

15  
**Генерация и динамика дефектов в каплях нематохонлестериков, иницируемые электрическим полем**

© Ю.И. Тимиров, О.А. Скалдин, Е.Р. Басырова, Ю.А. Лебедев

Институт физики молекул и кристаллов УНЦ РАН,  
Уфа, Россия

E-mail: timirov@anrb.ru

(Поступила в Редакцию 31 марта 2015 г.)

Экспериментально изучена динамика и взаимопревращение дефектов в нематохонлестерических каплях, иницируемых электрическим полем. Показано, что в зависимости от величины приложенного напряжения и отношения радиуса капли к величине равновесного шага спирали  $R/P$  могут быть реализованы ориентационно-структурные превращения различного типа. В частности, когда выполняется отношение  $R/P \leq 1$ , наблюдаются капли с одним дефектом типа Франка–Прайса, который вращается при приложении переменного электрического напряжения. В случае  $R/P \geq 1$  динамика вращения дефекта трансформируется в процесс периодического его распада на два поверхностных дефекта с силой  $m = 1$ .

Работа выполнена при поддержке РФФИ (грант № 14-02-97014), гранта Республики Башкортостан молодым ученым и молодежным научным коллективам (договор № 5-2015) и стипендии Президента РФ СП-904.2013.1.

## 1. Введение

В настоящее время достаточно хорошо изучены фундаментальные свойства (магнитные, электрические и оптические) и варианты использования в электрооптических устройствах функциональных композиционных материалов на основе жидкокристаллических сред, представляющих собой взвеси капель жидких кристаллов (ЖК) в изотропной жидкости, либо в полимерных матрицах [1–5]. Тем не менее, интерес исследователей к этим материалам не ослабевает [6]. Это связано с рядом нетривиальных физических свойств жидких кристаллов в малых объемах с замкнутой геометрией [5], что позволяет, например, уменьшить времена отклика капсулированных жидкокристаллических ячеек на воздействие электрического поля, упростить оптические схемы считывания (без применения поляризаторов), создать гибкие ЖК устройства большой площади и т.д. Кроме того, в капсулированных ЖК развиваются более сложные ориентационные процессы, чем в электрооптических ячейках на основе однородных слоев ЖК; наблюдаются различные топологические дефекты („бужумы“, „ежи“, дисклинации, солитоны и т.д.) [7–9], которые играют важную роль в проявлении оптических, полевых, гидродинамических и других эффектов.

Многообразие конфигураций поля директора в капсулированных ЖК чрезвычайно велико и их природа тесно связана с характером упорядочения ЖК в объеме и на межфазной границе ЖК-подложка. Свойство, дающее возможность создавать требуемую ориентационную структуру капсулированных ЖК посредством формирования соответствующих граничных условий и внешних воздействий, служит основой для функционирования всех современных электрооптических ЖК-устройств. Исследования локальных переходов Фредерикса [10]

заложили основу для формирования нового подхода к управлению ЖК. Так в [11] впервые наблюдался локальный переход Фредерикса для плоского слоя нематика, где в качестве возмущающего внешнего фактора выступало изменение температуры. Капли нематика с граничными условиями, изменяющимися за счет вариации температуры рассматривались в работах [7,8,12]. В работах [13–15] изучены неравновесные ориентационные структуры капсулированных ЖК, возникающие при модификации граничных условий за счет добавки гомеотропного сурфактанта в каплях нематика, диспергированного в полимерной матрице. В [7] теоретически предсказан и экспериментально продемонстрирован сценарий трансформации поля директора сферических капель нематика, диспергированных в изотропной жидкости. В работе [16] был предложен и реализован новый метод управления ориентационной структурой капсулированного ЖК, основанный на модификации поверхностного сцепления ионообразующими сурфактантами под действием электрического поля, который наиболее актуален для практических приложений.

Таким образом, дисперсные системы на основе ЖК являются объектами активных исследований в области кристаллофизики и физики конденсированных сред. Однако в основном изучаются равновесные ориентационные переходы, в то время как динамика структурных превращений и процессы дефектообразования в критической области неустойчивости капель представлена незначительно. В связи с этим, целью данной работы является исследование процессов формирования дефектных структур, динамики циклических процессов распада и слияния дефектов в каплях слабозакрученного нематохонлестерика, иницируемые переменным электрическим полем.

## 2. Методика эксперимента

В качестве образцов для исследования выбрана смесь на основе нематического ЖК *n*-(4-метоксибензилиден)-4-бутиланилина (МББА) и холестерического ЖК-холестерилхлорида (ХХ) в пропорциях 1:0.0017 и 1:0.0022 весовых долей, так что значения равновесного шага спирали в этих смесях составляли  $P_1 = 72 \mu\text{m}$  и  $P_2 = 54 \mu\text{m}$  соответственно. Шаг спирали полученных смесей определялся по методу, описанному в [17]. Ячейка с толщиной ЖК слоя  $\sim 25 \mu\text{m}$  размещалась на термостоліке HCS250 (Instec, США) с термостабилизацией лучше  $0.01^\circ\text{C}$ . Термостолік располагался на вращающемся предметном століке поляризаціонно-оптического микроскопа AxioImager A1 (Carl Zeiss, Германия). Для получения каплеы в изотропном окружении, ЖК-ячейка перегревалась для полного перехода ЖК в изотропное состояние, затем медленно остужалась до появления зародышей мезофазы, которые по мере охлаждения укрупнялись до образования ЖК-капель нужного размера. Величина получаемых каплеы варьировалась охлаждением или нагревом ячейки.

Объектом исследования являются свободно взвешенные и сплюснутые капли ЖК, диспергированные в изотропном расплаве. Измерения размеров каплеы проводились в программном пакете AxioVision (Carl Zeiss, Германия) со встроенной системой определения размеров объекта. Точность определения размеров каплеы была порядка  $1 \mu\text{m}$ . Полученные с помощью видеокамеры VX-440 (PCO, Германия) экспериментальные последовательности видеоизображений оцифровывались с помощью фрейм-граббера Pinnacle USB-700 (Pinnacle System, Германия) с разрешением  $720 \times 576$  пикселей и записывались на жесткий диск для дальнейшей обработки. К ЖК-слою прикладывалось переменное электрическое напряжение  $U$  частотой  $f = 50 \text{ Hz}$ .

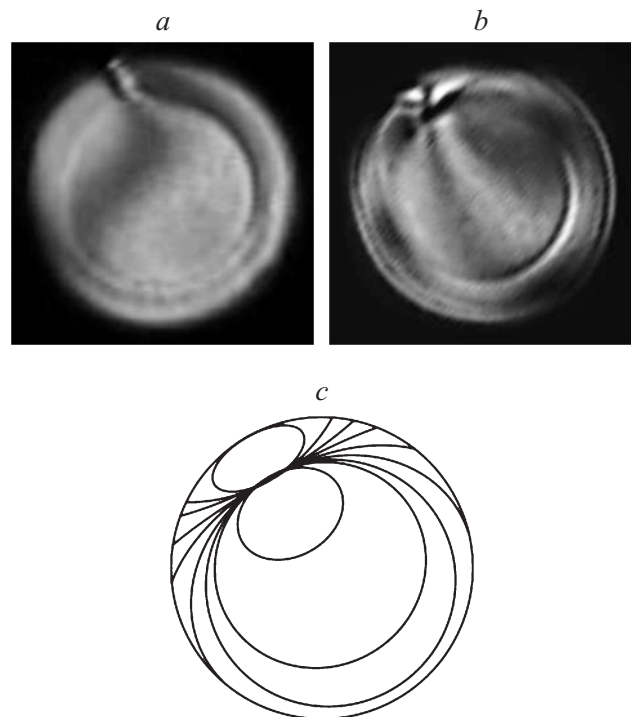
## 3. Экспериментальные результаты и их обсуждение

3.1. Структура и динамика дефектов в каплях нематохолестериков при  $R/P \leq 1$ . Рассмотрим структурные превращения в каплях нематохолестериков размером  $R < P$  и равновесным шагом геликоида  $P_1 = 72 \mu\text{m}$  и  $P_2 = 54 \mu\text{m}$ , индуцированные внешним электрическим полем, приложенным к ЖК-ячейке. В этом случае при охлаждении изотропного расплава образуются свободные капли, капли-перетяжки [18], а также сплюснутые капли, микрофотографии которых представлены на рис. 1, *a, b*; последние и были объектами исследований данной работы. В отсутствие внешнего электрического поля в них наблюдается один поверхностный дефект, структура которого приведена на рис. 1, *c*. Здесь в скрещенных николях достаточно хорошо видно количество ветвей погасания — их восемь, что соответствует силе дефекта  $m = 2$ . Последнее находится в согласии с моделью

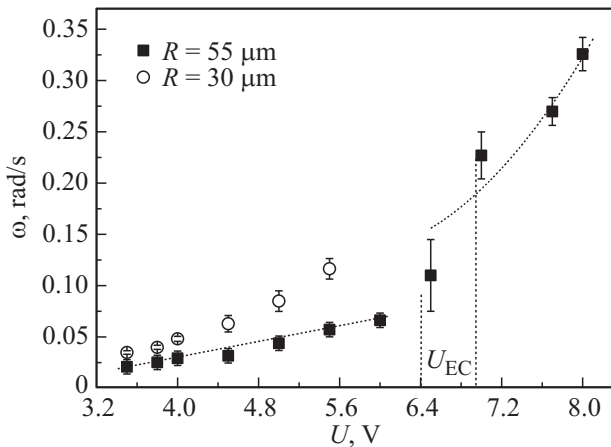
Франка-Прайса для хиральных ЖК каплеы [19] и такие дефектные структуры наблюдаются довольно часто в слабозакрученных нематиках и холестериках [20,21]. При приложении электрического поля ориентационная структура этих каплеы становится неустойчивой и при достижении порогового значения напряжения  $U \sim 1.5 \text{ V}$  она начинает вращаться как целое; при этом направление вращения может быть как по часовой стрелке, так и против для данной величины переменного электрического поля. На рис. 2 представлены экспериментальные зависимости угловой скорости вращения дефекта для каплеы ЖК с шагом геликоида  $P = 72 \mu\text{m}$  двух размеров — радиусами  $R_1 \sim 55 \mu\text{m}$  и  $R_2 \sim 30 \mu\text{m}$ . Из анализа этих зависимостей следует, что угловая скорость вращения ориентационной структуры растет с напряжением, причем в каплях меньшего размера скорость вращения выше. Кроме того, можно выделить две области на кривой зависимости  $\omega(U)$  (рис. 2) для каплеы с  $R \leq 55 \mu\text{m}$ , которые разделены точкой перегиба при  $U \sim 6.4 \text{ V}$ . В области напряжений  $U \leq 6.4 \text{ V}$  вращение дефектной структуры капли может быть связано с электромеханическим эффектом [22], когда угловая скорость  $\omega \sim E$ ,

$$\frac{d\phi}{dt} = \frac{v_e E}{3\gamma_1} \approx U, \quad (1)$$

где  $v_e$  — коэффициент электромеханического сцепления,  $\gamma_1$  — динамический коэффициент вязкости нематохолестерического ЖК. Как следует из выражения (1),



**Рис. 1.** Микрофотографии каплеы нематохолестерического ЖК с одним поверхностным дефектом: (а) шаг спирали  $P = 72 \mu\text{m}$ , (б)  $P = 54 \mu\text{m}$ ; на (с) модель строения каплеы Франка-Прайса (радиус каплеы  $R \sim 50 \mu\text{m}$ ).



**Рис. 2.** Зависимость угловой скорости вращения дефектной структуры от приложенного напряжения  $U$  для нематохолестерика с шагом  $P = 72 \mu\text{m}$ ;  $U_{EC}$  — порог электрогидродинамической неустойчивости.

угловая скорость  $\omega \sim E$ , а значит также  $\omega \sim U$ , что достаточно хорошо согласуется с экспериментом (рис. 2). При значениях  $6.4 < U < 7.0 \text{ V}$  имеет место переходная область включения электроконвективного механизма, при котором угловая скорость вращения  $\omega \sim U^2$ . Такое поведение качественно согласуется с решением уравнения Навье–Стокса с учетом электрических сил в приближении изотропной жидкости [23]

$$\eta \Delta v = E \delta q, \tag{2}$$

здесь  $\eta$  — обычный коэффициент вязкости,  $v$  — конвективная скорость,  $\delta q$  — аккумулярованный связанный объемный заряд в ЖК за счет анизотропии проводимости. С учетом уравнения Пуассона

$$\text{div } \mathbf{E} = \frac{1}{\epsilon} \delta q \tag{3}$$

из (2) и (3) следует

$$v \approx E^2 \approx U^2. \tag{4}$$

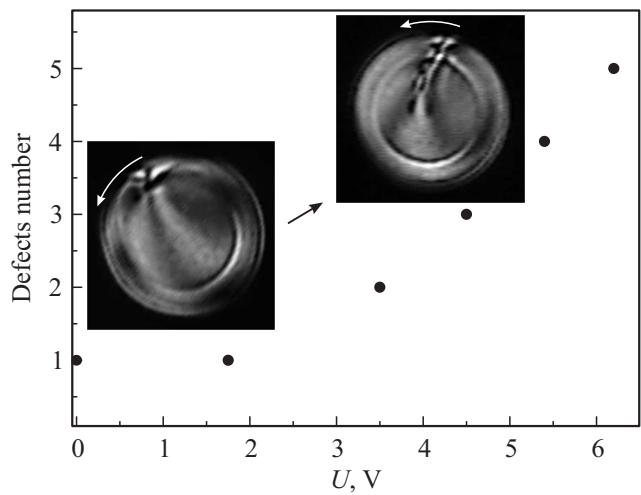
А поскольку в общем случае в циклическую частоту  $\omega$  имеется вклад скорости электроконвективного движения, то для нее из выражения (4) получаем качественную оценку

$$\omega \approx v \approx U^2. \tag{5}$$

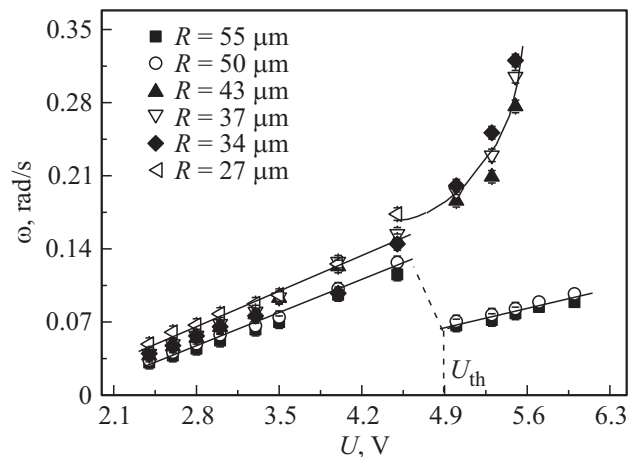
Последнее хорошо коррелирует с экспериментальной зависимостью для  $U \geq 7.0 \text{ V}$  (рис. 2).

3.2. Динамика дефектов и циклические процессы в каплях с  $R/P \geq 1$ . Если увеличить соотношение  $R/P$  до значений  $\sim 1$  и более, например, выбрав смесь с шагом спирали  $P = 54 \mu\text{m}$  и  $25 \leq R \leq 40 \mu\text{m}$ , то в таких каплях в электрических полях наблюдаются более сложные процессы. В частности, дефект с зарядом  $m = 2$  с увеличением электрического поля начинает „диссоциировать“ и трансформируется в

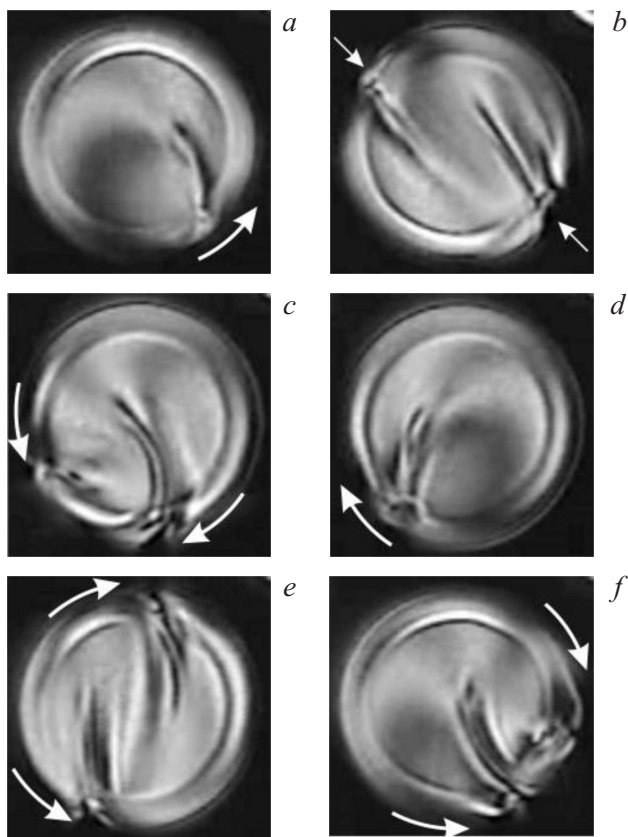
цепочку дисклинаций единичной силы  $|m| = 1$  (рис. 3). Заметим, что диссоциация дисклинации Франка–Прайса на два поверхностных дефекта силой  $m = 1$  экспериментально описана еще в [21]. Здесь же обнаружено, что количество дисклинаций в цепочке зависит от величины электрического поля, но должно удовлетворять ограничениям, определяемым теоремами Пуанкаре и Гаусса [8] и, с этой точки зрения, цепочка представляет собой систему чередующихся дефектов разного знака. Кроме того, вся эта система дефектов также продолжает вращаться как целое, а скорость вращения зависит от величины приложенного электрического напряжения  $U$  (рис. 4).



**Рис. 3.** Зависимость количества дефектов в цепочке от приложенного напряжения  $U$  в каплях нематохолестерика с шагом  $P = 54 \mu\text{m}$ .



**Рис. 4.** Зависимость угловой скорости вращения цепочки дисклинаций от приложенного напряжения  $U$  для капель нематохолестерика с шагом спирали  $P = 54 \mu\text{m}$  и различными радиусами  $R = 27, 34, 37, 43, 50$  и  $55 \mu\text{m}$ .  $U_{th}$  — пороговое напряжение смены режима вращения цепочки дисклинаций на циклический процесс распада дефекта с  $m = 2$  на две дисклинации с  $m = 1$  при возрастании электрического поля для капель размером  $R/P \sim 1$ .



**Рис. 5.** Микрофотографии процесса циклического взаимопревращения дефектов в каплях нематохолестерика для случая  $R/P \sim 1$  при напряжении  $U = 5.5 \text{ V}$ . Стрелками показаны поверхностные дисклинации  $m = 1$  и направления их движения ( $R = 54 \mu\text{m}$ ).

Следует подчеркнуть, что в зависимости от размера капля наблюдаются два различных пути эволюции дефектной структуры при возрастании электрического поля. Для каплей, имеющих размер, удовлетворяющий соотношению  $R/P$  порядка или немного меньше 1 (при  $R \sim 54 \mu\text{m}$ ), имеет место переход к нелинейному характеру изменения циклической частоты  $\omega$  вращения системы дефектов, который, по-видимому, связан с близостью развития электроконвективных процессов. В случае же совпадения величин радиуса капли и шага спирали, т.е. при  $R/P \sim 1$  и более, дефектная структура капли становится неустойчивой и наблюдается циклический процесс периодического распада дефекта силой  $m = 2$  на две дисклинации силой  $m = 1$  (рис. 5); это происходит по достижении порогового значения напряжения  $U_{th} \sim 4.7 \text{ V}$  следующим образом. В некоторый момент времени дефект силой  $m = 2$  (рис. 5,а) распадается на два диаметрально расположенных поверхностных дефекта силой  $m = 1$  (рис. 5,б), которые начинают двигаться друг к другу (рис. 5,с) вплоть до слияния (рис. 5,д), после чего снова возникают два дефекта с  $m = 1$  (рис. 5,е), которые взаимодействуя, образуют дефект силой  $m = 2$  (рис. 5,ф) и цикл завершается.

На графике зависимости циклической частоты вращения системы дисклинаций от напряжения  $\omega(U)$  (рис. 4), этой стадии соответствует скачок частоты  $\omega$  (для капель размером  $R \geq 50 \mu\text{m}$ ) в сторону ее уменьшения. Для более же мелких капель, как отмечалось выше, при  $U \geq U_{th}$  характерен нелинейный рост скорости вращения дисклинационной линии как целого и отсутствие процессов распада и образования цепочки дисклинаций.

#### 4. Заключение

Проведенные исследования показали, что в каплях слабозакрученного нематического жидкого кристалла с добавкой холестерика, диспергированных в изотропной среде, в результате воздействия электрического поля могут формироваться самые различные ориентационные структуры в зависимости от отношения шага спирали к радиусу капли.

Так, для сплюснутых капель НХЖК с  $R/P < 1$  реализуется классическая конфигурация поля директора Франк–Прайс структура с дисклинацией силой  $m = 2$ , которая при приложении электрического поля и достижении порогового значения электрического поля  $U \sim 1.5 \text{ V}$  начинает вращаться. При увеличении отношения  $R/P$  в каплях до значений  $\geq 1$  в электрических полях наблюдаются более сложные процессы. В частности, с увеличением электрического поля наблюдается „диссоциация“ дефекта силой  $m = 2$  в цепочку дисклинаций силой  $|m| = 1$ . Вся эта цепочка дефектов также продолжает вращаться как единое целое. Для таких капель с  $R/P \leq 1$  имеет место переход к нелинейному характеру изменения частоты  $\omega$  вращения системы дефектов, который, по-видимому, связан с „включением“ механизма электрогидродинамической неустойчивости, а при  $R/P \geq 1$  и  $U_{th} \geq 4.7 \text{ V}$  наблюдается циклический процесс периодического распада дефекта силой  $m = 2$  на две дисклинации силой  $m = 1$ .

#### Список литературы

- [1] J.W. Doane, A. Golemme, J.L. West, J.B. Whitehead, B.G. Wu. *Mol. Cryst. Liq. Cryst.* **165**, 511 (1988).
- [2] А.В. Ковальчук, М.В. Курик, О.Д. Лаврентович. *Зарубежная радиоэлектроника* **5**, 44 (1989).
- [3] Г.М. Жарков, А.С. Сонин. *Жидкокристаллические композиты*. Наука, Новосибирск (1994). 224 с.
- [4] S.J. Klosowicz, J. Zmija. *Opt. Eng.* **34**, 3440 (1995).
- [5] G.P. Crawford, S. Zumer. *Liquid Crystals in Complex Geometries*. Taylor & Francis, London (1996). 584 p.
- [6] M. Jamil, F. Ahmad, J.T. Rhee, Y.J. Jeon. *Curr. Sci.* **101**, 1544 (2011).
- [7] Г.Е. Воловик, О.Д. Лаврентович. *ЖЭТФ* **85**, 1997 (1983).
- [8] М.В. Курик, О.Д. Лаврентович. // *УФН* **154**, 381 (1988).
- [9] P.S. Drzaic. *Liquid Crystal Dispersions*. World Scientific Publ., Singapore (1995). 448 p.
- [10] E. Dubois-Violette, P.G. de Gennes. *J. Phys. Lett. (France)* **36**, L-255 (1975).
- [11] G. Ryschenkow, M. Kleman. *J. Chem. Phys.* **64**, 404 (1976).

- [12] В.С. Сутормин, М.Н. Крахалев, О.О. Прищепа. Журн. СФУ. Математика и физика **2**, 352 (2009).
- [13] О.О. Прищепа, А.В. Шабанов В.Я. Зырянов. Письма в ЖЭТФ **79**, 315 (2004).
- [14] O.O. Prischepa, A.V. Shabanov, V.Ya. Zyryanov. Mol. Cryst. Liq. Cryst. **438**, 141 (2005).
- [15] O.O. Prischepa, A.V. Shabanov, V.Ya. Zyryanov. Phys. Rev. E **72**, 031 712 (2005).
- [16] В.Я. Зырянов, М.Н. Крахалев, О.О. Прищепа, А.В. Шабанов. Письма в ЖЭТФ **86**, 440 (2007).
- [17] О.А. Скалдин, Ю.И. Тимиров, Ю.А. Лебедев. Письма в ЖТФ **36**, 23 (2010).
- [18] Ю.И. Тимиров, О.А. Скалдин, Е.Р. Гареева. Письма в ЖТФ **39**, 36 (2013).
- [19] C. Robinson, J.C. Ward, R.B. Beevers. Disc. Faraday Soc. **25**, 29 (1958).
- [20] Y. Bouligand, F. Livolant. J. Phys. (France) **45**, 1899 (1984).
- [21] F. Xu, P.P. Crooker. Phys. Rev. E **56**, 6853 (1997).
- [22] N.V. Madhusudana, R. Pratibha. Liq. Cryst. **5**, 1827 (1989).
- [23] Л.М. Блинов. Электро- и магнитооптика жидких кристаллов. Наука, М. (1978). 384 с.