УДК 535.211 *Краткое сообщение*

Самофокусировка излучения в прозрачной наносуспензии

В.И. Иванов, А.В. Мяготин
ФГБОУ ВО «Дальневосточный государственный университет путей сообщения»
600021, Россия, Хабаровск, ул. Серышева, 47
valivi@mail.ru

DOI: 10.26456/pcascnn/2025.17.059

Аннотация: Самофокусировка излучения обычно рассматривается как нелинейный эффект в среде с положительным коэффициентом кубичной нелинейности. Такой нелинейностью обладают наносуспензии за счет электрострикционных потоков наночастиц в неоднородном световом поле. Описание данного типа нелинейности традиционно ограничивается рассмотрением режима слабых интенсивностей светового поля. В этом случае квазистационарное изменение концентрации наночастиц прямо пропорционально интенсивности излучения. Поэтому анализ самовоздействия излучения соответствует классическому случаю. В данной работе проанализирован режим самофокусировки гауссова пучка в прозрачной наносуспензии при больших интенсивностях излучения, когда отклик среды уже не соответствует кубичной нелинейности. Приведено решение нелинейной стационарной задачи светоиндуцированного переноса наночастиц в жидкой среде под действием электрострикционных сил при больших интенсивностях излучения. Полученный результат демонстрирует экспоненциальную зависимость изменения концентрации наночастиц от интенсивности излучения. Это кардинально отличается от режима слабых интенсивностей, где изменение концентрации находится в линейной зависимости от интенсивности. В классическом случае кубичной нелинейности режим самофокусировки определяет полная мощность пучка. Рассмотренная модель демонстрирует существенное снижение критической мощности самофокусировки при высоких интенсивностях излучения, использование которых является более предпочтительным для экспериментального осуществления режима самофокусировки.

Ключевые слова: самовоздействие излучения, кубичная нелинейность, электрострикция, наносуспензия, самофокусировка, критическая мощность, оптическая диагностика.

Иванов Валерий Иванович – д.ф.-м.н., профессор кафедры физики и теоретической механики ФГБОУ ВО «Дальневосточный государственный университет путей сообщения»
Мяготин Артем Владимирович – старший преподаватель кафедры физики и теоретической механики ФГБОУ ВО «Дальневосточный государственный университет путей сообщения»

Short Communication

Light induced lens in a transparent nanosuspension

V.I. Ivanov, A.V. Myagotin
Far Eastern State Transport University, Khabarovsk, Russia

DOI: 10.26456/pcascnn/2025.17.059

Abstract: Self-focusing of radiation is usually considered as a nonlinear effect in a medium with a positive coefficient of the cubic nonlinearity. Nanosuspensions have such nonlinearity due to electrostrictive flows of nanoparticles in a non-uniform light field. The description of this type of nonlinearity is traditionally limited to the consideration of the mode of weak intensities of the light field. In this case, the quasi-stationary change in the concentration of nanoparticles is directly proportional to the radiation intensity. Therefore, the analysis of the self-action of radiation corresponds to the classical case. In this paper, we analyze the self-focusing mode of a Gaussian beam in a transparent nanosuspension at high radiation intensities, when a response of the medium no longer corresponds to the cubic nonlinearity. A solution is given to the nonlinear stationary problem of light-induced transfer of nanoparticles in a liquid medium under the action of electrostrictive forces at high radiation intensities. The obtained result demonstrates an exponential dependence of the change in the concentration of nanoparticles on the radiation intensity. This is fundamentally different from the mode of weak intensities, where the change in concentration is linearly dependent on the intensity. In

the classical case of the cubic nonlinearity, the self-focusing mode is determined by the total beam power. The considered model demonstrates a significant decrease in the critical self-focusing power at high radiation intensities, the use of which is more preferable for the experimental implementation of the self-focusing mode.
Keywords: self-action of the radiation, cubic nonlinearity, electrostriction, nanosuspension, self-focusing, critical power, optical diagnostics.

Valery I. Ivanov – Dr. Sc., Professor of the Department of Physics and Theoretical Mechanics, Far Eastern State Transport University
Artiom V. Myagotin – Senior Lecturer of the Department of Physics and Theoretical Mechanics, Far Eastern State Transport University

Поступила в редакцию/received: 15.07.2025; после рецензирования/revised: 26.08.2025; принята/accepted 03.09.2025.

1. Введение

Самовоздействие излучения является одним из распространенных эффектов в нелинейных средах [1]. Тепловая дефокусировка интенсивного лазерного пучка наблюдается практически во всех средах, при этом механизмы образования могут быть различными [1-3]. В ряде сред лазерный луч испытывает самофокусировку [3-5]. В обоих случаях отклик среды соответствует кубичной нелинейности (только разного знака), поскольку изменение эффективного показателя преломления среды пропорционально интенсивности излучения [1]. Но в средах с положительным коэффициентом нелинейности при достаточно большой мощности излучения может наблюдаться критический режим самофокусировки, при котором происходит самоканалирование пучка, когда дифракционное расплывание компенсируется самофокусировкой [1].

В данной работе проанализирован такой режим самофокусировки в прозрачной наносуспензии, в которой светоиндуцированная линза образуется за счет электрострикционного эффекта, вызывающего изменение концентрации наночастиц в неоднородном поле световой волны [6,7]. В отличие от предыдущих работ светоиндуцированная линза не считается тонкой.

2. Самофокусировка гауссова пучка

Явление самофокусировки представляет собой спонтанное сжатие энергии светового луча в нелинейной среде с положительным показателем преломления. В наиболее элементарном приближении самовоздействие моделируется как светоиндуцированная линза с определенным фокусным расстоянием в тонком слое материала [1]. При прохождении через объемный слой нелинейной среды пучок существенно дифрагирует непосредственно внутри самого слоя, что приводит к уменьшению фокусного расстояния подобной линзы по сравнению с толщиной слоя (толстая нелинейная линза) [1]. Для приблизительной оценки величины фокусного расстояния толстой линзы F_{nl} возможно использование

формулы тонкой линзы с заменой толщины слоя l на меньший параметр:

$$F_{nl} = a_0\sqrt{n_0 / |n_{nl}(I)|}, \quad (1)$$

где a_0 – радиус пучка в перетяжке, $n_{nl}(I)$ – нелинейная компонента показателя преломления.

Точное описание самофокусировки требует применения теории нелинейной дифракции. В рамках данного подхода самофокусировка моделируется параболическим уравнением, которое одновременно учитывает как индуцированную пучком неоднородность среды посредством нелинейной компоненты показателя преломления n_{nl}, так и дифракционные эффекты волнового пучка. Приближенное решение параболического уравнения в случае локальной нелинейности дает возможность получить следующее выражение для ширины пучка [1]:

$$a^2(z) = a_0^2\left[\left(1-\frac{z}{F_{nl}}\right)^2 + \left(1-\frac{P_0}{P_{cr}}\right)\frac{z^2}{l_d^2}\right], \quad (2)$$

где P_0 – полная мощность гауссова пучка в перетяжке, P_{cr} – характерная критическая мощность самовоздействия, l_d –дифракционная длина.

Из уравнения (2) видно, что эффект дефокусировки суммируется с дифракционным расширением пучка. В соответствии с формулой (1), для пучка низкой мощности ($P_0 << P_{cr}$) происходит частичная компенсация дифракционной расходимости. Когда мощность пучка достигает критического значения), поперечный размер пучка остается постоянным по мере распространения: формируется волноводный режим распространения (пространственный солитон). При превышении критической мощности) наблюдается явление самофокусировки.

Формула для критической мощности дает возможность определить данный параметр для произвольной среды с положительным коэффициентом кубической нелинейности n_2

$$P_{cr} = \frac{\lambda^2}{64\pi^2 n_2}, \quad (3)$$

где λ – длина волны излучения.

3. Электрострикционный механизм самофокусировки в наносуспензии

Явление самофокусировки (дефокусировки) световых пучков в нелинейных средах представляет собой детально изученный нелинейный эффект для гомогенных сред [1]. В случае двухфазных жидких систем (бинарных растворов, микроэмульсий) традиционный тепловой механизм самовоздействия светового излучения дополняется концентрационными потоками (например, термодиффузионный эффект Соре), способными вносить существенный вклад в формирование нелинейного отклика среды

[3-5]. Альтернативный механизм формирования оптической нелинейности в коллоидных системах реализуется посредством электрострикционных сил [6]. Подобная оптическая нелинейность была экспериментально исследована в наноколлоидах и микроэмульсионных системах [7-9].

Теоретическое описание данного типа нелинейности традиционно ограничивается рассмотрением режима слабых интенсивностей светового поля. В случае низких интенсивностей светового излучения в наносуспензии с электрострикционной нелинейностью коэффициент кубической нелинейности имеет вид [10]:

$$n_2^{eff} = n_1 \delta f_0 I_s^{-1}, \tag{4}$$

где $I_s = D\gamma^{-1}$ – характерная интенсивность насыщения, D – коэффициент диффузии наночастицы, $\gamma = \beta\mu$, $\mu = (6\pi\eta a)^{-1}$ – подвижность микрочастицы, a – радиус наночастицы, η – вязкость жидкости, β – поляризуемость наночастицы [11], $\delta = (n_2 - n_1)/n_1$, а n_1, n_2 – показатели преломления вещества дисперсионной среды и дисперсной фазы соответственно, f_0 – начальная объемная доля дисперсной среды.

Применяя выражения (3)-(4), находим критическую мощность в наносуспензии P_{cr}^0:

$$P_{cr}^0 = \frac{\lambda^2 I_s}{64\pi^2 n_1 \delta f_0}, \tag{5}$$

При высоких интенсивностях излучения изменение концентрации наночастиц достигает величин, сопоставимых с исходной концентрацией, и перестает быть линейно зависимым от интенсивности. Для расчета нелинейного отклика необходимо решать задачу светоиндуцированного массопереноса. Уравнение баланса, которое описывает эволюцию концентрации наночастиц в жидкой среде с учетом электрострикционного потока имеет следующий вид [2]:

$$\frac{\partial C(r,t)}{\partial t} = D\nabla^2 C - div(\gamma C \nabla I). \tag{6}$$

Здесь приняты следующие обозначения: $C(r,t)$ – концентрация дисперсных частиц.

Проанализируем ситуацию высоких интенсивностей в стационарном состоянии. В установившемся режиме уравнение (2) принимает упрощенную форму:

$$-D\nabla C + \gamma C \nabla I = 0. \tag{7}$$

Общее решение уравнения (7) для случая бесконечно протяженной кюветы

$$C = C_0 \exp\left\{\alpha e^{-r^2/r_0^2}\right\}. \tag{8}$$

В данном выражении введена безразмерная характеристика интенсивности излучения $\alpha = I_0 / I_s$ (I_0 – интенсивность падающего излучения). В режиме высоких интенсивностей выполняется условие $\alpha >> 1$, при этом изменение концентрации наночастиц становятся значительно больше в сравнении с исходной концентрацией.

Полученный результат (9) демонстрирует экспоненциальную зависимость концентрации от интенсивности излучения, что кардинально отличается от режима слабых интенсивностей, где изменение концентрации находится в линейной зависимости от интенсивности. При этом пользоваться параметром кубичной нелинейности некорректно, поскольку величина нелинейного отклика уже не прямо пропорциональна интенсивности излучения.

На рис. 1 приведены рассчитанные зависимости концентрации наночастиц C (отнесенной к начальному значению концентрации C_0) от расстояния до оси пучка ρ (приведенного к радиусу пучка). Видно, что для невысоких интенсивностей ($\alpha = 0{,}5$) профиль концентрации и профиль гауссовой интенсивности пучка почти не отличаются. Для более высокой интенсивности лазерного пучка различие становится весьма существенным (для $\alpha = 5$). При этом полуширина профиля концентрации наночастиц уменьшается.

Анализ критической мощности (нормированной относительно ее значения при низкой интенсивности) для рассматриваемого случая приводит к следующему выражению

$$P_{cr}^{\alpha} = P_{cr} / P_{cr}^{0} = \alpha (e^{\alpha} - 1)^{-1}. \qquad (9)$$

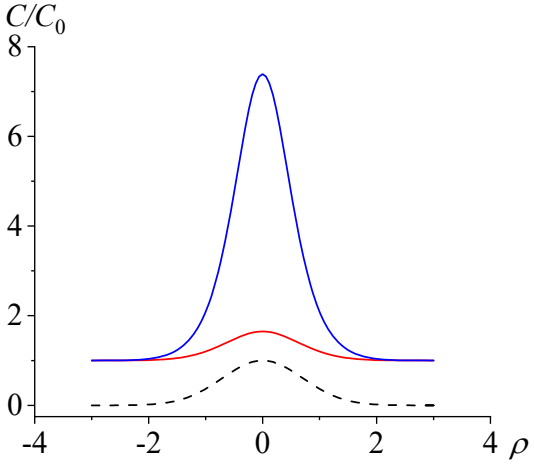

Рис. 1. Зависимость приведенной концентрации наночастиц от приведенного расстояния ρ до оси пучка для разных значений интенсивности излучения: $\alpha = 0{,}5$ (красная кривая); $\alpha = 5$ (синяя кривая). Для сравнения пунктиром показана координатная зависимость интенсивности излучения.

Рис. 2 показывает теоретическую зависимость критической мощности от нормированной интенсивности излучения в соответствии с

выражением (9). Вычисления демонстрируют существенное снижение критической мощности самофокусировки при высоких интенсивностях излучения ($\alpha >> 1$). В классическом случае кубичной нелинейности режим самофокусировки определяет полная мощность пучка. Следовательно, увеличение интенсивности (фокусировка пучка) является более предпочтительным режимом для экспериментального осуществления самоканалирования.

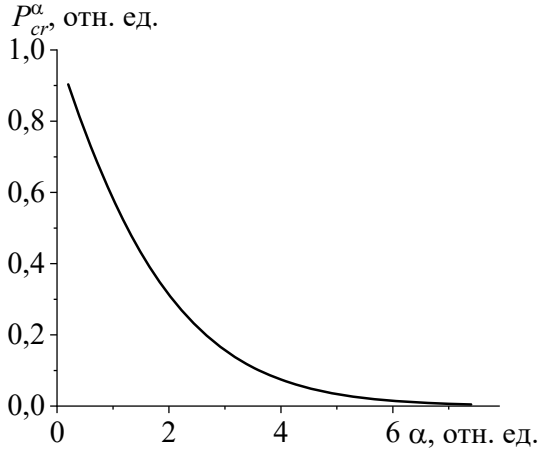

Рис. 2. Зависимость критической мощности от нормированной интенсивности излучения.

3. Заключение

Проанализирован режим самофокусировки гауссова пучка в прозрачной наносуспензии с электрострикционной нелинейностью. Приведено решение нелинейной стационарной задачи светоиндуцированного переноса наночастиц в жидкой среде под действием электрострикционных сил при больших интенсивностях излучения. Полученный результат демонстрирует экспоненциальную зависимость изменения концентрации наночастиц от интенсивности излучения, что кардинально отличается от режима слабых интенсивностей, где изменение концентрации находится в линейной зависимости от интенсивности [12-14]. Модель демонстрирует существенное снижение критической мощности самофокусировки при высоких интенсивностях излучения, использование которых является более предпочтительным для экспериментального осуществления режима самофокусировки. Полученные результаты актуальны для нелинейной оптики наносуспензий [15-17], а также для разработки методов оптической диагностики жидкофазных наноматериалов [18-21].

Библиографический список:

1. **Shen, Y.R.** The principles of nonlinear optics / Y.R. Shen. – New York: John Wiley & Sons, 1984. – 576 p.
2. Dobek, K. Thermal lensing: outside of the lasing medium / K. Dobek // Applied Physics B. –2022. – V. 128. – I. 2. – Art. № 18. – 21 p. DOI: 10.1007/s00340-021-07718-2.

3. **Иванов, В.И.** Самовоздействие гауссова пучка излучения в слое жидкофазной микрогетерогенной среды / В.И. Иванов, А.И. Ливашвили // Оптика атмосферы и океана. – 2009. – Т. 22. – № 8. – С. 751-752.
4. **Cabrera, H.** A thermal lens model including the Soret effect / H. Cabrera, E. Sira, K. Rahn, M. García-Sucre // Applied Physics Letters. – 2009. – V. 94. – I. 5. – P. 051103-1-051103-3. DOI: 10.1063/1.3078287.
5. **Иванов, В.И.** Влияние термодиффузии на термолинзовый отклик в жидкофазной дисперсной среде / В.И. Иванов, Г.Д. Иванова, В.К. Хе // Физико-химические аспекты изучения кластеров, наноструктур и наноматериалов. – 2013. – Вып. 5. – С. 112-115.
6. **Ivanov, V.I.** Light induced lens response in nanosuspension/ V.I. Ivanov, G.D. Ivanova, V.K. Khe // Proceedings of the SPIE. – 2016. – V. 10176. – Art. № 101760V. – 8 p. DOI: 10.1117/12.2268263.
7. **Иванов, В.И.** Самовоздействие гауссова пучка в жидкофазной микрогетерогенной среде / В.И. Иванов, Ю.М. Карпец, А.И. Ливашвили, К.Н. Окишев // Известия Томского политехнического университета.
– 2005. – Т. 308. – № 5. – С. 23-24.
8. **Lee, W.** Nonlinear optical response of colloidal suspensions / R. El-Ganainy, D. Christodoulides, K. Dholakia, E. Wright // Optics Express. – 2009. – V. 17. – I. 12. – P. 10277-10289. DOI: 10.1364/OE.17.010277.
9. **Vicary, L.** Pump-probe detection of optical nonlinearity in water-in-oil microemulsion // Philosophical Magazine B. – 2002. – V. 82. – I. 4. – P. 447-452. DOI: 10.1080/13642810208223133.
10. **Иванов, В.И.** Электрострикционный механизм светолинзового отклика в наносуспензии / В.И. Иванов, А.В. Мяготин, Г.Д. Иванова // Физико-химические аспекты изучения кластеров, наноструктур и наноматериалов. – 2017. – Вып. 9. – С. 205-209. DOI: 10.26456/pcascnn/2017.9.205.
11. **Gordon, R.** Particle-optical self-trapping / R. Gordon, J.T. Blakely, D. Sinton // Physical Review A. – 2007. – V. 75 – I. 5. – P. 055801-1-055801-4. DOI: 10.1103/PhysRevA.75.055801.
11. **Pai, C.** Non-linear optical studies of colloidal nanofluids / C. Pai, M. Shalini, P. Agnel et al. // International Journal of Chemical and Physical Sciences. – 2014. – V. 3. – №. 5. – P. 44-51.
12. **Myagotin, A.V.** Transient gratings in the transparent nanoliquid / A.V. Myagotin, V.I. Ivanov, G.D. Ivanova // Proceedings of the SPIE. – 2017. – V. 10176. – Art. № 101761Z. – 6 p. DOI: 10.1117/12.2268272.
14. **Pai, C.** Nonlinear and magneto-optical effects in magnetic nanofluids / C. Pai, H. Muthurajan, N. Momin, M. Shalini, S. Radha // ScienceJet. – 2015. – V. 4. – Art. № 114. – 6 p.
15. **El-Ganainy, R.** Optical beam instabilities in nonlinear nanosuspensions // R. El-Ganainy, D.N. Christodoulides, Z.H. Musslimani et al. // Optics Letters. – 2007. – V. 32. – I. 21. – P. 3185-3187. DOI: 10.1364/OL.32.003185.
16. **Pobegalov, G.** Low-power optical bistability and hysteresis in the laser system with absorbing nanosuspension / G. Pobegalov, P. Agruzov, I. Ilichev, A. Shamray // Optics Letters. – 2014. – V. 39. – I. 9.
– P. 2819-2822. DOI: 10.1364/OL.39.002819.
17. **El-Ganainy, R.** Soliton dynamics and self-induced transparency in nonlinear nanosuspensions / R. El-Ganainy, D.N. Christodoulides, C. Rotschild, M. Segev // Optics Express. – 2007. – V. 15. – I. 16. – P. 10207-10218. DOI: 10.1364/OE.15.010207.
18. **Kelly, T.S.** Guiding and nonlinear coupling of light in plasmonic nanosuspensions / T.S. Kelly, Y.-X. Ren, A. Samadi et al. // Optics Letters. – 2016. – V. 41. – I. 16. – P. 3817-3820. DOI: 10.1364/OL.41.003817.
19. Ivanov, V. Light-induced thermodiffusion in two-component media / V. Ivanov, G. Ivanova, K. Okishev, V. Khe // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. – 2017. – V. 168. – Art. № 012045, – 4 p. DOI: 10.1088/1757-899X/168/1/012045.
20. **Bialkowski, S.E.** Photothermal spectroscopy methods for chemical analysis / S.E. Bialkowski // In: Chemical Analysis: A Series of Monographs on Analytical Chemistry and Its Applications. – V. 134. – New York: Wiley-Interscience, 1996. – xxix + 584 p.
21. **Ovseychook, O.O.** Thermal lens spectroscopy in two-component liquid / O.O. Ovseychook, V.I. Ivanov, G.D. Ivanova // Journal of Physics: Conference Series. – 2018. – V. 1038. – Art. № 012091. – 5 p. DOI: 10.1088/1742-6596/1038/1/012091.

References:

1. Shen Y.R. The principles of nonlinear opticsж New York, John Wiley & Sons, 1984, 576 p.
2. Dobek K. Thermal lensing: outside of the lasing medium, *Applied Physics B*, 2022, vol. 128, issue 2, art. no. 18, 21 p. DOI: 10.1007/s00340-021-07718-2.
3. Ivanov V.I., Livashvily A.I. Samovozdejstvie gaussova puchka izlucheniya v sloe zhidkofaznoj mikrogeterogennoj sredy [The gaussin beam self-action in the thin film of the liquid microgeterogenious medium], *Optika atmosfery i okeana [Atmospheric and Oceanic Optics]*, 2009, vol. 22, no. 8, pp. 751-752. (In

Russian).
4. Cabrera H., Sira E., Rahn K., García-Sucre M. A thermal lens model including the Soret effect, *Applied Physics Letters*, 2009, vol. 94, issue 5, pp. 051103-1-051103-3. DOI: 10.1063/1.3078287.
5. Ivanov V.I., Ivanova G.D., Khe V.K. Vliyanie termodiffuzii na termolinzovyj otklik v zhidkofaznoj dispersnoj srede [A thermodiffusion influence on the thermal lense response in a liquid dispersive media], *Fiziko-khimicheskie aspekty izucheniya klasterov, nanostruktur i nanomaterialov [Physical and chemical aspects of the study of clusters, nanostructures and nanomaterials]*, 2013, issue 10, pp. 280-285. (In Russian).
6. Ivanov V.I., Ivanova G.D., Khe V.K. Light induced lens response in nanosuspension, *Proceedings of the SPIE*, 2016, vol. 10176, art. no. 101760V, 8 p. DOI: 10.1117/12.2268263.
7. Ivanov V.I., Karpets Y.M., Livashvily A.I., Okishev K.N. Samovozdeistvie gaussova puchka v zhidkofaznoi mikrogeterogennoi srede [Self-action of a Gaussian beam in a liquid-phase microheterogeneous medium], *Izvestiya Tomskogo politekhnicheskogo universiteta [Bulletin of the Tomsk Polytechnic University]*, 2005, vol. 308, no. 5, pp. 23-24. (In Russian).
8. Lee W., El-Ganainy R., Christodoulides D., Wright E. Nonlinear optical response of colloidal suspensions, *Optics Express*, 2009, vol. 17, issue 12, pp. 10277-10289. DOI: 10.1364/OE.17.010277.
9. Vicary L. Pump-probe detection of optical nonlinearity in water-in-oil microemulsion, *Philosophical Magazine B,* 2002, vol. 82, issue 4, p. 447-452. DOI: 10.1080/13642810208223133.
10. Ivanov V.I., Myagotin A.V., Ivanova G.D., Elektrostriktsionnyj mekhanizm svetolinzovogo otklika v nanosuspenzii [Electrostriction mechanism of light induced lens response in nanosuspension], *Fiziko-khimicheskie aspekty izucheniya klasterov, nanostruktur i nanomaterialov [Physical and chemical aspects of the study of clusters, nanostructures and nanomaterials],* 2017, issue 9, pp. 205-209; DOI: 10.26456/pcascnn/2017.9.205. (In Russian).
11. Gordon R., Blakely J.T., Sinton D. Particle-optical self-trapping, *Physical Review A*, 2007, vol. 75, issue 5, pp. 055801-1-055801-4. DOI: 10.1103/PhysRevA.75.055801.
12. Pai C., Shalini M., Agnel P. et. al. Non-linear optical studies of colloidal nanofluids, *International Journal of Chemical and Physical Sciences*, 2014, vol. 3, no. 5, pp. 44-51.
13. Myagotin A.V., Ivanov V.I., Ivanova G.D. Transient gratings in the transparent nanoliquid, *Proceedings of the SPIE*, 2017, vol. 10176, art. no. 101761Z, 6 p. DOI: 10.1117/12.2268272.
14. Pai C., Muthurajan H., Momin N., Shalini M., Radha S. Nonlinear and magneto-optical effects in magnetic nanofluids, *ScienceJet*, 2015, vol. 4, art. № 114, 6 p.
15. El-Ganainy R., Christodoulides D.N., Musslimani Z.H. et al. Optical beam instabilities in nonlinear nanosuspensions, *Optics Letters*, 2007, vol. 32, issue 21, pp. 3185-3187. DOI: 10.1364/OL.32.003185.
16. Pobegalov G., Agruzov P., Ilichev I., and Shamray A. Low-power optical bistability and hysteresis in the laser system with absorbing nanosuspension, *Optics Letters*, 2014, vol. 39, issue 9, pp. 2819-2822. DOI: 10.1364/OL.39.002819.
17. El-Ganainy R., Christodoulides D.N., Rotschild C., Segev M. Soliton dynamics and self-induced transparency in nonlinear nanosuspensions, *Optics Express*, 2007, vol. 15, issue 16, pp.10207-10218. DOI: 10.1364/OE.15.010207.
18. Kelly T.S., Ren Y.-X., Samadi A. et al. Guiding and nonlinear coupling of light in plasmonic nanosuspensions, *Optics Letters,* 2016, vol. 41, issue 16, pp. 3817-3820. DOI: 10.1364/OL.41.003817.
19. Ivanov V., Ivanova G., Okishev K., Khe V. Light-induced thermodiffusion in two-component media, *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 2017, vol. 168, art. no. 012045, 4 p. 10.1088/1757-899X/168/1/012045.
20. Bialkowski S.E. Photothermal spectroscopy methods for chemical analysis, *Chemical Analysis: A Series of Monographs on Analytical Chemistry and Its Applications,* vol. 134. New York: Wiley-Interscience, 1996, xxix + 584 p.
21. Ovseychook O.O., Ivanov V.I., Ivanova G.D. Thermal lens spectroscopy in two-component liquid, *Journal of Physics: Conference Series*, 2018, v. 1038, art. no. 012091, 5 p. DOI: 10.1088/1742-6596/1038/1/012091.