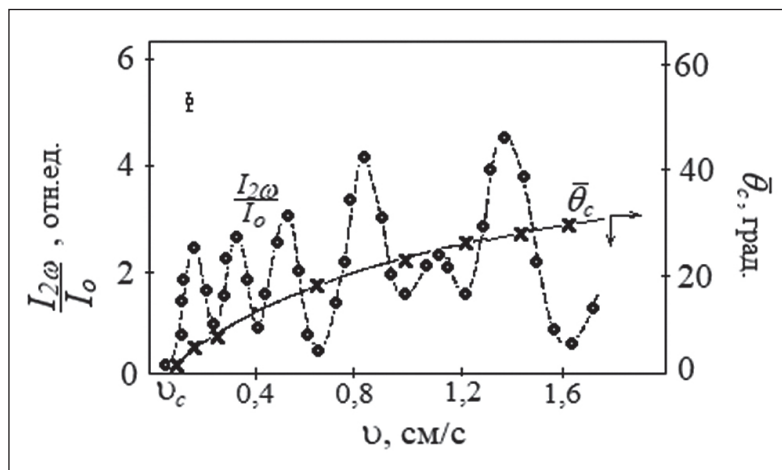


Рис. 5. Зависимости (о) – степени модуляции интенсивности прошедшего поляризованного света через ячейку с ЖК МББА; (x) – индуцируемого сдвигом угла наклона  $\theta_c$  от скорости сдвига  $v$

Относительная величина второй гармоники  $I_{2\omega}/I_{\omega}$  в зависимости от абсолютного значения скорости осциллирует. Из чего делаем вывод, что в ячейке индуцируется постоянный наклон директора относительно оси  $Z$ , т.к. минимумы интенсивности соответствуют набегу разности фаз между обыкновенной и необыкновенной световыми волнами, равной  $\Delta = \pi n$  ( $n = 1, 2, 3, \dots$ ). Находим зависимость угла наклона от скорости колебания подвижной пластины (рис. 5). Зная величину среднего угла  $\bar{\theta}_c$  и амплитуду девиации директора  $\bar{\theta}_d$ , можно определить величины флексокоэффициентов  $e_{33}$  исследуемых веществ, т.к. измеряемая величина первой гармоники следующим образом зависит от перечисленных параметров:

$$U_{1\omega} \approx \int_{-\frac{h}{2}}^{\frac{h}{2}} P_z dz = e_{33} \bar{\theta}_c \bar{\theta}_d^m \exp(i\omega t) h. \quad (3)$$

Выражение (3) верно при условии малости углов  $\bar{\theta}_c$  и  $\bar{\theta}_d$ ,  $\bar{\theta}_c > \bar{\theta}_d$ , а также в случае, если  $|\theta_c(z) - \bar{\theta}_c| \ll 1$ , т.е. стационарное отклонение  $\theta_c(z)$  слабо отличается от среднего  $\bar{\theta}_c$  [26],  $\theta_d^{max}$  – максимальная величина амплитуды колебания директора в слое, которая связана со средним значением  $\bar{\theta}_d$  измеряемой в эксперименте по амплитуде модуляции светового потока. Исходя из формулы (1),  $\bar{\theta}_d^m$  и  $\bar{\theta}_d$  связаны следующим образом:

$$\bar{\theta}_d^m \approx \frac{1}{h} \int_{-\frac{h}{2}}^{\frac{h}{2}} \bar{\theta}_d dz = \bar{\theta}_d^m (\lambda h)^{-1},$$

где  $\lambda = |\vec{q}|$  – декремент затухания упруго-вязкой волны.

Тогда выражение (3) запишется в виде:

$$U_{1\omega} \approx e_{33} \bar{\theta}_c \bar{\theta}_d (\lambda h^2) \exp(i\omega t). \quad (4)$$

Наличие достаточно большой величины флексомодулей делает ЖК перспективным в отношении возможности регистрации ими акустических колебаний и разработки акустических преобразователей. Но для этого, помимо существования прямого флексоэлектрического эффекта, необходимо знать амплитудно-частотную характеристику сигналов, генерируемых вследствие сдвиговых возмущений, создаваемых колебаниями одной из подложек.

Исследования показали, что частотная характеристика сигнала  $U_{1\omega}$  (рис. 6) (скорость сдвига  $\vec{v} = \text{const}$ ), например, в МББА аналогична зависимости  $U_{1\omega}(\omega)$ , полученной при возмущениях изгибного типа. Значит, реально ячейки подобного типа могут быть использованы в качестве детекторов акустических колебаний низкочастотной области от 20 до 1500÷2000 Гц, хотя имеются данные об использовании аналогичных конструкций для регистрации звуковых полей с помощью светового луча – зонда до частот  $\omega \sim 10 \div 15$  кГц.

Перейдем теперь к рассмотрению второй гармоники. Как было показано выше, появление второй гармоники связано с ориентационной модуляцией поляризованного поверхностного слоя – поверхностной поляризации упруго-вязкой волной, что ведет к периодическому изменению емкости этого слоя, проявляющееся в виде генерации поверхностных зарядов на удвоенной частоте возмущения. То есть появление второй гармоники является пороговым, причем пороговое значение скорости  $v_c \sim 8$  мм/с возникновения  $U_{2\omega}(\omega)$  совпадает с появлением стационарного наклона молекул в слое. Однако имеются отличия в соотношении сигналов  $U_{1\omega}$  и  $U_{2\omega}$ .

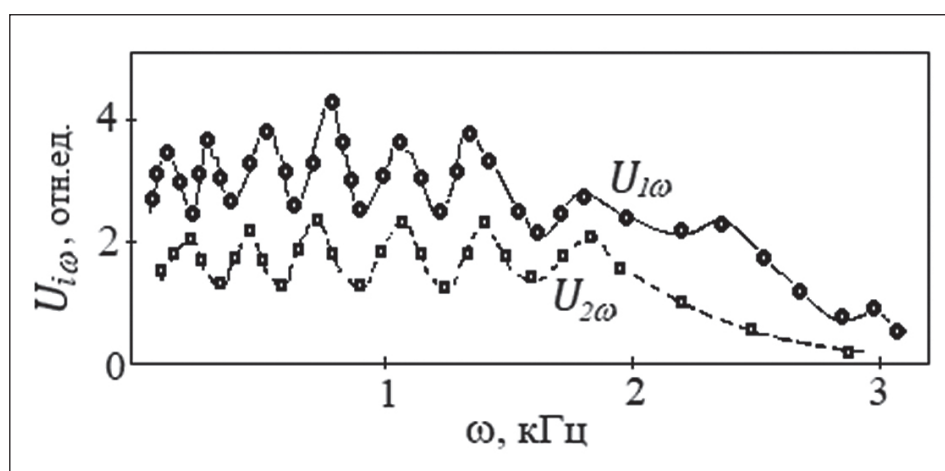


Рис. 6. Частотные зависимости  $U_{1\omega}$  и  $U_{2\omega}$  гармоник для МББА ( $T_N = 25^\circ\text{C}$ )

При сдвиге  $U_{1\omega} > U_{2\omega}$ , что говорит о том, что  $e_{33} > e_{11}$ , например, в МББА и БГАОБ.

Экспериментальным изучением механизмов молекулярно-ориентационной поляризации жидких кристаллов, возбуждаемой акустическим возмущением, было установлено, что в одноосных кристаллах, какими являются большинство нематиков, имеются два флексоэлектрических коэффициента  $e_{11}$  и  $e_{33}$ . Причем в общем значении коэффициента  $e_{11}$  дают вклады как диполи, так и квадруполь, хотя и в разном «весовом» соотношении. Такой вывод является результатом анализа температурных зависимостей первой гармоники ЭДС  $U_{1\omega}$  и акустооптических эффектов. Однако вопрос о «весовых вкладах» перечисленных механизмов во флексокоэффициент  $e_{33}$  остается открытым. В связи с этим необходимо исследование температурных зависимостей флексокоэффициента  $e_{33}$ . Для этого изучим температурное поведение ЭДС, индуцируемой на частоте первой гармоники, а также температурные зависимости величины постоянного угла наклона директора  $\theta_c$ , индуцируемого сдвигами колебаниями одной из подложек, и амплитуды колебания директора  $\bar{\theta}_d$ .

Рассмотрим температурную зависимость  $U_{1\omega}$ , например, в НЖК МББА (рис. 7 а). Вдали от фазового перехода нематик – изотропная жидкость сигнал, регистрируемый на первой гармонике, ведет себя достаточно регулярно и объяснимо с точки зрения

феноменологии, т.е. его величина, уменьшаясь, может быть функцией параметра порядка  $S$ , как предсказывает теория флексоэлектрического эффекта. Однако при приближении к фазовому переходу регрессия сигнала  $U_{1\omega}$  прекращается, а затем значение его возрастает вплоть до температурного перехода нематик – изотропное состояние  $T_{NI}$ , что уже необъяснимо в рамках теории. Для понимания такого поведения обратимся к формуле (4). Из нее следует, что величина сигнала  $U_{1\omega}$  пропорциональна флексокоэффициенту  $e_{33}$ , среднему постоянному углу  $\bar{\theta}_c$  наклона в слое ЖК и амплитуде колебания директора  $\bar{\theta}_d$ , которые так же, как и модуль  $e_{33}$  могут быть зависимыми от температуры. Отметим, что в данном случае экспериментально параметры  $\bar{\theta}_c$  и  $\bar{\theta}_d$  выбирались малыми, хотя  $\bar{\theta}_c > \bar{\theta}_d$ . Отсюда, получив зависимости  $\bar{\theta}_c(T)$  и  $\bar{\theta}_d(T)$ , можем построить температурные зависимости  $e_{33}(T)$ .

Ранее было установлено, что в ячейке с НЖК, имеющей начальную однородную гомеотропную ориентацию, индуцируется сдвигом некоторый постоянный наклон директора  $\bar{\theta}_c$  (рис. 7). Выберем по оси абсцисс такое значение скорости, чтобы вследствие наличия наклона при прохождении слоя ЖК поляризованным светом разность фаз  $\Delta$  оставалась меньше  $\pi$ , и посмотрим, как будет зависеть вторая гармоника оптического сигнала  $I_{2\omega}/I_0$  от температуры (рис. 7 б).

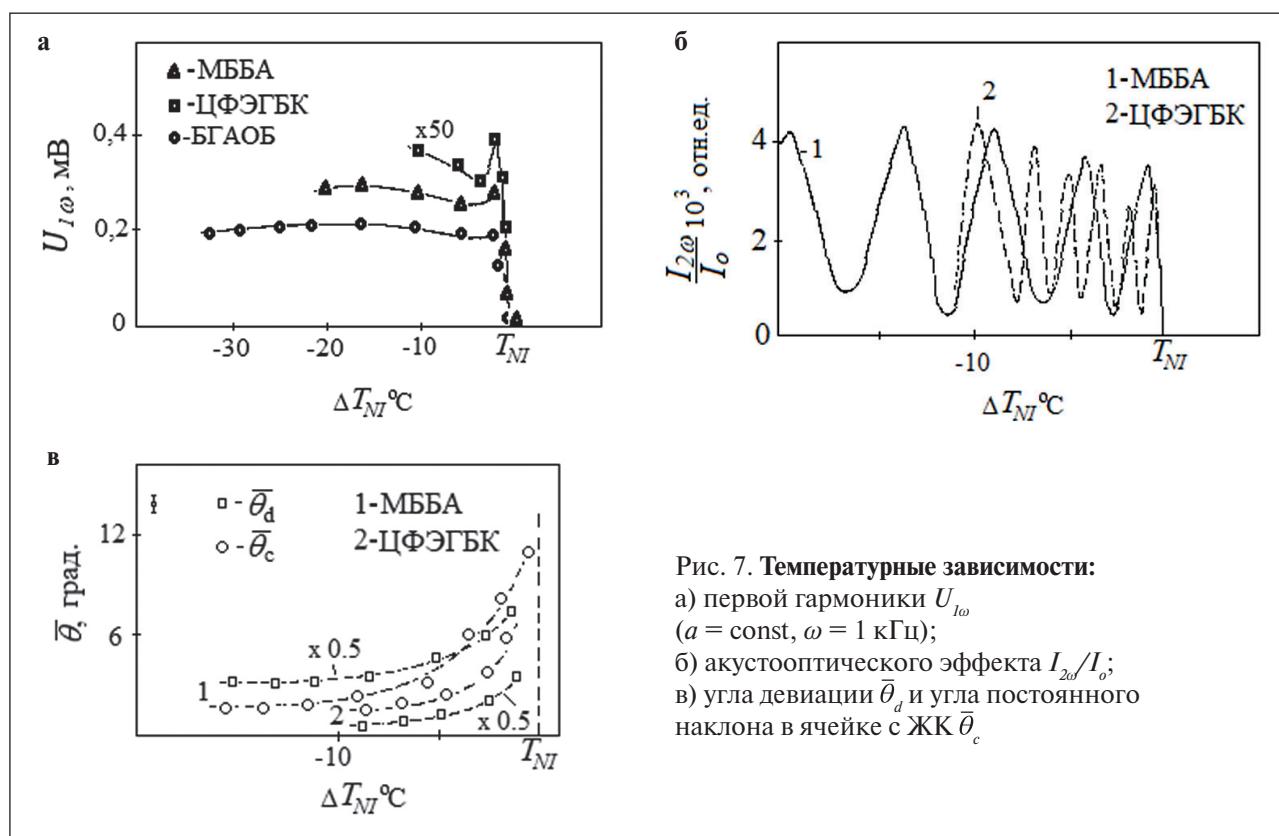


Рис. 7. Температурные зависимости:  
а) первой гармоники  $U_{1\omega}$   
( $a = \text{const}$ ,  $\omega = 1$  кГц);  
б) акустооптического эффекта  $I_{2\omega}/I_0$ ;  
в) угла девиации  $\bar{\theta}_d$  и угла постоянного наклона в ячейке с ЖК  $\bar{\theta}_c$



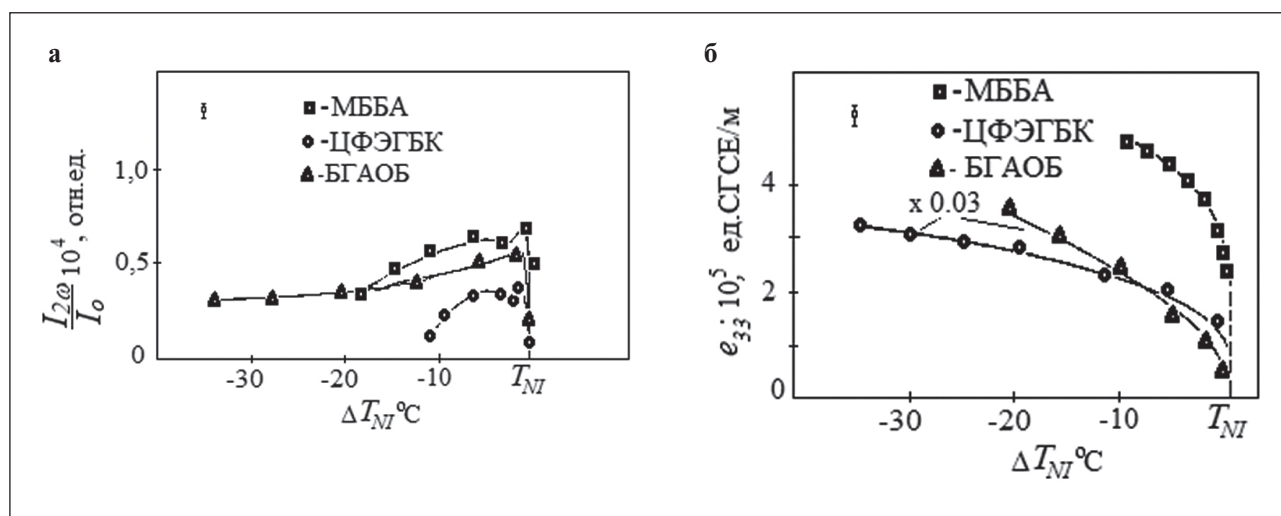


Рис. 8. Температурные зависимости величины: а) акустооптического эффекта  $I_{2\omega}/I_0$  ( $a = \text{const}$ ,  $\omega = 1$  кГц); б) флексоэлектрических коэффициентов  $e_{33}$  ЖК (МББА, БГАОБ, ЦФЭГБК)

Следует обратить внимание на осциллирующий характер зависимости относительной интенсивности прошедшей необыкновенной волны  $I_{2\omega}/I_0$ . Поскольку начальная разность фаз  $\Delta < \pi$ , то подобное поведение может быть только следствием возрастания угла  $\bar{\theta}_c$ , т.к. другой параметр – оптическая анизотропия  $\Delta n(T)$  – уменьшается с приближением к фазовому переходу, как функция параметра порядка  $S$ .

Можно оценить, во сколько раз изменяется угол при приближении к температуре перехода нематического – изотропного состояния  $T_{NI}$ . Зависимость  $I_{2\omega}/I_0(T)$  имеет пять минимумов, а т.к.  $\bar{\theta}_c \sim \pi n$  (где  $n$  – количество минимумов), то  $\bar{\theta}_c \sim \sqrt{n} \sim 2,3$  раза. В действительности, если учесть поправку на температурное изменение оптической анизотропии, получим скорректированную зависимость  $\bar{\theta}_c(T)$  (рис. 7 в), значение угла при этом возрастает в 4, 5 раза, что согласуется с результатом работы [25] для МББА. Кроме того, по огибающей  $I_{2\omega}/I_0(T)$  можно судить о зависимости величины осцилляций директора, т.к. значения максимумов пропорциональны квадрату амплитуды директора  $\bar{\theta}_d^2$ , которая к фазовому переходу также возрастает. Для проверки этого результата изучим температурное поведение величины  $I_{2\omega}/I_0(T)$  при условии, что  $\Delta \ll \pi$ , когда величина постоянного наклона  $\bar{\theta}_c \approx 0$ , т.е. директор совершает колебания под действием периодического сдвига около начального гомеотропного состояния (рис. 8).

Величина  $I_{2\omega}/I_0(T)$ , как и следовало ожидать, к фазовому переходу возрастает, что объясняется ростом  $\bar{\theta}_d$ . Отсюда, зная температурные изменения величин, входящих в формулу для  $U_{I\omega}$  (4), получим зависи-

мости флексокоэффициентов  $e_{33}$  для исследуемых веществ (рис. 8 б). Обсудим эти зависимости.

Можно отметить, что функциональное поведение  $e_{33}(T)$  в этих ЖК, а точнее в их нематической фазе, описывается общей зависимостью от параметра порядка  $S$  как  $e \sim \alpha S + \beta S^2$ . Все значения весовых коэффициентов существенно отличаются для различных НЖК, но согласуются с данными, полученными для модулей  $e_{11}$  методом изгибных колебаний. Для МББА  $\alpha \sim 0,1$ ,  $\beta \sim 0,9$ ; для БГАОБ  $\alpha \sim 0,3$ ,  $\beta \sim 0,7$ ; а для ЦФЭГБК, НФООБ, ОЦБ  $\alpha \sim 1,0$ ,  $\beta \sim 0$ . Значения  $\alpha$  и  $\beta$  для МББА указывают на возникновение дипольного механизма флексоэлектрической поляризации. В случае же ЦФЭГБК  $\alpha \sim 1$ , а  $\beta \sim 0$ , это означает, что в данном случае имеет место квадрупольный характер флексополяризации.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, в статье рассмотрен флексоэлектрический эффект, наблюдаемый в тонких слоях нематических жидких кристаллов с гомеотропной ориентацией молекул, помещенных между двумя стеклянными пластинами. Возникновение эффекта имеет пороговый характер, критическая скорость деформации около 8 мм/с. Рассмотрены условия и параметры воздействия (амплитуда сдвига, температура образца) на ячейку–конденсатор для различных жидких кристаллов. Предлагается использовать полученные результаты для создания оптического затвора (шторка) для витражей или окон зданий и сооружений.

## СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Yakovkin I., Lesiuk A. Director orientational instability in a planar flexoelectric nematic cell with easy axis gliding. *Journal of Molecular Liquids*. 2022; 363: 119888. Available from: <https://doi.org/10.1016/j.molliq.2022.119888>
2. Denisova O.A. Nonlinear dynamics of liquid crystal: ultrasonic light modulator. In the collection: *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 16. In collection “Dynamics of Technical Systems, DTS 2020”. 2020. 012026. Available from: <https://doi.org/10.1088/1757-899X/1029/1/012026>
3. Petrov A.G. Flexoelectricity and Mechanotransduction. *Current Topics in Membranes*. 2007; 58: 121–150. Available from: [https://doi.org/10.1016/S1063-5823\(06\)58005-6](https://doi.org/10.1016/S1063-5823(06)58005-6)
4. Denisova O.A. One of the scenarios of transition to the turbulent mode of the flow of liquid crystals. In the collection: *Journal of Physics: Conference Series. II International Scientific Conference on Metrological Support of Innovative Technologies (ICMSIT II-2021)*. 2021. 22020. Available from: <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1889/2/022020>
5. Sukigara C., Mino Y. Measurement of oxygen concentrations and oxygen consumption rates using an optical oxygen sensor, and its application in hypoxia-related research in highly eutrophic coastal regions. *Continental Shelf Research*. 2021; 229: 104551. Available from: <https://doi.org/10.1016/j.csr.2021.104551>
6. Denisova O.A. Factors influencing flexoelectric polarization in liquid crystals. В сборнике: *Journal of Physics: Conference Series*. In the collection: “International Scientific Conference Energy Management of Municipal Facilities and Sustainable Energy Technologies”. 2020. 012104. Available from: <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1614/1/012104>
7. Itoh T., Izu N. Effect of Pt electrodes in cerium oxide semiconductor-type oxygen sensors evaluated using alternating current. *Sensors and Actuators B: Chemical*. 2021; 345: 130396. Available from: <https://doi.org/10.1016/j.snb.2021.130396>
8. Denisova O.A. Application of the flexoelectric effect in liquid crystals to create acousto-optic transducers. In the collection: *Journal of Physics: Conference Series. International Conference “Information Technologies in Business and Industry”*. 2019. 062004. Available from: <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1333/6/062004>
9. Hossain F., Cracken S. Electrochemical laser induced graphene-based oxygen sensor. *Journal of Electroanalytical Chemistry*. 2021; 899: 115690. <https://doi.org/10.1016/j.jelechem.2021.115690>
10. Dong Y., Liu Z. A limiting current oxygen sensor with 8YSZ solid electrolyte and (8YSZ)<sub>0.9</sub>(CeO<sub>2</sub>)<sub>0.1</sub> dense diffusion barrier. *Journal of Alloys and Compounds*. 2021; 885: 160903 Available from: <https://doi.org/10.1016/J.JALLCOM.2021.160903>
11. Vanderlaan M., Brumm T. Oxygen sensor errors in helium-air mixtures. *Cryogenics*. 2021; 116: 103297. Available from: <https://doi.org/10.1016/j.cryogenics.2021.103297>
12. Eberhart M., Loehle S. Transient response of amperometric solid electrolyte oxygen sensors under high vacuum. *Sensors and Actuators B: Chemical*. 2020; 323: 128639. Available from: <https://doi.org/10.1016/j.snb.2020.128639>
13. Shan K., Yi Z. Mixed conductivity evaluation and sensing characteristics of limiting current oxygen sensors. *Surfaces and Interfaces*. 2020; 21: 100762. Available from: <https://doi.org/10.1016/j.surfin.2020.100762>
14. Denisova O.A., Abramishvili R.L. Nonlinear orientational effect in liquid crystals to create a linear displacement sensor. In the collection: *MATEC Web of Conferences*. 2017. 02008. Available from: <https://doi.org/10.1051/mateconf/201713202008>
15. Luo M., Wang Q. A reflective optical fiber SPR sensor with surface modified hemoglobin for dissolved oxygen detection. *Alexandria Engineering Journal*. 2021; 60(4): 4115–4120. Available from: <https://doi.org/10.1016/J.AEJ.2020.12.041>
16. Luo N., Wang C. Ultralow detection limit MEMS hydrogen sensor based on SnO<sub>2</sub> with oxygen vacancies. *Sensors and Actuators B: Chemical*. 2022; 354: 130982. Available from: <https://doi.org/10.1016/J.SNB.2022.09.184>
17. Denisova O.A. Application of nonlinear processes in liquid crystals in technical systems. In the collection: *AIP Conference Proceedings. XV International Scientific-Technical Conference “Dynamics of Technical Systems”, DTS 2019*. 2019. 030003. Available from: <https://doi.org/10.1063/1.5138396>
18. Marland J., Gray M. Real-time measurement of tumour hypoxia using an implantable microfabricated oxygen sensor. *Sensing and Bio-Sensing Research*. 2020; 30: 100375. Available from: <https://doi.org/10.1016/j.sbsr.2020.100375>
19. Weltin A., Kieninger J. Standard cochlear implants as electrochemical sensors: Intracochlear oxygen measurements in vivo. *Biosensors and Bioelectronics*. 2022; 199: 113859. Available from: <https://doi.org/10.1016/j.bios.2021.113859>
20. Denisova O.A. Measuring system for liquid level determination based on linear electro-optical effect of liquid crystal. In the collection: *XIV International Scientific-Technical Conference “Dynamics of Technical Systems”, DTS 2018. MATEC Web of Conferences*. 2018. 02005. Available from: <https://doi.org/10.1051/mateconf/201822602005>

21. Akasaka S., Amamoto Y. Limiting current type yttria-stabilized zirconia thin-film oxygen sensor with spiral Ta<sub>2</sub>O<sub>5</sub> gas diffusion layer. *Sensors and Actuators B: Chemical*. 2021; 327: 128932. Available from: <https://doi.org/10.1016/j.snb.2020.128932>
22. Phan T.T., Tosa T., Majima Y. 20-nm-Nanogap oxygen gas sensor with solution-processed cerium oxide. *Sensors and Actuators B: Chemical*. 2021; 343: 130098. Available from: <https://doi.org/10.1016/j.snb.2021.130098>
23. Grigoriev V.A., Zhelkobaev Zh.I., Kaznacheev A.V. Investigation of flexoelectric effect in MBBA in strong electric fields. *Phys. solid. bodies*. 1982; 24(10): 3174–3176. Available from: <https://doi.org/10.1002/J.2168-0159.2014.TB00084.X>
24. Bahadur B. *Handbook of liquid crystals. Liquid crystals: Applications and Uses*. 2014: 1. Available from: <https://doi.org/10.1142/1013>
25. Marcerou J.P., Prost J. Flexoelectricity in isotropic phases. *Physics Lett*. 1978; 66A (3): 218–220. Available from: [https://doi.org/10.1016/0375-9601\(78\)90662-X](https://doi.org/10.1016/0375-9601(78)90662-X)
26. Blinov L.M. *Structure and properties of liquid crystals*. Springer: 2011. Available from: <https://doi.org/10.1007/978-90-481-8829-1>

#### ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРЕ

**Денисова Ольга Аркадьевна** – д-р физ.-мат. наук, профессор кафедры «Физика» Высшей школы информационных и социальных технологий Уфимского государственного нефтяного технического университета, г. Уфа, Россия, [denisovaolga@bk.ru](mailto:denisovaolga@bk.ru), <https://orcid.org/0000-0001-6374-3109>

**Автор заявляет об отсутствии конфликта интересов.**

Статья поступила в редакцию 15.09.2022; одобрена после рецензирования 05.10.2022; принята к публикации 07.10.2022.