http://dx.doi.org/10.35596/1729-7648-2019-125-7-21-27

*Оригинальная статья*
*Original paper*

УДК 537.226

# ЭЛЕКТРООПТИЧЕСКОЕ ПЕРЕКЛЮЧЕНИЕ ГЛАВНОЙ ОПТИЧЕСКОЙ ОСИ СПИРАЛЬНОЙ НАНОСТРУКТУРЫ СЕГНЕТОЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ЖИДКОГО КРИСТАЛЛА В ПЛАНАРНО-ОРИЕНТИРОВАННОЙ ДИСПЛЕЙНОЙ ЯЧЕЙКЕ

ПОЖИДАЕВ Е.П., ТКАЧЕНКО Т.П., КУЗНЕЦОВ А.В., КОМПАНЕЦ И.Н.

*Физический институт имени П.Н. Лебедева РАН, г. Москва, Российская Федерация*

*Поступила в редакцию 8 ноября 2019*

© Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники, 2019

**Аннотация.** В известной дисплейной ячейке с нематическим жидким кристаллом (НЖК) и встречно-штыревыми электродами на одной из стеклянных подложек реализуется режим переключения «In-Plane Switching» (IPS), при котором главная оптическая ось НЖК переориентируется в параллельной подложкам плоскости, обеспечивая наиболее корректную цветопередачу при разных углах обзора, вплоть до 178 ° по горизонтали и вертикали. К сожалению, создание гребенки металлических электродов усложняет и удорожает технологический процесс и вызывает ухудшение контрастности изображения. В то же время экспериментальные результаты и расчеты, основанные на классической электрооптике кристаллов, свидетельствуют, что электрооптическое переключение в режиме IPS является естественной и неотъемлемой особенностью обычной (со сплошными электродами) дисплейной ячейки с планарно-ориентированным слоем сегнетоэлектрического жидкого кристалла (СЖК), в котором реализуется эффект деформированной электрическим полем спиральной наноструктуры СЖК (DHF-эффект). В такой ячейке переориентация главной оптической оси под воздействием слабого электрического поля тоже происходит в плоскости подложек, если СЖК имеет малый шаг (около 100 нм и менее) и большой угол наклона молекул в слое (около 38 ° и более). Измеренные в данной работе зависимости коэффициента пропускания света СЖК-ячейкой подтвердили достижение электрооптического режима IPS в ячейке DHF СЖК, причем частота модуляции света составила 1 кГц. Таким образом, при сохранении всех достоинств IPS-режима, известных в НЖК, реализация его в СЖК позволяет дополнительно получить технологические преимущества и многократный выигрыш в частоте модуляции.

**Ключевые слова:** IPS, переключение главной оптической оси, сегнетоэлектрический жидкий кристалл, электрооптический эффект деформированной спиральной наноструктуры.

**Конфликт интересов.** Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

**Благодарности.** Авторы выражают благодарность В.В. Кесаеву за помощь в проведении экспериментов и полезные обсуждения.

**Для цитирования.** Пожидаев Е.П., Ткаченко Т.П., Кузнецов А.В., Компанец И.Н. Электрооптическое переключение главной оптической оси спиральной наноструктуры сегнетоэлектрического жидкого кристалла в планарно-ориентированной дисплейной ячейке. Доклады БГУИР. 2019; 7(125): 21-27.

# ELECTRO-OPTICAL SWITCHING OF THE MAIN OPTICAL AXIS OF A FERROELECTRIC LIQUID CRYSTAL SPIRAL NANOSTRUCTUREIN A PLANAR-ORIENTED DISPLAY CELL

EUGENY P. POZHIDAEV, TIMOFEY P. TKACHENKO, ARTEMY V. KUZNETSOV, IGOR N. KOMPANETS

*P.N. Lebedev Physical Institute of RAS, Moscow, Russian Federation*

*Submitted 8 November 2019*

© Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics, 2019

**Abstract.** In a known display cell with the nematic liquid crystal (NLC) and interdigital electrodes on one of the glass substrates, the "In-Plane Switching" (IPS) mode is implemented, in which the NLC main optical axis reorients in a plane parallel to substrates, providing the most correct color reproduction at different angles view, up to 178 ° horizontally and vertically. Unfortunately, the creation of interdigital metal electrodes complicates and increases the technological process cost and causes a decrease in image contrast. At the same time, experimental results and calculations based on classical electro-optics of crystals indicate that electro-optical switching in the IPS mode is a natural and intrinsic feature of a conventional (with continuous electrodes) display cell with a planar-oriented layer of the ferroelectric liquid crystal (FLC), in which the effect of the deformed (by the electric field) helix FLC nanostructure is realized (DHF effect). In such a cell, the reorientation of the main optical axis under the influence of a weak electric field also occurs in the substrate plane if the FLC has a small pitch (about 100 nm or less) and a large tilt angle of molecules in the layer (about 38 ° or more). The dependences of the FLC cell light transmittance measured in this work, confirmed the achievement of the IPS electro-optical mode in the DHF FLC cell; moreover, the light modulation frequency was 1 kHz. Thus, while maintaining all the advantages of the IPS mode known in NLC, its implementation in FLC allows additionally obtaining technological advantages and multiple increase in modulation frequency.

**Keywords:** IPS, main optical axis switching, ferroelectric liquid crystal, crystal-optical effect of deformed spiral nanostructure.

**Conflict of interests.** The authors declare no conflict of interests.

**Gratitude.** The authors are grateful to V.V. Kesaev for help in conducting experiments and useful discussions.

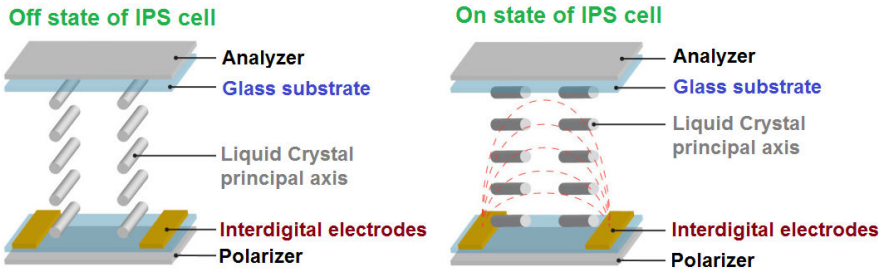
**For citation.** Pozhidaev E.P., Tkachenko T.P., Kuznetsov A.V., Kompanets I.N. Electro-optical switching of the main optical axis of a ferroelectric liquid crystal spiral nanostructure in a planar-oriented display cell. Doklady BGUIR. 2019; 7(125): 21-27.

## Введение

Основными особенностями переключения главной оси нематического жидкого кристалла (НЖК) параллельно плоскости подложек дисплейной ячейки, известного как «In-Plane Switching» (IPS), являются большой угол обзора (более 170 º) и слабая модуляция цветовой гаммы в процессе переключения [1–4]. Вместе с тем производство IPS-дисплеев на основе нематических жидких кристаллов связано с решением довольно сложных технологических задач, вызванных необходимостью использования решетки встречно-штыревых электродов, как показано на рис. 1.

В спиральных наноструктурах жидкокристаллических сегнетоэлектриков наблюдается электрооптический эффект деформированной электрическим полем спиральной наноструктуры сегнетоэлектрического жидкого кристалла (СЖК) [5]. Электрооптическая модуляция при деформации этой структуры в DHFLC-ячейках, которая детально изучена теоретически и экспериментально [6–9], известна под англоязычной аббревиатурой DHFLC-effect, поскольку все публикации на эту тему выполнены на английском языке. Известно, что главная оптическая ось DHFLC-ячейки отклоняется в электрическом поле в плоскости, перпендикулярной

направлению поля [10]. В планарно ориентированной DHFLC-ячейке главная оптическая ось параллельна подложкам, а поле перпендикулярно им. Следовательно, главная оптическая ось отклоняется в плоскости, параллельной плоскости подложек (рис. 2).




*a* *b*

**Рис. 1.** Включенное (*a*) и выключенное (*b*) состояния ячейки IPS НЖК; штриховыми линиями показаны силовые линии электрического поля *E*

**Fig. 1.** On (*a*) and off (*b*) state of the *IPS* NLC cell: dashed lines show the force lines of the electric field *E*

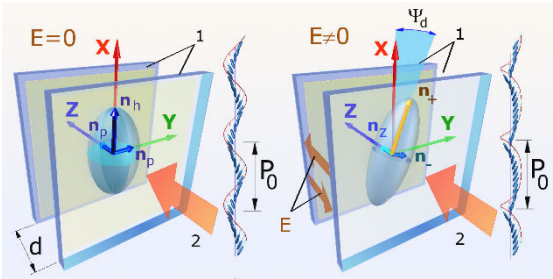



**Рис. 2.** Геометрия планарно-ориентированной ячейки DHFLC с равномерно закрученной спиралью: цифрой 1 обозначены стеклянные пластины, покрытые слоем оксида индия-олова (ITO), поверх которых нанесены ориентирующие слои; стрелка 2 указывает направление распространения падающего линейно поляризованного света; *d* – толщина слоя DHFLC; $P_0$ – шаг спирали; $n_p$, $n_h$ – показатели преломления спиральной структуры DHFLC при $E = 0$ [10]; $\Psi_d(E) \sim E$ – отклонение главной оптической оси в электрическом поле

**Fig. 2.** The geometry of a planar-oriented DHFLC cell with a uniformly twisted spiral: the number 1 indicates glass plates coated with a layer of indium tin oxide (ITO), on top of which are orienting layers; arrow 2 indicates the direction of propagation of the incident linearly polarized light; *d* – DHFLC layer thickness; $P_0$ is the spiral pitch; $n_p$, $n_h$ are the refractive indices of the helical structure of DHFLC at $E = 0$ [10]; $\Psi_d(E) \sim E$ is the deviation of the main optical axis in the electric field

Замена периодической спиральной наноструктуры макроскопическими эллипсоидами эффективных показателей преломления (рис. 2) при анализе распространения света через структуру будет верной на определенной длине волны λ, несмотря на некоторые трудности, связанные с эффектами оптического вращения и Брегговского отражения, если [11]

$$p_0 \le \lambda / 5 .$$

Рис. 2 иллюстрирует специфическое двухосное преобразование эллипсоида эффективных показателей преломления $n_+ \sim E^2$, $n_- \sim E^2$, $n_z \sim E^2$ в электрическом поле $E$ в сочетании с отклонением главной оптической оси на угол $\Psi_d \sim E$ [6–10] в плоскости, перпендикулярной направлению электрического поля [10], то есть в плоскости подложек (обозначено цифрой 1 на рис. 2). Таким образом, существует некоторая аналогия между переключением главной оптической оси в IPS НЖК (рис. 1) и в планарно-ориентированных DHFLC-ячейках (рис. 2). Следовательно, эффект IPS в ячейках DHFLC возможен, если упомянутое выше двухосное преобразование эффективных показателей преломления не оказывает существенного влияния на модуляцию фазы света в слое DHFLC. Иначе говоря, должно выполняться соотношение

$$n_+(E) << n_h;\ n_-(E) << n_p. \qquad (1)$$

Данная работа посвящена экспериментальному доказательству существования такой

возможности. Предлагаемый подход основан на том факте, что при выполнении условия (1) светопропускание $T$ планарно-ориентированного слоя DHFLC, расположенного между скрещенными поляризаторами, описывается соотношением, доказанным как теоретически, так и экспериментально [7]:

$$T(E) = \sin^2 4\Psi_d(E) \cdot \sin^2 \frac{\pi \Delta n_{eff}(E) d}{\lambda}, \qquad (2)$$

где $\Delta n_{eff}(E) = n_+(E) - n_-(E)$ – эффективное двулучепреломление слоя DHFLC в электрическом поле.

## Результаты экспериментов и их обсуждение

Две многокомпонентные сегнетоэлектрические жидкокристаллические (СЖК) смеси с субволновым шагом спирали ($p_0 < 100$ нм) были разработаны авторами для исследования электрооптических DHFLC-ячеек. Это FLC-587-F7, у которого угол отклонения молекул в смектических слоях $\theta = 31{,}6°$ при 22 °, и FLC-650 ($\theta = 38{,}4°$ при 22°C, как показано на рис. 3). Обе смеси СЖК состоят из бифенилпиримидинов в качестве ахиральной смектической С-матрицы и трифторметилалкильных диэфиров терфенилдикарбоновой кислоты в качестве хиральных легирующих примесей, обладающих очень высокой закручивающей способностью [12]. Эти смеси, которые являются частными случаями общего материаловедческого подхода, описанного в [12], были исследованы, поскольку они характеризуются довольно разными зависимостями $\Delta n_{eff}(E)$ и $\Psi_d(E)$, показанными на рис. 3.

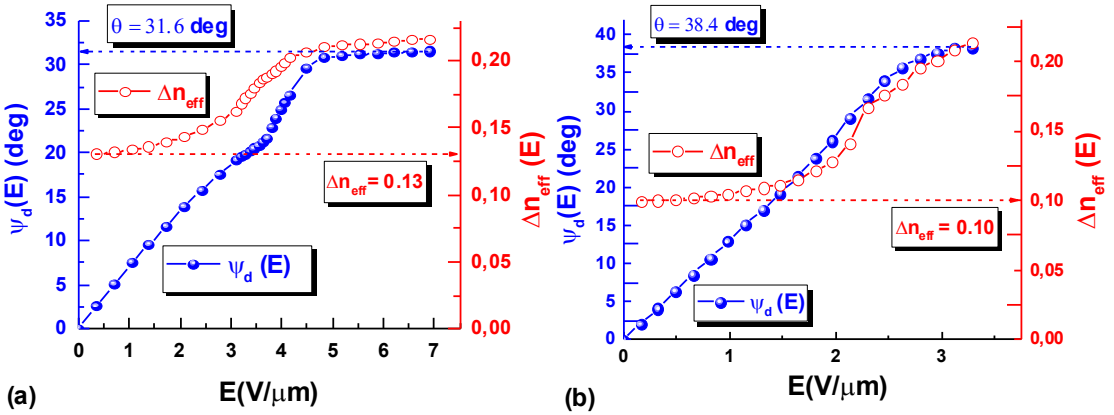



**Рис. 3.** Зависимости $\Delta n_{eff}(E)$ (окружности) и $\Psi_d(E)$ (шары) для FLC-587-F7 (*a*) и FLC-650 (*b*), измеренные при 22 °C на длине волны 632,8 нм

**Fig. 3.** Dependencies $\Delta n_{eff}(E)$ (circles) and $\Psi_d(E)$ (balls) for FLC-587-F7 (*a*) and FLC-650 (*b*) measured at 22 °C on wavelength 632,8 nm

Указанные зависимости были получены в экспериментальной установке на основе схемы интерферометра Маха-Цендера, которая подробно описана в [8]. Отметим, что количественное значение угла наклона θ молекул в смектических слоях в геликоидальных структурах СЖК определяется уровнем насыщения $\Psi_d(E)$ экспериментальной кривой, поведение которой в электрическом поле (так же как и $\Delta n_{eff}(E)$ зависит от величины угла наклона, как показано на рис. 3.

На рис. 4 приведены измеренные зависимости $T(E)$ двух ячеек DHFLC (с FLC-587-F7 и FLC-650) и рассчитанные значения сомножителей, включенных в соотношение (2). Для расчетов взяты измеренные зависимости $\Psi_d(E)$ и $\Delta n_{eff}(E)$, представленные на рис. 3. Рассчитанные компоненты коэффициента пропускания показаны окружностями и ромбами. Измерения проводились при 22 °C на длине волны 632,8 нм

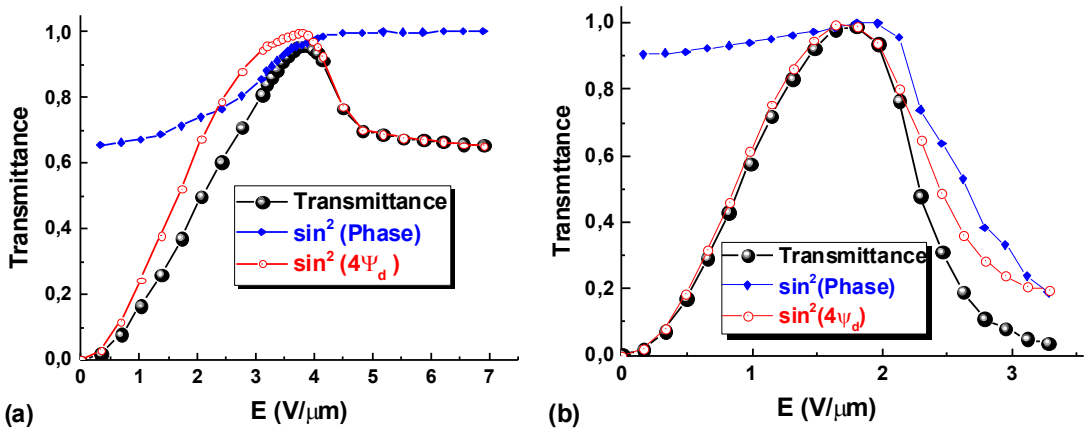



**Рис. 4.** Измеренный общий коэффициент пропускания света $T(E)$ (шары) и вычисленные значения сомножителей в соотношении (2) для ячейки DHFLC, помещенной между скрещенными поляризаторами и заполненной: *a* – FLC-587-F7 при $d$ = 1,45 мкм; *b* – FLC-650 при $d$ = 3,05 мкм

**Fig. 4.** The measured total transmittance of light $T(E)$ (balls) and the calculated values of the factors in relation (2) for a DHFLC cell placed between crossed polarizers and filled with: *a* – FLC-587-F7 at $d$ = 1,45 μm; *b* – FLC-650 at $d$ = 3,05 μm

Измеренная зависимость $T(E)$ на рис. 4, *b* (шары) практически совпадает с расчетной зависимостью $\sin^2(4\Psi_d)$ (окружности), а коэффициент $\sin^2(\pi\Delta n_{eff}d/\lambda)$, который обозначен как $\sin^2$(Phase) на рис. 4, *b* практически не меняется, когда $0 \le T(E) \le 1$. По этой причине можно утверждать, что в данном случае электрооптическая модуляция вызвана, главным образом, переключением главной оптической оси. Однако на рис. 4, *a* тот же коэффициент $\sin^2(\pi\Delta n_{eff}d/\lambda)$ изменяется при $0 \le T(E) \le 1$ на 45 %, что совсем не согласуется с определением режима IPS, при котором вклад фазового фактора в электрооптическую модуляцию должен быть пренебрежимо мал. Таким образом, электрооптическая модуляция в ячейках DHFLC приближается к режиму IPS при увеличении угла θ, что видно при сравнении рис. 3 и 4.

## Заключение

Экспериментально показано, что электрооптическая мода IPS может наблюдаться в дисплейных ячейках DHFLC с субволновым шагом спирали. По отношению к ячейкам IPS НЖК, дисплейные ячейки IPS DHFLC имеют несомненное технологическое преимущество, поскольку для их изготовления используются сплошные электроды. Кроме того, ячейки DHFLC обеспечивают электрооптическую модуляцию с частотой порядка 1 кГц (рис. 5) [6, 12], что также является их очевидным преимуществом по сравнению с ячейками IPS НЖК.

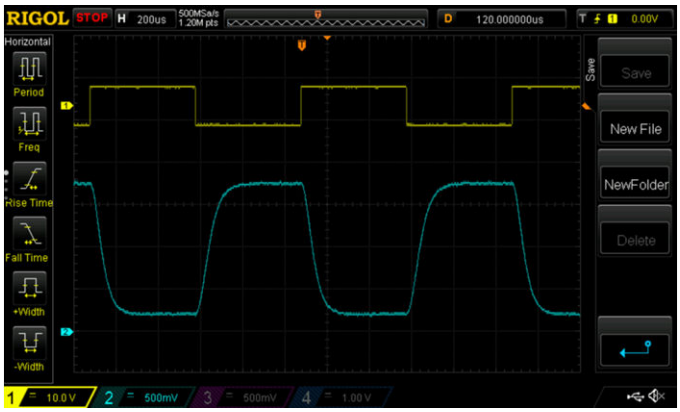



**Рис. 5.** Электрооптический отклик дисплейной ячейки IPS DHFLC с FLC-650 (нижняя осциллограмма) на управляющий электрический сигнал (меандр). Частота модуляции света в режиме IPS 1 кГц. Толщина слоя СЖК 3 мкм, температура 22° С

**Fig. 5.** Electro-optical response of the IPS DHFLC display cell with FLC-650 (lower oscillogram) to the control electric signal (meander). The light modulation frequency in IPS mode is 1 kHz. The thickness of the FLC layer is 3 μm, the temperature is 22° C

## Список литературы / References

1. Oh-E M., Kondo K. Electro-optical characteristics and switching behavior of the in-plane switching mode. *Appl. Phys. Lett*. 1995; 67: 3895. DOI: 10.1063/1.115309.
2. Oh-E M., Kondo K. Response mechanism of nematic liquid crystals using the in-plane switching mode. *Appl. Phys. Lett*. 1996; 69: 623. DOI: 10.1063/1.117927.
3. Oh-E M., Kondo K. The in-plane switching of homogeneously aligned nematic liquid crystals. *Liq. Cryst*. 1997; 22: 379. https://doi.org/10.1080/026782997209090.
4. Oh-E M., Yoneya M., Ohta M., Kondo K. Dependence of viewing angle characteristics on pretilt angle in the in-plane switching mode. *Liq. Cryst*. 1997; 22: 391. https://doi.org/10.1080/026782997209108.
5. Beresnev L.A., Chigrinov V.G., Dergachev D.I., Pozhidaev E.P., Funfshilling J., Schadt M. Deformed helix ferroelectric liquid crystal display – a new electrooptic mode in ferroelectric smectic C* liquid crystals. *Liq. Cryst*. 1989; 5: 1171. https://doi.org/10.1080/02678298908026421.
6. Pozhidaev E., Torgova S., Minchenko M., Yednak C. A. R., Strigazzi A., Miraldi E. Phase modulation and ellipticity of the light transmitted through a smectic C* layer with short helix pitch. *Liq. Cryst*. 2010; 37: 1067. http://dx.doi.org/10.1080/02678292.2010.486482.
7. Kiselev A.D., Pozhidaev E.P., Chigrinov V.G., Kwok H.S. Polarization-gratings approach to deformed-helix ferroelectric liquid crystals with subwavelength pitch. *Phys. Rev. E*. 2011; 83: 031703. DOI: 10.1103/PhysRevE.83.031703.
8. Kotova S.P., Samagin S.A., Pozhidaev E.P., Kiselev A.D. Light modulation in planar aligned short-pitch deformed-helix ferroelectric liquid crystals. *Phys. Rev. E*. 2015; 92: 062502. http://dx.doi.org/10.1103/PhysRevE.92.062502.
9. Kesaev V.V., Kiselev A.D., Pozhidaev E.P. Modulation of unpolarized light in planar-aligned subwavelength-pitch deformed-helix ferroelectric liquid crystals, *Phys. Rev. E*. 2017; 95: 032705. https://doi.org/10.1103/PhysRevE.95.032705.
10. Pozhidaev E.P., Schrivastava A.K., Kiselev A.D., Chigrinov V.G., Vashchenko V.V., Krivoshey A.I., Minchenko M.V., Kwok H.S. Enhanced orientational Kerr effect in vertically aligned deformed helix ferroelectric liquid crystals, *Optics Letters*. 2014; 39: 2900. http://dx.doi.org/10.1364/OL.39.002900.
11. Hubert P., Jägemalm P., Oldano C., Rajteri M. Optic models for short-pitch cholesteric and chiral smectic liquid crystals. *Phys. Rev. E*. 1998; 58: 3264. https://journals.aps.org/pre/abstract/10.1103/PhysRevE.58.3264.
12. Mikhailenko V., Krivoshey A., Pozhidaev E., Popova E., Fedoryako A., Gamzaeva S., Barbashov V., Srivastava A., Kwok H., Vashchenko V. The nano-scale pitch ferroelectric liquid crystal materials for modern display and photonic application employing highly effective chiral components: Trifluoromethylalkyldiesters of p-terphenyldicarboxylic acid. *Journal of Molecular Liquids*, 2019; 281: 186. https://doi.org/10.1016/j.molliq.2019.02.047.

## Вклад авторов

Пожидаев Е.П. разработал методологию, выполнил изготовление СЖК-материалов.

Ткаченко Т.П. и Кузнецов А.В. провели экспериментальные исследования.

Компанец И.Н. осуществлял руководство исследованиями, участвовал в обсуждении результатов работы.

## Authors contribution

Pozhidaev E.P. developed a methodology, completed the production of FFA materials.

Tkachenko T.P. and Kuznetsov A.V. conducted experimental studies.

Kompanets I.N. supervised research, participated in the discussion of the results of the work.

**Сведения об авторах**

Пожидаев Е.П., д.ф.-м.н., ведущий научный сотрудник Физического института им. П.Н. Лебедева РАН, профессор Московского авиационного института (национальный исследовательский университет).

Ткаченко Т.П., студент Московского авиационного института (национальный исследовательский университет); лаборант-исследователь Физического института им. П.Н. Лебедева РАН.

**Information about the authors**

Pozhidaev E.P., D.Sci, Leading Researcher of the P.N. Lebedev Physical Institute of RAS, Professor of the Moscow Aviation Institute (National Research University).

Tkachenko T.P., student of the Moscow Aviation Institute (National Research University); laboratory assistant at the P.N. Lebedev Physical Institute of RAS.

Кузнецов А.В., студент Московского авиационного института (национальный исследовательский университет); лаборант-исследователь Физического института им. П.Н. Лебедева РАН.

Компанец И.Н., д.ф.-м.н., профессор, главный научный сотрудник Физического института им. П.Н. Лебедева РАН.

**Адрес для корреспонденции**

119991, Российская Федерация,
г. Москва, Ленинский проспект, д. 53,
Физический институт им. П.Н. Лебедева РАН
тел. +7-903-124-32-35;
kompan@lebedev.ru
Компанец Игорь Николаевич

Kuznetsov A.V., student of the Moscow Aviation Institute (National Research University); laboratory assistant at the P.N. Lebedev Physical Institute of RAS.

Kompanets I.N., D.Sci, Professor, Chief Researcher of the P.N. Lebedev Physical Institute of RAS.

**Address for correspondence**

119991, Russian Federation,
Moscow, Leninsky prospect, 53,
P.N. Lebedev Physical Institute of RAS
tel. +7-903-124-32-35;
kompan@lebedev.ru
Kompanets Igor Nikolaevich