

ОПТИКА И СПЕКТРОСКОПИЯ

УДК 681.625.923; 532.133; 532.612.4

*Р.М. ГАДИРОВ, А.В. ОДОД, Г.Ю. НАЗАРОВА, А.Е. КУРЦЕВИЧ, Т.Н. КОПЫЛОВА***МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА СТРУЙНОЙ ПРИНТЕРНОЙ ПЕЧАТИ
НИЗКОВЯЗКИХ ЖИДКОСТЕЙ***

Предложен подход, позволяющий выполнять струйную принтерную печать низковязких жидкостей и заключающийся в подавлении нежелательных слабозатухающих акустических колебаний путем воздействия сдвоенного импульса. Длительность и амплитуда второго импульса подбираются таким образом, чтобы возникающие акустические колебания находились в противофазе к колебаниям от первого импульса.

Ключевые слова: *принтерная печать, пьезоактуатор, продольная волна, вязкость, скорость звука, поверхностное натяжение.*

Введение

В настоящее время струйная принтерная печать является перспективным инструментом создания устройств органической электроники, таких, как индикаторы, дисплеи, полевые транзисторы, сенсоры [1–3]. При создании органических полупроводниковых полимерных материалов с помощью принтерных технологий встает вопрос о создании жидких композиций, пригодных для печати, поскольку чернила должны удовлетворять ряду требований: вязкости, поверхностному натяжению, скорости высыхания, кислотности, размеру растворенных частиц и т.д. Однако внесение модифицирующих добавок в растворы полимеров часто приводит к нежелательным явлениям: выпадению в осадок основного полимера, ухудшению электрических характеристик получаемых пленок. Большинство полупроводниковых полимеров растворяются только в малополярных органических растворителях ароматического ряда (толуол, анизол), галогеналканах (хлороформ, четыреххлористый углерод), обладающих низкой вязкостью. Возможность растворения полупроводниковых полимеров в полярных средах требует введения в их структуру полярных групп [4].

В процессе высыхания капли раствора в ней происходит перераспределение вещества, связанное с возникающими тепловым и концентрационным градиентами и приводящее к так называемому эффекту «кофейного пятна». Избавиться от этого явления можно путем оптимизации режимов высыхания при строго контролируемой температуре капли, подложки и окружающей атмосферы [5].

В ситуациях, когда требуется задавать высокие температуры капли для контроля профиля пленки в ходе высыхания или при печати растворами полимеров без добавок модификаторов, как правило, возникают трудности, связанные с тем, что характеристики растворов не удовлетворяют рекомендованным требованиям производителей принтерных головок. Так, в низковязких жидкостях при воздействии прямоугольного электрического импульса на пьезоактуатор в резонаторе возникают слабозатухающие акустические колебания, приводящие к неоднородному вылету капели, захвату воздуха в камеру резонатора и, в конечном итоге, срыву печати [6].

Выходом в такой ситуации является применение импульсов сложной формы, позволяющих компенсировать нежелательные слабозатухающие акустические колебания. В этом случае необходимо правильно подбирать форму таких импульсов.

Целью работы является описание подхода к выбору формы импульсов, обеспечивающих стабильную печать.

Вычислительные и экспериментальные детали

За основу была взята аналитическая модель [6, 7], позволяющая описывать отклик пьезоэлектрической печатающей головки принтера с камерой накачки по типу резонатора Гельмгольца. Схема одного элемента печатающей головки приведена на рис. 1.

* Работа выполнена в рамках научного проекта № 8.1.32.2017 при поддержке Программы повышения конкурентоспособности ТГУ среди ведущих мировых научно-образовательных центров.

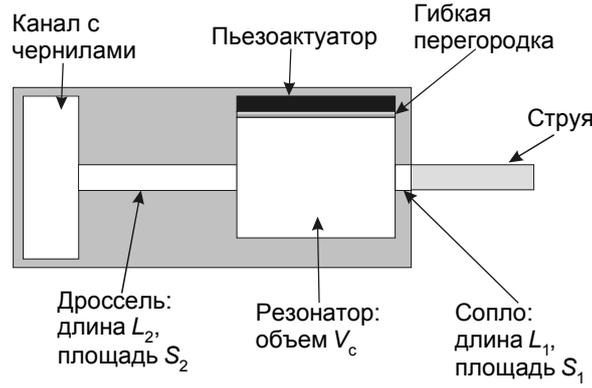


Рис. 1. Схема печатающего элемента головки принтера [7]

Приведем конечные уравнения, описывающие смещение x_1 столба жидкости в печатающем сопле длиной L_1 , площадью S_1 со временем t , при воздействии одиночным прямоугольным импульсом длительности t_p [6]. В случае сильно затухающих акустических колебаний при высокой вязкости жидкости, когда коэффициент демпфирования $\zeta > 1$, основное уравнение, описывающее смещение жидкости x_1 , записывается как

$$x_1 = \frac{\Delta V_0}{S_1} \left[1 - e^{-\zeta \omega_n t} \left(\frac{\zeta}{\sqrt{1-\zeta^2}} \sin \omega_n t \sqrt{1-\zeta^2} + \cos \omega_n t \sqrt{1-\zeta^2} \right) \right] - \frac{\Delta V_0}{S_1} \left[1 - e^{-\zeta \omega_n (t-t_p)} \left(\frac{\zeta}{\sqrt{1-\zeta^2}} \sin \omega_n (t-t_p) \sqrt{1-\zeta^2} + \cos \omega_n (t-t_p) \sqrt{1-\zeta^2} \right) \right],$$

где ΔV_0 – изменение объема камеры накачки; ω_n – собственная частота системы.

Коэффициент демпфирования определяется как $\zeta = \frac{4\pi\eta}{\rho_0 c} \sqrt{\frac{V_c L_1}{S_1^3}}$, а собственная частота системы

$\omega_n = c \sqrt{\frac{S_1}{V_c L_1}}$. Здесь η и ρ_0 – динамическая вязкость и плотность жидкости; c – скорость звука в жидкости; V_c – объем камеры резонатора.

В случае низковязких жидкостей $\zeta < 1$ смещение описывается как

$$x_1 = \frac{\Delta V_0}{S_1} \left(1 + \frac{\lambda_2}{\lambda_1 - \lambda_2} e^{\lambda_1 t} - \frac{\lambda_1}{\lambda_1 - \lambda_2} e^{\lambda_2 t} \right) - \frac{\Delta V_0}{S_1} \left(1 + \frac{\lambda_2}{\lambda_1 - \lambda_2} e^{\lambda_1 (t-t_p)} - \frac{\lambda_1}{\lambda_1 - \lambda_2} e^{\lambda_2 (t-t_p)} \right),$$

где $\lambda_{1,2} = (-\zeta \pm \sqrt{\zeta^2 - 1}) \omega_n$.

Импульс произвольной формы можно представить как сумму прямоугольных импульсов с определенной амплитудой и длительностью. В этом случае суммарное смещение столба жидкости будет представляться как сумма смещений от воздействия соответствующих одиночных импульсов.

Максимальное значение производной по времени для смещения x_1 принималось за скорость вылета капли u .

Вклад различных сил в поведение жидкости можно описать при помощи гидродинамических критериев подобия (критерии Рейнольдса, Вебера, Онезорге, Лапласа и др.). Так, критерий Онезорге Oh, описываемый выражением [8, 9]

$$Oh = \frac{\eta}{\sqrt{\sigma \rho_0} d_1},$$

не зависит от скорости движения жидкости и определяет соотношение вязкостных сил и поверхностного натяжения σ . Этот критерий используется для описания самих чернил и склонности их к образованию сателлитных капель при отрыве столба жидкости от сопла диаметром d_1 . Оптимальным для печати считается диапазон значений $0.1 < Oh < 1$.

При моделировании задавались следующие параметры печатающей головки: объем камеры резонатора $V_c = 0.2 \text{ мм}^3$; длина сопла $L_1 = 7.5 \text{ мкм}$; площадь сопла $S_1 = 346.4 \text{ мкм}^2$ (диаметр $d_1 = 21 \text{ мкм}$).

Экспериментально печать осуществлялась на струйном принтере Dimatix DMP-2831 с картриджем DMC-11610, снабженным 16 соплами диаметром 21 мкм и позволяющим получать капли объемом 10 пл.

В качестве тестовых жидкостей были взяты анизол, н-бутанол и вода, для которых в табл. 1 приведены значения вязкости (η), плотности (ρ_0), скорости звука (c) и поверхностного натяжения (σ) при различных температурах.

Таблица 1

Значения вязкости η , плотности ρ_0 , скорости звука c и поверхностного натяжения σ при разных температурах для воды, н-бутанола и анизола

Вещество	$T, \text{ К}$	$\eta, \text{ мПа}\cdot\text{с}$	$\rho_0, \text{ кг/м}^3$	$c, \text{ м/с}$	$\sigma, \text{ мН/м}$
Вода	303	0.801 [12]	995.6 [10]	1507*[12]	71.2 [11]
	308	0.719 [12]	994.0 [10]	1519 [12]	70.4 [11]
	313	0.656*	992.2 [10]	1526*	69.6 [11]
	318	0.597 [12]	990.2 [12]	1535 [12]	68.8 [11]
	323	0.550*	988.0 [13]	1541*	67.9 [11]
н-Бутанол	303	2.266 [17]	801.8 [16]	1224 [14]	23.3 [15]
	308	2.030*	797.9 [16]	1206 [16]	22.8 [15]
	313	1.768 [17]	795.8 [17]	1190 [14]	22.7 [18]
	318	1.585*	790.7 [19]	1178*	21.8*
	323	1.363 [17]	787.6 [17]	1170*	21.3*
Анизол	303	0.933 [20]	984.5 [20]	1398[21]	34.2*[22]
	308	0.849 [20]	979.2 [23]	1388[21]	33.4*
	313	0.764 [23]	975.0 [20]	1362[21]	32.8*
	318	0.700*	967.0*	1344[21]	32.1*
	323	0.637*	960.0*	1320[21]	31.5*[24]

Примечание. * Значения получены интерполяцией.

Результаты и их обсуждение

Большинство современных струйных принтеров работает с чернилами, вязкость которых находится в диапазоне 10–15 мПа·с. При таких вязкостях значение коэффициента демпфирования находится в диапазоне 0.5–0.9. В случае низковязких жидкостей коэффициент демпфирования значительно ниже единицы. Для примера на рис. 2 приведены смещение и скорость смещения жидкости внутри сопла при воздействии прямоугольного импульса для чернил с вязкостью 1 мПа·с ($\zeta = 0.05$) и 15 мПа·с ($\zeta = 0.81$).

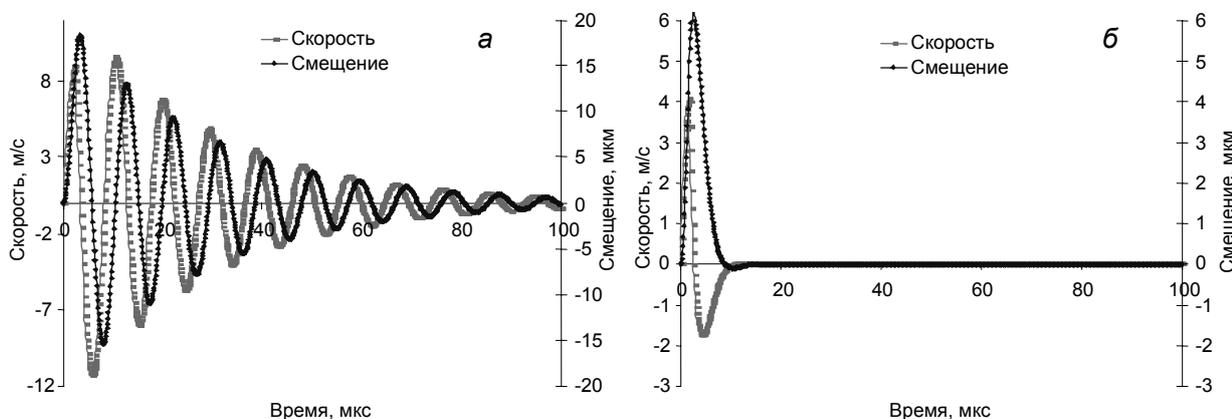


Рис. 2. Смещение и скорость смещения жидкости: а – при вязкости 1 мПа·с; б – при вязкости 15 мПа·с

Анализируя выражения для ω_n и ζ , можно заключить, что при увеличении скорости звука c частота колебаний будет увеличиваться, а скорость их затухания снижаться. Увеличение плотности жидкости ρ_0 также будет снижать скорость затухания колебаний, а увеличение вязкости жидкости будет приводить к затуханию колебаний. Таким образом, зависимость колебаний от параметров жидкости оказывается сложной. Однако поскольку вязкость жидкости с температурой, как правило, меняется в большей степени, то можно сказать, что именно изменение вязкости будет оказывать решающее значение на коэффициент демпфирования.

В случае низковязких жидкостей возникают долго затухающие акустические колебания, которые при положительной полуволне приводят к выталкиванию жидкости из сопла, а при отрицательной – к затягиванию жидкости внутрь и попаданию воздуха через сопло в камеру резонатора, что приводит к срыву печати [25, 26].

Устранить такие длительные осцилляции можно, воздействуя последующими импульсами таким образом, чтобы возникающие от них акустические волны оказывались в противофазе, а максимальная амплитуда смещения жидкости приходилась только на первую положительную полуволну первого импульса (рис. 3, а). Из-за необходимости согласования фаз длительность второго импульса и его амплитуда будут зависеть от амплитуды и длительности первого импульса. При недостаточной компенсации колебания также будут продолжаться, однако с меньшей амплитудой (рис. 3, б).

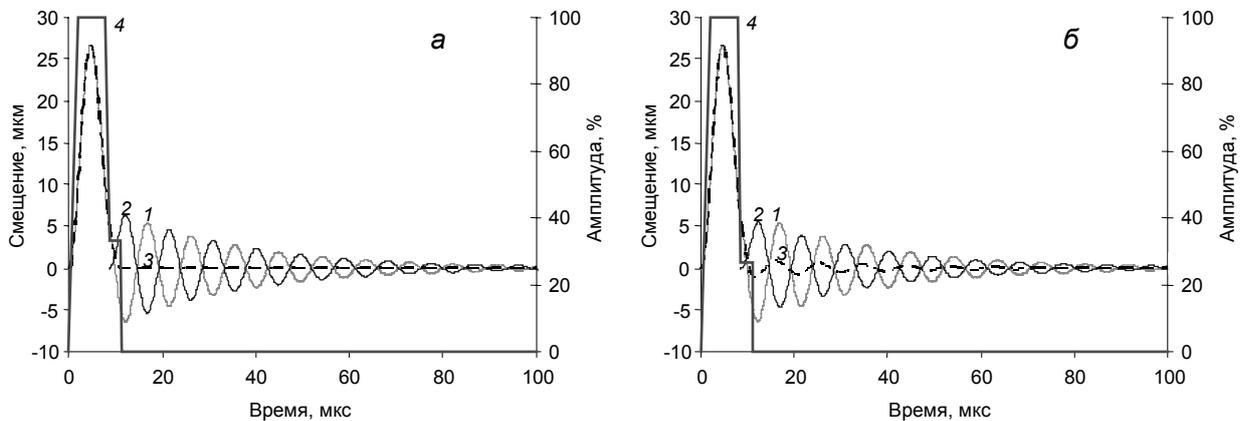


Рис. 3. Форма импульса, отклик от сдвоенного импульса и от отдельных его составляющих при полной компенсации (а) (амплитуда второго импульса $A_2 = 33.3\%$) и при недостаточной компенсации (б) ($A_2 = 26.7\%$): 1 – отклик от первого импульса; 2 – отклик от второго импульса; 3 – суммарный отклик; 4 – форма импульса

Апробация предложенного подхода выполнялась на разных жидкостях, имеющих низкую вязкость. Длительность первого импульса (t_1) выбиралась таким образом, чтобы при его воздействии смещение столба жидкости достигало максимального положительного значения, а на момент завершения мгновенная скорость смещения равнялась нулю. Длительность второго импульса (t_2) и его амплитуда (A_2) подбирались так, чтобы максимально снизить последующие смещения столба жидкости ниже значения 1 мкм. Амплитуда изменялась с шагом 6.67 %, а длительность импульса – с шагом 0.064 мкс, что связано с ограничениями разрядности цифроаналогового преобразования на задающем генераторе импульсов принтера Dimatix.

В табл. 2 приведены длительности (t) и амплитуды (A) первого и второго импульсов для воды, н-бутанола и анизолы при разных температурах, а также скорость вылета капли (u), максимальная амплитуда остаточных осцилляций (I), число Онезорге (Oh) и коэффициент демпфирования (ζ). Скорость вылета капли u и амплитуда остаточных осцилляций I определялись при фиксированном значении изменения объема резонатора равном 10 пл. Для печатающей головки картриджа DMC-11610 такое смещение соответствует напряжению на пьезоактуаторе около 22 В.

Из приведенных в табл. 2 данных видно, что с ростом температуры для анизолы и н-бутанола оптимальным является увеличение длительностей первого и второго импульсов, что связано с уменьшением скорости звука в этих растворителях. В воде с увеличением температуры скорость звука растет, что приводит к росту частоты системы и уменьшению коэффициента демпфирования.

ния, поэтому оптимальным в данном случае является уменьшение длительностей первого и второго импульсов.

Из рассчитанных значений критерия Онезорге следует, что только у н-бутанола соотношение вязкостных сил, сил поверхностного натяжения и инерции находится в оптимальном для струйной принтерной печати диапазоне значений. В остальных случаях жидкость при выходе из сопла будет склонна к формированию множества сателлитных капель. Снизить этот эффект можно путем контроля скорости вылета капли. Жидкости с низкой вязкостью на выходе из сопла имеют высокую скорость (выше 10 м/с). Поскольку оптимальной скоростью вылета капли считается 7–10 м/с, то для указанных жидкостей требуется пропорциональное снижение напряжения V на пьезоактуаторе. Фактически это будет приводить к уменьшению изменения объема резонатора и уменьшению объема капли.

Таблица 2

Задаваемые длительности t и амплитуды A первого и второго импульсов и рассчитанные значения скорости смещения u , амплитуды остаточных осцилляций I , числа Онезорге Oh , коэффициента демпфирования ζ и оптимальное напряжение печати V для воды, н-бутанола и анизол при различных температурах

$T, ^\circ\text{C}$	Импульс		$u, \text{ м/с}$	$I, \text{ мкм}$	Oh	ζ	$V, \text{ В}$
	$t_1, \text{ мкс } (A_1, \%)$	$t_2, \text{ мкс } (A_2, \%)$					
Вода							
30	8.000 (100)	1.984 (33.3)	19.7	0.7	0.0207	0.0402	8.5
35	8.000 (100)	1.816 (33.3)	19.9	0.7	0.0188	0.0359	7.0
40	8.000 (100)	1.728 (33.3)	20.1	0.4	0.0172	0.0327	7.0
45	7.960 (100)	1.688 (33.3)	20.3	0.8	0.0158	0.0297	6.5
50	7.960 (100)	1.624 (33.3)	20.5	0.6	0.0146	0.0272	6.0
н-Бутанол							
30	5.440 (100)	5.376 (60.0)	13.3	0.3	0.1110	0.1690	10.0
35	5.440 (100)	5.504 (60.0)	13.3	0.1	0.1041	0.1590	10.0
40	5.568 (100)	5.504 (60.0)	13.8	0.9	0.0942	0.1450	9.5
45	5.568 (100)	5.632 (66.7)	15.0	0.2	0.0833	0.1280	9.0
50	5.760 (100)	5.632 (66.7)	16.3	1.0	0.0759	0.1130	8.5
Анизол							
30	4.800 (100)	4.544 (86.7)	28.3	0.7	0.0347	0.0506	6.0
35	4.800 (100)	4.672 (86.7)	28.5	0.6	0.0324	0.0475	5.5
40	4.800 (100)	4.800 (86.7)	28.9	0.3	0.0295	0.0435	5.5
45	4.864 (100)	4.864 (86.7)	29.0	0.6	0.0274	0.0407	5.0
50	4.928 (100)	4.992 (86.7)	28.9	1.0	0.0253	0.0379	5.0

Экспериментальная проверка показала, что на режимах, предложенных в табл. 2, печать осуществляется без срывов. Для примера на рис. 4 приведены кадры видеоряда вылета капель воды из сопла принтера при 50 °С, напряжении питания 6 В и частоте следования импульсов 1 кГц. Запись выполнена в стробоскопическом режиме. Видно, что капля формируется без хвоста и сателлитов.

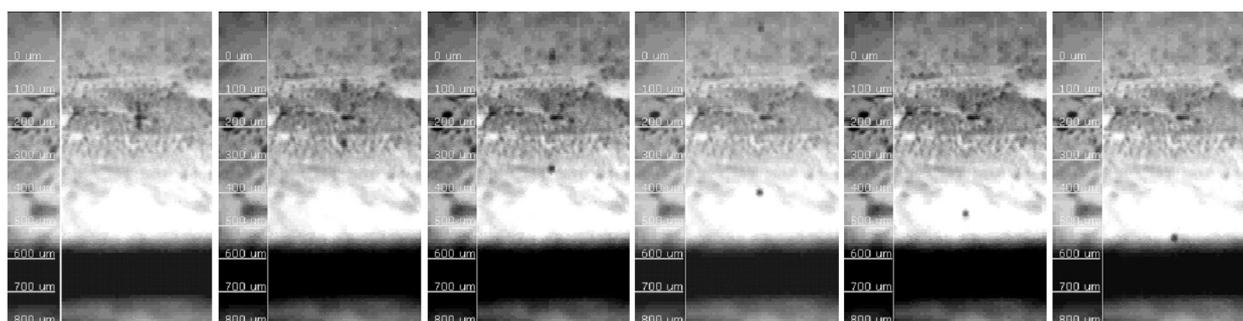


Рис. 4. Кадры видеоряда вылета капель из сопла принтера через 6, 15, 27, 42, 53 и 67 мкс после приложения импульса на пьезоактуатор

Заключение

Продемонстрирован подход, позволяющий выполнять струйную печать низковязких жидкостей пьезоэлектрической печатающей головкой. В основе предложенного подхода используется принцип интерференции акустических волн, в результате которой нежелательные долго затухающие колебания подавляются путем воздействия небольших импульсов в противофазе. Показано, что с ростом температуры в случае н-бутанола и анизола суммарная длительность импульсов должна увеличиваться, в то время как для воды – уменьшаться. Уменьшение напряжения на пьезоактуаторе для предотвращения образования сателлитов приводит к уменьшению объема капли. С одной стороны, это положительный эффект, поскольку снижение объема капель при печати низковязкими жидкостями позволяет увеличить разрешение печати, с другой стороны – требует особого контроля формы импульсов и снижает максимальную частоту вылета капель.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Chen C.T. // Features of Liquid Crystal Display Materials and Processes. – InTech, 2011.
2. Vaart N.C., Lifka H., and Budzelaar F.P.M. // J. Soc. Inf. Display. – 2005. – V. 13. – No. 1. – P. 9–16.
3. De Gans B.J., Duineveld P.C., and Schubert U.S. // Adv. Mater. – 2004. – V. 16. – No. 3. – P. 203–213.
4. Одод А.В., Гадиров Р.М., Солодова Т.А. и др. // Изв. вузов. Физика. – 2017. – Т. 60. – № 12. – С. 167–171.
5. Soltman D. and Subramanian V. // Langmuir. – 2008. – V. 24. – P. 2224–2231.
6. Dijksman J.F., Duineveld P.C., Hack M.J.J., et al. // J. Mater. Chem. – 2007. – V. 17. – No. 6. – P. 511–522.
7. Inkjet Technology for Digital Fabrication / eds. I.M. Hutchings and G.D. Martin. – Wiley, 2012. – 390 p.
8. Martin G.D., Hoath S.D., and Hutchings I.M. // J. Phys.: Conf. Ser. – 2008. – V. 105. – P. 012001.
9. Derby B. // J. Eur. Ceram. Soc. – 2011. – V. 31. – P. 2543–2550.
10. Tanaka M., Girard G., and Davis R. // Metrologia. – 2001. – V. 38. – P. 301–309.
11. Vargaftik N.B., Volkov B.N., and Voljak L.D. // J. Phys. Chem. Ref. Data. – 1983. – V. 12. – P. 817–820.
12. George J. and Sastry N.V. // J. Chem. Eng. Data. – 2004. – V. 49. – P. 235–242.
13. Kell G.S. // J. Chem. Eng. Data. – 1975. – V. 20. – P. 97–105.
14. Rodriguez A., Canosa J., and Tojo J. // J. Chem. Eng. Data. – 2001. – V. 46. – No. 6. – P. 1506–1515.
15. Vijande J., Pineiro M.M., Garcia J., et al. // J. Chem. Eng. Data. – 2006. – V. 51. – P. 1778–1782.
16. Troncoso J., Tovar C.A., Cerdeirina C.A., et al. // J. Chem. Eng. Data. – 2001. – V. 46. – P. 312–316.
17. Dikio E.D., Nelana S.M., et al. // Int. J. Electrochem. Sci. – 2012. – V. 7. – P. 11101–11122.
18. Strey R. and Schmeling T. // Ber. Bunsenges. Phys. Chem. – 1983. – V. 87. – P. 324–327.
19. Senanayke P.C., Gee N., and Freeman G.R. // Can. J. Chem. – 1987. – V. 65. – P. 2441–2446.
20. Al-Kandary J.A., Al-Jimaz A.S., and Abdul-Latif A.-H.M. // J. Chem. Eng. Data. – 2006. – V. 51. – No. 6. – P. 2074–2082.
21. Sreedevi Y., Srinivasu Ch., Fakruddin Sk., et al. // Int. Lett. Chem. Phys. Astron. – 2013. – V. 7. – No. 2. – P. 120–124.
22. Sanchez I.C. // J. Chem. Phys. – 1983. – V. 79. – P. 405–415.
23. Rathnam M.V., Ambavadekar D.R., and Nandini M. // Hindawi. – 2013. – Article ID 413878.
24. Kumar A. // J. Am. Chem. Soc. – 1993. – V. 115. – No. 20. – P. 9243–9248.
25. De Jong J., De Bruin G., et al. // J. Acoust. Soc. Am. – 2006. – V. 120. – No. 3. – P. 1257–1265.
26. Wei J., Yue C., Zhang G., et al. // Sensors, 2012 IEEE. – 2012. – P. 1–4.

Сибирский физико-технический институт им. В.Д. Кузнецова
Томского государственного университета, г. Томск, Россия

Поступила в редакцию 12.01.18,
после доработки – 12.07.18.

Гадиров Руслан Магомедтахирович, к.х.н., ст. науч. сотр., e-mail: grm882@ngs.ru;
Одод Алексей Владимирович, аспирант, техник, e-mail: stily.ao@gmail.com;
Назарова Галина Юрьевна, аспирантка, e-mail: galina.kuydina@mail.ru;
Курцевич Александр Евгеньевич, техник, e-mail: koall1996@yandex.ru;
Копылова Татьяна Николаевна, д.ф.-м.н., профессор, e-mail: kopylova@phys.tsu.ru.