

УДК 53

О. А. Денисова, А. Н. Чувывров\*

**РЕЛАКСАЦИЯ ДИРЕКТОРА ПРИ АЗИМУТАЛЬНОЙ  
НЕСТАБИЛЬНОСТИ ЖИДКИХ КРИСТАЛЛОВ**

**RELAXATION OF DIRECTOR AT LIQUID CRYSTALS  
AZIMUTHAL INSTABILITY**

Уфимская государственная академия экономики и сервиса, кафедра физики,  
450078 Уфа, ул. Чернышевского, д. 145

\*Башкирский государственный университет, кафедра инженерной физики,  
450074 Уфа, ул. Валиди, д. 32

*Экспериментально исследованы релаксационные процессы в тонких гомеотропно ориентированных слоях нематических жидких кристаллов под действием низкочастотного периодического сдвига (частота воздействия  $\omega \sim 100$  Гц). Обнаружено, что процессы релаксации описываются экспоненциальной временной зависимостью и составляют десятки секунд.*

**Ключевые слова:** нематические жидкие кристаллы, релаксация директора.

*The relaxation processes in thin layers of homeotropically oriented nematic liquid crystals under the action of a periodic low-frequency shift (frequency of exposure of  $\sim 100$  Hz) is experimentally investigated. It is found that the relaxation processes are described by an exponential time dependence and take dozens of seconds.*

**Key words:** nematic liquid crystal, relaxation of director.

Жидкие кристаллы (ЖК) – анизотропные, низкоразмерные, вязкоупругие и чрезвычайно подвижные объекты. В последние годы они все больше активно охватывают сферы деятельности человека. Эти материалы, интенсивно используемые особенно в современной технике отображения информации, проявляют одновременно и свойства твердых тел и жидкостей, сохраняя при этом выделенную анизотропию в пространстве. Существуют одно- и двуосные нематические пленки, структурированные послойно смектические и закрученные холестерические мезофазы. Такие пленки обладают целым рядом свойств, которые делают их очень привлекательными, например, при различных воздействиях внешних полей: электрических, магнитных акустических и температурных градиентах. Эти анизотропные объекты показывают достаточно специфические физические свойства. К ним, в первую очередь, можно отнести переходы Фредерикса, связанные с изменением ориентаций длинных осей молекул при наличии внешних полей, термо- и электроконвекцию при наличии даже слабых полей. Такие мезофазы вещества чрезвычайно чувствительны также и к незначительным изменениям граничных условий, они проявляют эффекты памяти, что позволяет использовать их в современных системах отображения информации, в методах неразрушающего контроля твердых объектов и в медицине.

В настоящее время в области акустики жидких кристаллов развивается перспективное направление – исследование оптических эффектов при акустических течениях жидких кристаллов. Как правило такие исследования проводились на стенде ДЛП (двулучепреломления) с регистрацией переменного сигнала до 100 МГц. Исследование низкочастотной релаксации нематических жидких кристаллов (НЖК) в области частот 1 кГц слабо отражены в отечественной и зарубежной литературе. В основном исследуется частотный диапазон 1 – 100 МГц, где механизмы, определяющие релаксационные процессы, связаны с вращением молекул вокруг длинной оси [1]. В случае низкочастотного сдвига работают вязкоупругие процессы релаксации ориентационного порядка, информация о которых практически отсутствует. В работе [2] исследован эффект азимутальной неустойчивости нематиков, заключающийся в том, что при достижении некоторой критической амплитуды внешнего воздействия директор «выходит» из первоначальной плоскости колебания в третье измерение.

Целью данной работы является экспериментальное исследование низкочастотной акустической релаксации при азимутальной неустойчивости тонких гомеотропных слоев нематиков под действием периодического сдвига после его отключения.

Для регистрации и первичной обработки изучаемых сигналов была собрана экспериментальная установка, основным узлом которой является поляризационно-оптический микроскоп Amplival-Pol U [2]. Измерения проводились в диапазоне звуковых частот 0,02 – 20 кГц. Исследовались нематические слои толщиной до 125 мкм с гомеотропной ориентацией молекул жидкого кристалла. На используемые подложки напылялся металлический хром, который создавал гомеотропную ориентацию. Объектом исследования был выбран жидкий кристалл нематического типа *n*-метоксибензилиден-*n*'-бутиланилин (МБА) с температурным интервалом существования мезофазы 18 – 42 °С. Основным методом изучения был метод интерферометрии двулучепреломления на базе поляризационного микроскопа. Ячейка представляет собой «сэндвич» – это две массивные стеклянные пластины, между которыми помещалась третья стеклянная пластинка из покровного стекла толщиной, меньше расстояния между массивными пластинами. Пластинка из покровного стекла могла свободно совершать колебания в своей плоскости. Прокладки изготавливались из покровного стекла в виде узких полосок. Между пластинами помещался ЖК. Для создания в образце НЖК сдвиговых колебаний мембрана вибратора соединялась при помощи стеклянного волновода. Измерение амплитуды колебаний тонкой подложки ячейки производилось индуктивным способом.

В изучаемой экспериментальной ситуации директор движется в плоскости  $ZY$ , где  $Y$  совпадает с горизонтальной плоскостью и направлением колебания пластины ( $Y \parallel v$ ), а  $Z$  – с нормалью к плоскости ячейки. Такое движение характеризуется углом  $\theta$  (угол отклонения директора от равновесного состояния), отклонение в плоскости  $ZX$  характеризуется углом  $\alpha$  и поворот директора в плоскости  $XV$  – углом  $\varphi'$ .

Для изучения релаксационных процессов при эффекте «выхода» директора из плоскости осцилляции в третье измерение была выбрана ячейка с ЖК-слоем толщиной  $h_c = 105$  мкм, т. к. эта толщина является началом нелинейного роста порога  $a_n$  по толщине. Для этого исследовались релаксационные зависимости оптического сигнала после отключения сдвига при различных временах воздействия  $t_n$  и амплитудах  $a$  (николи скрещены, а направление сдвига совпадало с поляризатором) (рис. 1, 2). На рис. 1 изображены релаксационные зависимости оптического сигнала  $I(t)$  при временах воздействия  $t_n = 5; 10; 15; 20; 30; 40; 50; 60; 90$  с.

Рассмотрим сначала случай самого наименьшего времени воздействия (рис. 1, *a*), т. е. при  $t_n = 5$  с. Из нее следует, что сначала сигнал  $I(t)$  резко падает, а затем медленно релаксирует до нуля. Причем, времена перехода к равновесному гомеотропному состоянию составляют порядка 10 с.

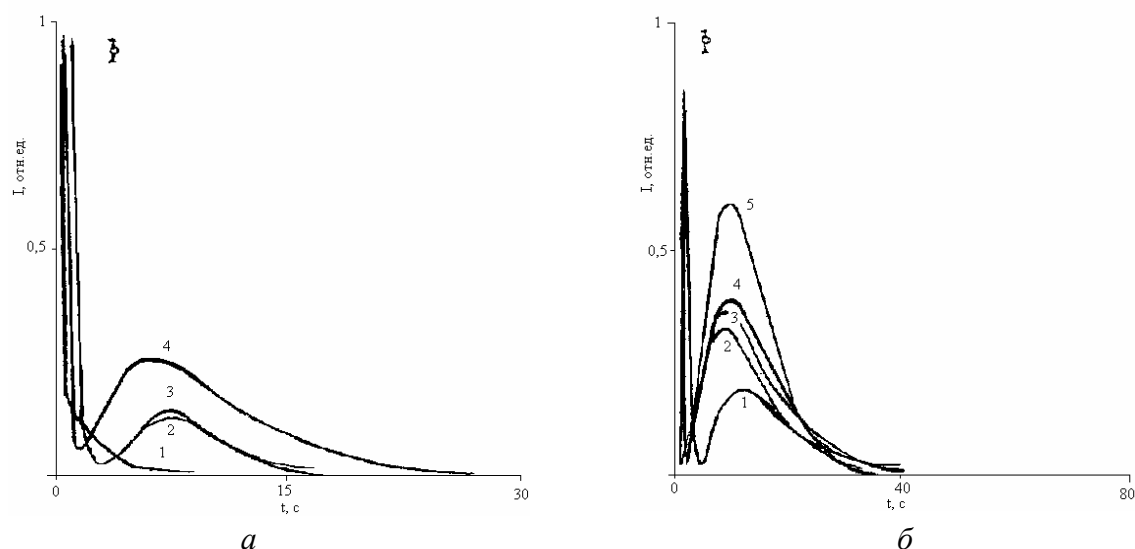


Рис. 1. Временные зависимости оптического сигнала при временах воздействия  $t_n$ : *a* – 1 – 5 с; 2 – 10 с; 3 – 15 с; 4 – 20 с; *б* – 1 – 30 с; 2 – 40 с; 3 – 50 с; 4 – 60 с; 5 – 90 с (при  $a=50$  мкм)

При увеличении времени воздействия до 10 с характер оптического сигнала меняется. С одной стороны, сохраняется начальная фаза резкого спада, с другой стороны – после достижения минимума слой снова просветляется, причем положение максимума интенсивности на временной оси не зависит от времени воздействия как параметра, хотя интенсивность самого максимума растет. Появление просветления связано с развитием *Twist*-моды, влияющей на образование обратных потоков в ЖК. Фактически рост амплитуды максимума отражает также и рост максимального угла «выхода» директора из первоначальной плоскости осцилляции *ZY*. Релаксационные зависимости  $I(t)$  при амплитудах сдвига  $a = 19,4; 21; 22,4; 25,2; 26,6; 28; 30,8; 33,6; 35; 36,4; 39,2; 42; 49; 56$  мкм представлены на рис. 2. Они имеют характер, аналогичный кривым, изображенным на рис. 1, но в отличие от первого случая положение максимума смещается на временной оси в сторону больших времен. По данным временных зависимостей оптического сигнала были рассчитаны зависимости угла поворота директора  $\varphi'$  в плоскости *XU* от амплитуды сдвига, времени воздействия  $t_n$  и релаксационные зависимости  $\varphi'$  после отключения воздействия.

Рассмотрим сначала как зависит максимальный угол поворота  $\varphi'_{max}$  от амплитуды воздействия (время воздействия  $t_n$  фиксировано и равно 50 с) и от времени воздействия при фиксированной амплитуде  $a = 50$  мкм. Это можно сделать по максимальным значениям интенсивности просветления слоя.

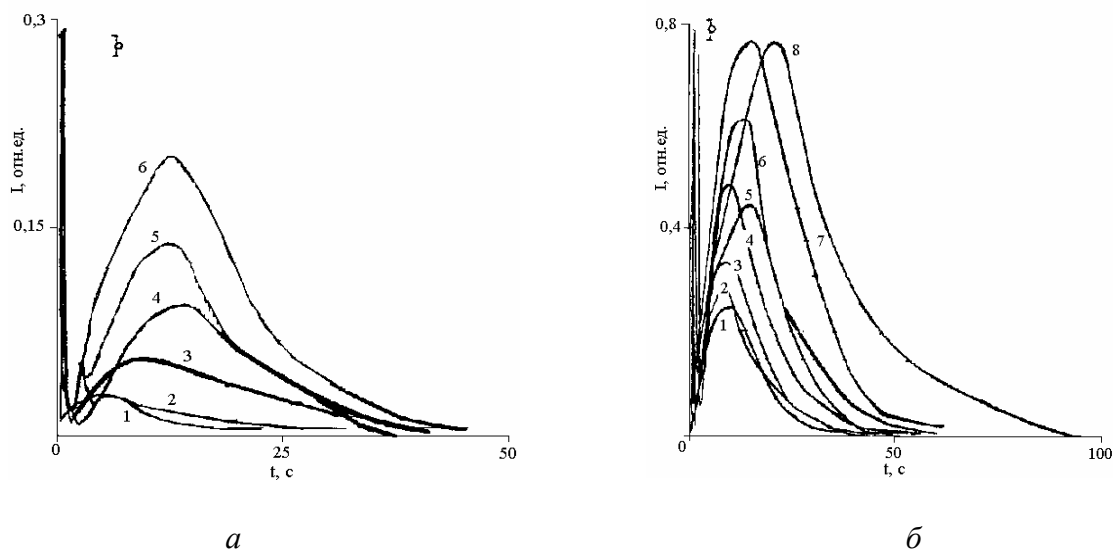


Рис. 2. Временные зависимости оптического сигнала при амплитудах сдвига  $a$  (при  $t_n = 50$  с):  
 $a$  – 1 – 19,4 мкм; 2 – 21 мкм; 3 – 22,4 мкм; 4 – 25,2 мкм; 5 – 26,6 мкм; 6 – 28 мкм;  
 $\bar{b}$  – 1 – 30,8 мкм; 2 – 33,6 мкм; 3 – 35 мкм; 4 – 36,4 мкм; 5 – 39,2 мкм; 6 – 42 мкм;  
 7 – 49 мкм; 8 – 56 мкм

На рис. 3,  $a$  и 3,  $\bar{b}$  представлены зависимости  $\varphi'_{max}(a)$  и  $\varphi'_{max}(t_n)$ . Угол поворота директора в плоскости  $XU$  возрастает от амплитуды сдвига  $a$  и времени воздействия  $t_n$  и стремится к своему максимальному значению в данном диапазоне амплитуд и времен к  $\varphi'_{max} \approx 45^\circ$ , в противном случае, если становится больше  $45^\circ$ , мы должны наблюдать постепенное гашение слоя при  $\varphi'_{max}$  стремящемся к  $90^\circ$ . Однако, такое поведение интенсивность прошедшего света не обнаруживает.

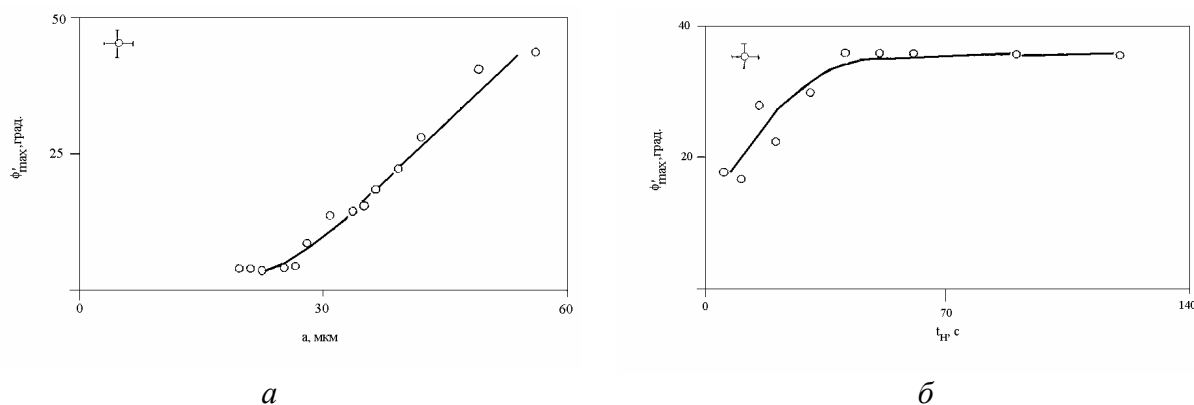


Рис. 3. Зависимости максимальных значений угла поворота директора  $\varphi'_{max}$  в плоскости  $XU$ :  
 $a$  – от амплитуды сдвига при  $t_n = 50$  с,  $\bar{b}$  – времени воздействия при  $a = 50$  мкм  
 ( $h_c = 105$  мкм)

Если зафиксировать амплитуду сдвига  $a$  и менять время воздействия, то получим зависимость угла  $\varphi'_{max}$ , характеризующую временной процесс переориентации директора при включении внешнего воздействия. Эта зависимость обнаруживает тенденцию стремления переориентации директора к  $\varphi'_{max} = 45^\circ$ .

Теперь перейдем к рассмотрению процесса релаксации при больших временах  $t_n \approx 10 - 20$  с. Выше было показано, что в этом случае возникает максимум интенсивности (рис. 1, 2). По ним были построены зависимости угла максимального отклонения директора в плоскости  $XU$ , соответствующие появлению этих максимумов (рис. 4, а, б).

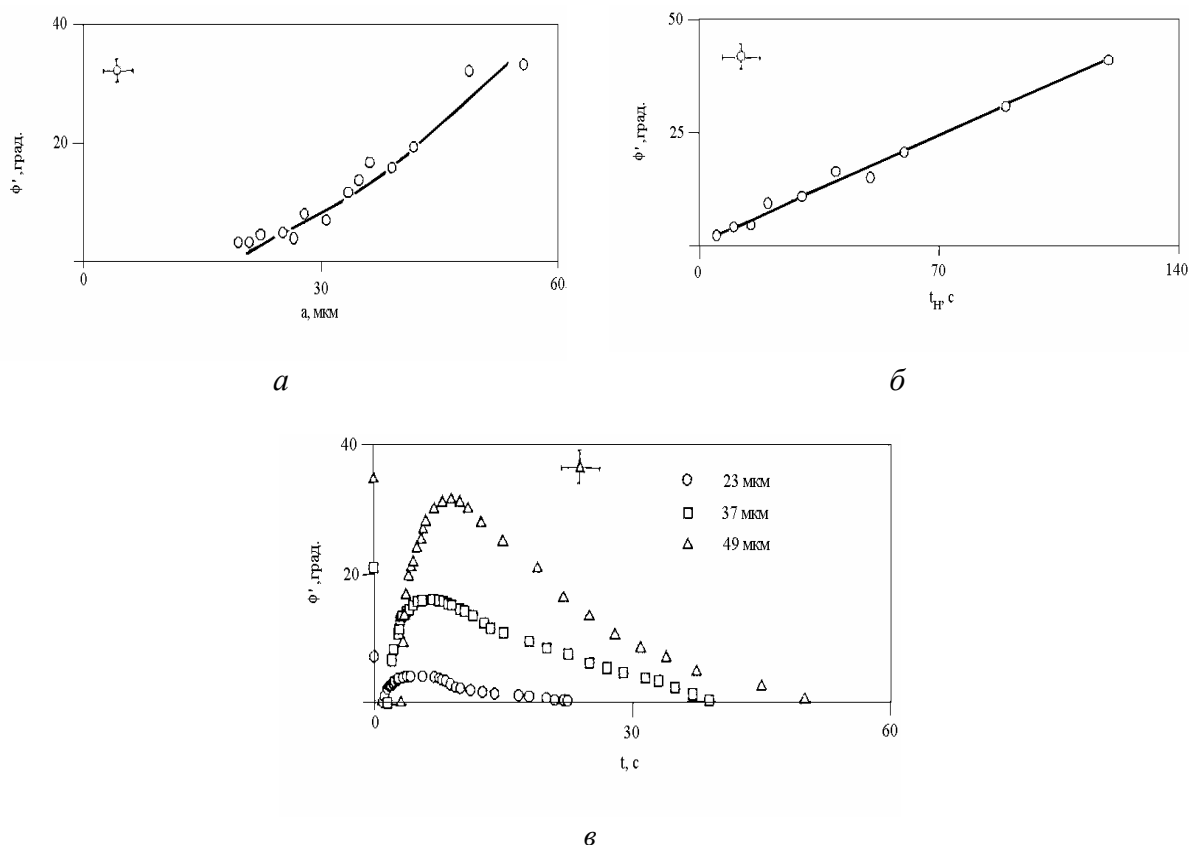


Рис. 4. Зависимости угла поворота директора  $\varphi'$  в плоскости  $XU$ :  
 а – от амплитуды сдвига при  $t_n = 50$  с, б – времени воздействия при  $a = 50$  мкм,  
 в – времени ( $h_c = 105$  мкм)

Поведение угла  $\varphi'(a)$  при фиксированном  $t_n = 50$  с коррелирует с поведением  $\varphi'_{max}(a)$ , рассчитанному по начальной фазе интенсивности прошедшего света после отключения воздействия (рис. 4, а). Рис. 4, б иллюстрирует зависимость того же угла  $\varphi'$  от времени воздействия  $t_n$  при фиксированной амплитуде сдвига  $a$ . Она обнаруживает линейный характер возрастания и, что важно, аппроксимация при  $t_n=0$  дает  $\varphi'$  также равный нулю. Последнее соответствует общему смыслу процесса отклонения директора, т. е. когда  $t_n=0$  должно быть  $\varphi'(t)=0$ . По данным временных зависимостей  $I(t, a_i)$  при  $t_n=const$  были также построены зависимости  $\varphi'(t, a_i)$ , некоторые из которых показаны на рис. 4, в. Из них следует, что  $\varphi'(t)$  достаточно долго релаксирует ( $\approx 20 - 50$  с) до равновесного состояния. По существу, этот процесс аналогичен релаксации при твист-деформации планарно ориентированного НЖК в магнитном поле, и может быть описан уравнением [3]:

$$K_{22} \frac{\partial^2 \theta}{\partial z^2} = \gamma_1 \frac{\partial \theta}{\partial t}.$$

Решение этого уравнения (при любых  $\theta$ ) дает экспоненциальный спад  $\theta$  с набором постоянных времен:

$$\tau_n^{-1} = \frac{K_{22}}{\gamma_1} \left[ \frac{(2n+1)\pi}{d} \right]^2.$$

Оценки времен из этой формулы дают  $\tau_0 \approx 10$  с (при  $n=0$ ) (данные по материальным параметрам взяты из [3, 4]).

Используя данные для оптического сигнала  $I(t)$  (рис. 1, 2), были рассчитаны зависимости времен релаксации от амплитуды сдвига  $a$ , времени воздействия  $t_n$  и толщины ЖК-слоя  $h_c$ . Из рис. 5, *a* следует, что времена релаксации  $\tau$  линейно зависят от амплитуды сдвига. Анализируя зависимость времени релаксации  $\tau$  от времени воздействия  $t_n$ , можно сделать вывод, что эта величина сначала резко нарастает, затем выходит на плато (рис. 5, *б*), и аналогична поведению времени релаксации  $\tau$  при процессе образования стационарного угла наклона директора под действием сдвига [2]. На рис. 5, *в* показаны зависимости времен релаксации  $\tau$  при амплитудах сдвига  $a = 28; 42; 52; 70; 84$  мкм и  $t_n = const$  от толщины ЖК-слоя  $h_c$ . Сравнение рассматриваемой величины с аналогичным поведением  $\tau(h_c)$  для процесса образования стационарного угла наклона директора показывает их достаточно хорошую корреляцию.

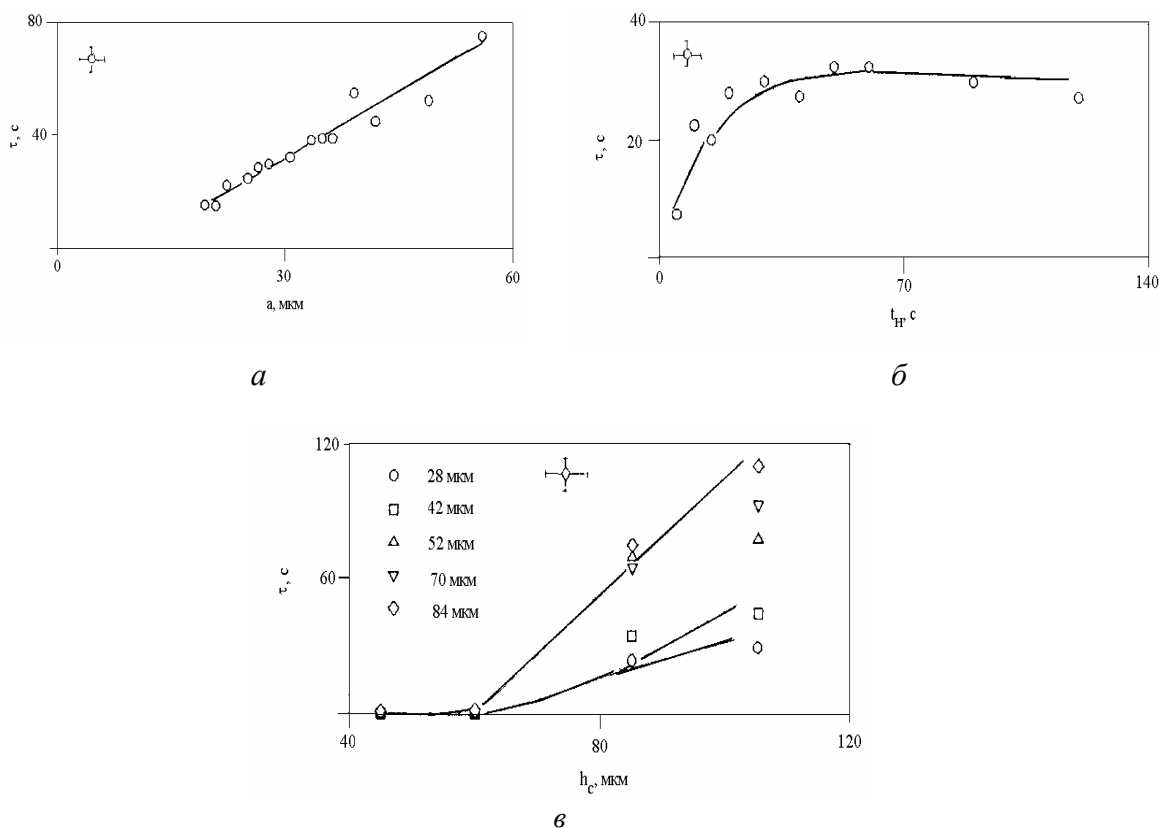


Рис. 5. Зависимости времен релаксации  $\tau$  от: *a* – от амплитуды сдвига при  $t_n = 50$  с, *б* – времени воздействия при  $a = 50$  мкм, *в* – толщины ЖК-слоя

Таким образом, в данной работе исследованы релаксационные процессы реориентации директора после отключения воздействия при различных параметрах: от времени воздействия  $t_n$  при фиксированном значении амплитуды сдвига  $a$ , от амплитуды воздействия  $a$  при фиксированном значении  $t_n$  от толщины ЖК-образца  $h_c$ . Получены зависимости времен релаксации  $\tau$  от амплитуды сдвига, времени воздействия  $t_n$  и толщины ЖК-слоя  $h_c$ . Показано, что релаксационные процессы перехода к равновесному невозмущенному состоянию являются долговременными и составляют десятки секунд.

Приведенные экспериментальные результаты могут быть полезными при дальнейшей разработке теории нелинейных явлений жидких кристаллов, при применении жидких кристаллов как объектов для использования в нанотехнологиях для науки, промышленности и медицины. Результаты представленных исследований могут быть использованы при разработке сейсмодатчиков, акустических низкочастотных преобразователей и сенсорных устройств, модуляторов и дефлекторов света с большой глубиной модуляции и большим углом дефлексии.

#### Список использованной литературы

- 1 . Капустин А. Н., Капустина О. А. Акустика жидких кристаллов. М. : Наука, 1986. 248 с.
- 2 . Baimakova (Denisova) O. A., Scaldin O. A., Chuvyrov A. N. // Mol. Cryst. Liq. Cryst. 1995. Vol. 265. P. 299 – 314.
- 3 . Блинов Л. М. Электро-магнитооптика жидких кристаллов. М. : Наука, 1977. 384 с.
- 4 . Stephen T. J., Straley J. P. // Rev. Mod. Phys. 1974. Vol. 46. P. 617 – 704.

Поступила в редакцию 7.11.2011 г.