

## Практические применения пьезоэлектрических резонаторов с поперечным электрическим полем

Б.Д. Зайцев<sup>1,\*</sup>, А.М. Шихабудинов<sup>1</sup>, А.А. Теплых<sup>1</sup>, И.А. Бородина<sup>1</sup>, И.Е. Кузнецова<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Саратовский филиал Института радиотехники и электроники  
имени В.А. Котельникова РАН, Россия, 410019, Саратов, ул. Зеленая, д. 38

<sup>2</sup>Институт радиотехники и электроники имени В.А. Котельникова РАН,  
Россия, 125009, Москва, ул. Моховая, д. 11, корп. 7

(Статья поступила 13.11.2014; Подписана в печать 08.12.2014)

Рассматриваются возможности применения пьезоэлектрических резонаторов с поперечным электрическим полем для анализа свойств жидкости и для измерения микроперемещений. Показано, что если в качестве информационного параметра взять модуль электрического импеданса или адмиттанса на фиксированной частоте вблизи резонанса, то чувствительность датчика можно существенно повысить. Изменение указанных параметров может достигать 30% и 70% при изменении вязкости от 1 до 1000 мПа·с и проводимости в пределах 100–10000 мкС/см. Второе применение основано на том факте, что электрическое поле резонатора проникает за пределы пьезоэлектрической пластины. Были проведены эксперименты по изучению влияния зазора между свободной стороной резонатора и электрически проводящей или диэлектрической пластиной на частоты параллельного и последовательного резонансов. Показано, что на этой основе возможно создание измерителей микроперемещений, которые могут быть использованы для непрерывного контроля деформаций и раскрытия трещин различных конструкций, элементов мостов и зданий, а также для измерения небольших перемещений двух объектов относительно друг друга. Оказалось, что частота параллельного резонанса однозначно связана с шириной зазора в пределах 0–0,3 мм и 0–2,5 мм при использовании проводящей пластины и пластины из поликора, соответственно. Частота последовательного резонанса от зазора не зависит, но зависит от температуры. Таким образом, частота последовательного резонанса позволяет определить температуру и сделать необходимые корректировки.

PACS: 43.20+g

УДК: 534.231.3

Ключевые слова: пьезоэлектрический резонатор с поперечным электрическим полем, резонансная частота, параллельный резонанс, последовательный резонанс, вязкость и проводимость жидкостей, микроперемещения.

### ВВЕДЕНИЕ

На протяжении 20–30 лет исследователи постоянно уделяют особое внимание разработке и совершенствованию акустоэлектрических датчиков для изучения свойств различных жидкостей, включая биологические. Показано, что используя традиционные резонаторы на объемных акустических волнах с продольным электрическим полем можно измерять не только вязкость, но и проводимость жидкости [1]. Продемонстрированы также возможности акустических волн в пьезоэлектрических пластинах нулевого [2, 3] и высших порядков [4, 5], скорость и затухание которых зависят от вязкости и проводимости жидкости. Но особое внимание разработчиков жидкостных датчиков привлекают пьезоэлектрические резонаторы с поперечным электрическим полем, возможности которых в качестве жидкостных сенсоров были показаны в [6–12]. Исследовалось влияние вязкой, диэлектрической и проводящей жидкостей на характеристики таких резонаторов. В качестве информационного параметра, зависящего от вязкости и проводимости жидкости, была выбрана резонансная частота. Однако вариации ре-

зонансной частоты при изменении свойств жидкости в широких пределах оказались очень незначительными. Например, максимальное изменение резонансной частоты составляет всего 1–2% при изменении вязкости от 1 до 1000 мПа·с и проводимости в пределах 100–10000 мкС/см. Кроме того, в [13] было показано, что при контакте резонатора даже с невязкой и непроводящей жидкостью частотные зависимости реальной и мнимой частей электрического импеданса вблизи резонанса могут оказаться сильно размытыми, что затрудняет точное определение резонансной частоты. Таким образом, резонансная частота является не совсем удобным информационным параметром для измерения свойств жидкости. В данной работе на основе резонатора с поперечным возбуждающим электрическим полем и с простейшей геометрией электродов, нанесенных на пластину ниобата лития X-среза, разработан жидкостной датчик и продемонстрированы его возможности на примере проводящей и вязкой жидкостей. Для подавления нежелательных колебаний использовалось нанесение поглощающего покрытия на определенную область резонатора [14–16]. Показано, что для определения вязкости и проводимости жидкостей более удобным информативным параметром является модуль импеданса или адмиттанса резонатора на фиксированной частоте вблизи резонанса.

\*E-mail: zai-boris@yandex.ru

Второе применение основано на том факте, что электрическое поле резонатора проникает за пределы пьезоэлектрической пластины. Были проведены эксперименты по изучению влияния зазора между свободной стороной резонатора и электрически проводящей или диэлектрической пластиной на частоты параллельного и последовательного резонансов. Показано, что на этой основе возможно создание измерителей микроперемещений с температурной компенсацией, которые могут быть использованы для непрерывного контроля деформаций и раскрытия трещин различных конструкций, элементов мостов и зданий, а также для измерения небольших перемещений двух объектов относительно друг друга. Оказалось, что частота параллельного резонанса однозначно связана с шириной зазора при использовании проводящей или диэлектрической пластины. Частота последовательного резонанса от зазора не зависит, но зависит от температуры. Таким образом, частота последовательного резонанса позволяет определить температуру и сделать необходимые корректировки. Показано, что меняя материал пластины, можно изменять диапазон измерения ширины зазора.

## 1. КОНСТРУКЦИИ ИЗМЕРИТЕЛЕЙ

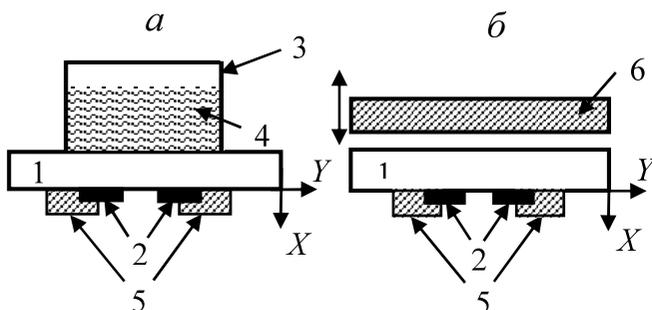


Рис. 1: Измеритель параметров жидкости (а) и измеритель микроперемещений (б): 1 — пластина из ниобата лития, 2 — электроды, 3 — жидкостной контейнер, 4 — жидкость, 5 — поглощающее покрытие, 6 — диэлектрическая или проводящая пластина

В работе рассматривались жидкостные датчики и измерители микроперемещений на основе резонаторов с поперечным возбуждающим электрическим полем. На рис. 1а представлена схема датчика, состоящего из резонатора и жидкостной ячейки, аналог которого использовался в биологических экспериментах [13]. Резонатор представлял собой пьезоэлектрическую пластину ниобата лития X-среза толщиной 510 мкм, на одной стороне которого располагались два прямоугольных электрода с размерами  $5 \times 10 \text{ мм}^2$  [13]. Эти электроды, состоящие из слоев хрома и серебра с толщинами 30 и 200 нм, были нанесены в вакууме через соответствующую маску. Зазор между электродами был равен 2 мм. Ориентация электродов выбиралась так, что поперечные компоненты поля были параллельны оси Y.

Пространство вокруг электродов и часть электродов покрывались тонким слоем специального быстросохнущего лака толщиной  $\sim 200 \text{ мкм}$  [14–16] для демпфирования паразитных колебаний и повышения добротности резонатора. Оптимальная ширина области демпфирования на электродах в соответствие с [16] составила примерно 2 мм.

Присутствие жидкостной ячейки объемом порядка 1 мл никак не влияло на характеристики резонатора, поскольку ее поперечные размеры существенно превосходили область электродов. Ранее было показано, что при такой ориентации пластины и электродов устойчивый резонанс получается на продольной акустической волне, распространяющейся вдоль оси X. На рис. 1б показан датчик для измерения микроперемещений. Его основу составлял точно такой же, как и в предыдущем случае, резонатор с поперечным электрическим полем. Над свободной стороной резонатора помещалась проводящая или диэлектрическая пластина, которая могла перемещаться в вертикальном направлении с помощью специального прецизионного механизма. Точность обеспечения зазора между резонатором и пластиной составляла 10 мкм.

## 2. ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ПРОВОДЯЩЕЙ ЖИДКОСТИ

Были исследованы характеристики резонатора при контакте с проводящей жидкостью, представляющей собой раствор хлористого натрия в дистиллированной воде. Путем изменения концентрации хлористого натрия проводимость менялась от 2 до 10000 мкС/см. Измерение проводимости используемых образцов жидкости проводилось многопозиционным кондуктометром HI8733N (компании HANNA Instruments). Были проанализированы измеренные частотные зависимости реальной и мнимой частей электрического импеданса и его модуля для нагруженного резонатора при различных значениях проводимости жидкости. Анализировались также аналогичные частотные зависимости для электрического адмиттанса. Анализ этих зависимостей показал, что в присутствии жидкости резонансные кривые существенно расширяются, причем степень расширения увеличивается с ростом проводимости, что затрудняет точное определение резонансной частоты. Однако было установлено, что во всем измеряемом диапазоне частот модуль импеданса/адмиттанса монотонно уменьшается/увеличивается с ростом проводимости раствора. Таким образом, оказалось, что наиболее информативным параметром при измерении проводимости жидкости является модуль импеданса или адмиттанса на фиксированной частоте вблизи резонанса. Это подтверждается рис. 2а, б, на котором показаны зависимости модуля импеданса  $Z$  (рис. 2а) и адмиттанса  $Y$  (рис. 2б) от проводимости раствора для частоты 6,5 МГц. Видно, что с ростом проводимости модуль импеданса монотонно уменьша-

ется от 4,8 до 1,2 кОм (75%). Что касается модуля адмиттанса, он увеличивается в пределах 0,224–0,8 мС (72%) при увеличении проводимости в тех же пределах. Таким образом, изменение проводимости однозначно влияет на изменение модуля электрического импеданса или адмиттанса.

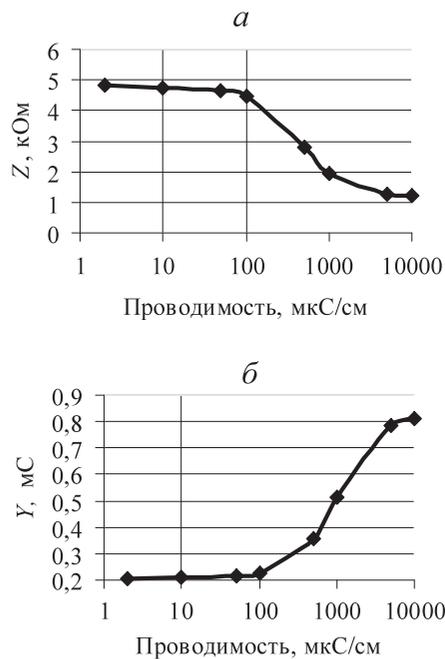


Рис. 2: Зависимости модулей импеданса  $Z$  (а) и адмиттанса  $Y$  (б) от проводимости жидкости на частоте 6, МГц

### 3. ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ВЯЗКОЙ ЖИДКОСТИ

Были исследованы также характеристики резонатора при контакте с вязкой жидкостью, представляющей собой смесь глицерина и дистиллированной воды. Путем изменения концентрации глицерина вязкость менялась от 1 до 2260 мПа·с. Измерение вязкости используемых образцов жидкости проводилось вибровискозиметром SV-10 (компании A&D). Анализ частотных зависимостей реальной и мнимой частей электрического импеданса/адмиттанса и его модуля при различных значениях вязкости контактирующей жидкости показал, что в отличие от проводящей жидкости частотные зависимости реальной части импеданса/адмиттанса в этом случае сохраняют резонансный характер и расширяются в меньшей степени. Это объясняется тем, что проводящая жидкость может играть роль виртуального электрода [12], который приводит к сильному перераспределению амплитуд нормальных и поперечных компонент поля в резонаторе. Что касается вязкой непроводящей жидкости, то она выступает лишь в роли ме-

ханической нагрузки, которая сильно не меняет распределение электрического поля внутри резонатора.

Анализ зависимостей резонансных частот для последовательного и параллельного резонансов от вязкости жидкости показал, что эти зависимости имеют немонотонный характер и существенный разброс, что не позволяет использовать резонансные частоты в качестве информативного параметра. На рис. 3 показаны зависимости модуля импеданса  $Z$  (рис. 3а) и адмиттанса  $Y$  (рис. 3б) от вязкости жидкости для частоты 6,5 МГц. Видно, что с ростом вязкости модуль импеданса монотонно увеличивается от 4,7 до 6,8 кОм (31%). Что касается модуля адмиттанса, он уменьшается от 0,224 до 0,155 мС (31%) при увеличении вязкости в тех же пределах. Таким образом, для анализа вязкой непроводящей жидкости в качестве информативного параметра можно использовать модуль импеданса или адмиттанса на фиксированной частоте.

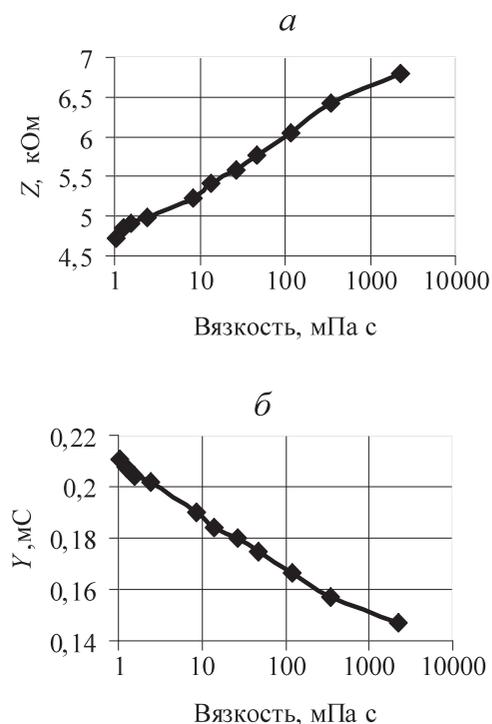


Рис. 3: Зависимости модулей импеданса  $Z$  (а) и адмиттанса  $Y$  (б) от вязкости жидкости на частоте 6,5 МГц

### 4. ВЛИЯНИЕ ДИЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ И ПРОВОДЯЩЕЙ ПЛАСТИНЫ ВБЛИЗИ СВОБОДНОЙ ПОВЕРХНОСТИ РЕЗОНАТОРА НА ЕГО ХАРАКТЕРИСТИКИ

Очевидно, что электрическое поле рассматриваемого резонатора проникает за пределы пьезоэлектрической пластины и это подтверждается результатами расчета уравнения Лапласа для такой конфигурации [17]. Поэтому были проведены эксперименты по изучению

влияния зазора между свободной стороной резонатора и электрически проводящей или диэлектрической пластиной на частоты параллельного и последовательного резонансов. На рис. 4а приведены зависимости частот параллельного и последовательного резонансов  $f$  от ширины зазора  $h$  между свободной стороной резонатора и хорошо проводящей пластиной. Видно, что частота параллельного резонанса увеличивается с ростом ширины зазора и достигает насыщения. Однако, в пределах 0–300 мкм частота параллельного резонанса однозначно связана с величиной зазора. Частота последовательного резонанса составляет 6,48 МГц и от зазора не зависит. Однако она однозначно зависит от температуры. Эксперименты показали, что температурный коэффициент изменения частоты последовательного резонанса составляет 430 кГц/град. Таким образом, измерив частоту последовательного резонанса, можно определить температуру и по измеренной частоте параллельного резонанса и соответствующей градуировочной кривой можно определить ширину зазора. На следующем рис. 4б приведены аналогичные

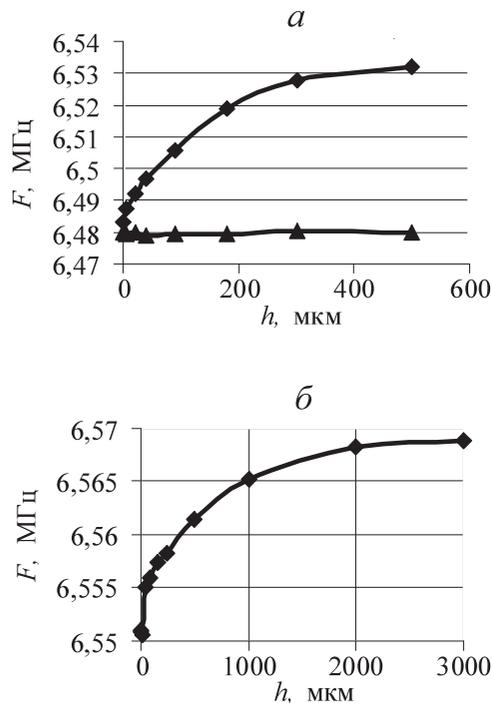


Рис. 4: Зависимости резонансной частоты  $f$  параллельного (кривая 1) и последовательного (кривая 2) резонансов от величины зазора  $h$  между свободной стороной резонатора и проводящей пластиной (а) и зависимость резонансной частоты  $f$  параллельного резонанса между свободной стороной резонатора и пластиной из поликора (б)

зависимости, когда вместо проводящей пластины используется пластина из поликора ( $\epsilon \approx 10$ ). Видно, что в этом случае диапазон измеряемых зазоров увеличился до 0–2 мм. При этом частота последовательного резонанса, в точности равная, как и в предыдущем случае, 6,48 МГц, также не зависит от зазора, но зависит от температуры. Таким образом, меняя материал пластины, можно менять диапазон изменения зазора. Следовательно, на этой основе возможно создание измерителей перемещений с температурной компенсацией, которые могут быть использованы для непрерывного контроля деформаций и раскрытия трещин различных конструкций, элементов мостов и зданий, а также для измерения небольших перемещений двух объектов относительно друг друга.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, контакт свободной поверхности резонатора с поперечным возбуждающим полем с проводящей или вязкой жидкостью приводит к существенному изменению его электрического импеданса/адмиттанса. Анализ показал, что параметром, который однозначно связан с проводимостью или вязкостью является модуль электрического импеданса или адмиттанса на любой частоте вблизи параллельного или последовательного резонанса. Этот параметр является более чувствительным к изменению проводимости или вязкости жидкости по сравнению с широко используемой для этой цели резонансной частотой, область изменения которой существенно меньше. Таким образом, изменение проводимости и вязкости жидкости однозначно влияет на изменение модуля электрического импеданса или адмиттанса, измерение которого на фиксированной частоте не представляет большой трудности на практике. Следовательно, при соответствующей градуировке описанный резонатор с поперечным электрическим полем может использоваться как измеритель проводимости или вязкости жидкости.

Кроме того, показана возможность использования пьезоэлектрических резонаторов с поперечным возбуждающим полем для создания измерителей микроперемещений с температурной компенсацией, которые могут быть использованы для непрерывного контроля деформаций и раскрытия трещин различных конструкций, элементов мостов и зданий, а также для измерения небольших перемещений двух объектов относительно друг друга.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (гранты № 12-02-01057а и 13-08-00678а).

[1] Josse F., Shana Z.A., Radtke D.E., Haworth D.T. IEEE Trans. on Ultrason., Ferroelectr. and Freq. Cont. **37**, N5. P. 359. (1990).

[2] Zaitsev B.D., Kuznetsova I.E., Joshi S.G., Borodina I.A. Ultrasonics **39**, N1. P. 45. (2001).

[3] Zaitsev B.D., Kuznetsova I.E., Joshi S.G., Borodina I.A.

- IEEE Trans. on Ultrason., Ferroelectr. and Freq. Cont. **48**, N 2. P. 627. (2001).
- [4] *Anisimkin I.V., Anisimkin V.I.* IEEE Trans. on Ultrason., Ferroelectr. and Freq. Cont. **53**, N 8. P. 1487. (2006).
- [5] *Anisimkin V.I.* IEEE Trans. on Ultrason., Ferroelectr. and Freq. Cont. **60**, N 10. P. 2204. (2013).
- [6] *Vetelino J.F.* Proc. of 2010 IEEE Ultrasonics Symposium. P. 2269. (2010).
- [7] *Hu Y., French L.A., Radecsky K., Pereira da Cunha M., Millard P., Vetelino J.F.* IEEE Trans. on Ultrason., Ferroelectr. and Freq. Cont. **51**, N 11. P. 1373. (2004).
- [8] *McCann D.F., McCann J.M., Parks J.M., Frankel D.J., Pereira da Cunha M., Vetelino J.F.* IEEE Trans. on Ultrason., Ferroelectr. and Freq. Cont. **56**, N 4. P. 779. (2009).
- [9] *Wark M., Kalanyan B., Ellis L., Fick J., Connel L., Neivandt D., Vetelino J.* Proc. of 2007 IEEE Ultrasonics Symposium. P. 1217. (2007).
- [10] *Zhang Z., Wang W., Ma T., Zhang C., Feng G.* Proc. of 2009 IEEE Ultrasonics Symposium. P. 655. (2009).
- [11] *Ma T., Zhang Z., Wang W., Zhang C., Feng G.* Proc. of 2009 IEEE Ultrasonics Symposium. P. 2511. (2009).
- [12] *Ma T., Wang J., Du J., Yuan L., Qian Z., Zhang Z., Zhang C.* IEEE Trans. on Ultrason., Ferroelectr. and Freq. Cont. **60**, N 4. P. 864. (2013).
- [13] *Zaitsev B.D., Kuznetsova I.E., Shikhabudinov A.M., Ignatov O.V., Guliy O.I.* IEEE Trans. on Ultrason., Ferroelectr. and Freq. Cont. **59**, N 5. P. 963 (2012).
- [14] *Zaitsev B.D., Kuznetsova I.E., Shikhabudinov A.M., Vasiliev A.A.* Proc. of 2010 IEEE Ultrasonics Symposium. P. 946. (2010).
- [15] *Зайцев Б.Д., Кузнецова И.Е. Шихабудинов А.М. Васильев А.А.* Письма в ЖТФ. **37**, № 11. С. 27. (2011).
- [16] *Zaitsev B.D., Kuznetsova I.E., Shikhabudinov A.M., Teplykh A.A., Borodina I.A.* IEEE Trans. on Ultrason., Ferroelectr. and Freq. Cont. **60**, N 1. P. 166. (2014).
- [17] *Теплых А.А.* Нелинейный Мир. **11**, № 2. С. 94. (2013).

## Practical applications of piezoelectric resonators with lateral electric field

**B. D. Zaitsev<sup>1,a</sup>, A. M. Shikhabudinov<sup>1</sup>, A. A. Teplykh<sup>1</sup>, I. A. Borodina<sup>1</sup>, I. E. Kuznetsova<sup>2</sup>**

<sup>1</sup>*Kotel'nikov Institute of Radio Engineering and Electronics of RAS, CitySaratov Branch, CitySaratov, 410019, Russia*

<sup>2</sup>*Kotel'nikov Institute of Radio Engineering and Electronics of RAS, Moscow, 125009, Russia*

*E-mail: <sup>a</sup>zai-boris@yandex.ru*

The paper is devoted to the possibilities of the applications of piezoelectric resonators with lateral electric field for analysis of liquid properties and measurement of microdisplacements. It has been shown that the sensitivity of liquid sensors may be significantly increased by using the module of electrical impedance or admittance on the fixed frequency near the resonance as informative parameter. The change of pointed parameters may achieved 30% and 70% for the change in viscosity from 1 to 1000 mPa·s and for the change in conductivity in range 100–10000  $\mu\text{S}/\text{cm}$ . The second application is based on the fact that electric field of the resonator penetrates outside of piezoelectric plate. The experiments concerning with influence of the gap between free side of resonator and conductive and dielectric plate on the frequencies of series and parallel resonances were carried out. Obtained results have shown the possibility of development of meters of microdisplacements which may be used for permanent monitoring of deformations and crack opening of various constructions, elements of bridges and building, and also for measuring small displacements of two objects respectively each other. It has been demonstrated that the frequency of parallel resonance is unambiguously determined by the width gap in ranges 0–0.3 mm and 0–2.5 mm for conducting plate and plate of corundum, respectively. The frequency of series resonance does not depend on width of gap but is defined by the temperature. So the frequency of series resonance allows to determine the temperature and to perform the needed corrections.

PACS: 43.20+g

Keywords: piezoelectric resonator with lateral electric field, resonant frequency, parallel resonance, series resonance, viscosity and conductivity of liquids, microdisplacements.

Received 13.11.2014.

### Сведения об авторах

1. Зайцев Борис Давыдович — докт. физ.-мат. наук, профессор, заведующий лабораторией; тел.: (8452) 27-24-01, e-mail: zai-boris@yandex.ru.
2. Шихабудинов Александр Магомедович — канд. физ.-мат. наук, научный сотрудник; тел.: (8452) 27-24-01, e-mail: alexsheih@yandex.ru.
3. Теплых Андрей Алексеевич — канд. физ.-мат. наук, старший научный сотрудник; тел.: (8452) 27-24-01, e-mail: teplykhaa@mail.ru.
4. Бородина Ирина Анатольевна — канд. физ.-мат. наук, старший научный сотрудник; тел.: (8452) 27-24-01, e-mail: borodinaia@yandex.ru.
5. Кузнецова Ирен Евгеньевна — докт. физ.-мат. наук, ведущий научный сотрудник; e-mail: kuziren@yandex.ru.