

DOI: 10.17725/rensit.2024.16.325

Получение и обработка акустических откликов волн Лэмба в датчиках водных растворов базовых вкусов

¹Агейкин Н.А., ¹Анисимкин В.И., ²Воронова Н.В., ²Тельминов О.А., ²Шамин Е.С.

¹Институт радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова РАН, <http://cplire.ru/>

Москва 125009, Российская Федерация

²Научно-исследовательский институт молекулярной электроники, <https://www.niime.ru/>

Москва 124460, Зеленоград, Российская Федерация

E-mail: ageykin_niki@mail.ru, anis@cplire.ru, voronova@niime.ru, otelminov@niime.ru, eshamin@niime.ru

Поступила 11.04.2024, рецензирована 18.04.2024, принята 22.04.2024

Аннотация: В работе измерены суммарные потери акустических волн в пластинах $128^\circ\text{Y-LiNbO}_3$ при нанесении жидкости, обусловленные радиационным излучением волн в жидкую среду, а также ее вязкостью, электропроводностью, плотностью и диэлектрической проницаемостью жидкостного анализа. В качестве тестируемых выбраны растворы с 5-ю базовыми вкусами, широко применяемые для калибровки и создания эталонов при тестировании жидких сред. Измерения проведены в диапазоне 30...60 МГц. Экспериментальные данные были представлены в виде полярных гистограмм, из сравнения площадей и формы которых определялся вкус того или иного раствора. К тем же экспериментальным результатам был применен метод анализа большого массива данных (РСА) для описания линейных процессов деформации упругих волн на основе экспериментальных данных, содержащих известные значения измерений физических показателей волны для различных типов жидкостных сред, который ранее использовался для идентификации газов и предсказания свойств различных веществ по линейному отклику нормальной акустоэлектронной волны. Выполнен сравнительный анализ результатов, полученных с помощью полярных гистограмм и стандартного метода классификации РСА. Продемонстрированы преимущества последнего. Результаты данного исследования полезны как при разработке акустических датчиков без сенсорных слоев, так и для применения методов машинного обучения к данным в других типах датчиков.

Ключевые слова: волны Лэмба, датчики водных растворов, анализ большого массива данных, базовые вкусы

УДК 53.087

Благодарности: Работа выполнена при финансировании Российского научного фонда (проект № 20-19-00708П).

Для цитирования: Агейкин Н.А., Анисимкин В.И., Воронова Н.В., Тельминов О.А., Шамин Е.С. Получение и обработка акустических откликов волн Лэмба в датчиках водных растворов базовых вкусов. РЭНСИТ: Радиоэлектроника. Наносистемы. Информационные технологии, 2024, 16(3):325-330. DOI: 10.17725/rensit.2024.16.325.

Acoustic responses of Lamb waves obtaining and processing in sensors of basic tastes aqueous solutions

Nikita A. Ageykin, Vladimir I. Anisimkin

Kotel'nikov Institute of Radioengineering and Electronics of RAS, <http://cplire.ru/>

Moscow 125009, Russian Federation

E-mail: ageykin_niki@mail.ru, anis@cplire.ru

Nataliya V. Voronova, Oleg A. Telminov, Evgeniy S. Shamin

Molecular Electronics Research Institute, <https://www.niime.ru/>

Moscow 124460, Zelenograd, Russian Federation

E-mail: voronova@niime.ru, otelminov@niime.ru, eshamin@niime.ru

Received April 11, 2024, peer-reviewed April 18, 2024, accepted April 22, 2024

Abstract: In this work, the total acoustic wave losses in $128^\circ\text{Y-LiNbO}_3$ wafers during liquid application due to radiation emission of waves into the liquid medium, as well as its viscosity, conductivity, density and dielectric constant of the liquid analyte are measured. Solutions with 5 basic flavors, widely used for calibration and reference creation in liquid media testing, were selected as test liquids. The measurements were performed in the range of 30...60 MHz. After the measurements, the experimental data were presented in the form of polar histograms, from the comparison of areas and shapes of which the flavor of a particular liquid was determined. Then, a principal component analysis (PCA) method was applied to the same experimental results to describe linear elastic wave deformation processes based on experimental data containing known values of physical wave measurements for different types of liquid media, which was previously used to identify gases and predict the properties of various substances from the linear response of a normal acoustic-electronic wave. In this paper, a comparative analysis of the results obtained using polar histograms and the standard PCA classification method is performed. The advantages of the latter are demonstrated. The results of this study are useful both for the development of acoustic sensors without sensor layers and for the application of machine learning methods to data in other types of sensors.

Keywords: Lamb waves, aqueous solution sensors, principal component analysis, basic flavors

UDC 53.087

Acknowledgments: The work was financed by the Russian Science Foundation (project no. 20-19-00708II).

For citation: Nikita A. Ageikin, Vladimir I. Anisimkin, Nataliya V. Voronova, Oleg A. Telminov, Evgeniy S. Shamin. Acoustic responses of Lamb waves obtaining and processing in sensors of basic tastes aqueous solutions. *RENSIT: Radioelectronics. Nanosystems. Information Technologies*, 2024, 16(3):325-330e. DOI: 10.17725/j.rensit.2024.16.325.

СОДЕРЖАНИЕ

1. ВВЕДЕНИЕ (326)
2. МЕТОДИКА ИЗМЕРЕНИЙ И РАСЧЕТОВ (327)
3. ПОЛУЧЕННЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ (329)
4. ЗАКЛЮЧЕНИЕ (330)

ЛИТЕРАТУРА (330)

1. ВВЕДЕНИЕ

В последние годы растет потребность в миниатюрных высокочувствительных датчиках жидкостей и газов, что стимулирует их разработку с применением различных физических принципов. Одним из таких принципов, является акустоэлектронный подход. В датчиках акустоэлектронного типа измерение каждого параметра тестируемой среды производится при помощи специально подобранной акустической волны. Этим требованиям в полной мере отвечают акустические волны Лэмба различных порядков n , распространяющиеся в пьезоэлектрических пластинах толщиной h порядка длины волны [1,2].

Основной задачей сенсора является идентификация, классификация и каталогизация образца жидкости. Задачи классификации и каталогизации сходные, однако, классификация предполагает своим условием наличие критериев, а

каталогизация предполагает своей целью полноту описания [3].

Микроволновые датчики на основе акустических пластинчатых мод привлекательны по ряду причин. Они пригодны для детектирования газов и жидкостей, способны измерять физические свойства проб малого объема (~ 100 мкл), имеют небольшие размеры (~ 100 мм³) и обладают двумя независимыми откликами (амплитудным и фазовым). Отсутствие чувствительных покрытий повышает повторяемость и долговременную стабильность измерений, при этом форма и точный объем пробы не влияют на результаты измерений.

До настоящего момента результаты измерений представлялись в виде полярных гистограмм [4], а их сравнение производилось визуальными методами, что не является оптимальным способом идентификации, классификации и каталогизации различных образцов жидкости и газов. Известен ряд работ, в которых схожие задачи решаются с помощью использования стандартных методов классификации.

Так в работе [5] представлен двумерный и трехмерный анализ главных компонент (principal component analysis, PCA) набора параметров затухания и фазы для различных растворов вкусовых

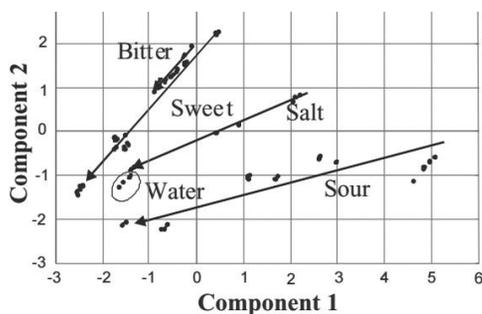


Рис. 1. Двумерный график PCA для водных растворов четырех вкусов различной концентрации и деионизированной дистиллированной воды [5].

образцов. В качестве четырех параметров для PCA использовались отношение амплитуд и разность фаз на каждой из линий задержки (электрически замкнутой и свободной). Было показано, что достигнуто 100% линейное разделение основных вкусов, при этом контрольное вещество – деионизированная дистиллированная вода – четко выделяется (Рис. 1).

Далее при различной концентрации тестируемых жидкостей, также достигалось 100% различие. Рис. 1 показывает, как различные тестовые вещества сходятся к области деионизированной воды при уменьшении их концентрации в водном растворе.

В работе [6] выделение признаков выполняется с помощью линейных преобразований, таких как классический анализ главных компонент (PCA) и линейный дискриминантный анализ (LDA). PCA позволяет найти проекции с максимальной дисперсией и является наиболее распространенным методом линейного извлечения признаков. Однако он не является оптимальным для классификации, поскольку не учитывает идентичность (метку класса) запаховых примеров в базе данных. LDA, напротив, учитывает классовую метку каждого примера. Его цель – найти проекции, которые максимизируют расстояние между примерами с разными вкусами и при этом минимизируют расстояние между примерами с одним и тем же вкусом. Например, PCA может лучше работать с проекцией, содержащей высоковариационный случайный шум, в то время как LDA лучше справляется с проекцией, содержащей тонкую, но, возможно, важную дискриминационную информацию [7]. Поэтому LDA более подходит для целей классификации.

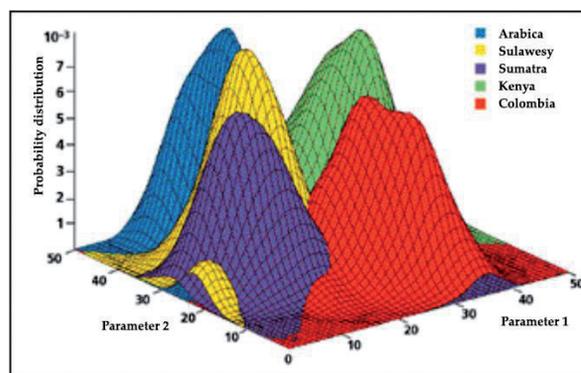


Рис. 2. Трехмерный график распределения 5 сортов кофе [6].

В последнее время несколько исследовательских групп используют некоторые нелинейные преобразования, такие как нелинейные карты Саммона и нелинейные карты Кохонена. Карты Саммона пытаются найти (обычно) двух- или трехмерное отображение, сохраняющее расстояние между парами примеров на исходном 32-мерном пространстве. Карты Кохонена проецируют 32-мерное пространство на (обычно) двумерную сетку элементов обработки, называемых нейронами.

Так исследователи из Государственного университета Северной Каролины смогли отличить один сорт кофе от другого в ходе применения методов дискриминации для обработки данных с использованием сенсоров на основе оксида металла (Рис. 2). Горизонтальные оси представляют собой первую и вторую проекции линейного дискриминантного анализа – метода извлечения признаков. Вертикальная ось – функция распределения вероятностей для каждого кофе по двум дискриминантным параметрам (Рис. 2).

В связи с вышеизложенным, целью настоящей работы являлся выбор подходящего метода обработки выходных сигналов чувствительного элемента датчика жидкости и классификация сортов тестируемых образцов на основе измеренных физических параметров, а также их сопоставление с эталонными образцами.

2. МЕТОДИКА ИЗМЕРЕНИЙ И РАСЧЕТОВ

Для исследований влияния жидкости на акустический отклик волн Лэмба использовалась многоканальная линия задержки, подобная описанной в работе [4]. Четыре пары входных и выходных встречно-плетерных преобразователей (ВПП) с периодом 200 мкм располагались по кругу на трехдюймовой

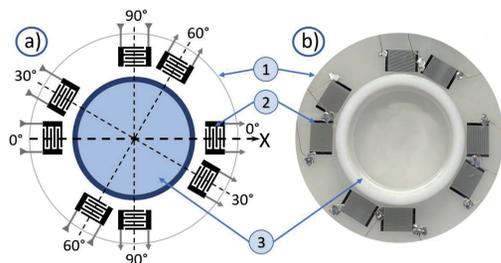


Рис. 3. Схематическое изображение (а) и фото (б) экспериментального образца с 4-мя акустическими каналами на одной пьезоэлектрической пластине [4]. 1 – пластина, 2 – встречно-иттербиевые преобразователи (ВИПП), 3 – жидкостная кювета. Акустические каналы образуют углы $\Theta = 0^\circ, 30^\circ, 60^\circ$ и 90° с кристаллографической осью X. Диаметр кюветы 18 мм.

пластине LiNbO_3 поворотного 128°Y -среза (углы Эйлера $0^\circ, 37.86^\circ, \Theta = 0^\circ, 30^\circ, 60^\circ$ и 90°), толщиной $h = 500$ мкм. Одна поверхность пластин была шлифована (верхняя) и другая – полирована (нижняя). На верхней поверхности между ВИПП размещалась тefлоновая кювета для тестируемой жидкости. В каждом из 4-х каналов (направления распространения $\Theta = 0^\circ, 30^\circ, 60^\circ$ и 90° к оси X) возбуждалось по 7 волн разных порядков n . В результате общее число волн, зондирующих тестируемую жидкость, составляло 28. Экспериментальный образец представлен на **Рис. 3**.

На данный момент известно 5 базовых вкусов: соленый, сладкий, кислый, горький, умами [8]. В работе в качестве таковых использовались 5 видов 0.9% водных растворов: поваренной соли, которая соответствует соленому вкусу, сахара – сладкий вкус, лимонной кислоты – кислый, настойки полыни – горький и глутаминовой кислоты – умами.

Методика акустических измерений подробно описана в работе [4]. Каждая акустическая волна под действием жидкости испытывает суммарное поглощение (т.е. изменение амплитуды волны), которое обусловлено вязкоупругими потерями, акустоэлектронным взаимодействием и излучением (радиацией) волн в жидкости, которое возникает при высокой скорости распространения волны в пластине по сравнению со скоростью продольной объемной акустической волны в жидкости ($V_n > V_{ж}$) (**Рис. 4**) [9-10].

В процессе эксперимента в кювету сначала наливался первый раствор, например, отвечающий за соленый вкус, и проводилось по 7 измерений в каждом из 4 каналов (всего 28). Далее жидкость извлекалась шприцом, емкость промывалась дистиллированной водой и высушивалась. После этого вводился следующий раствор для тестирования. Изменения амплитуд

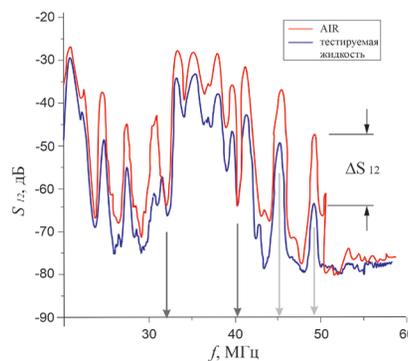


Рис. 4. Типичный вид частотной зависимости вносимых потерь ΔS_{12} , измеренных в одном из акустических каналов экспериментального образца (**Рис. 3**) на воздухе (красная линия) и с тестируемой жидкостью (тж) в кювете (синяя линия). Пластина: $128^\circ\text{Y-LiNbO}_3$, $h = 500$ мкм, $\lambda = 200$ мкм, $h/\lambda = 2.5$, $\Theta = 60^\circ$. Тестируемая жидкость: водный раствор NaCl ($\sigma = 6$ Сим/м, 200 мг). Диаметр кюветы $L = 18$ мм. Светлыми стрелками указаны моды с большими суммарными потерями. Темными стрелками показаны моды с малыми суммарными потерями.

волн ΔS_{12} , возникающие при введении каждого раствора (**Рис. 4**), служили акустическими откликами датчика, которые подвергались последующей обработке.

Вначале измеренные "отклики" представлялись в виде полярных гистограмм, по углу которых откладывался номер моды n или ее частота, а по радиусу – отличие ΔS_{12} этого сигнала от сигнала той же моды для воздуха в дБ (**Рис. 4**). Идентификация веществ осуществляется путем сравнения формы, площади, максимумов и минимумов гистограмм, измеренных для тестируемой жидкости и для жидкости заранее заданного стандарта. [4] Площадь S гистограмм определяется простым суммированием составляющих ее треугольников, боковые стороны которых – отклики соседних мод $\Delta S_{12}(n)$ и $\Delta S_{12}(n+1)$, а угол между ними – $\beta = 360^\circ/n$, где n – суммарное количество используемых мод во всех каналах (1).

$$S = 0.5 \sin \beta \sum \Delta S_{12}(n) \Delta S_{12}(n+1). \quad (1)$$

Затем, для идентификации жидких веществ по тем же откликам ΔS_{12} , применялся метод главных компонент [12]. В методах анализа многомерных данных важное место занимает метод главных компонент, целью которого является снижение размерности многомерных данных, сохраняя максимально возможную информативность [11-12].

В конечном итоге анализ и классификация вкуса и запаха происходит по алгоритму, представленному на **Рис. 5**. Он включает в себя снятие сигнала с датчика, обработку измерений,

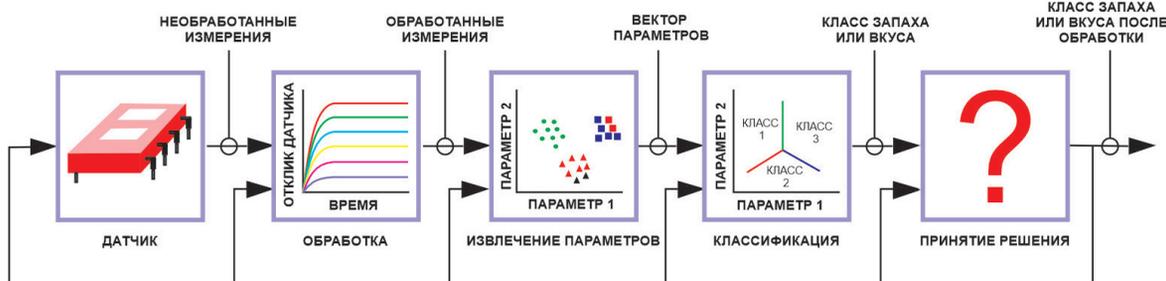


Рис. 5. Алгоритм определения класса запаха или вкуса с помощью нейросетевого анализа.

извлечение параметров, определение класса запаха или вкуса и окончательную классификацию тестируемого вещества.

3. ПОЛУЧЕННЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

В результате эксперимента для каждой жидкости была получена совокупность 28 акустических откликов ΔS_{12} , отвечающим разным волнам и разным каналам в пластинах ниобата лития. Ниже представлены полярные гистограммы 5-ти основных вкусов (соленого, сладкого, кислого, умами и горького), полученные с помощью этих акустических откликов.

Из представленных гистограмм видно, что для сильно отличающихся жидкостей-вкусов соответствующие гистограммы различаются по форме и площади. Также видно (Рис. 6, Таблица 1), что хотя максимальное отличие площадей достигает 2.8 раз, форма многих гистограмм подобна друг другу (Рис. 6), что затрудняет классификацию

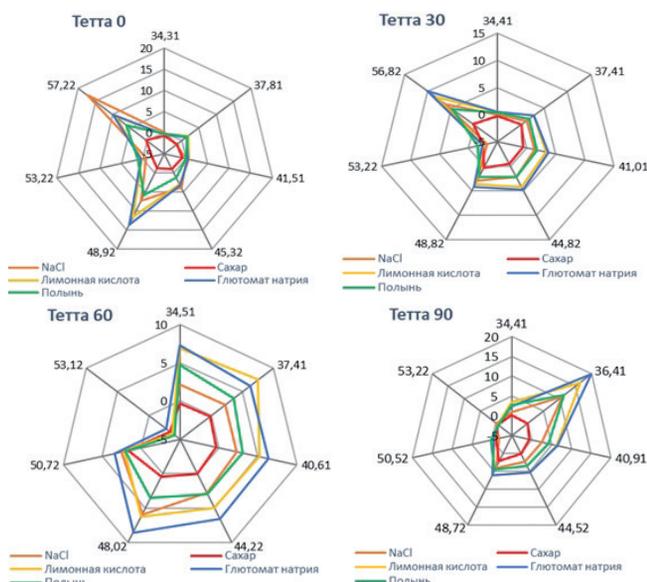


Рис. 6. Гистограммы акустических откликов ΔS_{12} водных растворов 5-ти базовых жидкостей с концентрацией 0.9%, измеренные в 4 каналах пластины $128^\circ\text{Y-LiNbO}_3$ с нормированной толщиной $h/\lambda = 2.5$.

Таблица 1

Площади гистограмм акустических откликов ΔS_{12} водных растворов 5-ти базовых веществ с концентрацией 0.9%, рассчитанные по формуле (1).

Θ°	S_1 , дБ ² солёный	S_2 , дБ ² сладкий	S_3 , дБ ² кислый	S_4 , дБ ² умами	S_5 , дБ ² горький
0	564.1(2.07)	273 (1)	573.3 (2.1)	597.7 (2.18)	474.6 (1.74)
30	416.9 (1.38)	303.7 (1)	511.1 (1.69)	544.4 (1.8)	430.5 (1.42)
60	465.5 (1.5)	310.4 (1)	632.9 (2.04)	708.2 (2.29)	477.4 (1.54)
90	512.6 (1.55)	332.3 (1)	727.6 (2.19)	756.9 (2.8)	591.62 (1.79)

даже сильно отличающихся жидкостей. Причем подобие формы гистограмм разных жидкостей будет, естественно, усиливаться при сближении физических свойств этих жидкостей.

Этот недостаток преодолевается с помощью метода главных компонент (РСА), примененный к той же совокупности акустических откликов ΔS_{12} (Рис. 7). Данные состояли из пяти наборов измерений для каждой исследуемой жидкости. В каждый набор измерений вошли по 7 значений откликов с каждого из 4 каналов – всего 28 признаков для каждого образца. Для применения РСА каждый вектор признаков был смещён на среднее и нормирован на дисперсию. На Рис. 7

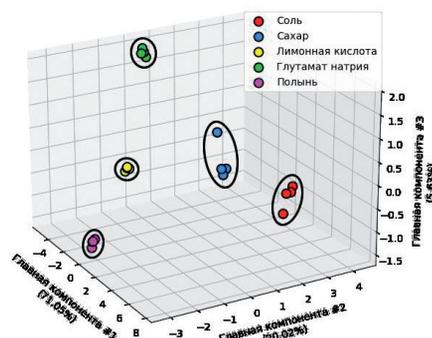


Рис. 7. Визуализация результатов применения метода главных компонент к суммарным потерям акустических волн ΔS_{12} всех акустических каналов акустоэлектронного датчика, представленного на рис. 3. Точки разного цвета соответствуют жидкостям с разным вкусом. Каждый выделенный кластер точек отмечен темным эллипсом.

представлен итоговый результат применения метода главных компонент.

Из Рис. 7 видно, что три выбранных главных компоненты в общей сумме объясняют 96.7% дисперсии в данных. Так же видно, что точки в осях выбранных главных компонент, соответствующие одинаково маркированным исследуемым образцам сгруппировались в кластеры, отмеченные темными эллипсами, а расстояние между точками внутри кластеров каждой жидкости много меньше расстояния между кластерами разных жидкостей, что позволяет надежно отличить одну жидкость от другой. Немаловажно отметить, что в пространстве выбранных главных компонент все исследуемые типы жидкостей полностью разделены.

4. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Исследования, проведенные в данной работе, показали, что применительно к акустоэлектронным датчикам метод главных компонент дает более четкое разделение вкусов, чем полярные гистограммы. Такая задача является тривиальной и не требует дополнительного использования алгоритмов машинного обучения (или, в частности, нейросетевых алгоритмов).

В тоже время, для решения сходных задач, с более сложным массивом экспериментальных данных могут подойти такие алгоритмы как, например, нейросети на основе CNN (сверточная нейронная сеть) для классификации по частотной зависимости, классические методы машинного обучения, такие как метод опорных векторов, а также случайный лес и градиентный бустинг для работы с табличными данными.

Следующим этапом работ по оптимизации методики обработки откликов акустоэлектронных датчиков будет применение различных методов классификации для близких по вкусу жидкостей и сходных по запаху газов.

ЛИТЕРАТУРА

1. Фрайден Дж. *Мир электроники. Современные датчики. Справочник*. М., Техносфера, 2006.
2. Викторов ИА. *Физические основы применения ультразвуковых волн Рэлея и Лэмба в технике*. М., Наука, 1966.
3. Красников ГЯ, Горнев ЕС, Матюшкин ИВ. Общая теория технологии и микроэлектроника: часть 1. Уровни описания. *Электронная техника. Серия 3. Микроэлектроника*, М, Наука, 2017, с. 51.
4. Анисимкин ВИ, Воронова НВ. Интегральная решетка акустических датчиков для распознавания жидкостей микролитрового объема. *Известия РАН*.

Сер. физ., 2017, 81(8):1010-1013. DOI: 10.7868/S0367676517080014.

5. Sehra G, Cole M, Gardner JW. Miniature taste sensing system based on dual SH-SAW sensor device: an electronic tongue. *Sensors and Actuators B: Chemical*, 2004, 103(1-2):233-239; doi: 10.1016/j.snb.2004.04.055.
6. Troy Nagle H, Susan S. Schiffman and Ricardo Gutierrez-Osuna. The how and why of electronic noses. *IEEE Spectrum*, 1998, 35(9):22-34..
7. Terakawa Y, Kondoh J. Numerical and experimental study of acoustic wave propagation in glass plate/water/128YX-LiNbO₃ structure. *Japanese Journal of Applied Physics*, 2020, Vol. 59, SKKC08; doi: 10.35848/1347-4065/ab84ae.
8. Holmes B. *Flavor: the science of our most neglected sense*. London, WH Allen, 2017, 310 p.
9. Caliendo C. Longitudinal Modes along Thin Piezoelectric Waveguides for Liquid Sensing Applications *Sensors*, 2015, 15(6):12841; doi: 10.3390/s150612841.
10. White RM, Wicher PJ, Wenzel SW, Zellers ET. Plate-mode ultrasonic oscillator sensors. *IEEE Trans. on Ultras., Ferroel. and Freq. Contr.*, 1987, 34(2):162.
11. Ибятков РИ, Киселева НГ, Валиев АА. Сб. трудов. Секция 1. Акт. пробл. фунда. и прикл. математики II междунаучно-практич. конф. «Математические методы в технике и технологиях». Набережные Челны, Изд. Набережнечел. гос. пед. ун-т, 2017, с. 21.
12. Кожевников ВС, Горнев ЕС, Мещанинов ФП, Жевненко ДА. Анализ методов математического моделирования мемристоров. *Межд. форум «Микроэлектроника-2019» 5-я Межд. научн. конф. «Электронная компонентная база и микроэлектронные модули»*, 2019, с. 556.

Агейкин Никита Алексеевич

м.и.с.

ИРЭ им. В.А. Котельникова РАН

Москва 125009, Россия

E-mail: ageykin_niki@mail.ru

Анисимкин Владимир Иванович

д.ф.-м.н.

ИРЭ им. В.А. Котельникова РАН

Москва 125009, Россия

E-mail: anis@cplire.ru

Воронова Наталия Владимировна

к.ф.-м.н.

НИИ молекулярной электроники

Москва 124460, Зеленоград, Россия

E-mail: nvoronova@niime.ru

Тельминов Олег Александрович

к.т.н.

НИИ молекулярной электроники

Москва 124460, Зеленоград, Россия

E-mail: otelminov@niime.ru

Шамин Евгений Сергеевич

аспирант

НИИ молекулярной электроники

Москва 124460, Зеленоград, Россия

E-mail: eshamin@niime.ru