

ФИЗИКА МАГНИТНЫХ ЯВЛЕНИЙ

УДК 537.876.4, 535.42

DOI: 10.17223/00213411/65/12/3

МОДЕЛИРОВАНИЕ ПОЛОСОВОГО ФИЛЬТРА ТЕРАГЕРЦОВОГО ДИАПАЗОНА
НА ОСНОВЕ МАГНИТНЫХ ЖИДКОСТЕЙ*

З.С. Кочнев, Ю.В. Кистенев, А.В. Борисов

Национальный исследовательский Томский государственный университет, г. Томск, Россия

Предложена модель полосового фильтра, состоящая из геометрической модели кюветы с магнитной жидкостью. Для построения модели использовались уравнения гидродинамики Навье – Стокса, уравнение конвективного переноса на функцию уровня и система уравнений Максвелла. С применением численного моделирования исследованы свойства периодических нитевидных структур в магнитной жидкости, находящейся во внешнем однородном магнитном поле, в зависимости от величины внешнего магнитного поля и параметров магнитных жидкостей. Проведены расчеты трансформации спектральных характеристик широкополосного ТГц-излучения, проходящего через создаваемые периодические структуры. В результате получены зависимости и определены реперные точки в формировании магнитной жидкостью периодических структур во внешнем магнитном поле и получены качественные оценки спектра пропускания модельных фильтров ТГц-излучения.

Ключевые слова: *магнитная жидкость, магнитное поле, гидродинамика, перестраиваемый полосовой фильтр ТГц-излучения.*

Введение

Магнитная жидкость (МЖ), также называемая ферромагнитной жидкостью или феррожидкостью (magnetic fluid, magnetic liquid, ferrofluid), представляет собой устойчивую двухфазную жидкую среду, состоящую из магнитных частиц в немагнитной жидкости-носителе. Свойства магнитных жидкостей определяются совокупностью характеристик входящих в нее компонентов. Чаще всего в качестве дисперсной магнитной фазы используются ферромагнитные, ферримангнитные металлы, оксиды металлов, а также сплавы со смешанной аморфно-кристаллической структурой [1–6]. Жидкость-носитель может быть полярной или неполярной. Основная функция этого компонента заключается в обеспечении среды, в которой «подвешиваются» частицы магнитного материала. В настоящее время применяется широкий набор жидкостей-носителей: спирты, силиконы, керосин, гептан, бензол, трансформаторное масло, автомобильное масло [4–6]. Внешнее магнитное поле оказывает ориентирующее воздействие на магнитные моменты магнитных частиц, не меняя физические свойства жидкости-носителя. МЖ используются при обогащении полезных ископаемых [7, 8], в энергетике (интенсификация теплообмена, магнитные уплотнения, магнитные смазки) [9–11], в экологии (сбор нефтесодержащих загрязнений в воде, утилизация органических отходов из воды) [12], в медицине (адресная доставка лекарств, контрастирование для магнитной резонансной томографии, гипертермия) [12–14].

Ранее было показано, что при воздействии внешним однородным магнитным полем на кювету, наполненную МЖ, входящие в состав магнитные нано- или микрочастицы формируют в течение нескольких секунд периодические структуры (агломераты), подобные обычным дифракционным решеткам. В работах [15, 16] показана возможность управления пространственным периодом структур агломератов в магнитной жидкости за счет изменения величины внешнего магнитного поля. Ряд работ посвящен исследованию деформации и ориентации капли феррожидкости в однородном магнитном поле [17]. Выполнялось моделирование движения феррожидкости в динамических магнитных полях, чтобы получить представление о динамических свойствах феррожидкости в небольших каналах [18]. В работе [19] авторами разработана математическая модель для прогнозирования динамики магнитной жидкости, находящейся под одновременным воздействием электрического и магнитного полей.

* Исследования выполнены при поддержке гранта Минобрнауки России (Соглашение № 075-15-2021-1412 от 23.12.2021, уникальный идентификатор контракта RF 2251.62321X0012).

Одно из применений МЖ – создание магнитно-управляемых модуляторов (фильтров, переключателей, затворов) терагерцового диапазона частот [20, 21]. Достоинством данного подхода является большое разнообразие вариантов магнитных жидкостей, что потенциально позволяет создавать фильтры с заданными параметрами. Для разработки высокоэффективных, функциональных магнитно-перестраиваемых устройств терагерцового диапазона необходимо теоретическое исследование межчастичных взаимодействий магнитных частиц и моделирование процессов структурообразования в МЖ во внешних магнитных полях. Цель работы – разработка модели магнитно-управляемого полосового фильтра ТГц-диапазона (от 0.2 до 1.2 ТГц). В качестве управляемого полосового фильтра рассматривается кювета с МЖ во внешнем магнитном поле, являющаяся двухмерным аналогом управляемого полосового фильтра ТГц-диапазона [22].

Объект и методы исследования

В качестве двухмерной модели кюветы рассматривалась квадратная область со стороной 1 см (рис. 1) с наложенными граничными условиями непроницаемости и гладкости для жидкостей и постоянного магнитного поля, направленного вертикально. В начальный момент времени в кювете находятся две жидкости, которые химически не взаимодействуют, среда является электрически нейтральной и находится в термодинамическом равновесии. Одна из них – модельная магнитная жидкость (область *a* на рис. 1), в качестве жидкости-носителя рассмотрено автомобильное моторное масло вязкости 5w40 (области *b* на рис. 1).

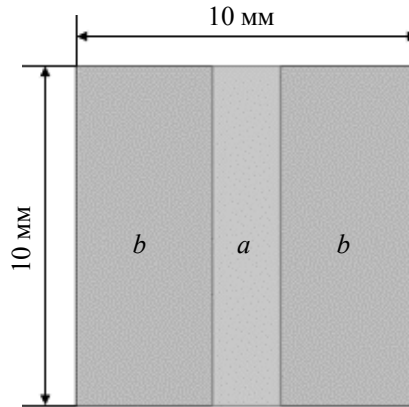


Рис. 1. Геометрия модели: *a* – фаза магнитной жидкости;
b – фаза жидкости-носителя

Кювета с магнитной жидкостью и жидкостью-носителем находится во внешнем магнитном и гравитационном полях, при этом происходит интенсивное взаимодействие между магнитным полем и МЖ, в результате которого область, занимаемая МЖ, деформируется. Данный процесс описывается уравнением Навье – Стокса

$$\rho \frac{\partial \vec{g}}{\partial t} + \rho (\vec{g} \cdot \nabla) \vec{g} - \eta \Delta \vec{g} + \nabla p = \vec{F} + \rho \vec{g}, \quad (1)$$

где Δ – оператор Лапласа; η – коэффициент кинематической вязкости; ρ – плотность; p – давление; $\vec{g} = (g^1, \dots, g^n)$ – векторное поле скорости; $\vec{g}$ – ускорение свободного падения; $\vec{F}$ – векторная сумма магнитной силы и силы поверхностного натяжения. Считая жидкость несжимаемой, запишем уравнение неразрывности

$$\nabla \vec{g} = 0. \quad (2)$$

Для описания динамики границы раздела «магнитная жидкость – жидкость-носитель» в межфазном потоке воспользуемся уравнением конвективного переноса на функцию уровня, которая равна нулю в одной жидкости (жидкости-носителе) и единице в другой (магнитной жидкости), а значение 0.5 соответствует границе раздела сред:

$$\frac{\partial \varphi}{\partial t} + \nabla \varphi \vec{g} = 0. \quad (3)$$

Решение уравнения (3) будем искать с помощью метода фазового поля [23]. Используем функцию уровня ϕ для различных параметров (плотность (ρ), динамическая вязкость (η)) при переходе через границу раздела в соответствии со следующими правилами:

$$\rho = \rho_c + (\rho_m - \rho_c)\phi, \quad \eta = \eta_c + (\eta_m - \eta_c)\phi, \quad (4)$$

где фаза магнитной жидкости и фаза жидкости-носителя представлены индексами m и c соответственно. Для описания внешнего магнитного поля использовались уравнения Максвелла:

$$\nabla \cdot \vec{B} = 0, \quad \nabla \times \vec{H} = 0, \quad (5)$$

$$\vec{B} = \mu_0 \mu \vec{H}. \quad (6)$$

Здесь $\vec{B}$ – вектор магнитной индукции; $\vec{H}$ – вектор напряженности магнитного поля; μ_0 – магнитная проницаемость вакуума; μ – магнитная проницаемость вещества. Причем

$$\mu = 1 + \mu_m \phi, \quad (7)$$

где μ_m – магнитная проницаемость МЖ. Магнитную силу, действующую на магнитную жидкость, и силу поверхностного натяжения можно представить в следующем виде [24]:

$$\vec{F}_m = \nabla \begin{pmatrix} \frac{\mu H_x^2}{2} & \mu H_x H_y \\ \mu H_x H_y & \frac{\mu H_y^2}{2} \end{pmatrix}, \quad (8)$$

$$\vec{F}_\sigma = \nabla [\sigma \{ \mathbf{I} + (-\mathbf{n}\mathbf{n}^T) \} \delta]. \quad (9)$$

Здесь σ – коэффициент поверхностного натяжения; $\mathbf{I}$ – единичная матрица; δ – дельта функция Дирака; $\mathbf{n}$ – единичный вектор нормали к границе раздела жидкостей.

Граничные условия:

$$\begin{aligned} \vartheta_n &= 0, \quad (\nabla \vartheta)_n = 0, \quad (\nabla \phi)_n = 0, \\ B_n &= \begin{cases} B_{\text{external}}, & \text{горизонтальные границы,} \\ 0, & \text{вертикальные границы,} \end{cases} \end{aligned} \quad (10)$$

где индекс n означает проекцию на соответствующую нормаль.

В качестве модельного в расчетах использовался спектральный профиль источника терагерцового излучения спектрометра с разрешением по времени ТГц-ТДС («Т-Спек 1000 Teravil», Эстония). Его оптическая схема приведена на рис. 2.

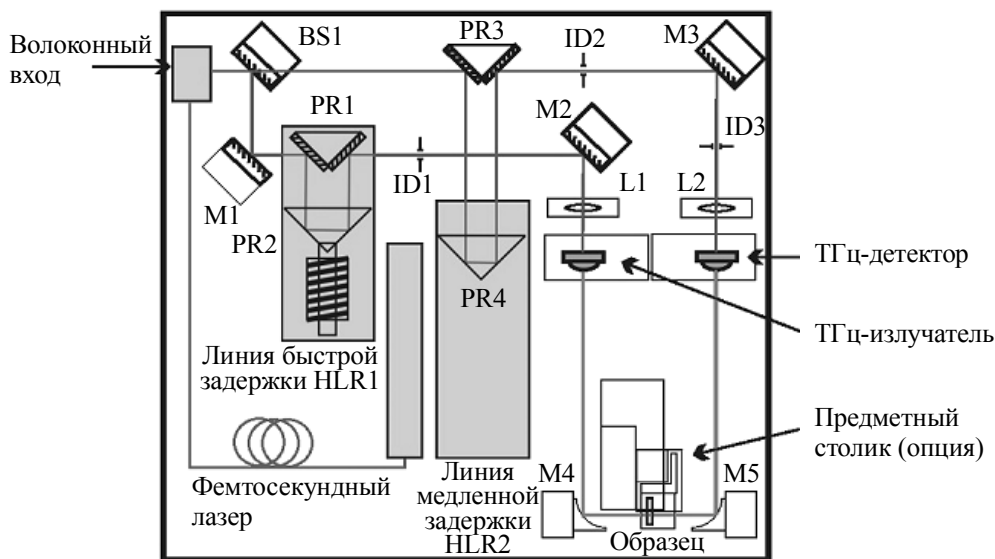


Рис. 2. Оптическая схема ТГц-спектрометра («Т-Спек 1000 Teravil», Эстония)

Результаты и их обсуждение

На основе математической модели (1) – (6) с магнитной силой (8) и силой поверхностного натяжения (9) проведено численное моделирование динамики МЖ для различных значений магнитной проницаемости и величины внешнего магнитного поля. Расчеты проводились при следующих характеристиках [25, 26]:

$$\begin{aligned}\rho_m &= 3200 \text{ кг/м}^3, \quad \rho_c = 854.5 \text{ кг/м}^3, \\ \eta_m &= 76.964 \text{ Па} \cdot \text{с}, \quad \eta_c = 0.207 \text{ Па} \cdot \text{с}, \\ \sigma &= 1.35 \cdot 10^{-2} \text{ Н/м}.\end{aligned}$$

На рис. 3, *а* показано начальное распределение магнитной жидкости и жидкости-носителя в расчетной области 1×1 см. Во внешнем магнитном поле $B_n = 0.01$ мТл для рассмотренных значений магнитной проницаемости μ_m в течение около 5 с возникает состояние динамического равновесия, которое проявляется в виде периодических структур, представленных на рис. 3, *б–г*, похожих на дифракционную решетку. Увеличение магнитной проницаемости μ_m приводит к уменьшению расстояния между этими структурами (к уменьшению периода решетки).

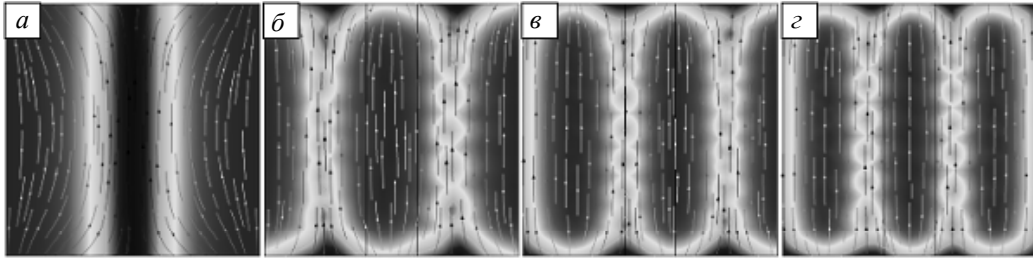


Рис. 3. Результаты численного моделирования при $B_n = 0.01$ мТл: *а* – начальное состояние; *б* – $\mu_m = 100$; *в* – $\mu_m = 200$; *г* – $\mu_m = 300$

На рис. 4 представлены результаты численных расчетов при $\mu_m = 300$ для различных значений магнитной индукции B_n . Как и в предыдущем случае, система переходит в состояние динамического равновесия за время, меньшее 5 с. При значении магнитной индукции меньше 0.01 мТл

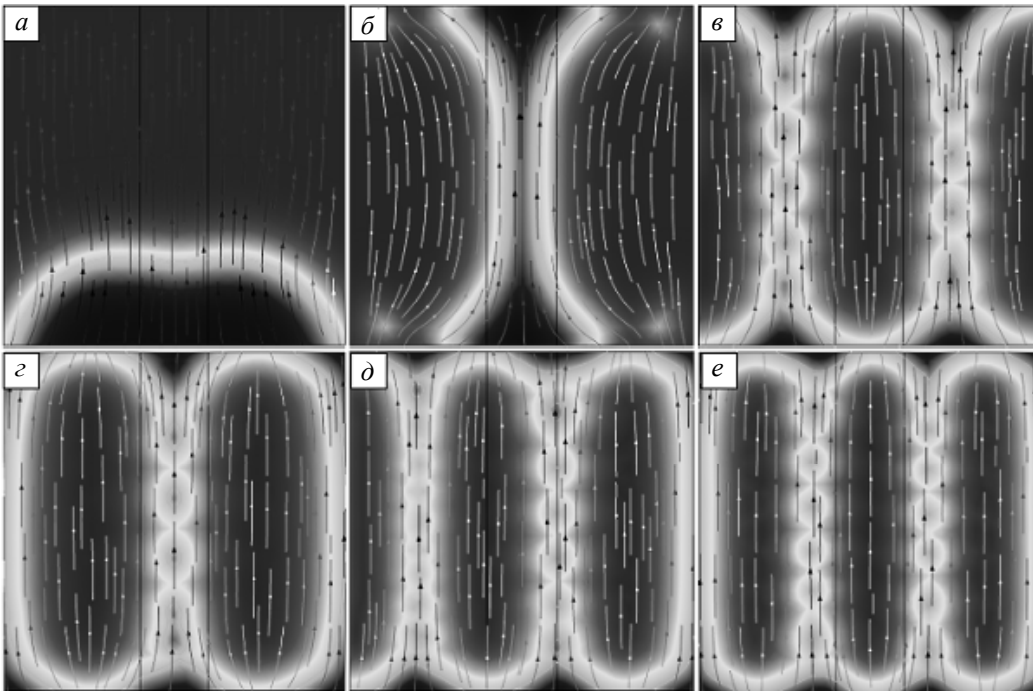


Рис. 4. Результаты численного моделирования для $\mu_m = 300$: *а* – $B_n < 0.01$ мТл; *б* – $B_n = 0.01$ мТл; *в* – $B_n = 0.1$ мТл; *г* – $B_n = 0.4$ мТл; *д* – $B_n = 0.6$ мТл; *е* – $B_n > 0.6$ мТл

процесс структурообразования не наблюдается, магнитная жидкость полностью оседает с течением времени (рис. 4, *a*). Когда значение магнитной индукции больше 0.01 мТл, формируются периодические структуры, причем увеличение значения магнитной индукции также приводит к уменьшению расстояния между этими структурами (к уменьшению периода решетки).

Представленные структуры подобны дифракционным решеткам. Дифракционная решетка имеет два основных параметра: период и ширину щели. Интенсивность света после прохождения дифракционной решетки описывается следующей формулой:

$$I = I_0 \frac{\sin^2(\pi b \sin(\varphi) / \lambda) \sin^2(N \pi d \sin(\varphi) / \lambda)}{(\pi b \sin(\varphi) / \lambda)^2 \sin^2(\pi d \sin(\varphi) / \lambda)}, \quad (11)$$

где I_0 – интенсивность, создаваемая одной щелью; φ – угол дифракции; λ – длина волны; N – количество щелей; b – ширина щели. Использованный модельный спектральный профиль источника терагерцового излучения спектрометра ТГц-ТДС («T-Spec 1000 Teravil», Эстония) представлен на рис. 5, *a*. Рассмотрим падение данного излучения на дифракционную решетку перпендикулярно ей. Если диаметр пучка меньше размера щели, дифракционная картина наблюдаться не будет. Предположим, что в каждой точке пучка интенсивность одинакова. Будем считать, что спектральный профиль излучения, представленный на рис. 5, *a*, описывает свойства вторичной волны, создаваемой одной щелью дифракционной решетки, т.е. I_0 . Модель, представленная на рис. 4, *e*, примерно соответствует дифракционной решетке с периодом $d = 3.30$ мм и шириной щели $b = 2.90$ мм. В этом случае диаметр пучка падающего излучения (4 мм) чуть больше ширины щели, т.е. пучок «накрывает» только одну щель. Для этих условий зависимость интенсивности прошедшего излучения от угла дифракции представлена на рис. 5, *б*.

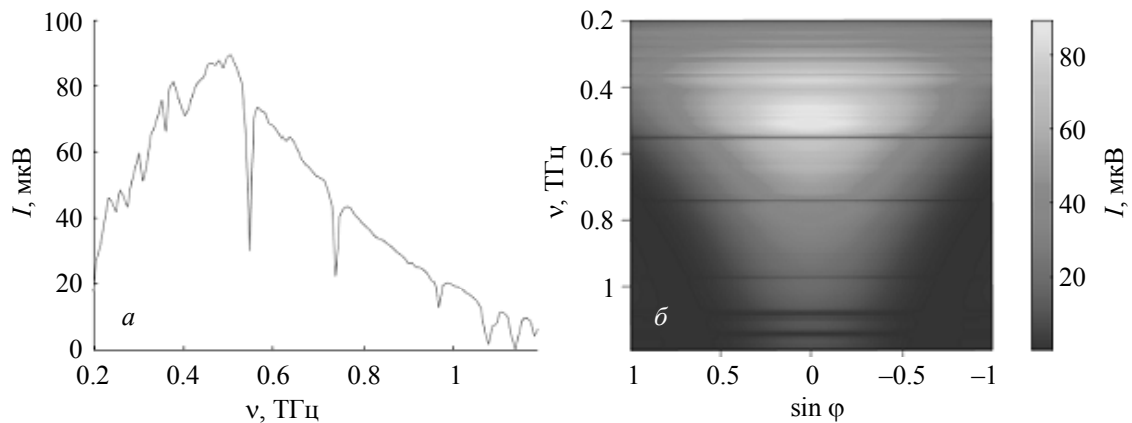


Рис. 5. Спектр интенсивности падающего на дифракционную решетку излучения (*a*) и зависимость спектра интенсивности прошедшего через дифракционную решетку излучения от синуса угла дифракции для случая, когда диаметр пучка падающего излучения равен 4 мм, ширина щели $b = 2.90$ мм (*б*)

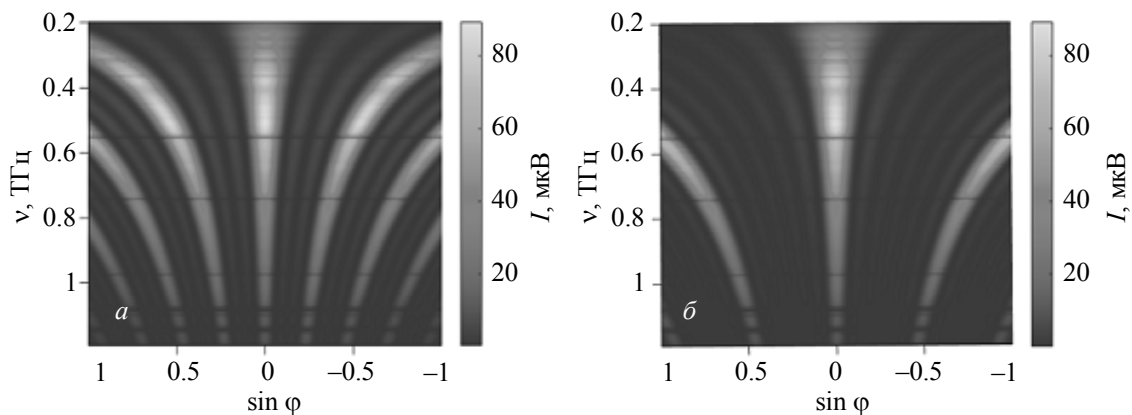


Рис. 6. Зависимость спектра интенсивности прошедшего через дифракционную решетку терагерцового излучения от синуса угла дифракции для случая, когда падающее излучение «накрывает» три щели (*a*) и семь щелей (*б*)

Когда диаметр пучка излучения много больше периода решетки, картина существенно меняется. Например, на рис. 6, а, б показана такая же зависимость для $d = 1.10$ мм, $b = 0.13$ мм и $d = 0.36$ мм, $b = 0.33$ мм соответственно.

Заключение

Исследованная в данной работе математическая модель позволяет получить качественные оценки поведения МЖ во внешнем магнитном поле. С использованием численного моделирования показано формирование периодических структур в МЖ во внешнем однородном магнитном поле, похожих на дифракционную решетку. Пользуясь этой аналогией, проведены оценки спектра пропускания модельных фильтров ТГц-излучения в зависимости от угла падения.

Полученные оценки качественно согласуются с экспериментальными данными, полученными нами ранее [22]. Представленные результаты позволяют рассматривать изложенный в данной работе подход как перспективный для оценки трансформации ТГц-волн при их прохождении через полосовые фильтры на основе магнитных жидкостей.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Kaur R., Hasan A., Iqbal N., et al. // J. Separation Sci. – 2014. – V. 37. – No. 14. – P. 1805–1825.
2. Faraji M., Yamini Y., Rezaee M. // J. Iran. Chem. Soc. – 2010. – V. 7. – P. 1–37.
3. Colloidal Magnetic Fluids: Basics, Development and Application of Ferrofluids: Lecture Notes in Physics / ed. S. Odenbach. – Springer, 2009. – V. 763. – 438 p.
4. Vekas L., Avdeev M., Bica D. // Nanoscience in Biomedicine. – Berlin; Heidelberg; New York: Springer, 2009. – P. 650–728.
5. Joseph A., Mathew S. // Chem. Plus Chem. – 2014. – V. 79. – No. 10. – P. 1382–1420.
6. Gens S., Derin B. // Current Opinion Chem. Eng. – 2014. – V. 3. – P. 118–124.
7. Jakabsky S., Lovas M., Mockovciakova A., Hredzak S. // J. Radioanal. Nucl. Chem. – 2000. – V. 246. – No. 3. – P. 543–547.
8. Biedermann A.R. // Geochemistry, Geophysics, Geosystems. – 2019. – V. 20. – No. 12. – P. 5650–5666.
9. Сучилин А.С., Грибут И.Э., Голиков С.А. // Электротехнические и информационные комплексы и системы. – 2011. – Т. 7. – № 4. – С. 41–45.
10. Максимов Т.В., Ключкин М.Ю., Максимов В.А. // Вестник Казанского технологического университета. – 2013. – Т. 16. – № 5. – С. 167–170.
11. Мартынова Д.Ю. // Вестник современных исследований. – 2018. – Т. 24. – № 9. – С. 173–176.
12. Баранов Д.А., Губин С.П. // Радиоэлектроника, наносистемы, информационные технологии. – 2009. – Т. 1. – № 1–2. – С. 129–147.
13. Laurent S., Dutz S., Hafeli U., Mahmoudi M. // Adv. Colloid Interfac. Sci. – 2011. – V. 166. – No. 1–2. – P. 8–23.
14. Mahmoudi M., Sant S., Wang B., et al. // Adv. Drug Delivery Rev. – 2011. – V. 63. – No. 1–2. – P. 24–46.
15. Усанов Д.А., Постельга А.Э., Бочкова Т.С., Гаврилин В.Н. // ЖТФ. – 2016. – Т. 86. – Вып. 3. – С. 146–148.
16. Антонюк О.А., Коваленко В.Ф., Молдован Б.Н., Петричук М.В. // ЖТФ. – 2005. – Т. 75. – С. 93–97.
17. Hassan M.-R., Zhang J., Wang C. // Phys. Fluids. – 2018. – V. 30. – No. 9. – P. 092002-1–092002-13.
18. Özbey A., Karimzadehkhoei M., Yalcin S., et al. // Microfluidics and Nanofluidics. – 2015. – V. 18. – P. 447–460.
19. Jackson B.A., Terhune K.J., King L.B. // Phys. Fluids. – 2017. – V. 29. – No. 6. – P. 064105-1–064105-10.
20. Chen S., Fan F., Chang S., et al. // Opt. Express. – 2014. – V. 22. – No. 6. – P. 6313–6321.
21. Shalaby M., Peccianti M., Ozturk Y., et al. // Appl. Phys. Lett. – 2012. – V. 100. – P. 241107-1–241107-3.
22. Кочнев З.С., Князькова А.И., Мещерякова Т.А. и др. // Изв. вузов. Физика. – 2021. – Т. 64. – № 11. – С. 134–138.
23. Olsson E., Kreiss G. // J. Comput. Phys. – 2005. – V. 210. – No. 1. – P. 225–246.
24. Hassan M.-R., Wang C. // Excerpt from the Proceedings of the 2019 COMSOL Conference in Boston. – 2019. – P. 1–6.
25. Колчанов Н.В., Колесниченко Е.В. // Вестник Пермского университета. Физика. – 2017. – Т. 4. – С. 37–44.
26. Беляев Е.С., Ермолаев А.И., Титов Е.Ю., Тумаков С.Ф. // Вестник научно-технического развития. – 2018. – Т. 7. – 94 с.

Поступила в редакцию 21.09.2022,
принята в печать 27.10.2022.

Кочнев Захар Сергеевич, инженер, мл. науч. сотр., аспирант НИ ТГУ, e-mail: kochnev_zakhar@mail.ru;

Кистенев Юрий Владимирович, д.ф.-м.н., профессор, зам. проректора по НИД НИ ТГУ, зав. лабораторией лазерного молекулярного имиджинга и машинного обучения НИ ТГУ, e-mail: yuk@iao.ru;

Борисов Алексей Владимирович, к.ф.-м.н., доцент НИ ТГУ, e-mail: borisov@phys.tsu.ru.