

УДК 532.783

*A. M. Parshin*<sup>1,2</sup>, *V. S. Sutormin*<sup>1</sup>, *V. Ya. Zyryanov*<sup>1</sup>, *V. F. Shabanov*<sup>1</sup>

**ВЛИЯНИЕ ИОННОГО СУРФАКТАНТА НА ЭНЕРГИЮ СЦЕПЛЕНИЯ ЖИДКОГО КРИСТАЛЛА С ПОВЕРХНОСТЬЮ, ИССЛЕДОВАННОЕ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ МАГНИТНЫХ ПОРОГОВЫХ ПОЛЕЙ ПЕРЕХОДА ФРЕДЕРИКСА**

<sup>1</sup>Институт физики им. Л. В. Киренского, Федеральный исследовательский центр «Красноярский научный центр Сибирского отделения Российской академии наук»,  
Академгородок, 50, 660036 Красноярск, Россия

<sup>2</sup>Сибирский Федеральный университет, пр. Свободный, 79, 660041 Красноярск, Россия  
E-mail: parshin@iph.krasn.ru

*Исследовано сцепление нематического жидкого кристалла 5CB и 5CB, допированного ионным сурфактантом ЦТАБ, в ячейках с плоскопараллельными ограничивающими поверхностями. Получены зависимости интенсивности проходящего лазерного излучения от величины магнитного поля для ячеек с различными толщинами слоя нематика при различных температурах. Из пороговых полей перехода Фредерикса определены значения полярной энергии сцепления жидкого кристалла с поверхностью. Изучено влияние ионного сурфактанта на энергию сцепления, установлено, что добавление в объем жидкого кристалла ионного сурфактанта ведет к ее ослаблению. Проведен анализ точности определения энергии сцепления на основе выражения, следующего из соотношения Рапини – Популара. Показано, что лучшее экспериментальное разрешение энергии сцепления достигается при использовании тонких слоев нематика, более сильных магнитных полей, а также слабого сцепления молекул жидкого кристалла с поверхностью.*

**Ключевые слова:** нематический жидкий кристалл, ионный сурфактант, энергия сцепления, магнитное поле, переход Фредерикса.

**DOI:** 10.18083/LCAppl.2018.3.59

*A. M. Parshin*<sup>1,2</sup>, *V. S. Sutormin*<sup>1</sup>, *V. Ya. Zyryanov*<sup>1</sup>, *V. F. Shabanov*<sup>1</sup>

**INFLUENCE OF IONIC SURFACTANT ON THE ANCHORING ENERGY OF LIQUID CRYSTAL WITH A SURFACE INVESTIGATED USING MAGNETIC THRESHOLD FIELDS OF FREEDERICKSZ TRANSITION**

<sup>1</sup>Kirensky Institute of Physics, Federal Research Center KSC SB RAS,  
50 Akademgorodok, Krasnoyarsk, 660036, Russia

<sup>2</sup>Siberian Federal University, 79 Svobodny Ave., Krasnoyarsk, 660041, Russia  
E-mail: parshin@iph.krasn.ru

*The coupling of nematic liquid crystal 5CB and 5CB doped with ionic surfactant CTAB in the cells with plane-parallel interfaces was studied. For the cells with the varied nematic layer thickness at different temperatures, the dependencies of the passed laser radiation intensity on the magnetic field were obtained. From the threshold fields of Freedericksz transition, the polar anchoring energy of the liquid crystal to the surface was determined. The effect of the ionic surfactant on the anchoring energy was studied and it was found that the addition of the ionic surfactant to liquid crystal weakens the anchoring energy. The analysis of the accuracy of the anchoring energy determination based on the expression following from the Rapini – Popular relation was carried out. It was shown*

that the best experimental resolution of the anchoring energy is achieved when the thin nematic layers, stronger magnetic fields and weak anchoring of the liquid crystal molecules with the surface are used.

**Key words:** nematic liquid crystal, ionic surfactant, anchoring energy, magnetic field, Freedericksz transition.

## Введение

Жидкие кристаллы (ЖК) представляют собой материал, который может быть переключен между различными состояниями путем приложения внешних воздействий, таких как электрическое или магнитное поле, температура и др. [1]. Вследствие этого жидкие кристаллы нашли широкое практическое применение и продолжают интенсивно изучаться. В большинстве случаев ЖК помещается между двумя ограничивающими подложками и его объемные свойства определяются сформированной конфигурацией директора, которая, в свою очередь, зависит от ориентации молекул жидкого кристалла на межфазных границах. Помимо ориентации ЖК на ограничивающих подложках, важным параметром, характеризующим поверхностное сцепление, является полярная энергия сцепления  $W_0$ . Кроме того, существенную информацию о взаимодействии жидких кристаллов с ограничивающими поверхностями могут дать измерения температурных зависимостей  $W_0$  [2–4]. Существуют различные способы измерения полярной энергии сцепления [5], большинство из которых основаны на использовании электрических и магнитных полей. Так,  $W_0$  может быть определена путем измерения пороговых полей перехода Фредерикса, вызванного электрическим [6] или магнитным полем [2–4, 7, 8], а также путем измерения полей насыщения [9–11], при которых практически прекращаются изменения ориентации ЖК. Наряду с этим энергия сцепления может быть получена из непрерывной регистрации двулучепреломления и емкости ЖК-ячейки в зависимости от приложенного электрического напряжения [12–14].

Одним из активных направлений изучения жидкокристаллических материалов является исследование влияния различных добавок на отклик ЖК при приложении внешних воздействий. Добавление примесей в ЖК может приводить не только к улучшению отклика системы, например динамических характеристик, но и к реализации принципиально новых ориентационно-структурных превращений в жидких кристаллах. Так, например, в работах [15–18] добавление в ЖК ионного

сурфактанта позволило реализовать электроуправляемые изменения конфигурации директора за счет эффекта ионной модификации поверхностного сцепления. В данном способе управления под действием постоянного электрического поля происходило изменение плотности поверхностно-активных ионов на межфазной границе, что приводило к трансформации поверхностного сцепления молекул ЖК. Поскольку ионы сурфактанта адсорбируются на границах раздела, то встает вопрос об их влиянии на полярную энергию сцепления [19, 20]. В данном случае для измерения  $W_0$  наиболее предпочтительными являются методы, в которых применяется магнитное поле, поскольку использование электрического поля может приводить к паразитным эффектам [12]. Целью настоящей работы являлось исследование изменения полярной энергии сцепления ЖК с ограничивающими поверхностями при добавке в жидкий кристалл ионного сурфактанта.

## Экспериментальная часть

Объектом исследования являлись плоские ЖК-ячейки, состоящие из двух стеклянных подложек и слоя нематического жидкого кристалла между ними. На внутренние стороны подложек предварительно наносились полимерные пленки поливинилового спирта (ПВС), способствующие планарной ориентации молекул ЖК. Нанесение полимерных пленок на подложки производилось методом центрифугирования, а ось легкого ориентирования задавалась механическим натиранием поверхности полимера. Величина зазора  $d$ , соответствующая толщине слоя ЖК, задавалась тефлоновыми спейсерами. Измерения  $d$  проводились до заполнения ячеек жидким кристаллом с использованием интерференционной методики, описанной в [21]. Жидкокристаллические ячейки с зазорами  $d$ , равными 5 и 13,6 мкм, заполнялись нематиком 4-*n*-пентил-4'-цианобифенил (5ЦБ), а ячейки с зазорами 4,8 и 13,9 мкм заполнялись 5ЦБ, допированным ионным сурфактантом *цетилтри-метиламмоний бромид* (ЦТАБ) с концентрацией 0,78 % по весу.

Измерения полярной энергии сцепления были проведены с использованием магнитооптической установки, собранной на базе электромагнита (рис. 1).

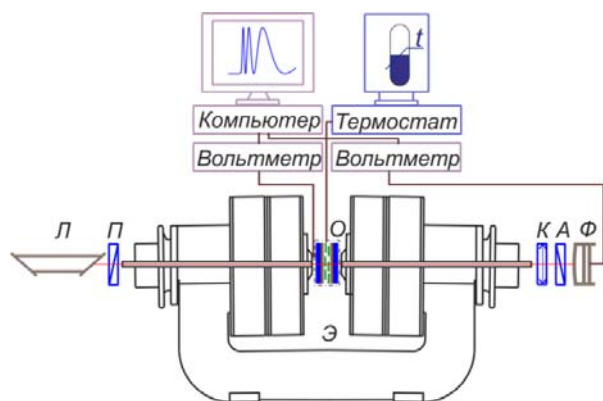


Рис. 1. Схема магнитооптической установки:  
 Л – He-Ne лазер; П – поляризатор; Э – электромагнит;  
 О – образец; К – компенсирующая четвертьволновая  
 пластинка; А – анализатор; Ф – фотодиод

Fig. 1. Scheme of magneto-optical setup:  
 Л – He-Ne laser; П – polarizer; Э – electromagnet;  
 О – sample; К – compensating quarter-wave plate;  
 А – analyzer; Ф – photodiode

Луч света He-Ne лазера ( $\lambda = 632,8$  нм) Л последовательно проходил вдоль осевой линии полюсов электромагнита через поляризатор П, образец О, компенсирующую четвертьволновую пластинку К, анализатор А и попадал на фотодиод Ф. Жидкокристаллическая ячейка помещалась в термостатируемую кювету, которая устанавливалась между полюсами электромагнита так, чтобы в исходном состоянии директор нематика был перпендикулярен силовым линиям магнитного поля. Угол между направлением поляризации падающего на образец света и направлением натирания подложек составлял  $45^\circ$ . В исходном состоянии четвертьволновая пластинка и анализатор настраивались таким образом, чтобы получить близкую к нулю интенсивность прошедшего света  $I$  при фиксированной температуре образца. Для этого в отсутствие образца четвертьволновая пластинка помещалась между скрещенными поляризаторами и поворачивалась так, чтобы получить нулевое значение  $I$ . Затем пластинка удалялась, и в электромагнит помещалась ЖК-ячейка. Путем вращения анализатора

находилась минимальное значение  $I$ . В этом случае короткая ось эллипса поляризации света, выходящего из слоя ЖК, была параллельна направлению анализатора. Затем четвертьволновая пластинка вводилась вновь и поворачивалась на тот же угол, на который был повернут анализатор из скрещенного состояния. В этом случае свет на выходе после четвертьволновой пластинки имел линейную поляризацию. На последнем этапе анализатор поворачивался таким образом, чтобы получить близкое к нулю  $I$ .

Температура  $T$  в кювете контролировалась медь-константановой термопарой, магнитное поле  $H$  измерялось с помощью датчика Холла. Стабилизация температуры и магнитного поля составляла  $\pm 0,5$  %. Значения интенсивности лазерного излучения  $I$  и величины магнитного поля  $H$  от 0 до 24 кЭ, пропорциональные сигналам с фотодиода и датчика Холла, регистрировались вольтметрами, а зависимости  $I(H)$  записывались с помощью компьютерной программы LabVIEW. Скорость сканирования величины магнитного поля составляла 1 кЭ/мин. Из кривых  $I(H)$  определялось пороговое магнитное поле  $H_{th}$ , которое затем использовалось для расчета величины энергии сцепления  $W_\theta$  из выражения [22]:

$$\operatorname{ctg}\left(\frac{H_{th}}{H_{th}^\infty} \frac{\pi}{2}\right) = \frac{H_{th}}{H_{th}^\infty} \frac{\pi K_{11}}{W_\theta d}, \quad (1)$$

где  $K_{11}$  – модуль упругости поперечного изгиба ЖК;  $d$  – толщина слоя нематика;  $H_{th}$  – пороговое магнитное поле, измеряемое в эксперименте;  $H_{th}^\infty$  – пороговое магнитное поле при  $W_\theta \rightarrow \infty$ , которое определялось как

$$H_{th}^\infty = \frac{\pi}{d} \sqrt{\frac{K_{11}}{\Delta\chi}}, \quad (2)$$

где  $\Delta\chi$  – анизотропия диамагнитной восприимчивости ЖК.

## Результаты и обсуждение

На рисунке 2 представлены кривые  $I(H)$  вблизи порога для ячеек, одна из которых была заполнена 5ЦБ (рис. 2, а), а другая 5ЦБ, допированным ионным сурфактантом (рис. 2, б).

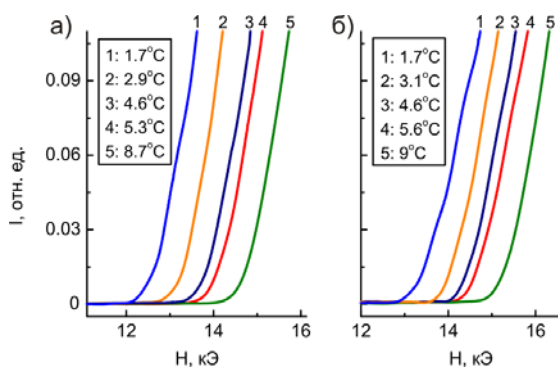


Рис. 2. Магнитооптический отклик образцов, наблюдаемый при различных значениях приведенной температуры: *a* – ячейка заполнена 5ЦБ, *б* – 5ЦБ, допированным ионным сурфактантом ЦТАБ. Толщины слоев ЖК составляют 5 и 4,8 мкм, соответственно

Fig. 2. The magneto-optical response of the samples observed at different values of the reduced temperature  $T_{NI} - T$ . The cell is filled with 5CB (*a*) and 5CB doped by the ionic surfactant CTAB (*b*). The thicknesses of LC layers are 5 and 4,8  $\mu\text{m}$ , respectively

Зависимости были сняты для слоев ЖК толщиной 5 и 4,8 мкм, соответственно, при различных значениях приведенной температуры образца  $T^* = T_{NI} - T$ , где  $T_{NI}$  – температура перехода нематика в изотропную фазу. Из рисунка следует, что наличие в ЖК-добавки ЦТАБ не влияет существенным образом на вид кривых и их изменение при варьировании температуры образца. Для обеих ячеек при увеличении значения приведенной температуры происходит рост порогового магнитного поля, при котором начинается переориентация директора. Одновременно с этим наблюдается уменьшение крутизны зависимостей  $I(H)$  в припороговой области. Аналогичные изображенные на рис. 2 зависимости  $I(H)$  были получены для ячеек с толщиной нематика 13,6 и 13,9 мкм при различных значениях  $T^*$ . В данных ячейках пороговое магнитное поле с начала переориентации директора имело меньшие значения вследствие большей толщины слоев ЖК.

Из экспериментальных кривых  $I(H)$  определялись значения  $H_{th}$ , зависимости которых от приведенной температуры представлены на рис. 3 и 4. На рис. 3 показаны значения  $H_{th}$  для ЖК-ячеек с тонкими слоями (4,8 и 5 мкм), а на рис. 4 – для образцов с толстыми слоями нематика (13,6 и 13,9 мкм). Видно, что экспериментальные точки имеют разброс, который для тонких слоев (рис. 3) оказался существенно меньше, чем для толстых

слоев нематика (рис. 4). Для всех исследованных образцов ЖК-ячеек наблюдается повышение порогового магнитного поля переориентации нематика при увеличении приведенной температуры.

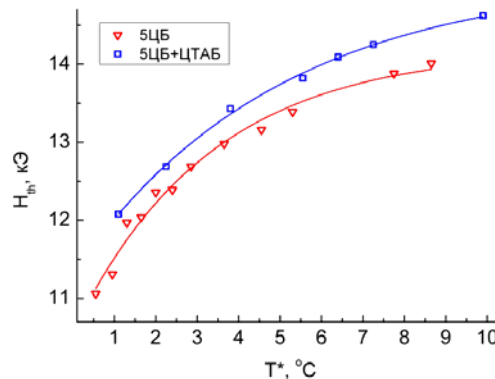


Рис. 3. Зависимости порогового магнитного поля  $H_{th}$  от приведенной температуры  $T^*$  для ячеек, заполненных 5ЦБ и 5ЦБ, допированным ионным сурфактантом ЦТАБ. Толщины слоев ЖК составляют 5 и 4,8 мкм, соответственно. Сплошными линиями представлены аппроксимации

Fig. 3. Dependences of the threshold magnetic field  $H_{th}$  on the reduced temperature  $T^*$  for the cells filled with 5CB and 5CB doped by the ionic surfactant CTAB. The thicknesses of LC layers are 5 and 4,8  $\mu\text{m}$ , respectively. Approximations are represented by solid lines

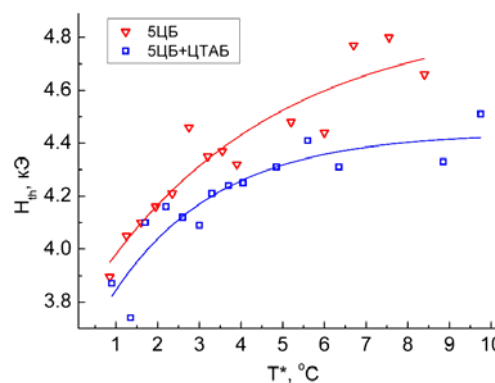


Рис. 4. Зависимости порогового магнитного поля  $H_{th}$  от приведенной температуры  $T^*$  для ячеек, заполненных 5ЦБ и 5ЦБ, допированным ионным сурфактантом ЦТАБ. Толщины слоев ЖК составляют 13,6 и 13,9 мкм, соответственно. Сплошными линиями представлены аппроксимации

Fig. 4. Dependences of the threshold magnetic field  $H_{th}$  on the reduced temperature  $T^*$  for the cells filled with 5CB and 5CB doped by the ionic surfactant CTAB. The thicknesses of LC layers are 13,6 and 13,9  $\mu\text{m}$ , respectively. Approximations are represented by solid lines

Определенные из эксперимента пороговые магнитные поля использовались для расчета полярной энергии сцепления  $W_0$  из выражения (1). Значения  $H_{th}^\infty$  при  $W_0 \rightarrow \infty$  были вычислены из выражения (2). При этом использовались литературные данные  $K_{11}$  и  $\Delta\chi$  при соответствующих значениях приведенной температуры [23]. На рис. 5 приведена зависимость полярной энергии сцепления от приведенной температуры  $T^*$  для ячеек, содержащих тонкие слои 5ЦБ и 5ЦБ, допированного ионным сурфактантом.

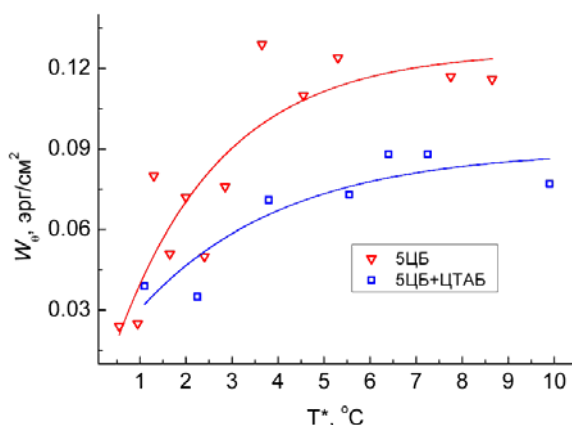


Рис. 5. Зависимости полярной энергии сцепления  $W_0$  от приведенной температуры  $T^*$  для ячеек, заполненных 5ЦБ и 5ЦБ, допированным ионным сурфактантом ЦТАБ. Толщины слоев ЖК составляют 5 и 4,8 мкм, соответственно. Сплошными линиями представлены аппроксимации

Fig. 5. Dependences of the polar anchoring energy  $W_0$  on the reduced temperature  $T^*$  for the cells filled with 5CB and 5CB doped by the ionic surfactant CTAB. The thicknesses of LC layers are 5 and 4,8  $\mu\text{m}$ , respectively. Approximations are represented by solid lines

Из рисунка следует, что для обоих образцов при увеличении  $T^*$  наблюдается повышение  $W_0$ . По-видимому, с этим фактом связано уменьшение кривизны зависимостей  $I(H)$ , представленных на рис. 2. Увеличение энергии сцепления приводит к менее резкому росту угла отклонения  $\theta_m$  в центре ячейки с ростом величины магнитного поля [24], что, в свою очередь, приводит к более плавному изменению интенсивности света. Полярная энергия сцепления имеет значения  $10^{-2}$ – $10^{-1}$  эрг/см<sup>2</sup>, которые согласуются с данными измерений  $W_0$  нематика 5ЦБ на подложке ПВС, представленных в работах [5, 25]. Для 5ЦБ, допированного ионным

сурфактантом, энергия сцепления имеет меньшие значения по сравнению со слоем 5ЦБ без добавки. Это, по-видимому, связано с тем, что ЦТАБ при определенных условиях может задавать для молекул данного нематика гомеотропное поверхностное упорядочение и его добавка в ЖК приводит к ослаблению планарного поверхностного сцепления, задаваемого пленкой ПВС.

Как было отмечено выше, экспериментальные значения  $H_{th}$  имеют разброс. Это приводит к еще большему разбросу точек на зависимостях  $W_0(T^*)$ , что не позволило получить достоверные значения полярной энергии сцепления для образцов, содержащих толстые слои нематика. Влияние толщины слоя ЖК на точность определения энергии сцепления продемонстрировано на рис. 6, где представлены зависимости  $W_0$  от приведенной величины магнитного поля  $h = H_{th} / H_{th}^\infty$ .

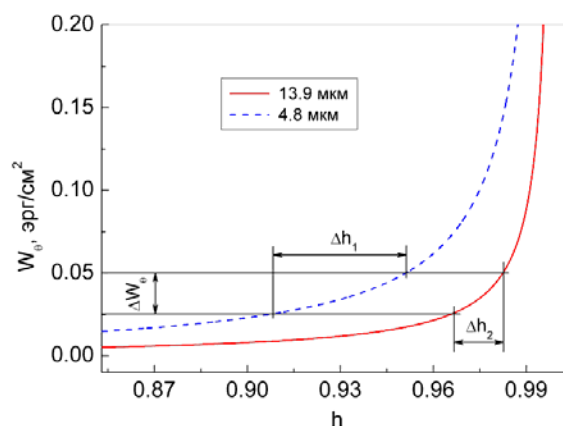


Рис. 6. Расчетные зависимости полярной энергии сцепления  $W_0$  от приведенного магнитного поля  $h$  для различных толщин слоя нематика

Fig. 6. The calculated dependences of the polar anchoring energy  $W_0$  on the reduced magnetic field  $h$  for different thicknesses of nematic layer

Кривые были построены для толщин слоя нематика 4,8 и 13,9 мкм с использованием выражения (1). Видно, что неточность в определении магнитного поля  $\Delta h_1 \approx 0,043$  для тонкого слоя ЖК приводит к неопределенности полярной энергии сцепления в диапазоне  $\Delta W \approx 0,025$  эрг/см<sup>2</sup>. Однако для толстого слоя нематика к такой же  $\Delta W_0$  приводит неточность определения магнитного поля  $\Delta h_2 \approx 0,016$ , то есть

для лучшей экспериментальной точности определения  $W_0$  необходимо использовать тонкие слои нематика и, соответственно, сильные магнитные поля. Кроме того, представленные зависимости демонстрируют, что при более слабом сцеплении молекул ЖК с подложками, неточности  $\Delta h$  будут меньше влиять на вычисленное значение  $W_0$ .

Неточность в определении порогового магнитного поля связана с наличием закругленностей на кривых  $I(H)$  (рис. 2). В работе [22] теоретически показано, что резкий порог начала переориентации наблюдается при угле ориентации директора на ограничивающих поверхностях ячейки  $\theta_0$ , равном нулю. При углах  $\theta_0$ , отличных от нуля, резкий порог переориентации исчезает. Проведенные дополнительные измерения угла преднаклона молекул ЖК с использованием магнитного нуля-метода показали, что в исследованных образцах  $\theta_0$  имел значение около  $1^\circ$ . Это могло привести к некоторому размытию кривых  $I(H)$ , однако не могло существенно исказить вид пороговых зависимостей. Кроме того, появление закруглений может происходить из-за формирования двойного упорядоченного электрического слоя, возникающего вследствие адсорбции ионов сурфактанта на межфазных границах [19, 20]. Однако существенной разницы зависимостей  $I(H)$  для ячеек, заполненных 5ЦБ и 5ЦБ, допированным ЦТАБ, в пороговой области не наблюдалось, что не позволяет предполагать наличие структурированных приповерхностных слоев.

### Выводы

В работе проведены экспериментальные исследования влияния ионного сурфактанта на сцепление ЖК с поверхностью. Для исследований изготавливались ячейки, подложки которых были покрыты пленками поливинилового спирта, и содержащие тонкие (4,8 и 5 мкм) и толстые слои нематика (13,6 и 13,9 мкм). В качестве ЖК использовался нематик 5ЦБ и 5ЦБ, допированный ионным сурфактантом ЦТАБ. Получены зависимости интенсивности проходящего лазерного излучения  $I$  от величины магнитного поля  $H$  для ячеек с неодинаковыми толщинами слоя ЖК при различных температурах образцов, из которых определялись пороговые значения магнитных полей перехода Фредерикса  $H_{th}$ . Используя эти значения, удалось вычислить полярная энергия сцепления  $W_0$ . Проведены исследования зависимости  $W_0$  от тем-

пературы, которые показали, что при увеличении температуры образца происходило ее уменьшение. Энергия сцепления для 5ЦБ, допированного ЦТАБ, оказалась ниже, чем для 5ЦБ без добавок, что связано с особенностями используемого сурфактанта. Показано, что толщина нематического слоя существенно влияет на точность определения  $W_0$ . Значения  $W_0$  получены для тонких слоев, в то время как для толстых слоев нематика разброс точек не позволил определить достоверные значения полярной энергии сцепления. Проведенный анализ на основе выражения, следующего из потенциала Рапини – Популара, подтвердил, что лучшее экспериментальное разрешение  $W_0$  получается при использовании тонких слоев нематиков и, соответственно, сильных магнитных полей, а также слабого сцепления молекул ЖК с поверхностью.

*В. С. Сутормин благодарен РФФИ за поддержку исследований по гранту № 16-32-60036 мол\_а\_дк.*

### Список литературы / References

1. Блинов Л. М. Жидкие кристаллы: структура и свойства. М.: Книжный дом «Либроком», 2013. 480 с. [Blinov L. M. Structure and Properties of Liquid Crystals. Dordrecht, Heidelberg, London, New York: Springer, 2011, 379 p. DOI: 10.1007/978-90-481-8829-1].
2. Rosenblatt C. Temperature dependence of the anchoring strength coefficient at a nematic liquid crystal-wall interface. *J. Phys. France*, 1984, **45** (6), 1087–1091. DOI: 10.1051/jphys:019840045060108700.
3. Podoprigora V.G., Gunyakov V.A., Parshin A.M., Khrustalev B.P., Shabanov V.F. Liquid crystals on the solid state surface—the determination of anchoring energy under an applied magnetic field. *Molecular Crystals and Liquid Crystals*, 1991, **209** (1), 117–121. DOI: 10.1080/00268949108036185.
4. Гуныков В. А., Подопригра В. Г., Паршин А. М., Хрусталева Б. П., Шабанов В. Ф. Измерение энергии сцепления жидкого кристалла с поверхностью подложки в сильном магнитном поле // *Поверхность. Физика, химия, механика*. 1992. № 2. С. 69–72. [Gunyakov V.A., Podoprigora V.G., Parshin A.M., Khrustalev B.P., Shabanov V.F. Measurement of the surface anchoring energy of a nematic liquid crystal in contact with a substrate under a strong magnetic field. *Physics, Chemistry and Mechanics of Surfaces*. 1992, **8** (2), 307–311].
5. Марусий Т. Я., Резников Ю. А., Решетняк В. Ю., Чигринов В. Г. Энергия сцепления нематических

- жидких кристаллов с ориентирующими поверхностями и методы ее определения // *Поверхность. Физика, химия, механика*. 1990. № 7. С. 5–23. [Marusiy T.Ya., Resnikov Yu.A., Reshetnyak V.Yu., Chigrinov V.G. Liquid crystal-to-alignment surface anchoring energy and its measuring techniques. *Physics, Chemistry and Mechanics of Surfaces*. 1990, 7, 5–23. (in Russ.)].
6. Гребенкин М. Ф., Селиверстов В. А., Блинов Л. М., Чигринов В. Г. Свойства нематических жидких кристаллов с положительной диэлектрической анизотропией // *Кристаллография*. 1975. Т. 20, вып. 5. С. 984–990. [Grebentkin M.F., Seliverstov V.A., Blinov L.M., Chigrinov V.G. Properties of nematic liquid-crystals with positive dielectric anisotropy. *Crystallography*, 1975, 20 (5), 984–990. (in Russ.)].
7. Yang K.H., Rosenblatt C. Determination of the anisotropic potential at the nematic liquid crystal-to-wall interface. *Appl. Phys. Lett.*, 1983, 43 (1), 62–64. DOI: 10.1063/1.94121.
8. Gunyakov V.A., Parshin A.M., Khrustalev B.P., Shabanov V.F. Determination of anchoring energy for nematic onto ferroelectric substrate. *Solid State Communications*, 1993, 87 (9), 751–753. DOI: 10.1016/0038-1098(93)90406-D.
9. Блинов Л. М., Кабаенков А. Ю. Температурная зависимость и «размерный эффект» для энергии сцепления планарно ориентированного нематика на твердой подложке // *ЖЭТФ*. 1987. Т. 93, вып. 5. С. 1757–1764. [Blinov L.M., Kabaenkov A.Yu., Temperature dependence and the “size effect” exhibited by the anchoring energy of a nematic with a planar orientation on a solid substrate. *Sov. Phys. JETP*, 1987, 66 (5), 1002–1006].
10. Gunyakov V.A., Parshin A.M., Shabanov V.F. Investigation of the nematic-ferroelectric interface under a strong magnetic field. *Solid State Communications*, 1998, 105 (12), 761–765. DOI: 10.1016/S0038-1098(97)10221-6.
11. Гуняков В. А., Паршин А. М., Шабанов В. Ф. Особенности анизотропного взаимодействия нематического жидкого кристалла с полярной поверхностью скола сегнетоэлектрического кристалла // *Оптический журнал*. 1998. Т. 65, № 7. С. 43–46. [Guniakov V.A., Parshin A.M., Shabanov V.F. Features of the anisotropic interaction of a nematic liquid crystal with a polar surface of a cleavage of a ferroelectric crystal. *Optical Journal*, 1998, 65 (7), 43–46. (in Russ.)].
12. Yokoyama H., van Sprang H.A. A novel method for determining the anchoring energy function at a nematic liquid crystal-wall interface from director distortions at high fields. *J. Appl. Phys.*, 1985, 57 (10), 4520–4526. DOI: 10.1063/1.335352.
13. Seo D.-S., Iimura Y., Kobayashi S. Temperature dependence of the polar anchoring strength of weakly rubbed polyimide films for the nematic liquid crystal (5CB). *Appl. Phys. Lett.*, 1992, 61 (2), 234–236. DOI: 10.1063/1.108194.
14. Ji Y., Kelly J.R., West J.L. A study of the surface anchoring at a polymer/liquid crystal interface in the neighborhood of the glass transition. *Liquid Crystals*, 1993, 14 (6), 1885–1893. DOI: 10.1080/02678299308027724.
15. Зырянов В. Я., Крахалев М. Н., Прищепа О. О., Шабанов А. В. Ориентационно-структурные превращения в каплях нематика, обусловленные ионной модификацией межфазной границы под действием электрического поля // *Письма в ЖЭТФ*. 2007. Т. 86, вып. 6. С. 440–445. [Zyryanov V.Ya., Krakhalev M.N., Prishchepa O.O., Shabanov A.V. Orientational structure transformations caused by the electric-field-induced ionic modification of the interface in nematic droplets. *JETP Letters*, 2007, 86 (6), 383–388. DOI: 10.1134/S0021364007180087].
16. Зырянов В. Я., Крахалев М. Н., Прищепа О. О., Шабанов А. В. Инверсная мода эффекта ионной модификации поверхностного сцепления в каплях нематика // *Письма в ЖЭТФ*. 2008. Т. 88, вып. 9. С. 688–692. [Zyryanov V.Ya., Krakhalev M.N., Prishchepa O.O., Shabanov A.V. Inverse regime of ionic modification of surface anchoring in nematic droplets. *JETP Letters*, 2008, 88 (9), 597–601. DOI: 10.1134/S002136400821011X].
17. Сутормин В. С., Крахалев М. Н., Прищепа О. О., Зырянов В. Я. Электроуправляемый локальный переход Фредерикса в слое нематического жидкого кристалла // *Письма в ЖЭТФ*. 2012. Т. 96, вып. 8. С. 562–567. [Sutormin V.S., Krakhalev M.N., Prishchepa O.O., Zyryanov V.Ya. Electrically controlled local Fréedericksz transition in a layer of a nematic liquid crystal. *JETP Letters*, 2012, 96 (8), 511–516. DOI: 10.1134/S0021364012200131].
18. Sutormin V.S., Krakhalev M.N., Prishchepa O.O., Lee W., Zyryanov V.Ya. Electro-optical response of an ionic-surfactant-doped nematic cell with homeoplanar-twisted configuration transition. *Optical Materials Express*, 2014, 4 (4), 810–815. DOI: 10.1364/OME.4.000810.
19. Barbero G., Durand G. Ion adsorption and equilibrium distribution of charges in a cell of finite thickness. *J. Phys. France*, 1990, 51 (4), 281–291. DOI: 10.1051/jphys:01990005104028100.
20. Barbero G., Durand G. Selective ions adsorption and nonlocal anchoring energy in nematic liquid crystals. *J. Appl. Phys.*, 1990, 67 (5), 2678–2680. DOI: 10.1063/1.345484.

21. Huibers P.D.T., Shah D.O. Multispectral Determination of Soap Film Thickness. *Langmuir*, 1997, **13** (22), 5995–5998. **DOI:** 10.1021/la960738n.
22. Rapini A., Papoular M. Distorsion d'une lamelle nématique sous champ magnétique conditions d'ancrage aux parois. *J. Phys. Colloques*, 1969, **30**, C4-54–C4-56. **DOI:** 10.1051/jphyscol:1969413.
23. Bradshaw M.J., Raynes E.P., Bunning J.D., Faber T.E. The Frank constants of some nematic liquid crystals. *J. Phys. France*, 1985, **46** (9), 1513–1520. **DOI:** 10.1051/jphys:019850046090151300.
24. Nehring J., Kmetz A.R., Scheffer T.J. Analysis of weak-boundary-coupling effects in liquid-crystal displays. *J. Appl. Phys.*, 1976, **47** (3), 850–857. **DOI:** 10.1063/1.322718.
25. Frunza S., Roques Y., Farenc J., Stoenescu D.N., Traverse J. P. Anchoring energy of some nematic liquid crystals at alignment layers of different topography. *Crystal Research and Technology*, **31** (8), 1095–1099. **DOI:** 10.1002/crat.2170310819.

Поступила в редакцию 21.06.2018 г.  
Received 21 June 2018