

DOI: 10.17725/rensit.2023.15.361

Датчики уровня жидкости и анализа термодинамических процессов при ее замерзании на объемных акустических волнах

Анисимкин В.И., Кузнецова И.Е., Смирнов А.В.

Институт радиотехники и электроники им. В.А.Котельникова РАН, <http://www.cplire.ru/>
Москва 125009, Российская Федерация

E-mail: anis@cplire.ru, kuziren@yandex.ru, andre-smirnov-v@yandex.ru

Поступила 01.12.2023, рецензирована 03.12.2023, принята 05.12.2023, опубликована 06.12.2023.

Представлена действительным членом РАЕН В.В. Колесовым

Аннотация: Фундаментальным свойством продольных объемных акустических волн (ОАВ) является их неспособность распространяться в газообразной среде из-за сильного поглощения в МГц-диапазоне и, напротив, их способность распространяться в жидкости. На основе этого свойства предложен датчик уровня жидкости на ОАВ. Для этих целей впервые использовано не измерение изменения скорости и поглощения волн, а изменение времени их распространения от излучателя до приемника. Показано, что этот акустический параметр идеально подходит для таких измерений, поскольку он слабо зависит от температуры, но зависит от агрегатного состояния среды распространения. Разработана методика бесконтактного исследования экзо-, эндо- и изотермических процессов, сопровождающих фазовые переходы жидкость-лед и лед-жидкость. С ее помощью экспериментально продемонстрирован изотермический характер фазового перехода вода-лед при нормальных условиях.

Ключевые слова: объемные акустические волны, жидкость, уровень жидкости, экзо-, эндо- и изотермические процессы, фазовый переход вода-лед

PACS: 43.35.Yb

Благодарности: Работа выполнена в рамках госзадания ИРЭ им.В.А. Котельникова РАН.

Для цитирования: Анисимкин В.И., Кузнецова И.Е., Смирнов А.В. Датчики уровня жидкости и анализа термодинамических процессов при ее замерзании на объемных акустических волнах. *РЭНСИТ: Радиоэлектроника. Наносистемы. Информационные технологии*, 2023, 15(4):361-366. DOI: 10.17725/rensit.2023.15.361.

Sensors for liquid level and analysis of thermodynamic processes during its freezing based on bulk acoustic waves

Vladimir I. Anisimkin, Iren E. Kuznetsova, Andrey V. Smirnov

Kotel'nikov Institute of Radioengineering and Electronics of RAS, <http://www.cplire.ru/>
Moscow 125009, Russian Federation

E-mail: anis@cplire.ru, kuziren@yandex.ru, andre-smirnov-v@yandex.ru

Received December 01, 2023, peer-reviewed December 03, 2023, accepted December 05, 2023, published December 06, 2023.

Abstract: A fundamental property of longitudinal bulk acoustic waves (BAW) is their inability to propagate in a gaseous medium due to strong absorption in the MHz range and, on the contrary, their ability to propagate in liquids. Based on this property, a liquid level sensor based on BAW is proposed. For these purposes, for the first time, it was used not to measure changes in the velocity and attenuation of waves, but to change the time of their propagation from the emitter to the receiver. It is shown that this acoustic parameter is ideal for such measurements, since it weakly depends on temperature, but depends on the aggregate state of the propagation medium. A technique has been developed for non-contact research of exo-, endo- and isothermal processes accompanying liquid-ice and ice-liquid phase transitions. With its help, the isothermal nature of the water-ice phase transition under normal conditions was experimentally demonstrated.

Keywords: bulk acoustic waves, liquid, liquid level, exo-, endo- and isothermal processes, water-ice phase transition

PACS: 43.35.Уь

Acknowledgments: The work was carried out within the framework of the state assignment of the V.A. Kotelnikov Institute of Radioengineering and Electronics of RAS.

For citation: Vladimir I. Anisimkin, Iren E. Kuznetsova, Andrey V. Smirnov. Sensors for liquid level and analysis of thermodynamic processes during its freezing based on bulk acoustic waves. *RENSIT: Radioelectronics. Nanosystems. Information Technologies*, 2023, 15(4):361-366e. DOI: 10.17725/rensit.2023.15.361.

СОДЕРЖАНИЕ

1. ВВЕДЕНИЕ (362)
 2. КОНСТРУКЦИЯ ДАТЧИКА УРОВНЯ ЖИДКОСТИ НА ОАВ И ПОЛУЧЕННЫЕ С ЕГО ПОМОЩЬЮ РЕЗУЛЬТАТЫ (362)
 3. ДАТЧИК ДЛЯ БЕСКОНТАКТНОГО ИССЛЕДОВАНИЯ ЭКЗО-, ЭНДО- И ИЗОТЕРМИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ, СОПРОВОЖДАЮЩИХ ФАЗОВЫЕ ПЕРЕХОДЫ ЖИДКОСТЬ-ЛЕД И ЛЕД-ЖИДКОСТЬ (363)
 4. ЗАКЛЮЧЕНИЕ (365)
- ЛИТЕРАТУРА (365)

1. ВВЕДЕНИЕ

Определение уровня жидкости в закрытых резервуарах является важной технической задачей [1,2]. Ее решение важно и для случая реализации биологических жидкостных датчиков и для промышленного применения в области атомной энергетики, газовой промышленности и т.д. Для ее решения используются различные подходы, основанные на использовании оптоволоконных сенсоров [3,4], лазерного луча, отражающегося от структуры жидкость/стекло [5], акустических волн, возбуждаемых лазером или пьезопреобразователем в стенке резервуара [6,7]. В зависимости от решаемой проблемы эти датчики могут размещаться как внутри самой жидкости [8,9], так и снаружи [6,7].

Одним из наиболее активно применяемых методов является использование акустических волн. В случае прямых измерений для получения информации о положении уровня жидкости используют акустические импульсы, отраженные от границы раздела жидкость-газ [10]. В этом случае акустическая волна генерируется преобразователем, размещенным на дне резервуара, проходит через стенки резервуара и жидкость, отражается от границы раздела жидкость-газ и возвращается к пусковому преобразователю. Время задержки отраженного

сигнала дает необходимую информацию. Другие методы основаны на передаче акустической волны через стенку резервуара и жидкость в горизонтальном направлении [10]. В этом случае выходной сигнал появляется, если уровень жидкости превышает расстояние между входным и выходным датчиками.

В данной работе исследуется возможность определения присутствия жидкости при помощи продольных объемных акустических волн. Методика базируется на фундаментальном свойстве продольных объемных акустических волн (ОАВ), а именно, их неспособности распространяться в газообразной среде из-за сильного поглощения в МГц-диапазоне и, напротив, их способности к распространению в жидкости. Также исследована возможность использования ОАВ для анализа термодинамических процессов, происходящих при замерзании жидкости.

2. КОНСТРУКЦИЯ ДАТЧИКА УРОВНЯ ЖИДКОСТИ НА ОАВ И ПОЛУЧЕННЫЕ С ЕГО ПОМОЩЬЮ РЕЗУЛЬТАТЫ

На **Рис. 1** показана конструкция датчика уровня жидкости на основе продольных объемных

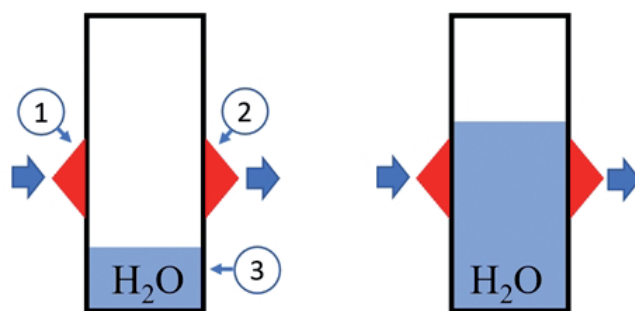


Рис. 1. Схематическое изображение экспериментального образца на основе продольных объемных акустических волн, предназначенного для регистрации уровня жидкости. 1 – излучающий преобразователь, 2 – приемный преобразователь, 3 – кювета.

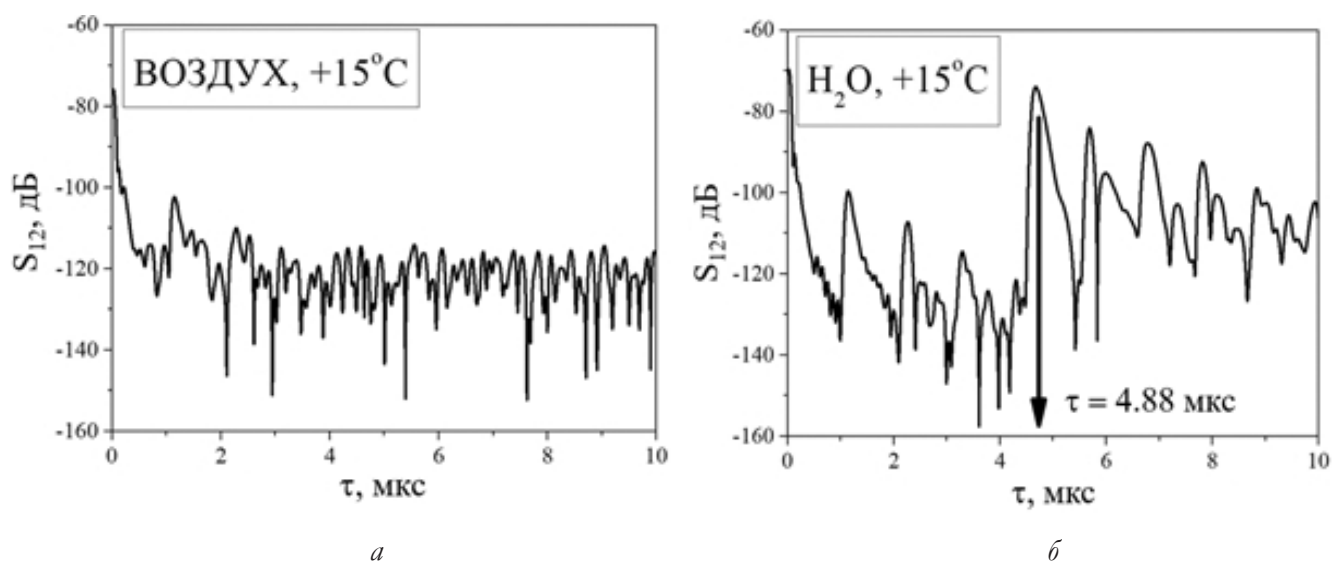


Рис. 2. Импульсные отклики на выходе экспериментального образца для регистрации уровня жидкости, измеренные с помощью анализатора четырехполюсников E5061B, работающего в амплитудно-временном формате. (а) – низкий уровень жидкости (Рис. 1, слева), (б) – высокий уровень жидкости (Рис. 1, справа).

Расстояние между преобразователями 5.3 мм.

акустических волн. Датчик состоит из излучателя, кюветы и приемника ультразвука на частотах от 1 до 37 МГц. Расстояние между преобразователями составляло 5.3 мм. Импульсные отклики приведены на **Рис. 2**. В отсутствие жидкости (кювета заполнена воздухом) выходной сигнал датчика на выходе образца равен нулю из-за высокого поглощения ультразвука в воздушном пространстве (Рис. 2а). При достижении жидкостью определенного уровня и перекрытии ею пути распространения ультразвукового пучка продольная волна начинает распространяться от излучателя к приемнику, и на выходе датчика регистрируется сигнал $S_{12}(\tau_L)$, задержка которого $\tau_L(\text{ж})$ соответствует скорости продольной волны $V_L(\text{ж})$ в этой жидкости (рис.2б).

По величине задержки акустического сигнала, его амплитуды и размеру кюветы были определены скорость V_L и поглощение α_L продольной (L) ОАВ в воде: $V_L(\text{H}_2\text{O}) = 1480$ км/с и коэффициент поглощения $\alpha_L(\text{H}_2\text{O}) = 1.9$ дБ/мм (30 МГц). Получены результаты, совпадающие с табличными значениями [11].

3. ДАТЧИК ДЛЯ БЕСКОНТАКТНОГО ИССЛЕДОВАНИЯ ЭКЗО-, ЭНДО- И ИЗОТЕРМИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ, СОПРОВОЖДАЮЩИХ ФАЗОВЫЕ ПЕРЕХОДЫ ЖИДКОСТЬ-ЛЕД И ЛЕД-ЖИДКОСТЬ

Экспериментальная методика для бесконтактного исследования экзо- ($\Delta T > 0$), эндо- ($\Delta T < 0$) и изо- ($\Delta T = 0$) термических процессов, сопровождающих фазовые переходы жидкость-лед и лед-жидкость, базировалась на образце, представленном на **Рис. 3**. Он состоял из кремниевого стержня ($10 \times 10 \times 50$ мм³), кюветы из теплоизоляционного материала (тефлон) (диаметр 5 мм, высота 10 мм, толщина 1.5 мм) и двух керамических преобразователей, приклеенных к стержню салолом. Проба жидкости, фазовый переход которой подвергался исследованию, вводилась шприцем через верхнюю поверхность кюветы, после чего эта поверхность изолировалась от внешней среды (накрывалась). Теплообмен через боковые стенки кюветы также исключался плохой температурной проводимостью тефлона, так что жидкость контактировала только с верхней поверхностью кремния.

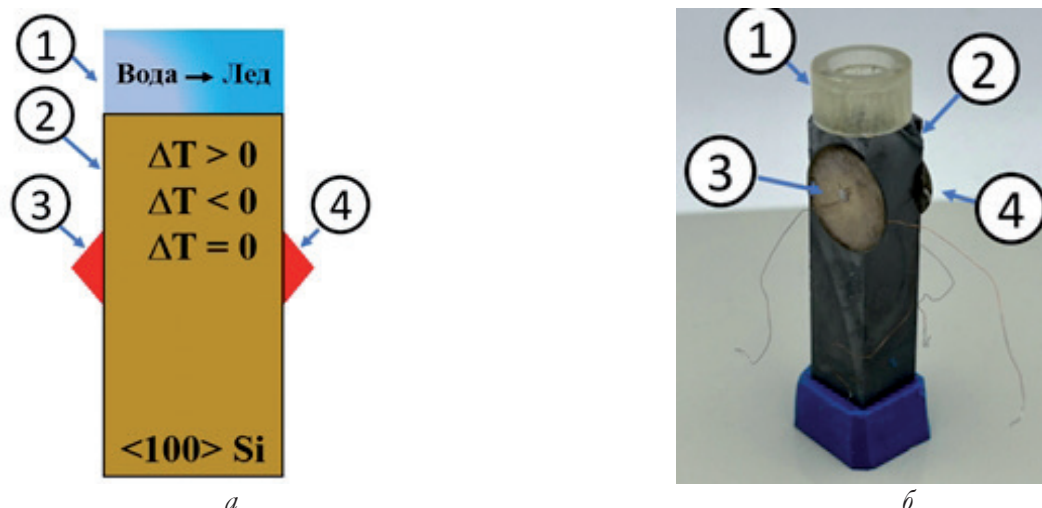


Рис. 3. Схематическое изображение (а) и фотография (б) экспериментального образца для бесконтактного исследования экзо- ($\Delta T > 0$), эндо- ($\Delta T < 0$) и изо- ($\Delta T = 0$) термических процессов, сопровождающих фазовые переходы жидкость-лёд-жидкость. 1 – исследуемая проба, 2 – кремниевый стержень, 3 – излучающий преобразователь, 4 – приемный преобразователь.

Характер фазового перехода жидкости в лед контролировался по изменению температуры ΔT тестируемой пробы при охлаждении образца.

Проба вместе со стержнем и преобразователями, охлаждаемые до температуры ниже температуры фазового перехода, зондировались на некотором расстоянии от торца кремния объемной акустической волной с известной чувствительностью к температуре. Изменение температуры жидкости ΔT в процессе льдообразования (если таковое имелось) практически без изменений передавалось внутренним областям кремниевого стержня благодаря его высокой температурной проводимости, что приводило к изменению скорости ΔV и фазы $\Delta \varphi$ зондирующей акустической волны. Величина ΔT определялась из известного соотношения [12]

$$\Delta T = (1/\text{TKV}) (\Delta V/V) = (1/\text{TKV}) (\Delta \varphi/\varphi) \quad (1)$$

где TKV – температурный коэффициент скорости зондирующей волны в кремнии, близкий к температурному коэффициенту задержки волны TKЗ (известен), V , φ – скорость и фаза этой волны (известны), ΔV , $\Delta \varphi$ – изменения скорости и фазы, которые измеряются при помощи анализатора четырехполюсников KEYSIGHT E5061B в фазовом режиме.

Для учета температурных изменений в склейках между преобразователями и стержнем,

а также в преобразователях, представляющих собой прессованную пьезокерамику, аналогичные измерения предварительно проводилась без тестируемого вещества, а значения выходных сигналов с и без тестируемых жидкостей, вычитались. В качестве тестируемой жидкости использовались дистиллированная вода. В качестве склейки керамических преобразователей с кремниевым стержнем применялся салол. Точность измерений, которая в основном определялась качеством акустического контакта (склейки) между пьезоэлектрическими преобразователями и кремниевым стержнем, оценивается как $\pm 1^\circ\text{C}$.

На **Рис. 4** представлены результаты измерений. В эксперименте использовались керамические преобразователи продольных объемных волн на 10 МГц с длиной волны $\lambda = V_L/f = 0.85$ мм. Поскольку протяженность стержня в направлении распространения волны равнялась $L = 10$ мм, то полный набег фазы между преобразователями составлял $\varphi_0 = 360^\circ \times (L/\lambda) = 360^\circ \times (10 \text{ мм}/0.85 \text{ мм}) = 4235$ град.

Процедура измерений была следующей. На первом этапе измерялся температурный коэффициент задержки TKЗ продольной акустической волны в кремниевом стержне с керамическими преобразователями и склейкой в отсутствие тестируемой жидкости: при охлаждении образца, например, с $T = +20^\circ\text{C}$ до $T = -15^\circ\text{C}$ изменение фазы составило $\Delta \varphi = 51.3$

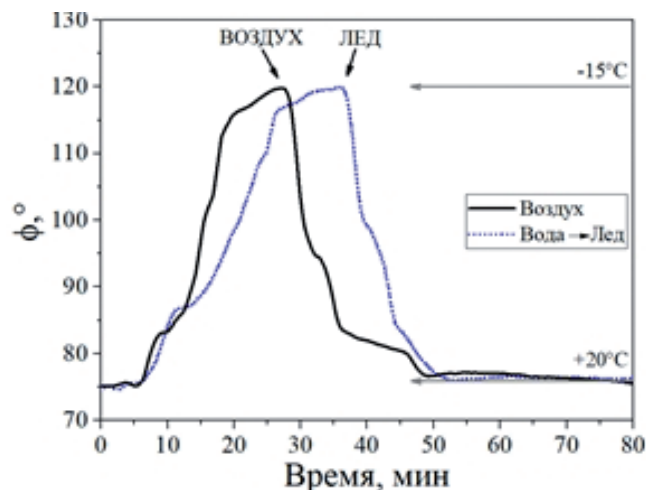


Рис. 4. Фазовые отклики продольной акустической волны, измеренные на воздухе (черная линия) и в процессе фазового перехода вода-лед (синяя прерывистая линия).

град (Рис. 4, сплошная линия). Поэтому ТКЗ стержня с керамическими преобразователями и склейкой равнялся $(1/\Delta T)(\Delta\varphi/\varphi_0) = (1/35^\circ\text{C})(51.13^\circ/4235^\circ) = +345 \text{ ppm}/^\circ\text{C}$. Для сравнения тот же коэффициент для продольной ОАВ в кремнии без преобразователей и склейки на порядок меньше и составляет всего $+32.7 \text{ ppm}/^\circ\text{C}$ [13].

На втором этапе измерялось аналогичное изменение фазы волны при охлаждении стержня с водой на его верхней поверхности. Вода трансформировалась в лед, что давало дополнительное изменение фазы $\Delta\varphi$ на -0.16 град по сравнению с чистым стержнем (Рис. 4, пунктир). Отсюда, дополнительное изменение температуры, связанное с фазовым переходом вода-лед, составляет $\Delta T = (1/\text{ТКЗ})(\Delta\varphi/\varphi_0) = (1/345 \text{ ppm}/^\circ\text{C})(-0.16^\circ/4235^\circ) = -0.1^\circ\text{C}$ или величину, близкую к нулю ($\Delta T \approx 0^\circ\text{C}$) – фазовый переход вода-лед, как и должно быть, является изотермическим [11].

Таким образом, бесконтактные исследования тепловых процессов, сопровождающих фазовые переходы жидкость-лед и лед-жидкость в условиях теплового контакта исследуемого объекта только с измерительным элементом, с помощью объемных акустических волн возможны. Точность измерений невысока ($\pm 1^\circ\text{C}$) и в основном определяется качеством акустического контакта пьезоэлектрических преобразователей с кремниевым стержнем

и тепловыми потерями. Для минимизации эффекта склейки измерения с чистым кремнием следует проводить непосредственно перед тестированием каждой жидкости, а для минимизации тепловых потерь пьезопреобразователи следует располагать в непосредственной близости от границы с тестируемым веществом. Апробация методики показала, что процесс фазового перехода для дистиллированной воды, как и должно быть, является изотермическим ($\Delta T \approx 0^\circ\text{C}$), Однако малые величины сопутствующих температурных вариаций ΔT определены с низкой точностью $\pm 1^\circ\text{C}$.

Более надежные измерения ΔT разработанным методом возможны лишь для фазовых переходов, которые сопровождаются более значительными изменениями температуры $|\Delta T| \geq 5^\circ\text{C}$.

4. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Распространение продольных колебаний в жидкостях с намного меньшим затуханием, чем в газообразных средах, позволяет фиксировать превышение или понижение уровня жидкости относительно заданного значения.

Температурные изменения скорости объемной волны, зондирующей кремниевый стержень в глубине, позволяют фиксировать характер термических процессов, сопровождающих фазовый переход на поверхности стержня.

Недостатком использования объемных акустических волн для детектирования фазовых переходов жидкость-лед является необходимость учета температурных изменений электромеханических преобразователей и склейки преобразователей с жидкостной кюветой.

ЛИТЕРАТУРА

1. Skladnev DA, Sorokin VV, Karlov SP, Anisimkin VI. Methods for Studying Parameters Biogenic Metal Nanoparticles, Formed in situ. *RENSIT: Radioelectronics. Nanosystems. Information Technologies*, 2022, 14(4):393-414e. DOI: 10.17725/remsit.2022.14.393.
2. Gorbachev IA, Smirnov AV. Biosensor based on Langmuir-Blodgett film with alcohol oxidase enzyme. *RENSIT: Radioelectronics. Nanosystems*.

- Information Technologies*, 2023, 15(3):307-316e. DOI: 10.17725/rensit.2023.15.307.
3. Shi J, Xu Z, Li X, Bai H, Guo C, Niu P, Yao J. A High-Resolution Liquid-Level Sensor Based on Fabry-Perot Interferometer With Fiber Laser Intracavity Sensing. *IEEE Sensors Journal*, 2023, 23(15):16938-16943. DOI: 10.1109/JSEN.2023.3288223.
 4. He R, Teng C, Kumar S, Marques C, Min R. Polymer Optical Fiber Liquid Level Sensor: A Review. *IEEE Sensors Journal*, 2022, 22(2):1081-1091. DOI: 10.1109/JSEN.2021.3132098.
 5. Suemori K, Komatsu Y, Nobeshima T. Flange-type liquid-level sensor based on laser light reflection. *Sensors International*, 2023, 4:100230. DOI: 10.1016/j.sintl.2023.100230.
 6. Kim H, Balagopal B, Kerrigan S, Garcia N, Chow M-Y, Bourham M, Fang T, Jiang X. Noninvasive liquid level sensing with laser generated ultrasonic waves. *Ultrasonics*, 2023, 130:106926. DOI: 10.1016/j.ultras.2023.106926.
 7. Sakharov VE, Kuznetsov SA, Zaitsev BD, Kuznetsova IE, Joshi SG. Liquid level sensor using ultrasonic Lamb waves. *Ultrasonics*, 2003, 41(4):319-322. DOI: 10.1016/S0041-624X(02)00459-6.
 8. Hercik R, Machacek Z, Byrtus R, Koziorek J. Identification of the Physical Dependencies of Accurate Oil Level Measurement for Automotive Applications. *Applied Sciences (Switzerland)*, 2023, 13(13):7707. DOI: 10.3390/app13137707.
 9. Rhee C, Yu SI, Kim DW, Bae IH, Shin J, Jeong SY, Kim YM, Shin SG. Density profile modeling for real-time estimation of liquid level in anaerobic digester using multiple pressure meters. *Chemosphere*, 2021, 277:130299. DOI: 10.1016/j.chemosphere.2021.130299.
 10. Lynnworth LC. *Ultrasonic measurements for process control*. New York, Academic Press, 1989.
 11. Kikoin IK, Kikoin AK. *Senior Physics 1*. Moscow, Mir Publ., 1987.
 12. Slobodnik AJ. The temperature coefficients of acoustic surface wave velocity and delay on lithium niobate, lithium tantalate, quartz, and tellurium dioxide. *Phys. Sci. Res. Pap.*, 1972, 477.
 13. Ono S, Wasa K, Hayakawa S. Surface acoustic wave properties in ZnO-SiO₂-Si layered structure. *Wave Electronics*, 1977, 3(1):35-49.

Анисимкин Владимир Иванович

д.ф.-м.н., с.н.с.

ИРЭ им В.А. Котельникова РАН

11/7, ул. Моховая, Москва 125009, Россия

E-mail: anis@cplire.ru

Кузнецова Ирен Евгеньевна

д.ф.-м.н.

ИРЭ им В.А. Котельникова РАН

11/7, ул. Моховая, Москва 125009, Россия

E-mail: kuziren@yandex.ru

Смирнов Андрей Владимирович

к.ф.-м.н.

ИРЭ им В.А. Котельникова РАН

11/7, ул. Моховая, Москва 125009, Россия

E-mail: andre-smirnov-v@yandex.ru.