

УДК 544.252.4

*А. И. Галеева<sup>1</sup>, Е. Ю. Русакова<sup>1</sup>, К. И. Ситдикова<sup>1</sup>, С. А. Богданова<sup>1</sup>,  
Ю. Г. Галяметдинов<sup>1,2</sup>*

**МЕЖФАЗНОЕ ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ В СИСТЕМЕ  
ЛИОТРОПНЫЙ ЖИДКИЙ КРИСТАЛЛ – ПОЛИМЕРНЫЙ ОРИЕНТАНТ**

**INTERPHASE INTERACTION IN THE LYOTROPIC  
LIQUID CRYSTAL – POLYMER ORIENTANT SYSTEM**

<sup>1</sup>Казанский национальный исследовательский технологический университет, кафедра физической и коллоидной химии  
420015 Казань, ул. К. Маркса, д. 68.

<sup>2</sup>Казанский физико-технический институт им. Е. К. Завойского КНЦ РАН,  
420029 Казань, ул. Сибирский тракт, д. 10/7

*Представлены результаты адгезионного взаимодействия лиотропных лантаноидсодержащих мезогенов на основе неионного и цвиттер-ионного ПАВ с полимерными ориентантами. Показано влияние природы ориентанта, ориентации и типа надмолекулярной организации лиомезофаз на характеристики адгезионного взаимодействия между полимером и слоем жидкого кристалла.*

**Ключевые слова:** *лиотропные лантаноидсодержащие мезогены, цвиттер-ионный ПАВ, полимерный ориентант, подложка, адгезия, смачивание.*

*The results of the adhesive interaction of lyotropic lanthanide-containing mesogens based on non-ionic and zwitter-ionic surfactant with polymer orientants are presented. The effect of nature of the orientant, the orientation and the type of supramolecular organization of lyomesophase on the characteristics of the adhesive interaction between polymer and liquid crystal layer is shown.*

**Key words:** *lyotropic lanthanide-containing mesogens, zwitter-ionic surfactant, polymer orientant, substrate, adhesion, wetting.*

В последнее время интенсивно исследуются жидкокристаллические системы (ЖК) как компоненты электронно-оптических устройств. Лиотропные жидкие кристаллы (ЛЖК), представляющие собой композиции амфифильных веществ и растворителей, используются в медицине как транспортные средства доставки лекарственных препаратов, как флуоресцирующие метки из наночастиц в больных клетках, в косметических средствах, при создании матриц для катализаторов, материалов оптоэлектроники [1 – 4]. Как известно, большинство применений ЖК основано на их использовании в плоско – параллельных ячейках [5].

Для осуществления оптических эффектов в ЖК и их использования в устройствах необходимо обеспечение воспроизводимой ориентации в ячейке. При создании однородно ориентированных образцов ЖК следует учитывать химическую природу, как жидкокристаллического материала, так и твердой поверхности. Анализ этих вопросов посвящена обширная научная литература [6 – 10]. Согласно [11] ориентирующее дей-

стве поверхностно-активных веществ (ПАВ) основано на том, что молекулы ПАВ, содержащиеся в жидкокристаллическом материале, при контакте с подложкой адсорбируются ее поверхностью и изменяют энергию границы раздела, способствуя определенному типу ориентации ЖК [12]. Известно, что полярность поверхности подложки оказывает существенное влияние на процессы самоорганизации амфифильных молекул в жидких кристаллах. Тем не менее, механизм управления полярностью ориентантов изучен недостаточно. Тонкие полиимидные пленки наиболее часто используются в качестве ориентирующих подложек для жидкокристаллических систем, поскольку они обладают хорошей термической стабильностью и обеспечивают устойчивую ориентацию [13 – 16]. В работе [17] описаны наиболее распространенные методы ориентации ЖК: натирание подложек [18], нанесение поверхностно-активных веществ, косое напыление ориентанта, метод светоиндуцированной ориентации.

В последние годы для исследования ориентации ЖК в объеме нашли применение методы атомно-силовой (АСМ), сканирующей туннельной и конфокальной микроскопии [19]. Ранее нами [20] методом АСМ исследовано фазовое поведение лиотропного лантансодержащего ЖК, обладающего нематической фазой, на подложке из высокоориентированного пиролитического графита (HOPG), способствующего планарной ориентации молекул в мезофазе.

Одним из информативных методов оценки межфазного взаимодействия является метод измерения краевого угла смачивания. Однако имеется очень ограниченное количество работ, использующих данный метод для изучения межфазного взаимодействия на границе раздела ЛЖК – поверхность [10].

Классическая теория явлений на границе жидкости и твердого тела базируется на двух основополагающих константах, которыми являются поверхностное натяжение жидкости и краевого угла смачивания жидкостью твердого тела. Явление смачивания активно изучается во многих работах. Так в обзоре [21] обсуждается ряд классических монографий и первоисточников по проблемам поверхностного натяжения и смачивания поверхностей. Рассмотрены основные закономерности влияния поверхностно-активных веществ на смачивание [22]. Большинство современных методов управления смачиванием в различных процессах основано на применении ПАВ. По масштабам практических приложений, а также по разнообразию свойств различных систем влияние ПАВ на смачивание представляет большую и сложную проблему коллоидной химии. В настоящее время накоплен значительный экспериментальный материал о влиянии индивидуальных ПАВ на смачивание. Существуют теоретические и полуэмпирические модели и уравнения, позволяющие делать достаточно надежные предсказания величин краевых углов в различных системах. Особую роль в процессах смачивания полимеров играют поверхностные энергетические характеристики – свободная поверхностная энергия (СПЭ) и ее составляющие [23 – 25].

В данной работе с целью получения материала, обладающего упорядоченной одноосной организацией и, как следствие, поляризованной люминесценцией, была изучена возможность ориентации синтезированных лантаноидсодержащих мезофаз с помощью полимерных ориентантов и влияние ориентации на межфазное взаимодействие в системе лиотропный жидкий кристалл – полимерный ориентант методом краевого угла смачивания.

### Экспериментальная часть

Объектами исследования являлись ранее полученные и изученные ЛЖК-системы на основе неионного ПАВ – монододецилового эфира декаэтиленгликоля  $C_{12}H_{25}O(CH_2CH_2O)_{10}H$  («Aldrich»), цвиттер-ионного ПАВ – N,N-диметилдодециламиноксида ( $C_{12}DMAO$ , «Fluka»), гидрата нитрата лантана  $La(NO_3)_3 \cdot 6H_2O$  («Aldrich»), воды и деканола [26 – 28].

В работе использовали ЛЖК-систему состава  $C_{12}EO_{10}:La(III) 50\% : H_2O 45\% : C_{10}H_{21}OH 5\%$  (мольное соотношение ПАВ:La(III) 1:1) характеризующуюся ламеллярной надмолекулярной упаковкой и систему –  $C_{12}DMAO:La(NO_3)_3 \cdot 6H_2O 45\% : H_2O 50\% : C_{10}H_{21}OH 5\%$  (ПАВ:La(III) 3:1), формирующую нематическую мезофазу.

Контроль стабильности систем проводили по данным поляризационно-оптической микроскопии (поляризационный микроскоп Olympus BX51 с видеокамерой и высокоточной терморегулируемой системой, фиксируя постоянство температуры перехода мезофаза – изотропная жидкость во всем объеме образца.

Пленки полимеров на подложках были получены методом напыления при вращении (spin-coating) на установке Spin coater Laurell WS-400-6NPP-LITE. Как основа для получения ориентированных пленок были использованы предметное стекло и стекло покрытое слоем ИТО (проводящий слой, состоящий из оксидов индия и олова). На подложку наносился тонкий слой полимера – ориентанта, в качестве которого были использованы планарные ориентанты: нейлон марки N6 («Aldrich»), полиимид марки AL 1254 («JSR») и гомеотропный ориентант JALS-2021-R2 («JSR»).

Шероховатость поверхностей полимеров исследовали методом атомно-силовой микроскопии (АСМ) с помощью микроскопа фирмы НТ-МДТ (Solver HV).

Краевой угол смачивания ЛЖК твердой поверхности определяли на приборе Kruss Easy Drop DSA 20E с системой автодозирования методом сидящей капли [29] при температуре 25 °С.

Поверхностное натяжение ЛЖК-систем на границе с воздухом измеряли в термостатируемой ячейке при  $25 \pm 1$  °С, используя модифицированный метод втягивания стеклянной пластинки Вильгельми.

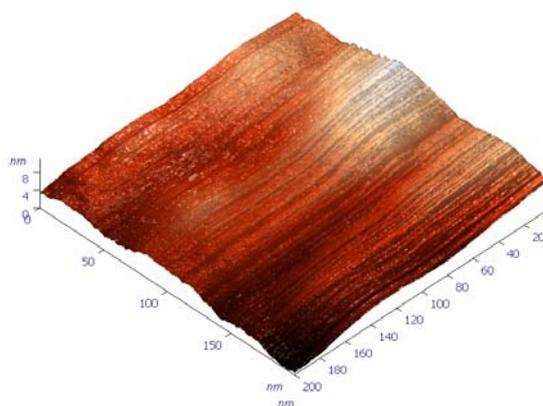
### Обсуждение результатов

На смачивание твердых тел жидкостями оказывают существенное влияние особенности поверхности твердого тела, в частности ее геометрия или шероховатость: формы неровностей, крутизна микрорельефа, упорядоченность неровностей (канавки), их протяженность и направления, углы наклона твердых шероховатых поверхностей. В ходе работы были определены параметры шероховатости исследуемых поверхностей полимеров методом атомно-силовой микроскопии (рис.). Найденные коэффициенты шероховатости учитывались при расчете смачивания по уравнению Венцеля-Дерягина [20].

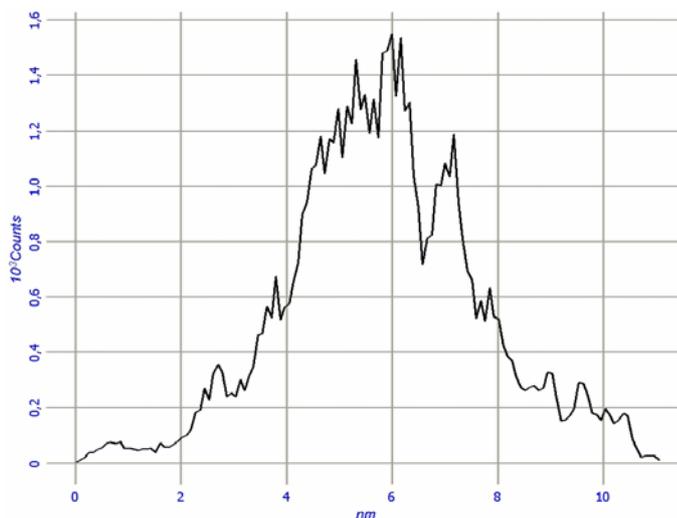
Для определения поверхностно-энергетических характеристик твердых полимеров и композиционных материалов традиционно измеряется краевой угол смачивания капли жидкости с известным поверхностным натяжением, нанесённой на поверхность твердого тела [30].

В работе для выявления особенностей поведения ЛЖК-систем на границе раздела подложка – мезофаза исследовали смачивание поверхностей ЛЖК и тестовыми жидкостями, варьируя тип подложки и мезофаз.

Свободная поверхностная энергия полимерных ориентантов, ее полярная и дисперсионная составляющие, были определены методом геометрической аппроксимации на основе концепции аддитивности Фоукса и уравнений Оуэнса-Вендта по данным измерения краевых углов смачивания поверхности образцов тестовыми жидкостями [31]. В качестве тестовых жидкостей использовались свежеперегранный, очищенный в соответствии с методикой [32] бидистиллят, иодистый метилен, глицерин, формамид, диметилформамид, этиленгликоль, диметилсульфоксид,  $\alpha$ -бромнафталин.



а



б

АСМ изображения ориентированной поверхности нейлона (а) и диаграмма распределения по размеру профиля поверхности (б)

Результаты оценки поверхностных энергетических параметров полимерных подложек представлены в табл. 1. В ходе работы было определено отношение полярной составляющей свободной поверхностной энергии полимерного ориентанта  $\gamma_s^p$  к ее полной величине –  $\chi^p = \gamma_s^p / \gamma_s$ . Данное соотношение использовалось Б. Виджаендром [33] для оценки полярности поверхности полимера (табл. 1).

Таблица 1

**Свободная поверхностная энергия полимеров ( $\gamma_s$ ), ее полярная ( $\gamma_s^p$ )  
и дисперсионная ( $\gamma_s^d$ ) составляющие**

№	Полимер	$\cos \theta$ (H <sub>2</sub> O)	$\gamma_s^p$ , мДж/м <sup>2</sup>	$\gamma_s^d$ , мДж/м <sup>2</sup>	$\gamma_s$ , мДж/м <sup>2</sup>	$x^p$
I	Полиимид гомеотропный	0,02	0,82	29,59	30,41	0,03
II	Полиимид гомеотропный ориентированный	0,07	1,93	27,04	28,97	0,07
III	Полиимид гомеотропный на стекле с ИТО	0,07	1,6	25,8	27,40	0,06
IV	Полиимид гомеотропный ориентированный на стекле с ИТО	0,30	4,97	19,98	24,95	0,20
V	Полиимидом планарный	0,68	15,63	27,88	43,51	0,36
VI	Полиимид планарный ориентированный	0,47	10,69	25,44	36,13	0,29
VII	Полиимидом планар- ный на стекле с ИТО	0,65	11,97	31,02	42,99	0,28
VIII	Полиимид планарный ориентированный на стекле с ИТО	0,60	12,46	24,19	36,65	0,34
IX	Нейлон	0,57	13,39	27,88	41,27	0,32
X	Нейлон ориентированный	0,45	10,08	31,14	41,22	0,24

Анализ результатов, приведенных в табл. 1 показывает, что СПЭ планарного ориентанта существенно выше, чем гомеотропного и лежит в интервале от 36 до 43 мДж/м<sup>2</sup>. Данные подложки характеризуются высокими значениями полярной составляющей СПЭ и полярностью поверхности  $x^p$ . Поверхность гомеотропных ориентантов является более низкоэнергетической (от 24 до 30 мДж/м<sup>2</sup>) и имеет низкое содержание полярных групп в поверхностном слое. Сравнение поверхностных энергетических характеристик полиимидных подложек с ИТО и без токопроводящего слоя указывает на некоторые различия, которые могут быть обусловлены тем, что, нанослои полиимида могут быть не сплошными, а самоорганизующимися разрывными покрытиями с «островковой» структурой [34].

Ориентирование поверхности полимера в целом приводит к уменьшению СПЭ. При использовании полиимида марки JALS-2021-R2, способствующего гомеотропной ориентации молекул в мезофазе, наблюдается увеличение полярности  $x^p$  в результате ориентации. Особенно это проявляется при ориентации стекла с токопроводящим слоем ИТО – полярность поверхности возрастает более чем в 3 раза.

Полярная составляющая СПЭ планарного полиимидного ориентанта в результате ориентации уменьшается. Очевидно, это обусловлено структурой применяемого полиимида, который не содержит подвижных функциональных групп и боковых цепей, способных к переориентации при ориентировании. Незначительное возрастание полярности отмечено только для подложек с нанесенным токопроводящим слоем.

СПЭ нейлона достаточно высока, равно как и полярность поверхности, однако и в этом случае наблюдается снижение величины  $x^p$  в результате ориентации поверхности.

В работе [35] указано, что феноменологически взаимодействие ЖК с подложкой характеризуется соотношением поверхностных натяжений подложки  $\gamma_s$  и ЖК  $\gamma_{LC}$ . Согласно литературным данным [17], если  $\gamma_{LC} > \gamma_s$ , то межмолекулярные силы в ЖК больше сил поверхностного натяжения подложки, что создает гомеотропную ориентацию. Если  $\gamma_s > \gamma_{LC}$ , то силы сцепления с поверхностью преобладают, и возникает планарная ориентация. Подобная закономерность наблюдается у изучаемых нами систем. Так, например,  $\gamma_s > \gamma_{LC}$  для ламеллярного ЖК на планарном полиимиде, что согласуется с вышесказанным.

Представленные данные о поверхностных энергетических характеристиках и полярности поверхности подтверждаются результатами определения контактных углов смачивания исследуемых подложек водой.

Процессы смачивания твердой поверхности жидкими кристаллами подчиняются тем же закономерностям, что и изотропные фазы [36]. Установление взаимосвязи между структурой ЖК в приповерхностных слоях и условиями полного или частичного смачивания остается нерешенной проблемой. Изучение смачивания ориентирующих подложек нематическими и ламеллярными лиомезофазами способствует установлению механизма взаимодействия ЖК с поверхностью полимерных ориентантов.

Нанесение капли жидкокристаллической системы на поверхность стекла, покрытого ориентантом, приводит к планарной ориентации молекул ЛЖК-системы (при использовании нейлона N6 и полиимида AL 1254). При этом длинные оси молекул жидкого кристалла вблизи стекол и во всем слое параллельны поверхности подложки и направлены в одну сторону. При использовании полиимида марки JALS 1254 наблюдается гомеотропная ориентация молекул, при которой длинные оси молекул жидкого кристалла перпендикулярны к поверхности подложки [12].

Первые предположения об определяющей роли физико-химических сил в механизме ориентации нематического ЖК (НЖК) на твердой поверхности были высказаны Фриделем [37]. НЖК ориентируется на подложке гомеотропно, если его молекулы не взаимодействуют с твердой поверхностью, и планарно – при наличии какого-либо физико-химического взаимодействия. Гомогенная ориентация НЖК на подложках, натертых кожей, бумагой, тканью, объясняется дипольным взаимодействием молекул жидкого кристалла с органическими примесями, переносимыми на поверхность при натирании.

Нами определены краевые углы смачивания поверхности ориентанта ЛЖК-системами, полученные значения косинусов углов смачивания приведены в табл. 2.

Таблица 2

**Равновесный краевой угол смачивания поверхности ориентанта  
ЛЖК-системами на основе ПАВ**

Тип мезофазы	Ламеллярная (L)	Нематическая (N)
Индекс образца	Cos $\theta$	
I	0,97	0,87
II	0,82	0,67
III	0,97	0,78
IV	0,94	0,80
V	0,97	0,58
VI	0,80	0,56
VII	0,92	0,80
VIII	0,88	0,48
IX	0,77	0,60
X	0,68	0,56

Положительное смачивание наблюдается для всех используемых нами систем, что связано с гидрофобностью используемых ориентирующих подложек. Из представленных данных видно, что ламеллярная фаза обладает более высокой смачивающей способностью, чем система с нематической мезофазой. Это может быть связано с различным составом и структурой ЛЖК. Сравнение смачивающей способности неионных ПАВ с анионными, катионными и цвиттер-ионными [38] показало, что неионные ПАВ характеризуется значительно более высокой смачивающей способностью. Авторы связывают это с критической концентрацией мицеллообразования, при которой отмечается максимальное смачивающее действие. Известно, что ее значения для оксиэтилированных соединений на один-два порядка ниже, чем для цвиттер-ионных ПАВ с близкой смачивающей способностью: мицеллы неионного ПАВ обогащены водой, более плавучи и более подвижны. Кроме этого, амфифильные молекулы систем ламеллярного ЖК содержат в своем составе полярные оксиэтиленовые группы, которые способны к донорно-акцепторному взаимодействию с полярными группами на поверхности ориентанта [39]. Поверхности с гомеотропным ориентантом лучше смачиваются всеми системами, чем с планарным. По-видимому, гомеотропная ориентация способствует большему растеканию жидкости, то есть взаимодействию с подложкой торцевых частей покрытия слабее, чем боковых. Однако, для более обоснованной интерпретации полученных данных необходимы дальнейшие исследования.

Анализ полученных результатов показал, что смачивание ориентированной поверхности ниже, чем необработанной. По-видимому, ориентирование поверхности путем ее натирания приводит к переориентации поверхностного слоя образца, то есть к планарной ориентации молекул, что сказывается в уменьшении смачивания.

Обращает на себя внимание то обстоятельство, что некоторое возрастание полярности поверхности при натирании подложек с гомеотропной ориентацией не ска-

зывается на результатах смачивания. По-видимому, исследуемые ЛЖК отличаются высокой способностью к самоорганизации в поверхностном слое, которая позволяет амфифильным соединениям ориентироваться наиболее термодинамически выгодным способом на межфазной границе полимер – ЛЖК.

Наибольшее смачивание достигается на подложках с ИТО. Наличие электропроводящего покрытия оказывает влияние на смачивание, по-видимому, из-за предположенной ранее островковой структуры слоя.

Результаты исследования смачивания позволяют перейти к расчету работы адгезии тестовых жидкостей и ЛЖК к ориентированной поверхности полимеров по уравнению Юнга-Дюпре  $W_a = \gamma_l (1 + \cos \theta)$  [40]. Влияние ЖК на смачивание определяется их адсорбцией на границах раздела фаз и во многом зависит от того, на какой границе происходит адсорбция. Следует отметить, что на смачивающую способность ЖК оказывает существенное влияние их поверхностное натяжение [41].

Поверхностное натяжение ЖК является важной характеристикой обеспечения условий требуемой ориентации ЖК на подложках. Определенные в ходе работы поверхностное натяжение исследуемых ЛЖК и расчетные значения работы адгезии мезофаз к поверхности ориентантов представлены в табл. 3.

Таблица 3

Работа адгезии ( $W_a$ ) ЛЖК-систем на основе ПАВ к поверхности ориентанта

Тип мезофазы	Ламеллярная (L)	Нематическая (N)
Поверхностное натяжение, $\gamma \cdot 10^3$ Н/м	32,01	28,04
Индекс образца	Работа адгезии $W_a \cdot 10^4$ , мН/м	
I	63,03	52,28
II	58,26	46,63
III	63,19	49,94
IV	62,01	50,4
V	63,04	44,11
VI	57,76	43,55
VII	61,55	50,4
VIII	60,29	41,37
IX	56,71	35,82
X	53,62	43,74

Установлено, что на адгезионное взаимодействие оказывает существенное влияние природа ориентанта и тип ЛЖК-систем. Нематический ЖК характеризуется меньшей адгезией к исследуемым поверхностям, чем система формирующая ламеллярную мезофазу. Ориентирование поверхности приводит к уменьшению работы адгезии, что коррелирует с данными по смачиванию. Адгезия к поверхности полиимида выше, чем к поверхности нейлона.

### Заключение

В ходе работы проведена оценка поверхностных энергетических параметров полимерных подложек, определена их полярность. Установлено, что СПЭ планарного ориентанта существенно выше, чем гомеотропного, также как и полярность поверхности. Ориентирование поверхности полимера в целом приводит к уменьшению СПЭ.

Проведены исследования смачивающей и адгезионной способностей ЛЖК-систем на различных подложках. Положительное смачивание наблюдается для всех используемых нами систем. Экспериментально подтверждена возможность прогнозирования смачивающей и адгезионной способности ЛЖК-систем в зависимости от мезофаз, которые они формируют, ПАВ, входящих в их состав, природы и геометрии подложки. Установлено, что работа адгезии и смачивание систем, обладающих ламеллярной мезофазой, существенно выше, чем для нематических ЛЖК.

Полученные результаты способствуют изучению механизма взаимодействия ЛЖК-систем с твердой поверхностью, позволяют выявить оптимальные условия смачивания, расширяют представления об особенностях самоорганизации наноструктур приповерхностных слоев, что важно для создания новых оптоэлектронных устройств.

*Работа выполнена при финансовой поддержке ГК № 16.513.11.3076.*

### Список использованной литературы

1. *Li C., He J., Liu J., Yu Z., Zhang Q., He C., Hong W.* // Journal of Colloid and Interface Science. 2010. Vol. 342. P. 354 – 360.
2. *Wang C., Chen D., Jiao X.* // Sci. Technol. Adv. Mater. 2009. Vol. 10. P. 023001.
3. *Kim Y., Nakagawa S., Ri K., Hashimoto S., Masaki H.* Liquid Crystal O/W Emulsions to Mimic Lipids and Strengthen Skin Barrier Function // Cosmetics & Toiletries. 2009. Vol. 7. P. 64 – 71.
4. *Selivanova N.M., Galeeva A.I., Gubaydullin A.T., Lobkov V.S., Galyametdinov Y.G.* // J. Phys. Chem. B. 2012. Vol. 16. P. 735 – 742.
5. *Takotoh K., Hasegawa M., Koden M. et al.* Alignment technologies and applications of liquid crystal devices. Taylor& Francis, 2005. 263 p.
6. *Коньяр Ж.* Ориентация НЖК и их смесей. Минск : БГУ, 1986. 104 с.
7. *Матвиенко В. Н., Курсанов Е. А.* Поверхностные явления в ЖК. М. : МГУ, 1991. 272 с.
8. *Sonin A. A.* The surface physics of liquid crystals. Amsterdam : Gordon and Breach Publishers, 1995. 192 p.
9. *Blinov L. M., Chigrinov V. G.* // Electrooptic effects in LC materials. Springer-Verlag, N.Y., 1994. P. 97 – 131.
10. *Томилин М. Г.* Взаимодействие жидких кристаллов с поверхностью. СПб. : Изд. Политехника, 2001. 325 с.
11. *Лукьянченко Е. С., Козунов В. А., Григорьев В. И.* // Успехи химии. 1985. Т. 54. С. 215 – 216.
12. *Promptnit P., Achalkumar A. S., Bramble J. P. et al.* // ACS Appl. Mater. Interfaces, 2010. Vol. 2. № 12. P. 3686 – 3692.
13. *Jeong S. M., Kim J. K., Shimbo Y. et al.* // Adv. Mater. 2010. Vol. 22. P. 34 – 38.
14. *Galyametdinov Y. G., Knyazev A. A., Dzhabarov V. I. et al.* // Adv. Mater. 2008. Vol. 22. P. 252 – 257.
15. *Park J., Jin-Hyuk Bae, Won-Ho Kim et al.* // Solid-State Electronics. 2010. Vol. 54. № 12. P. 1650 – 1656.
16. *Kim J. K., Le K. V., Dhara S. et al.* // J. Appl. Phys. 2010. Vol. 107. P. 123108.
17. *Невская Г. Е., Томилин М. Г., Чигринов В. Г.* // Жидкие кристаллы и их практическое использование. 2009. Вып. 1. № 27. С. 5 – 23.

18. Fang G., Shi Y., MacLennan J. E., Clark N. A. // *Langmuir*. 2010. Vol. 26. № 22. P. 17482 – 17488.
19. Smalyukh I. I., Senyuk B. I., Shiyonovskii S. V. et al. // *Mol. Cryst. Liq. Cryst.* 2006. Vol. 450. P. 79 – 95.
20. Селиванова Н. М., Галеева А. И., Низамеев И. Р. и др. // *Вестник Казанского технологического университета*. 2010. № 7. С. 87 – 94.
21. Иголкин С. И. // *Прикладная физика*. 2007. № 4. С. 43 – 51.
22. Богданова Ю. Г., Должикова В. Д., Сумм Б. Д. // *Вестн. моск. ун-та. Сер. 2: химия*. 2000. Т. 41. № 3. С. 199 – 201.
23. Bogdanova S. A., Shashkina O. R., Barabanov V. P. et al. // *Polymer Science. Series D. Glues and Sealing Materials*. 2011. Vol. 4. № 2. P. 71 – 77.
24. Барабанов В. П., Богданова С. А. // *Вестник КГТУ*. 2010. № 4. С. 7 – 25.
25. Саутина Н. В., Богданова С. А., Шапкина О. Р. // *Изв. вузов. Сер. хим. и хим. технол.* 2007. Т. 50. Вып. 12. С. 44 – 47.
26. Богданова С. А., Галеева А. И., Саутина Н. В., Галяметдинов Ю. Г. // *Вестник Казанского технологического университета*. 2011. № 11. С. 43 – 47.
27. Селиванова Н. М., Галеева А. И., Конов А. Б. и др. // *ЖФХ*. 2010. Т. 84. № 5. С. 802 – 807.
28. Галеева А. И., Лотфуллина Э. М., Чачков Д. В., Галяметдинов Ю. Г. // *Вестник Казанского технологического университета*. 2010. № 7. С. 454 – 463.
29. Селиванова Н. М., Галеева А. И., Вандюков А. Е., Галяметдинов Ю. Г. // *Изв. РАН. Сер. хим.* 2010. № 2. С. 459 – 462.
30. Старостина И. А., Стоянов О. В. *Кислотно-основные взаимодействия и адгезия в металл – полимерных системах : монография* Казан. гос. технол. ун-та. Казань : КГТУ, 2010. 200 с.
31. Fowkes F. M., Sun C. Y., Oss C. J., Good R. J. // *J. of American Oil Chemists' Society*. 1998. Vol. 75. № 4. P. 447 – 454.
32. Гордон А., Форд Р. *Спутник химика: физико-химические свойства, методики, библиография*. М. : Наука, 1976. 184 с.
33. Сумм Б. Д. *Основы коллоидной химии : учеб. пособие для студ. высш. учеб. заведений*. 2-е изд. М. : Изд. центр «Академия», 2007. 240 с.
34. Кузьменко Е. С., Жуков А. А., Пожидаев Е. П. // *Российские нанотехнологии*. 2010. № 1/2. С. 112.
35. Faetti S., Gatti M., Paleshi V. et al. // *Phys. Rev. Lett.* 1985. Vol. 55. № 16. P. 1681 – 1684.
36. Roucoules V., Ponche A., Geissler A. et al. // *Langmuir*. 2007. Vol. 23. P. 13136 – 13145.
37. Friedel M. G. // *Ann. Phys.* 1922. Vol. 18. P. 273 – 474.
38. Шенфельд Н. *Поверхностно-активные вещества на основе оксида этилена*. М. : Химия, 1982. 752 с.
39. Богданова С. А., Шапкина О. Р., Барабанов В. П., Стоянов О. В. // *Вестник Казанского технологического университета*. 2003. № 1/2. С. 130 – 134.
40. Богданова Ю. Г. *Адгезия и ее роль в обеспечении прочности полимерных композитов : учеб. пособие для студентов по специальности «Композиционные наноматериалы»*. М. : МГУ, 2010. 68 с.
41. Swikel D., Zhao Q., Liu C. et al. // *Langmuir*. 2010. Vol. 26. № 19. P. 15289 – 15294.

Поступила в редакцию 16.04.2012 г.