

DOI: 10.17725/rensit.2023.15.355

## Исследование резонаторов с продольным и поперечным электрическим полем с различными поперечными размерами

Зайцев Б.Д., Семёнов А.П., Теплых А.А., Бородина И.А

Институт радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова РАН, Саратовский филиал, <http://cplire.ru/>  
Саратов 410019, Российская Федерация

E-mail: [zai-boris@yandex.ru](mailto:zai-boris@yandex.ru), [alex-sheib@yandex.ru](mailto:alex-sheib@yandex.ru), [teplykhaa@mail.ru](mailto:teplykhaa@mail.ru), [borodinaia@yandex.ru](mailto:borodinaia@yandex.ru)

Поступила 24.11.2023, рецензирована 30.11.2023, принята 03.12.2023, опубликована 06.12.2023.

Представлена действительным членом РАЕН В.В. Колесовым

**Аннотация:** Экспериментально и теоретически исследовано влияние диаметра дискового резонатора с радиальным электрическим полем, изготовленного на основе пьезокерамики ЦТС-19 и поперечных размеров резонатора с поперечным электрическим полем (ПЭП) на основе пьезокерамики ЦТСНВ-1 на их основные характеристики, такие как частоты параллельного и последовательного резонансов и максимальные значения действительных частей электрического импеданса и адмиттанса.

**Ключевые слова:** радиальные колебания, резонаторы с поперечным электрическим полем, резонаторы с продольным электрическим полем, параллельный резонанс, последовательный резонанс, электрический импеданс

УДК: 534.231, 534.6.08

**Благодарности:** Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства образования и науки РФ (государственное задание FFWZ-2022-0002).

**Для цитирования:** Зайцев Б.Д., Семёнов А.П., Теплых А.А., Бородина И.А. Исследование резонаторов с продольным и поперечным электрическим полем с различными поперечными размерами. РЭНСИТ: Радиоэлектроника. Наносистемы. Информационные технологии, 2023, 15(4):355-360. DOI: 10.17725/rensit.2023.15.355.

## The investigation of resonators with longitudinal and lateral electric fields with various shear dimensions

Boris D. Zaitsev, Alexander P. Semyonov, Andrey A. Teplykh, Irina A. Borodina

Kotel'nikov Institute of Radioengineering and Electronics of RAS, Saratov Branch, <http://cplire.ru/>  
Saratov 410019, Russian Federation

E-mail: [zai-boris@yandex.ru](mailto:zai-boris@yandex.ru), [alex-sheib@yandex.ru](mailto:alex-sheib@yandex.ru), [teplykhaa@mail.ru](mailto:teplykhaa@mail.ru), [borodinaia@yandex.ru](mailto:borodinaia@yandex.ru)

Received November 24, 2023, peer-reviewed November 30, 2023, accepted December 03, 2023, published December 06, 2023.

**Abstract:** The influence of the diameter of a disk resonator with a radial electric field made on the basis of PZT-19 piezoceramics and the shear dimensions of a resonator with a lateral electric field (LFE) based on PZTNV-1 piezoceramics on their main characteristics, such as the frequencies of parallel and serial resonances and maximum values of the real parts of electrical impedance and admittance has been studied experimentally and theoretically.

**Keywords:** radial oscillations, resonators with a lateral electric field, resonators with a longitudinal electric field, parallel resonance, series resonance, electrical impedance and admittance

UDC: 534.231, 534.6.08

**Acknowledgments:** The work was carried out with the financial support of the Ministry of Education and Science of the Russian Federation (state assignment FFWZ-2022-0002).

**For citation:** Boris D. Zaitsev, Alexander P. Semyonov, Andrey A. Teplykh, Irina A. Borodina. The investigation of resonators with longitudinal and lateral electric fields with various shear dimensions. RENSIT: Radioelectronics. Nanosystems. Information Technologies, 2023, 15(4):355-360e. DOI: 10.17725/rensit.2023.15.355.

## СОДЕРЖАНИЕ

1. ВВЕДЕНИЕ (356)
  2. МЕТОДИКА ПРОВЕДЕНИЯ ЭКСПЕРИМЕНТА И ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ (356)
    - 2.1. ОПИСАНИЕ РЕЗОНАТОРОВ И МЕТОДИКИ ПРОВЕДЕНИЯ ЭКСПЕРИМЕНТА (356)
    - 2.2. ИССЛЕДОВАНИЕ РЕЗОНАТОРА С ПОПЕРЕЧНЫМ ЭЛЕКТРИЧЕСКИМ ПОЛЕМ (357)
  3. ТЕОРЕТИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ ВЛИЯНИЯ ПОПЕРЕЧНЫХ РАЗМЕРОВ РЕЗОНАТОРОВ НА ИХ ХАРАКТЕРИСТИКИ (358)
  4. ЗАКЛЮЧЕНИЕ (358)
- ЛИТЕРАТУРА (359)

## 1. ВВЕДЕНИЕ

Пьезоэлектрические резонаторы широко используются в различных областях науки и техники как в качестве пассивных компонент радиоэлектронной аппаратуры [1], так и в качестве различных датчиков. Эти датчики используются для исследования свойств различных жидкостей [2-8] и пленок [9-10], для анализа различных газов в воздушной среде [11-15], для регистрации специфических биологических реакций в водных средах [16-18], для создания детекторов микро-перемещений [19], и т.д.

Ранее было показано, что изменение электрических граничных условий вблизи свободной стороны пьезоэлектрического резонатора с поперечным электрическим полем влияет на его параметры [19]. Однако на практике при измерениях характеристик резонаторов такого типа в широком частотном диапазоне часто возникают резонансы, природа которых либо не ясна, либо трудно анализируема теоретически. Кроме того, следует отметить что особенности возбуждаемых колебаний в резонаторах необходимо анализировать не только теоретически, но и подтверждать теоретические данные результатами эксперимента. В данной работе изучены особенности механических колебаний в дисковом резонаторе с продольным возбуждающим электрическим полем и в прямоугольном резонаторе с поперечным электрическим полем при изменении их поперечных размеров.

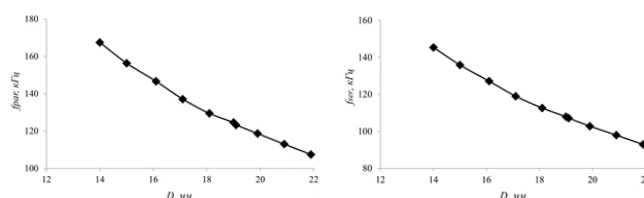
Цель данной работы – исследовать влияние поперечных размеров пьезоэлектрического

дискового резонатора с радиальным электрическим полем и пьезоэлектрического ПЭП резонатора на их основные характеристики.

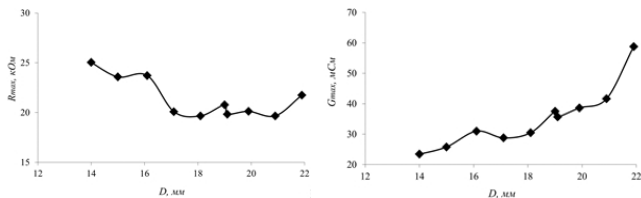
## 2. МЕТОДИКА ПРОВЕДЕНИЯ ЭКСПЕРИМЕНТА И ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ

### 2.1. ОПИСАНИЕ РЕЗОНАТОРОВ И МЕТОДИКИ ПРОВЕДЕНИЯ ЭКСПЕРИМЕНТА

Для проведения исследований был использован дисковый резонатор с продольным электрическим полем на основе пьезоэлектрики ЦТСНВ-1 (ООО "Аврора-ЭЛМА", г. Волгоград) с диаметром  $D = 21.9$  мм и толщиной 1.945 мм. В ходе всего эксперимента изменялся диаметр дискового резонатора механической обработкой от 21.9 мм до 14 мм с шагом  $\sim 1$  мм. Для каждого значения диаметра дискового резонатора измерялись частотные зависимости реальной и мнимой частей электрического импеданса. По измеренным частотным зависимостям определяли максимальные значения реальной части электрического импеданса и адмиттанса, а также резонансные частоты параллельного и последовательного резонансов. Зависимости резонансных частот параллельного ( $f_{\text{par}}$ ) и последовательного ( $f_{\text{ser}}$ ) резонансов от диаметра резонатора ( $D$ ) представлены на **Рис. 1**. Максимальные значения действительных частей электрического сопротивления ( $R_{\text{max}}$ ) и адмиттанса ( $G_{\text{max}}$ ) в зависимости от диаметра  $D$  показаны на **Рис. 2**. Рис. 1 показывает, что с уменьшением диаметра частота, как параллельного, так и последовательного резонансов увеличивается. Полное относительное изменение этих величин составляет 56% и 57%, соответственно. Максимальное значение реальной части электрического импеданса ( $R_{\text{max}}$ ) не изменяется



**Рис. 1.** Экспериментальные зависимости частот параллельного  $f_{\text{par}}$  (слева) и последовательного  $f_{\text{ser}}$  (справа) резонансов от диаметра диска  $D$  резонатора, изготовленного на основе пьезоэлектрики ЦТСНВ-1.



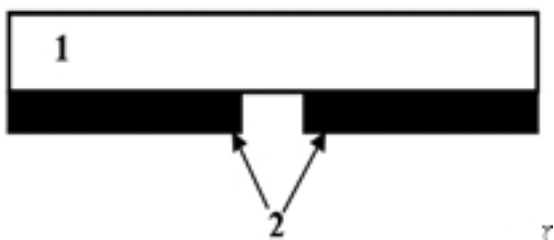
**Рис. 2.** Экспериментальные зависимости максимальных значений реальных частей электрического импеданса  $R_{max}$  (слева) и адмиттанса  $G_{max}$  (справа) от диаметра диска  $D$  резонатора, изготовленного на основе пьезокерамики ЦТСНВ-1.

с уменьшением диаметра диска от 22 до 17 мм, но затем незначительно увеличивается с уменьшением диаметра от 17 до 14 мм (Рис. 2, слева). Полное относительно изменение этой величины составляет 25% при изменении диаметра диска от 17 до 14 мм.

Максимальное значение реальной части электрического адмиттанса ( $G_{max}$ ) уменьшается от 60 до 20 мС с уменьшением диаметра резонатора от 22 до 14 мм (Рис. 2, справа). Полное относительно изменение максимального значения реальной части электрического адмиттанса составляет 60%. Подобное изменение характеристик дискового резонатора, особенно резонансной частоты параллельного резонанса, с уменьшением его диаметра свидетельствует о возбуждении механических колебаний радиального типа.

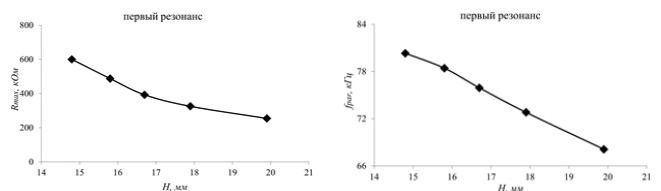
**2.2. ИССЛЕДОВАНИЕ РЕЗОНАТОРА С ПОПЕРЕЧНЫМ ЭЛЕКТРИЧЕСКИМ ПОЛЕМ**

ПЭП резонатор был изготовлен в лабораторных условиях из пластины пьезокерамики ЦТС-19 прямоугольной формы с толщиной 2.566 мм и поперечными размерами 19.9×17.86 мм<sup>2</sup>. На одну сторону пьезокерамической пластины были нанесены два прямоугольных алюминиевых электрода с размерами 19.9×6.9 мм<sup>2</sup> и с зазором между ними 4 мм (Рис. 3). Полярная ось пьезоэлектрика была ориентирована

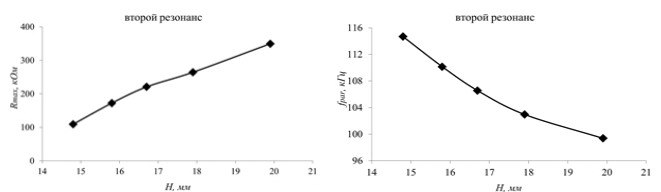


**Рис. 3.** Схема ПЭП резонатора: 1 – пластина из пьезокерамики ЦТС-19, 2 – электроды.

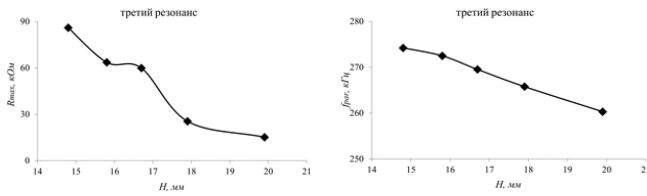
перпендикулярно зазору. В ходе эксперимента изменялся наибольший поперечный размер ( $H$ ) пьезокерамической пластины вдоль зазора путем его механического стачивания от 19.9 до 14.8 мм с шагом ~1-2 мм, с сохранением параллельности противоположных граней и целостности электродов резонатора. Для каждого значения длины пластины ( $H$ ) ПЭП резонатора измерялись частотные зависимости параллельного резонанса в рабочем диапазоне 50-300 кГц, по которым определялись значения резонансных частот и максимальные значения реальных частей электрического импеданса соответствующих каждой длине ПЭП резонатора, для трех наблюдаемых резонансов в данном частотном диапазоне. Зависимости максимального значения реальной части электрического импеданса и резонансной частоты параллельного резонанса от длины пластины ПЭП резонатора для трех наблюдаемых резонансов представлены на Рис. 4, 5 и 6. Рис. 4, 5, 6 показывают, что с уменьшением длины пластины от 19.9 до 14.8 мм четко наблюдается увеличение резонансной частоты для трех наблюдаемых параллельных резонансов в выбранном рабочем диапазоне.



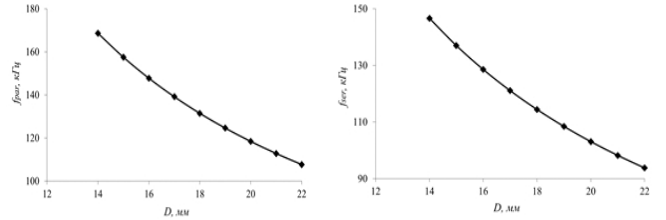
**Рис. 4.** Экспериментальные зависимости максимального значения реальной части электрического импеданса  $R_{max}$  (слева) и частоты параллельного резонанса  $f_{par}$  (справа) от длины  $H$  пьезокерамической пластины ПЭП резонатора, для первого наблюдаемого резонанса.



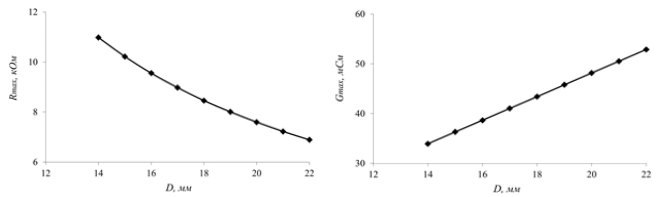
**Рис. 5.** Экспериментальные зависимости максимального значения реальной части электрического импеданса  $R_{max}$  (слева) и частоты параллельного резонанса  $f_{par}$  (справа) от длины  $H$  пьезокерамической пластины ПЭП резонатора, для второго наблюдаемого резонанса.



**Рис. 6.** Экспериментальные зависимости максимального значения реальной части электрического импеданса  $R_{max}$  (слева) и частоты параллельного резонанса  $f_{par}$  (справа) от длины  $H$  пьезокерамической пластины ПЭП резонатора, для третьего наблюдаемого резонанса.



**Рис. 7.** Теоретические зависимости частот параллельного  $f_{par}$  (слева) и последовательного  $f_{ser}$  (справа) резонансов от диаметра диска  $D$  резонатора, изготовленного на основе пьезокерамики ЦТСНВ-1.



**Рис. 8.** Теоретические зависимости максимальных значений реальных частей электрического импеданса  $R_{max}$  (слева) и адмиттанса  $G_{max}$  (справа) от диаметра диска  $D$  резонатора, изготовленного на основе пьезокерамики ЦТСНВ-1.

**Таблица 1**  
Относительные изменения резонансной частоты и максимального значения реальной части электрического импеданса ПЭП резонатора для каждого резонанса

Величина	Первый резонанс	Второй резонанс	Третий резонанс
$f_{par}$	18%	15%	5%
$R_{max}$	136%	69%	460%

Максимальное значение реальных частей электрического импеданса увеличивается с уменьшением длины пластины для первого и третьего резонансов (Рис. 4, 6) и уменьшается для второго резонанса (Рис. 5). Относительные изменения указанных величин представлены в **Таблице 1**.

### 3. ТЕОРЕТИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ ВЛИЯНИЯ ПОПЕРЕЧНЫХ РАЗМЕРОВ РЕЗОНАТОРОВ НА ИХ ХАРАКТЕРИСТИКИ

Теоретический анализ характеристик резонатора для различных значений его диаметра проводился при помощи двумерного метода конечных элементов [10]. Были построены зависимости резонансных частот параллельного и последовательного резонансов (**Рис. 7**) и максимальных значений реальных частей электрического импеданса и адмиттанса (**Рис. 8**) от диаметра резонатора. Сравнение графиков на Рис. 1 и Рис. 7, и графиков на Рис. 2 и Рис. 8 свидетельствует о хорошем соответствии теоретических данных экспериментальным результатам. При проведении расчетов материальные константы для пьезокерамики ЦТСНВ-1 были взяты из справочника [18]. Аналогичный теоретический расчет для ПЭП резонатора

не был проведен, поскольку используемый двумерный метод конечных элементов не позволяет учитывать размер резонатора в третьем измерении, который изменялся в процессе эксперимента.

### 4. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Экспериментально и теоретически изучено влияние диаметра резонатора с продольным электрическим полем, изготовленного из пьезокерамики ЦТСНВ-1, на его основные характеристики, такие как резонансные частоты параллельного и последовательного резонансов и максимальные значения реальных частей электрического импеданса и адмиттанса. Установлено, что изменение характеристик дискового резонатора с уменьшением его диаметра свидетельствует о возбуждении механических колебаний радиального типа, что подтверждается теоретическим анализом. Теоретический анализ проводился при помощи метода конечных элементов. Кроме того, экспериментально исследовано влияние поперечных размеров ПЭП резонатора, изготовленного на основе пьезокерамики ЦТС-19 на его характеристики, такие как частота параллельного резонанса и максимальное значение реальной части электрического

импеданса. Показано, что уменьшение длины пластины ПЭП резонатора от 19.9 до 14.8 мм приводит к увеличению частот всех наблюдаемых параллельных резонансов. При этом максимальное значение реальной части электрического импеданса увеличивается с уменьшением длины пластины для первого и третьего резонансов и уменьшается для второго.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Хоменко ИВ, Косых АВ. *Кварцевые резонаторы и автогенераторы*. Омск, Изд. ОмГТУ, 2018, 160 с.
2. Zao Z, Qian Z, Wang B, Kuznetsova I, Ma T, Yong Y-K. Design considerations for frequency shifts in a laterally finite FBAR sensor in contact with the Newtonian liquid. *IEEE Trans. on Ultrasonics, Ferroelectrics and Frequency Control*, 2020, 67(11):2402-2412, doi: 10.1109/TUFFC.2020.3006186.
3. McCann DF, McCann JM, Parks JM, Frankel DJ, M Pereira da Cunha, Vetelino JF. A lateral-field-excited LiTaO<sub>3</sub> high frequency bulk acoustic wave sensor. *IEEE Trans. on Ultras., Ferroel., and Freq. Contr.*, 2006, 56(4):779-787.
4. Zaitsev BD, Shikhabudinov AM, Teplykh AA, Kuznetsova IE. Liquid sensor based on a piezoelectric lateral electric field-excited resonator. *Ultrasonics*, 2015, 63:179-183.
5. Borodina IA, Zaitsev BD, Teplykh AA. Influence of the conductivity of a liquid contacting with a lateral electric field excited resonator based on PZT ceramics on its characteristics. *Ultrasonics*, 2020, 102:106059. DOI: 10.1016/j.ultras.2019.106059.
6. Zaitsev BD, Semyonov AP, Teplykh AA, Borodina IA. A new liquid sensor based on a piezoelectric resonator with a radial electric field. *Ultrasonics*, 2022, 119:106603; doi: 10.1016/j.ultras.2021.106603.
7. Zaitsev BD, Borodina IA, Teplykh AA. Compact liquid analyzer based on a resonator with a lateral excitation electric field. *Ultrasonics*, 2022, 126:106814; doi: 10.1016/j.ultras.2022.106814.
8. Semyonov A, Zaitsev B, Teplykh A, Borodina I. The Effect of Glycerol-Based Suspensions on the Characteristics of Resonators Excited by a Longitudinal Electric Field. *Sensors*, 2023, 23:608.
9. Kuznetsova IE, Zaitsev BD, Shikhabudinov AM. Elastic and viscosity properties of nanocomposite films based on low – density polyethylene. *IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control*, 2010, 57(9):2099-2102.
10. Teplykh Andrey, Zaitsev Boris, Semyonov Alexander, Borodina Irina. The Study of the Acoustic Characteristics of Chitosan Acetate Film Using a Radial Electric Field Excited Resonator. *Sensors*, 2023, 23:1808; doi: 10.3390/s23041808.
11. Kuznetsova I, Zaitsev B, Krasnopolskaya L, Teplykh A, Semyonov A, Avtonomova A, Ziangirova M, Smirnov A, Kolesov V. Influence of humidity on the acoustic properties of mushroom mycelium films used as sensitive layers for acoustic humidity sensors. *Sensors*, 2020, 20:2711.
12. Zaitsev BD, Teplykh AA, Fedorov FS, Grebenko AK, Nasibulin AG, Semyonov AP, Borodina IA. Evaluation of Elastic Properties and Conductivity of Chitosan Acetate Films in Ammonia and Water Vapors Using Acoustic Resonators. *Sensors*, 2020, 20:2236; doi: 10.3390/s20082236.
13. Liu K, Zhang C. Volatile organic compounds gas sensor based on quartz crystal microbalance for fruit freshness detection: A review. *Food Chem.*, 2021, 334:127615; doi: 10.1016/j.foodchem.2020.127615.
14. Wang L. Metal-organic frameworks for QCM-based gas sensors: A review. *Sensors Actuators, A Phys.*, 2020, 307:111984; doi: 10.1016/j.sna.2020.111984.
15. Gorbachev I, Smirnov A, Ivanov G, Avramov I, Datsuk E, Venelinov T, Bogdanova E, Anisimkin V, Kolesov V, Kuznetsova I. Langmuir-Blodgett films of arachidic and stearic acids as sensitive coatings for chloroform HF SAW sensors. *Sensors*, 2023, 23:100; doi: 10.3390/s23010100.
16. Guliy OI, Zaitsev BD, Semyonov AP, Alsowaidi AKM, Teplykh AA, Karavaeva OA, Borodina IA. Microbial acoustic sensor test-system based on a piezoelectric resonator with a lateral electric field for kanamycin detection in liquid. *Ultrasonics*, 2022, 120:106651; doi: 10.1016/j.ultras.2021.106651.
17. Hartz Jequil SR, Emanetoglu Nuri W, Howell Caitlin, John F. Vetelino. Lateral field excited

- quartz crystal microbalances for biosensing applications. *Biointerphases*, 2020, 15(3):030801; doi: 10.1116/6.0000144.
18. Gorbachev IA, Smirnov AV. Biosensor based on Langmuir-Blodgett film with alcohol oxidase enzyme. *Radioelektronika, Nanosistemy, Informacionnye Tehnologii*, 2023, 15(3):307-316e; doi: 10.17725/rensit.2023.15.307.
19. Zaitsev BD, Semyonov AP, Teplykh AA, Borodina IA. The sensor for measuring the micro-displacements based on the piezoelectric resonator with lateral electric field. *Ultrasonics*, 2019, 99:105973; doi: 10.1016/j.ultras.2019.105973.
20. Ганопольский ВВ, Касаткин БА, Легуша ФФ и др. *Пьезокерамические преобразователи: методы измерения и расчет параметров*. Справочник под ред. С.И. Пугачева. Л.: Судостроение, 1984, 256 с.

**Зайцев Борис Давыдович***д.ф.-м.н., профессор*

СФ ИРЭ им. В.А. Котельникова РАН

**38, ул. Зелёная, Саратов 410019, Россия****E-mail: zai-boris@yandex.ru****Семёнов Александр Павлович***к.ф.-м.н., с.н.с.*

СФ ИРЭ им. В.А. Котельникова РАН

**38, ул. Зелёная, Саратов 410019, Россия****E-mail: alex-sheih@yandex.ru****Теплых Андрей Алексеевич***к.ф.-м.н., с.н.с.*

СФ ИРЭ им. В.А. Котельникова РАН

**38, ул. Зелёная, Саратов 410019, Россия****E-mail: teplykhaa@mail.ru****Бородина Ирина Анатольевна***к.ф.-м.н., с.н.с.*

СФ ИРЭ им. В.А. Котельникова РАН

**38, ул. Зелёная, Саратов 410019, Россия****E-mail: borodinaia@yandex.ru**