

## НАБЛЮДЕНИЕ ЭЛЕКТРОКОНВЕКЦИИ В НЕМАТИЧЕСКИХ ЖИДКИХ КРИСТАЛЛАХ РЕНТГЕНОИНТЕРФЕРОМЕТРИЧЕСКИМ МЕТОДОМ

Л.Г. ГАСПАРЯН, В.П. МКРТЧЯН\*, Р.А. АЛАВЕРДЯН, Т.М. САРУХАНЯН

Ереванский государственный университет, Ереван, Армения

\*e-mail: vmkrtchyan@ysu.am

(Поступила в редакцию 30 марта 2021 г.)

Методом рентгеновской интерферометрии зарегистрировано электроконвекционное (ЭК) явление, возникающее в нематических жидких кристаллах (НЖК) типа E7 под влиянием внешнего электрического поля. Изучен характер показателей преломления обыкновенной ( $n_o$ ) и необыкновенной ( $n_e$ ) волн и определен момент возникновения ЭК в НЖК. Показано, что возникновение ЭК происходит, когда значения  $n_o$  и  $n_e$  совпадают. Показано также, что в НЖК типа E7, где отсутствуют свободные носители заряда, под влиянием внешнего эл. поля, может возникнуть ЭК явление как следствие образования связанных зарядов.

### 1. Введение

В работе [1] рентгеноинтерферометрическим методом изучено влияние внешнего электрического поля на анизотропию слоя нематического жидкого кристалла типа E7, определены показатели преломления обыкновенной ( $n_o$ ) и необыкновенной ( $n_e$ ) волн и показано, что такой образец является положительной анизотропной средой. Были вычислены декременты слоя НЖК для обыкновенного и необыкновенного лучей при определенном значении напряженности электрического поля ( $E = 5.5 \times 10^5$  В/м). Установлено что эти декременты почти равны. В работе [2,3] исследовано влияние электрического поля на реориентацию молекул НЖК и была измерена время релаксации молекул.

В работе [4] рассматривалось влияние электрического поля на показатели преломления обыкновенного и необыкновенного лучей и изучена рентгенооптическая анизотропия НЖК типа E7. Была измерена также зависимость коэффициента Керра от значения напряженности внешнего электрического поля.

Жидкие кристаллы являются интересным классом веществ, в которых проявляются красивые эффекты влияния электрического поля на среду. Особенностью данных сред является поле директора  $\mathbf{n}$ , указывающего направление ориентации длинных молекулярных осей [5]. Нематические жидккие кристаллы (НЖК), являясь слабопроводящими средами и обладая свойством анизотропии, во внешнем переменном электрическом поле демонстрируют возможность

образования периодических пространственных структур. Это явление называется электроконвективной неустойчивостью.

Электроконвекция [6] (ЭК) в нематических жидкких кристаллах, открытая в 1963 г. автором Р.Виллиамсом [7], представляет собой интересный и важный объект исследования не только в связи с его богатым структурообразования, но также из-за его важности для промышленного применения. ЭК представляет собой диссипативную структуру, возникающую из гидродинамической неустойчивости как следствие взаимодействия между внешней движущей силой и внутренней диссипативной динамикой, основанной на переходах между однородными и более сложными динамическими состояниями. В работах [8,9] изучена электроконвекция нематического жидкого кристалла в переменном электрическом поле.

В работе [4] было обнаружено, что с увеличением напряженности электрического поля значения декрементов обыкновенной и необыкновенной волн увеличиваются, стремясь к одному и тому же значению (см. точка А на рис. 4). Это обусловлено тем, что под влиянием электрического поля молекулы НЖК постепенно переориентируются, и, начиная с определенного значения напряженности электрического поля, распределяются параллельно эл. полю и имеют одинаковую ориентацию ( $\mathbf{N} \parallel \mathbf{E} \parallel \mathbf{K} \perp \boldsymbol{\sigma}$ ).

В настоящей работе исследован характер поведения двойного лучепреломления рентгеновских лучей (излучение MoKa<sub>1</sub> ( $\lambda=0.709\text{\AA}$ )) в НЖК типа E7, когда напряжение внешнего эл. поля намного больше того значения напряжения, при котором показатели преломления обыкновенного и необыкновенного лучей совпадают ( $E = 5.5 \times 10^5 \text{ В/м}$ ). Предполагается, что для высоких значений Е в НЖК возникают электроконвекция и диссипативная структура, возникающая из-за гидродинамической неустойчивости.

## 2. Описание эксперимента

Для измерения показателей преломления  $n_o$  и  $n_e$  используется Лауз LLL интерферометр, НЖК ячейка помещается в LLL интерферометре (рис.1). Измеряя смещение линий муара относительно исходного положения без НЖК, можно определить показатель преломления образца.

Смещения муаровых полос зависят также от взаимного расположения вектора  $\sigma$ -поляризации рентгеновской волны и оптической оси исследуемого образца. Если оптическая ось ( $\mathbf{N}$ ) перпендикулярна плоскости дифракции и нормали к волновому фронту ( $\mathbf{K}$ ) рентгеновской волны, проходящей через образец, то вектор  $\sigma$ -поляризованной волны ( $\boldsymbol{\sigma}$ ) будет параллелен главному сечению (плоскости, проходящей через нормаль к волновому фронту и оптическую ось) а, следовательно, и оптической оси. Волна будет себя вести как необыкновенная волна с показателем преломления  $n_e$ . Если образец повернуть на  $90^\circ$  относительно нормали к волновому фронту волны, то оптическая ось образца будет находиться в плоскости дифракции, и вектор  $\sigma$ -поляризованной волны ( $\boldsymbol{\sigma}$ ) будет

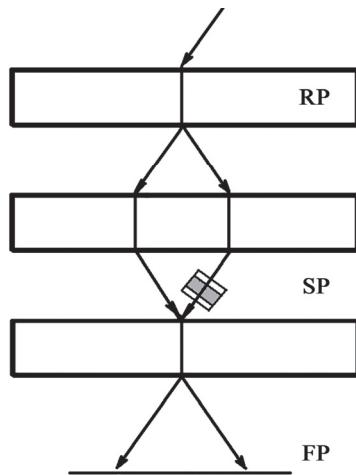


Рис.1. Ход лучей в LLL-интерферометре: RP – отражающие плоскости блоков, SP – исследуемый образец, FP – фотографическая пленка.

перпендикулярен главному сечению, а, следовательно, и оптической оси. Волна будет себя вести как обыкновенная волна с показателем преломления  $n_o$ .

Исследуемый образец НЖК типа E7 толщиной 20 мкм капиллярным методом заполняется в ячейку, которая состоит из двух прозрачных стеклянных подложек, покрытых тонким электропроводящим слоем ITO (Indium Tin Oxide), с помощью которых к НЖК прилагалось электрическое поле. С помощью натирания молекулам НЖК задавалась ориентация, параллельная подложкам ячейки. Для реориентации молекул НЖК на подложки с помощью генератора сигналов прилагалось электрическое поле с частотой 1 кГц, вектор напряженности которого перпендикулярен вектору поляризации и волновому фронту. Для измерения  $n_o$  и  $n_e$  эксперименты проводились для двух случаев, представленных на рис. 2 и 3.

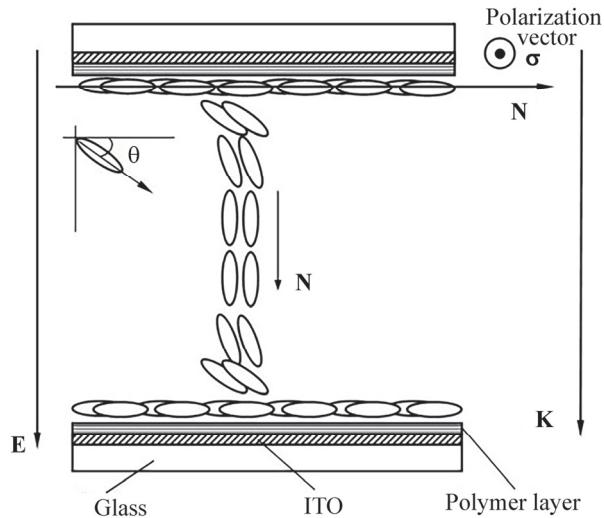


Рис.2. Схематическое изображение образца НЖК в случае, когда оптическая ось (N) перпендикулярна вектору поляризации ( $\sigma$ ) и волновому вектору (K).

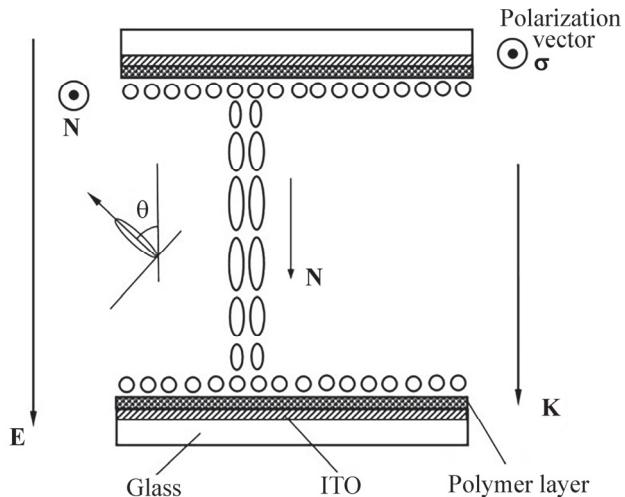


Рис.3. Схематическое изображение образца НЖК в случае, когда оптическая ось (**N**) параллельна вектору поляризации (**σ**) и перпендикулярна волновому вектору (**K**).

В первом случае при приложении электрического поля, вектор напряженности которого перпендикулярен оптической оси, молекулы реориентируются параллельно вектору напряженности (**E**) и волновому вектору (**K**), оставаясь перпендикулярными вектору поляризации (**σ**).

Во втором случае во время приложения электрического поля, вектор напряженности которого перпендикулярен оптической оси, молекулы реориентируются параллельно вектору напряженности и волновому вектору и перпендикулярно вектору поляризации, то есть под действием электрического поля в обоих случаях оптическая ось ЖК, в конечном счете, имеет одинаковую ориентацию (**N**||**E**||**K**⊥**σ**). Для этого, как показано в работе [4], с увеличением напряженности электрического поля в обоих случаях показатели преломления стремятся к одному и тому же значению. Это соответствует значению  $E = 5.5 \times 10^5$  В/м. Ождалось, что при дальнейшем увеличении значения  $E$  показатели преломления  $n_o$  и  $n_e$  должны были оставаться равными, так как не меняется условие (**N**||**E**||**K**⊥**σ**). Но, когда продолжаем увеличивать напряжение эл. Поля, наблюдается неоднородное смещение муаровых линий (рис.4), то есть  $n_o$  и  $n_e$  не сохраняют устойчивость. Это объясняется тем, что в НЖК начинают возникать гидродинамические неустойчивости, что и приводит к своеобразному ЭК явлению.

Измеряя период и смещение муаровых линий при разных значениях напряженности электрического поля, можно определять декременты показателей преломления:  $\delta = \lambda \Delta\Lambda / (t\Lambda)$ , где  $\lambda$  – длина волны MoKa<sub>1</sub>-излучения;  $\Delta\Lambda$  – относительное смещение муаровых полос;  $\Lambda$  – период муара;  $t$  – толщина слоя НЖК. Результаты измерений приведены на рис.5.

Чтобы объяснить поведение показателей преломления обычновенной ( $n_o$ ) и необыкновенной ( $n_e$ ) волн НЖК, полученных с помощью рентгеновского

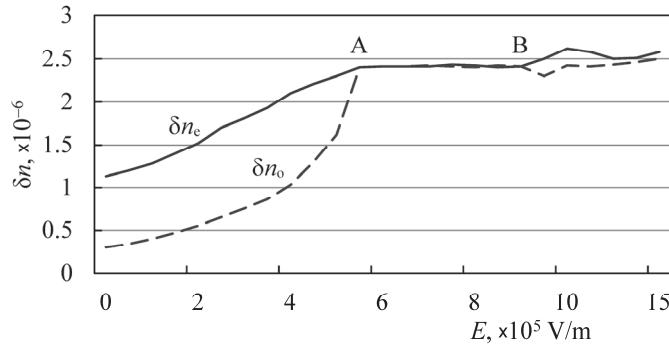


Рис.4. Зависимость значений декрементов обыкновенного и необыкновенного лучей от напряженности электрического поля.

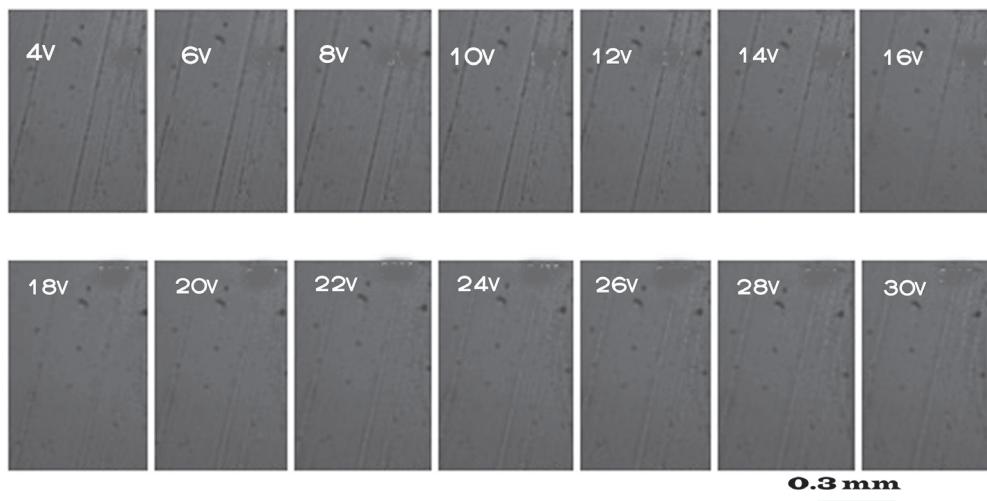


Рис.5. Потоки, генерируемые в образце НЖК при разных значениях напряженности внешнего электрического поля.

интерферометра, НЖК помещали под поляризационный микроскоп со скрещенными поляризаторами так, чтобы пропускание света через образец было максимальным. Потом к образцу прикладывали переменное электрическое поле с амплитудой до 30 В и частотой 1КГц, чтобы зафиксировать структурные изменения, происходящие в НЖК (см. рис.5). Из этих рисунков видно, что потоки в структуре НЖК возникают, начиная с напряжения 12 В ( $E = 5.5 \times 10^5$  В/м), то есть наблюдается явление электропонвекции. Для описания этого явления НЖК следует рассматривать как сложную систему, состоящую из анизотропных молекул и носителей электрического заряда. Под действием высокочастотного переменного поля в НЖК возникает электрогидродинамическая неустойчивость, которая приводит к так называемой модуляции структуры НЖК от определенного значения поля, что связано с неоднородной ориентацией директора. Влияние переменного электрического поля с относительно высокой частотой, большей обратного времени релаксации объемного заряда, на НЖК приводит к возникновению особого типа неустойчивости.

Выше порога неустойчивости в НЖК возникает модулированная структура, связанная с неоднородной ориентацией директора. Характерной особенностью данного эффекта является зависимость порога его возникновения от частоты. В таком диэлектрическом состоянии поле изменяется быстро, поэтому заряд не успевает релаксировать и не меняет знака, а распределения возмущений директора и скорости течения изменяются с частотой внешнего поля. На оптической картине образца в таком случае темные и светлые полосы меняются в пространстве местами через полпериода [8]. С другой стороны, при увеличении величины напряжения могут происходить более сложные изменения в структуре, приводящие к нестабильным потокам [10]. Подобные структурные нестабильности наблюдались в наших экспериментах, что демонстрируется на рисунках, полученных под микроскопом (см. рис.5). В случае малых значений напряжения директоры жидкого кристалла имеют тенденцию быть ориентированными параллельно электрическому полю. Небольшое изменение внешнего электрического поля не может нарушить ориентацию поля директоров. Известно, что чистые НЖК являются диэлектриками. В случае наличия свободных носителей зарядов в НЖК, под действием внешнего электрического поля, возможно нарушение полей ориентации директоров, в результате чего возникают электроконвективные потоки. Однако было показано, что в чистом НЖК также могут возникать электроконвективные потоки, поскольку заряженные молекулы НЖК (так называемые связанные заряды, которые возникают в результате выравнивания поляризованных молекул жидкого кристалла в ответ на действие внешнего электрического поля) также могут взаимодействовать с внешним полем, что приводит к возникновению потоков в НЖК [10]. То есть в ЖК образуются домены с объемным зарядом. Домен, который имеет объемный заряд, является равномерной субсредой образующейся в неравномерной среде. Этот домен противодействует внешнему воздействию, в результате чего и возникает ЭК явление.

### 3. Заключение

Установлено, что методом рентгеновской интерферометрии можно регистрировать электроконвекционное явление возникающее в НЖК типа Е7 под влиянием внешнего электрического поля. То есть, с помощью ЛЛЛ интерферометра, измеряя  $n_o$  и  $n_e$  и изучая их природу (характер), можно определить момент возникновения ЭК в НЖК.

Показано, что момент возникновения ЭК совпадает с моментом, когда значения декрементов обычного и необычного лучей, которые с увеличением напряженности эл. поля совпадали (промежуток АВ на рис.4), при дальнейшем увеличении Е (начиная со  $E = 9 \times 10^5$  В/м) не сохраняется.

Показано также, что в НЖК типа Е7, где отсутствуют свободные носители заряда, под влиянием внешнего эл. поля, может возникнуть ЭК явление как следствие образования связанных зарядов.

## ЛИТЕРАТУРА

1. **L.G. Gasparyan, V.P. Mkrtchyan, T.K. Dadalyan.** J. Contemp. Phys., **52**, 271 (2017).
2. **P.D. Berezin, I.N. Kompanets, V.V. Nikitin, S.A. Pikin,** Zh. Eksp. Teor. Fiz., **64**, 599 (1973).
3. **T. Ohtsuka, M. Tsukamoto,** J. of Appl. Phys., Japan, **10**, 1046 (1971).
4. **L.G. Gasparyan, V.P. Mkrtchyan, T.K. Dadalyan, P.S. Petrosyan.** J. Contemp. Phys., **54**, 376 (2019).
5. **С.А. Пикин.** Структурные превращения в жидких кристаллах. Москва, Наука, 1981.
6. **P.H. Roberts.** Quart. J. Mech. Appl. Math., **22**, 211 (1969).
7. **R. Williams.** J. Chem. Phys., **39**, 384 (1963).
8. **Н.Н. Картавых, А.Н. Мордвинов, Б.Л. Смородин.** Вестник Пермского университета, **1(17)**, 22 (2008).
9. **А.Н. Мордвинов, Б.Л. Смородин.** Журнал технической физики, **79**, 59, (2009).
10. **K.-W. Lee, T. Poschel.** Soft Matter, **13**, 8816 (2017).

ՈԵՆՏԳԵՆԱԲՆՏԵՐՖԵՐՈՒՄԵՏՐԻԿ ԵՂԱՍԱԿՈՎ ՆԵՄԱՏԻԿ ՀԵՂՈՒԿ  
ԲՅՈՒՐԵԴՆԵՐՈՒՄ ԷԼԵԿՏՐԱԿՈՆՎԵԿՑԻՈՆ ԵՐԵՎՈՒՅԹԻ  
ՈՒՍՈՒՄՆԱԾՈՒԹՅՈՒՆԸ

Լ.Գ. ԳԱՍՊԱՐՅԱՆ, Վ.Պ. ՄԿՐՏՉՅԱՆ, Ռ.Ա. ԱԼԱՎԵՐԴՅԱՆ, Տ.Մ. ՍԱՐՈՒԽԱՆՅԱՆ

Ունտագենախնտերֆերումետրիկ մեթոդով E7 տիպի նեմատիկ հեղուկ բյուրեղներում (ՆՀԲ) հետազոտված է էլեկտրոկոնվեկցիայի երևոյթի առաջացումը արտաքին էլեկտրական դաշտի ազդեցությամբ: Ուսումնասիրված է սովորական ( $n_o$ ) և անսովոր ( $n_e$ ) ալիքների բեկման ցուցիչների վարքը և որոշված է էլեկտրոկոնվեկցիայի երևոյթի առաջացման պահը: Ցույց է տրված, որ էլեկտրոկոնվեկցիայի երևոյթը առաջանում է, եթե  $n_o$ -ն և  $n_e$ -ն հավասարվում են: Ցույց է տրված նաև, որ E7 տիպի ՆՀԲ-ում որոնցում բացակայում են ազատ լիցվակիրները, էլեկտրական դաշտի ազդեցությամբ կարող է առաջանալ էլեկտրոկոնվեկցիա որպես կապված լիցքերի առաջացման հետևանք:

## OBSERVATION OF ELECTROCONVECTION IN NEMATIC LIQUID CRYSTALS BY X-RAY INTERFEROMETRIC METHOD

L.G. GASPARYAN, V.P. MKRTCHYAN, R.A. ALAVERDYAN, T.M. SARUKHANYAN

The electroconvection (EC) phenomenon arising in nematic liquid crystals (NLC) of type E7 under the influence of an external electric field was recorded by the method of X-ray interferometry. The character of the refractive indices of the ordinary ( $n_o$ ) and extraordinary ( $n_e$ ) waves is studied, and the moment of the appearance of EC in the NLC is determined. It is shown that the phenomenon of electroconvection occurs when  $n_o$  and  $n_e$  tending to the same value. It is also shown that in the E7 type NLC, where there are no free charge carriers, under the influence of an external el. field, an EC phenomenon can occur as a result of the formation of bound charges.