

# ИННОВАЦИОННЫЕ ПРОГРАММЫ ИНЖЕНЕРНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

## АВТОМАТИЗИРОВАННАЯ СИСТЕМА ИЗМЕРЕНИЙ ПАРАМЕТРОВ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ ЖИДКИХ КРИСТАЛЛОВ С ПОВЕРХНОСТЬЮ ОРИЕНТИРУЮЩЕГО СЛОЯ ЖИДКОКРИСТАЛЛИЧЕСКОЙ ЯЧЕЙКИ\*

В. Беляев<sup>1,2</sup>, А.А. Горбунов<sup>1</sup>, С.В. Мойсеенко<sup>1</sup>,  
Ал.Ан. Муравский<sup>3</sup>, Ан.Ал. Муравский<sup>3</sup>, И.В. Попов<sup>4</sup>,  
Н.А. Бункина<sup>5</sup>, К.А. Пупков<sup>1</sup>, А.С. Соломатин<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Инженерный факультет  
Российский университет дружбы народов  
ул. Орджоникидзе, 3, Москва, Россия, 115419

<sup>2</sup>Московский государственный областной университет  
ул. Радио, 10А, Москва, Россия, 105005

<sup>3</sup>Институт химии новых материалов НАН Беларуси  
ул. Ф. Скорины, 36, Минск, Республика Беларусь, 220141

<sup>4</sup>Центральный научно-исследовательский институт «Комета»  
ул. Велозаводская, 5, Москва, Россия, 115280

<sup>5</sup>Московский авиационный институт  
(Национальный исследовательский университет)  
Волоколамское шоссе, 4, Москва, А-80, ГСП-3, 125993

Разработана модель автоматизированной системы измерения угла преднаклона и азимутальной энергии сцепления в ЖК ячейках. Создана автоматизированная система с возможностью внешнего управления параметрами измерения. Разработано программное обеспечение для управления системой, сбора, преобразования и анализа данных измерений и сопоставления экспериментальных и теоретических результатов.

**Ключевые слова:** автоматизированный комплекс, жидкий кристалл, ЖК, угол преднаклона, азимутальная энергия сцепления.

**Постановка задачи.** Для разработки новых жидкокристаллических (ЖК) материалов и дисплеев нужно знать физические свойства жидких кристаллов (ЖК)

---

\* Работа выполнена при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований, гранты № 12-07-90007-Бел\_а и № 14-07-00574-а, Белорусского республиканского фонда фундаментальных исследований, грант № (Ф12Р-188), и по гранту Президента Российской Федерации НШ-1495.2012.8.

и их зависимость от управляющих воздействий и термодинамических параметров. Измерение этих свойств с удовлетворительной точностью требует разработки новых методик с учетом анизотропии практически всех свойств ЖК. Для объемных свойств ЖК (упругость, вязкость, диэлектрические и оптические параметры и др.) эти методики хорошо разработаны [1—4]. Сложнее измерять параметры взаимодействия ЖК с поверхностью ориентирующего слоя жидкокристаллической ячейки, так как результаты измерений зависят не только от свойств ЖК, но и структуры и метода приготовления ориентирующего слоя. К таким параметрам относятся поверхностное натяжение с полярной и дисперсионной компонентами, энергия сцепления ЖК с подложкой (полярная и азимутальная составляющие), угол преднаклона ЖК на поверхности подложки, поверхностная вязкость [5—8].

Для практических целей наиболее важными из них являются полярная и азимутальная энергия сцепления ЖК с подложкой ( $W_\theta$  и  $W_\phi$  соответственно) и  $\theta$  — угол преднаклона ЖК. Их измерение осуществляется рядом способов, описанных в [9—19]. Для измерения угла наклона в [9—12] используется метод поворота ячейки. При этом измеряется средний угол наклона ЖК. Разработаны методы измерения полярной энергии сцепления по изменению емкости ячейки или разности фазовой задержки между необыкновенным и обыкновенным лучами, распространяющимися в ячейке, при значительной деформации слоя ЖК под действием приложенного напряжения [12—18]. В этих измерениях используются ячейки, в которых деформация директора ЖК (преимущественное направление ориентации ЖК) во всем объеме слоя ЖК происходит в одной плоскости. Это изменение ориентации ЖК внутри ячейки соответствует деформации поперечного или продольного изгиба (spray или S и bend или B соответственно). Методы измерения азимутальной энергии сцепления, основанные на измерении угла поворота поляризации света, проходящего через твист-ячейку, предложены в [12; 18]. Теоретические основы этого метода заложены в [20; 21]. Методы и установки, в которых комбинируется измерение различных перечисленных параметров, описаны в [12; 18].

В [22—24] показано, что в ячейках с неоднородным распределением директора ЖК и произвольными углами преднаклона, наблюдается более сложная связь между величиной разности фазовой задержки и углом преднаклона, чем в однородно ориентированных ячейках. Поэтому измерения, выполняемые по методам [9—12], могут не давать полной информации по углу преднаклона на поверхности ориентирующего слоя. Это существенно при разработке новых ориентирующих ЖК покрытий с углом преднаклона в большом диапазоне, например, на основе кремнийорганических соединений [25; 26].

В связи с этим актуальной проблемой является разработка методов, обеспечивающих как точность и воспроизводимость результатов измерений, так и их физическую обоснованность. Технологической задачей разработки метода исследований является скорость и простота измерений, что может обеспечиваться автоматизацией управления параметрами измерительного процесса и регистрацией результатов измерений. При этом может использоваться комбинация различных методик измерения в одной установке. В конечном счете это позволяет ускорить процесс поиска новых материалов для ЖК дисплеев, достичь более точного измерения их характеристик и снижения стоимости конечных изделий.

Целью работы является создание автоматизированного комплекса исследований элементов ЖК дисплеев. Для этого были решены следующие задачи:

- разработка модели автоматизированной системы измерения угла преднаклона и азимутальной энергии сцепления в ЖК ячейках;
- создание автоматизированной системы с возможностью внешнего управления параметрами измерения;
- разработка программного обеспечения для управления системой, сбора, преобразования и анализа данных измерений и сопоставления экспериментальных и теоретических результатов.

**Физическая модель измерения поверхностного угла наклона.** Для определения величины поверхностного угла наклона используют метод измерения пропускания света в зависимости от угла поворота ЖК ячейки вокруг оси, перпендикулярной к направлению распространения светового пучка. Основы метода разработаны в [1—4].

Схема измерения показана на рис. 1. Ячейка, состоящая из двух стеклянных подложек с ориентирующими покрытиями на внутренних сторонах подложек, натертыми антипараллельно относительно друг друга, располагается на оси вращения, поверхностью перпендикулярно световому лучу, между скрещенными поляризаторами, которые составляют углы с осью вращения по  $45^\circ$ . Ячейка может вращаться вокруг оси, параллельной поверхности, перпендикулярной направлению натирания и луча света. Измеряется пропускание света при повороте ячейки на различные углы вокруг этой оси.

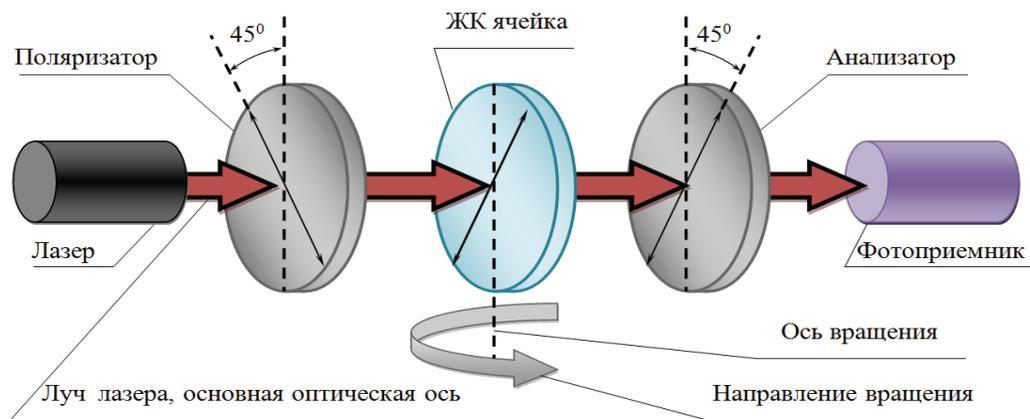


Рис. 1. Схема определения величины поверхностного угла наклона

Интенсивность света  $I$ , прошедшего через систему на рис. 2 и зарегистрированного фотоприемником, связана с фазовой задержкой  $\delta$  между необыкновенным и обыкновенным лучами, распространяющимися в ячейке, соотношением:

$$I = I_0 \sin^2 \left( \frac{\delta}{2} \right), \quad (1)$$

где  $I$  — интенсивность светового пучка, проходящего через оба поляризатора с параллельными осями, с учетом поглощения ячейки.

Фазовая задержка светового луча, прошедшего через ячейку при угле поворота ячейки  $\psi$ , может быть представлена как

$$\delta(\alpha, \psi) = \frac{2\pi}{\lambda} \cdot d \cdot f(\alpha, \psi), \quad (2)$$

где  $d$  — толщина слоя ЖК;  $\lambda$  — длина волны света,  $f(\alpha, \psi)$  — функция угла преднаклона ЖК  $\alpha = 90^\circ - \theta$  и угла поворота ячейки  $\psi$ , определяемого как угол между падающим световым лучом и направлением нормали к поверхности ячейки.

Функция  $f(\alpha, \psi)$  выражается как

$$\begin{aligned} f(\alpha, \psi) = & \frac{1}{c^2} (a^2 - b^2) \cdot \sin \alpha \cdot \cos \alpha \cdot \sin \psi + \\ & + \frac{1}{c} \sqrt{1 - \frac{a^2 b^2}{c^2} \cdot \sin^2 \psi} - \frac{1}{b} \cdot \sqrt{1 - b^2 \cdot \sin^2 \psi}. \end{aligned} \quad (3)$$

$$a = \frac{1}{n_1}; \quad b = \frac{1}{n_2}; \quad c^2 = a^2 \cdot \cos^2 \alpha + b^2 \cdot \sin^2 \alpha,$$

где  $n_1$  — показатель преломления ЖК для необыкновенного луча,  $n_2$  — показатель преломления ЖК для обыкновенного луча.

Для определения интенсивности света прошедшего через ЖК ячейку в опыте с вращением ячейки вдоль оси, параллельной оси распространения света, была применена следующая формула:

$$T(\psi) = \frac{1}{2} \sin^2 \left\{ \frac{1}{2} \cdot \delta(\psi) \right\}. \quad (4)$$

Для исследования азимутальной энергии сцепления  $W_\phi$  определяется длина волны  $\lambda$ , для которой угол поворота линейно-поляризованного света определяется только углом закрутки нематической твист-ячейки; регистрируется поворот плоскости поляризации  $\phi$ , при прохождении света с длиной волны  $\lambda$  через ЖК ячейку. Азимутальная энергия сцепления определяется параметрами ЖК и геометрией ячейки следующим образом:

$$W = \frac{2 \cdot K_{22}}{d \cdot \sin 2\Delta\phi}, \quad (5)$$

где  $\Delta\phi = \phi_t - \phi_0$ ,  $\phi$  — угол закрутки ячейки, заданный условиями обработки ориентирующего слоя,  $\phi_t$  — реальный угол закрутки жидкого кристалла в ячейке;  $d$  — зазор ячейки,  $K_{22}$  — константа упругости ЖК для деформации кручения.

Для определения величины  $\phi$ , измеряют пропускание твист-ячейки при ее вращении вокруг оси, нормальной к поверхности подложки. Пропускание света длины волны  $\lambda_c$  ЖК ячейкой определяется формулой

$$T = \cos^2 \{ \phi_t + \beta_{P-A} \}, \quad (6)$$

где  $\beta_{P-A}$  — угол между оптическими осями поляризатора и анализатора.

Принципиальная схема установки для измерения поверхностного угла наклона и азимутальной энергии сцепления представлена на рис. 2.

Автоматизированный комплекс измерения параметров ЖК ячейки был осуществлен с помощью программного блока управления (SMSD-1.5K). На рис. 3 приведена блок-схема установки с последовательностью действий при выполнении измерения и управление этими действиями.

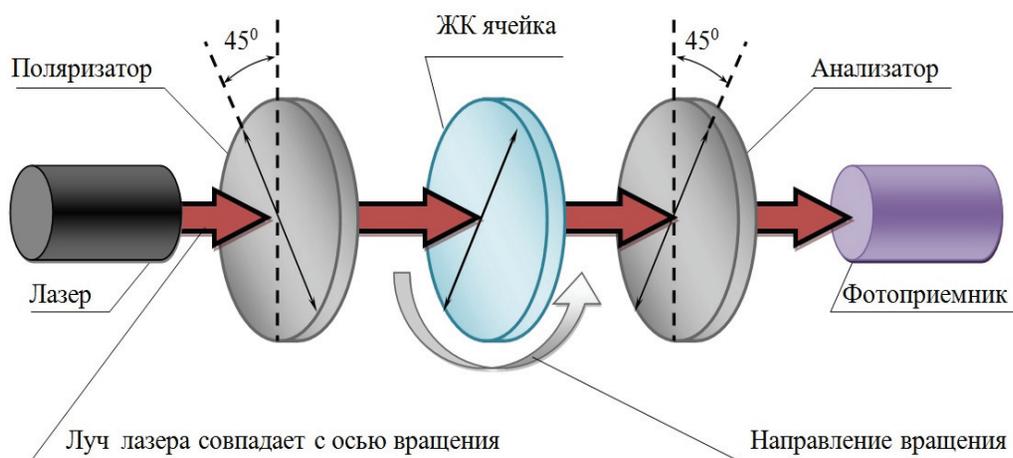
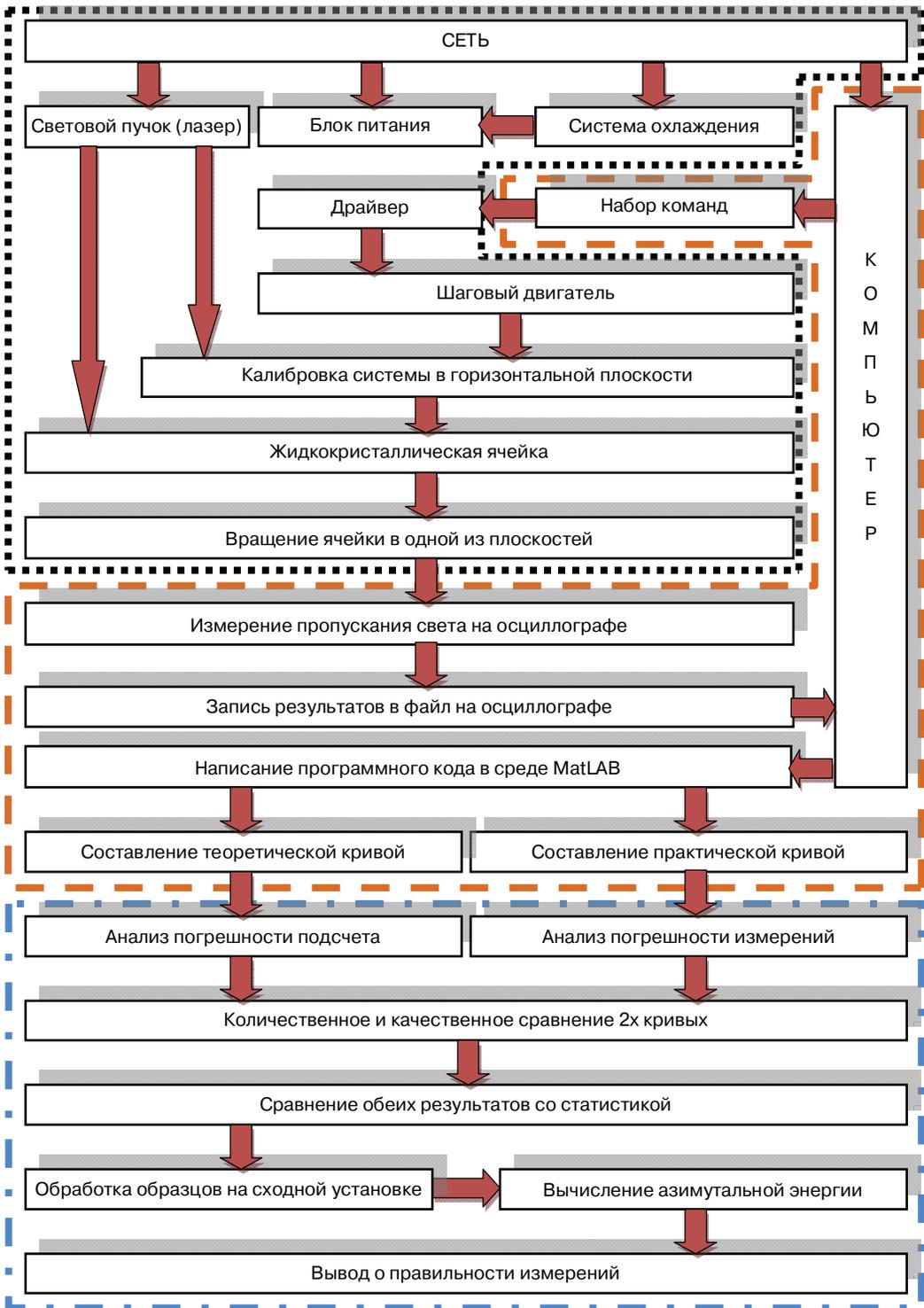


Рис. 2. Схема определения величины поверхностного угла наклона

**Система управления, сбора, преобразования и анализа данных измерений.** Процесс измерения происходит следующим образом. Излучение лазера проходит через поляризатор и падает на ЖК ячейку, находящуюся в движении. После прохождения через движущуюся ЖК ячейку луч проходит через анализатор и попадает в фотоприемник. Вал, вращающий ячейку, приводится в движение ременной передачей от шагового мотора по заданной программе, установленной в блок управления мотором. Скорость вращения ячейки оптимально подобрана для своевременного снятия показаний с фотоприемника. Данные с фотоприемника попадают на осциллограф, где обрабатываются в специальной программе с возможностью записи массива данных в файл. Для обработки данных был выбран программный пакет Matlab. Данные записываются в файл формата совместимого с этим программным пакетом.

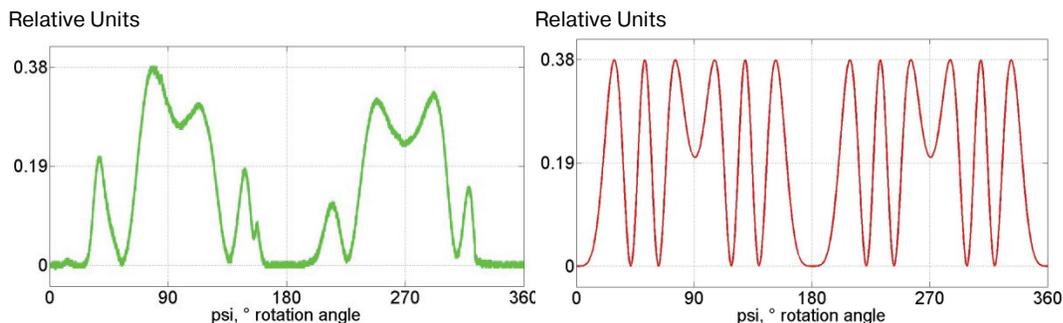
После завершения исполнения файла получаем график пропускания света ЖК твист-ячейкой в зависимости от угла поворота по оси вращения симметричной лучу лазера (рис. 4).

Чтобы определить измеряемый параметр взаимодействия ЖК с ориентирующей подложкой, например азимутальной энергии сцепления, необходимо совместить кривую пропускания света, полученную экспериментально, с кривой, рассчитанной по формуле (4) для некоторого значения угла недозакрутки  $\Delta\phi$ .

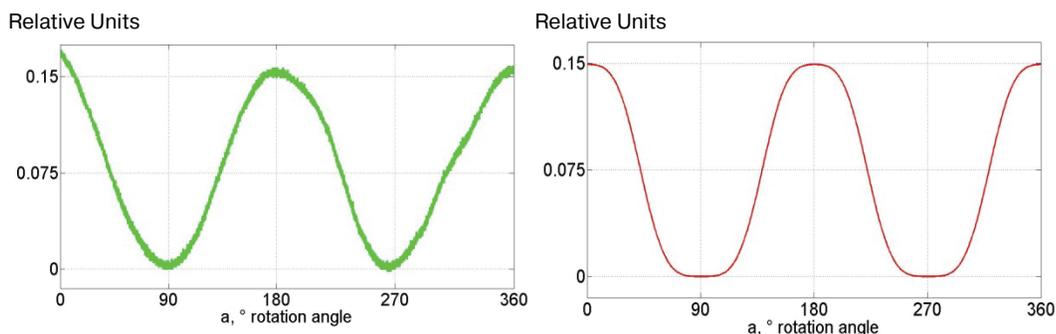


**Рис. 3.** Блок-схема установки, описывающая последовательность действий при проведении эксперимента:

Обозначения: — физическое звено опыта,  
 — программное звено опыта,  
 — аналитическое звено опыта.



**Рис. 4.** Теоретическая кривая пропускания света в зависимости от угла поворота вокруг оси, перпендикулярной пучку света (справа) и экспериментальная кривая измерения этого же параметра на примере S ячейки № 2046 (слева)



**Рис. 5.** Теоретическая кривая пропускания света в зависимости от угла поворота вокруг оси, параллельной пучку света (справа) и экспериментальная кривая измерения этого же параметра на примере твист ячейки № 2727 (слева).

Твист-ячейка заполнена ЖК-807. Показатели преломления для обыкновенного и необыкновенного лучей  $n_o = 1,5$ ,  $n_e = 1,7$ . Кривая пропускания рассчитана для угла недозакрутки ячейки  $\Delta\varphi = 4^\circ$ . Толщина ячейки  $d = 23$  мкм, константа упругости  $K_{22} = 3 \cdot 10^{-12}$  Н

Чтобы определить измеряемый параметр взаимодействия ЖК с ориентирующей подложкой, например угол преднаклона, необходимо совместить аналогичную кривую пропускания света, полученную экспериментально по схеме на рис. 1, с кривой, рассчитанной по формулам (2—4), рис. 4. Высота локальных максимумов пропускания при увеличении угла поворота уменьшается на экспериментальных графиках из-за отражения света от внешних поверхностей подложек ЖК ячейки. Этот эффект в формулах (2—4) не учтен.

Разработано программное обеспечение в среде Matlab, способное из данных формул с возможностью изменения параметров строить теоретические графики пропускания света в зависимости от параметров каждой конкретной ЖК ячейки и необходимого для измерения диапазона.

\*\*\*

Для двух методов измерения свойств жидкокристаллических ячеек разработаны и физически смоделированы установки и системы автоматического поворота

подвижных элементов и их кинематические схемы управления при различных направлениях поворота ячейки в одной установке.

Разработанные системы обеспечивают диапазон изменения углов поворота в заданном диапазоне с точностью, достаточной для правильного определения измеряемых физических параметров, а также высокую скорость измерения.

Разработано программное обеспечение, позволяющее сохранять полученные данные в файлах, совместимых с программным макетом Matlab, и смоделировать зависимость пропускания света от угла поворота ячейки, исходя из основных параметров кристалла для систем с различными направлениями поворота ячейки.

Для образцов ЖК ячеек различного типа ориентации смоделировано пропускание света в зависимости от угла поворота ячейки; эти данные сопоставлены с экспериментальными результатами и на их основе определены значения параметров взаимодействия жидких кристаллов с поверхностью ориентирующего слоя.

Авторы благодарят В.Г. Мазаеву за предоставление образцов КОС, В.М. Шошина, Ю.П. Бобылева за изготовление образцов ЖК ячеек, С.М. Трофимова за изготовление некоторых деталей оснастки установки, Д.Н. Чаусова за помощь в оформлении и структурировании данных.

#### ЛИТЕРАТУРА

- [1] *Physical Properties of Liquid Crystals*, Editors: G.W. Gray, V. Vill, H.W. Spiess, D. Demus, J.W. Goodby, Wiley-VCH, New-York, 522 p., 2009.
- [2] *Physical Properties of Liquid Crystals*, EMIS Data Review Series, vol. 1, Nematics, ed. D.A. Dunmur, A. Fukuda and G.R. Luckhurst, 2000.
- [3] *Belyaev V.V. "Viscosity of Nematic Liquid Crystals Hardcover"*, Cambridge International Science Publishing Ltd (2009), 238 p.
- [4] *Belyaev V.V. "Physical methods for measuring the viscosity coefficients of nematic liquid crystals"*, *Physics-Uspexhi (Advances in Physical Sciences)*, V. 44, p. 255—284 (2001).  
*J. Cognard Alignment of Nematic Liquid Crystals and Their Mixtures, Molecular Crystals and Liquid Crystals, Suppl. 1 (Gordon and Breach, London, 1982)*
- [5] *Yablonski S., Rajteri M., Oldano C., Durand G. Dynamics of flexoelectric surface oscillations in a nematic liquid crystal, Proc. SPIE 2731, 87 (1995).*
- [6] *Yablonski S., Rajteri M., Oldano C., Durand G. Dynamics of flexoelectric surface oscillations in a nematic liquid crystal, Proc. SPIE 2731, 87 (1995).*
- [7] *Vorflusev V.P., Kitzerow H.-S., Chigrinov V.G. Azimuthal surface gliding of a nematic liquid crystal, Appl. Phys. Lett. 70, 3359 (1997).*
- [8] *Marinov Y., Shonova N., Versace C., Petrov A.G. Flexoelectric spectroscopy measurements of surface dissipation of energy and surface viscosity of weakly anchored homeotropic nematic // Mol. Cryst. Liq. Cryst. 1999, 329, p. 533.*
- [9] *Opara T., Baran J.W., Zmija J. "Interferential method for determining the inclination angle of molecules in plane-parallel liquid crystalline layers", Cryst. Res. Technol. 22, 1073 (1988).*
- [10] *Chen S.-H., Kuo C.-L., Wie J.G., Hao C.-W. "Implementation and assessment of a tilt-angle-measurement system for liquid-crystal cells", Proc. SPIE 1815, Display Technologies, 194 (1992).*

- [11] Han K.Y., Miyashita T., Uchida T. “Accurate measurement of pretilt angle in the liquid crystal cell by an improved crystal rotation method”, *Mol. Cryst. Liq. Cryst.* 241, 147—157 (1994).
- [12] Muravsky A.I., Murauski A., Mazaeva V., Belyaev V. “Parameters on the LC alignment of organosilicon compound films”, *J. Soc. Inf. Display.* 13, 349—354 (2005).
- [13] Yokoyama H., van Sprang H.A. A novel method for determining the anchoring energy function at a nematic liquid-crystal wall interface from director distortion at high fields, *J. Appl. Phys.* 57, pp. 4520—4526 (1985).
- [14] Murauski A., Chigrinov V., Muravsky A., Fion S.-Y., Yeung, Ho J., Kwok H-S. Determination of the polar anchoring energy by electrical measurement, *Phys. Rev.* E71, 061707 (2005).
- [15] Nastishin Yu.A., Polak R.D., Shiyonovskii S.V., Bodnar V.H., Lavrentovich O.D. Nematic polar anchoring strength measured by electric field techniques, *J. Appl. Phys.* 86, No. 8, pp. 4199—4213 (1999).
- [16] Murauski A., Chigrinov V., Kwok H-S. New method for measuring polar anchoring energy of nematic liquid crystals, *Liq. Cryst.* 36, No.8, pp. 779—786 (2009).
- [17] Toko Y., Akahane T. Evaluation of Pretilt Angle and Polar Anchoring Strength of Amorphous Alignment Liquid Crystal Display from Capacitance Versus Applied Voltage Measuremen, *Mol. Cryst. Liq. Cryst. Sci. Technol.* 368, pp.469—481 (2001)
- [18] Murauski A., Muravsky A., Agabekov V. “Setup for simultaneous measurement of azimuthal and polar anchoring energy of liquid crystal within single cell in automatic regime”, *Bulletin of Moscow Region State University. Series Physics and Mathematics*, Issue 1, p. 51—56 (2013).
- [19] Belyaev V.V., Chausov D.N., Solomatin A.S., Murauski A.A., Murauski A.A., Mazaeva V.G. The study of the interaction energy with LCD monomolecular films orienting // 6<sup>th</sup> Workshop “Metrology and Standartization in Nanotechnology and Nanoindustry”, ... Proc., Ekaterinburg, 4—7 june 2013 г. Abstract, p. 37—40.
- [20] Zhou Y., He Z., Sato S. Generalized Relation Theory of Torque Balance Method for Azimuthal Anchoring Measurements, *Jpn. J. Appl. Phys.* 38, pp.4857 (1999)
- [21] Kononov V.A., Muravski A.A., Yakovenko S.Ye., Pelzl J. An Accurate Spectral Method for Measuring Twist Angle of Twisted Cells with Rubbed and Grooved Surfaces, *SID Symp. Dig. Tech. Pap.* 31, 1, pp. 620—623 (2000).
- [22] Belyaev V.V., Solomatin A.S., Chausov D.N., Gorbunov A.A. “Measurement of the LC pretilt angle and polar anchoring in cells with homogeneous and inhomogeneous LC director configuration and weak anchoring on organosilicon aligning films”, in *SID’12 Digest*, (2012), pp. 1422—1425.
- [23] Belyaev V., Solomatin A., Chausov D. “Phase retardation vs. pretilt angle in liquid crystal cells with homogeneous and inhomogeneous LC director configuration”, *Optics Express* 21, 4244—4249 (2013).
- [24] Belyaev V.V., Solomatin A.S., Chausov D.N. “Measurement of the liquid crystal pretilt angle in cells with homogeneous and inhomogeneous LC director configuration”, *Applied Optics*, Vol. 52, pp. 3012—3019 (2013).
- [25] Belyaev V.V., Mazaeva V.G. “Green technologies of LC alignment on the base of organosilicon compounds”, in *SID’11 Digest* (2011), pp. 1412—1415.
- [26] Belyaev V., Mazaeva V., Min’ko A., Timofeev S. “Organosilicon films with molecular micro-relief to align liquid crystals”, *Bulletin of Moscow Region State University. Series Physics and Mathematics*, Issue 1, p. 52—57 (2010).

**AUTOMATED SYSTEM  
FOR MEASURING THE PARAMETERS OF THE INTERACTION  
WITH THE SURFACE OF THE LIQUID CRYSTAL  
ALIGNMENT LAYER OF A LIQUID CRYSTAL CELL**

**V.V. Belyaev<sup>1,2</sup>, A.A. Gorbunov<sup>1</sup>, S.V. Moiseyenko<sup>1</sup>,  
A.I. Murauski<sup>3</sup>, An.A. Murauski<sup>3</sup>, I.V. Popov<sup>4</sup>,  
N.A. Bunkina<sup>5</sup>, K.A. Pupkov<sup>1</sup>, A.S. Solomatin<sup>2</sup>**

<sup>1</sup>Faculty of Engineering  
Peoples' Friendship University of Russia  
*Ordzhonikidze str., 3, Moscow, Russia, 115093*

<sup>2</sup>Moscow Region State University  
*Radio str., h. 10A, Moscow, Russia, 105005*

<sup>3</sup>Institute of Chemistry of New Materials  
of National Academy of Sciences of Belarus  
*F. Scoriny str., 36, Minsk, Belarus, 220141*

<sup>4</sup>Central Research Institute "Kometa"  
*Veloavodskaja str., 5, Moscow, Russia, 115280*

<sup>5</sup>Moscow Aviation Institute (National Research University)  
*Volokolamskoe av., h. 4, Moscow, A-80, Russia, 125993*

A model of an automated system of pretilt angle measurement and azimuthal anchoring energy in LC cells is developed. The automated system with ability to external control of measurement parameters. A software for the system control, data collection, transformation and analysis of measurement data is developed to comparison of the experimental and theoretical results.

**Key words:** automated system, liquid crystal, LCD, angle pretilt, azimuthal anchoring energy.