ПРОЕКТИРОВАНИЕ И ТЕХНОЛОГИЯ ПРИБОРОСТРОЕНИЯ И РАДИОЭЛЕКТРОННОЙ АППАРАТУРЫ/DESIGN AND TECHNOLOGY OF INSTRUMENTATION AND ELECTRONIC EQUIPMENT

DOI: https://doi.org/10.23670/IRJ.2023.138.40

РАЗРАБОТКА ПРИЁМНО-ИЗЛУЧАЮЩЕЙ СИСТЕМЫ С ПРИМЕНЕНИЕМ КОМБИНИРОВАННОГО ДАТЧИКА «ПЬЕЗОКЕРАМИКА-ПОЛИВИНИЛИДЕНФТОРИД»

Научная статья

Меркулов Л.Н.[1, *]

[1] Дальневосточный федеральный университет, Владивосток, Российская Федерация

* Корреспондирующий автор (merkulov_l[at]bk.ru)

Аннотация

В настоящей работе разрабатывается математическая модель комбинированной акустической системы, предназначенной для небольших замкнутых объёмов сложной формы. Во введении определена основная математическая и физические модели, а также примерный способ установки датчиков на объекте. В основной части работы посредством критического анализа литературных источников, подобраны оптимальные материалы для датчика – пьезокерамика ЦТС-19 для излучения и пленки полярного полимера ПВДФ для приема. Для описания поведения акустической волны применена направленная функция Грина. Выбраны алгоритмы расчета датчика с учетом основных элементов датчика. Проведены расчеты и построены графики частотных зависимостей основных параметров. В заключение проведен анализ и оценка результатов, сделаны выводы, а также упомянуты перспективы дальнейшего развития.

Ключевые слова: ультразвуковые излучатели, пьезополимеры, поливинилиденфторид, пьезокерамика, электроакустический тракт.

DEVELOPMENT OF A RECEIVING AND EMITTING SYSTEM USING A COMBINED "PIEZOCERAMIC-POLYVINYLIDENE FLUORIDE" SENSOR

Research article

Merkulov L.N.[1, *]

[1] Far Eastern Federal University, Vladivostok, Russian Federation

* Corresponding author (merkulov_l[at]bk.ru)

Abstract

This work develops a mathematical model of a combined acoustic system designed for small enclosed volumes of complex shape. In the introduction, the basic mathematical and physical models are defined, as well as an approximate way of installing the transducers on the object. In the main part of the work, through a critical analysis of literature sources, the optimal materials for the sensor are selected – piezoceramics CTS-19 for radiation and polar polymer film PVDF for reception. A directional Green's function has been applied to describe the behaviour of the acoustic wave. Algorithms for calculating the sensor were selected, taking into account the main elements of the sensor. Calculations have been carried out and frequency dependence plots of the main parameters have been constructed. Finally, the results are analysed and evaluated, conclusions are drawn, and prospects for further development are mentioned.

Keywords: ultrasonic radiators, piezopolymers, polyvinylidene fluoride, piezoceramics, electroacoustic tract.

Введение

В работе В.И. Короченцева «Направленные и фокусирующие антенны в объемах, ограниченных поверхностью произвольной формы» [1] описывается физико-математический аппарат гидроакустических систем, предназначенных для работы в разных средах с границами раздела. Также вводится понятие направленных функций Грина. В исследовании Эм А.А. и Корчака А.В. «Математическая модель излучателя сферических волн в слоистой среде» [2] рассматривается излучение ненаправленного излучателя в слоистой среде, поведение волны в больших объемах, в качестве математического аппарата используются направленные функции Грина.

В работе [3] рассмотрена задача распространения акустических волн в замкнутых небольших объемах сложной формы с границами раздела «кость-внутричерепное пространство-мозговое вещество». Осуществлена попытка перенести математическую модель из исследования [2] на малые масштабы. Проблема состоит в том, что на малых масштабах излучение, отражение и приём акустической волны имеет множество побочных эффектов, которые повышают погрешность расчётов. Для решения данной проблемы предлагается разработка более точной приёмно-излучающей системы.

Актуальность темы состоит в том, что перенос модели гидроакустической системы на малые масштабы позволит использовать результаты физико-математического моделирования при создании систем взаимодействия с морскими обителями.

В настоящей работе рассматривается возможность создания датчика с применением пленок полярного полимера. Дело в том, что акустический импеданс поливинилиденфторида (ПВДФ) близок к акустическому импедансу живых тканей (воды), что позволяет более точно зафиксировать отраженную волну [4]. Планируется использовать элемент из классической пьезокерамики в качестве излучателей, а пленки полимера – в качестве приемников. Внедрение такого комбинированного датчика позволит существенно повысить качество и точность исследований в гидроакустике.

Цель данной работы: разработка физико-математической модели комбинированного преобразователя, в котором используются пластинки пьезокерамики в качестве излучающих элементов, а пленки ПВДФ – в качестве приемных. Пьезокерамический элемент заданного профиля изготавливается из цирконат-титаната свинца (ЦТС) [5], [6]. На переднюю и заднюю поверхности элемента напыляются проводящие электроды из серебра, после чего он поляризуется по толщине в постоянном электрическом поле и излучает акустическую волну благодаря обратному пьезоэффекту. Отраженная акустическая волна попадает на элементы из пленок ПВДФ и посредством прямого пьезоэффекта преобразует их в электрический сигнал, фиксируемый усилителем.

Математическая постановка задачи

Главный математический аппарат – волновое уравнение Гельмгольца для гармонической волны:

$$\Delta u = \frac{1}{c^2} \cdot \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} \ ,$$

где u=u(x,y,z,t) – неизвестная функция координат и времени, $\Delta = \frac{\partial^2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2}{\partial y^2} + \frac{\partial^2}{\partial z^2}$ – оператор Лапласа. Для решения волнового уравнения используем направленные функции Грина [1]. Они будут записаны как суммы эффектов для падающей и отраженной волны.

$$G_m(MM_0) = G^-(MM_0) + VG^+(MM_0) \ ,$$

где M – точка приема сигнала с координатами x и y;

M_0 – точка излучения сигнала с координатами x_0 и y_0;

V – коэффициент отражения от границы раздела.

Окончательное выражение направленной функции Грина можно представить в виде:

$$G(M, M_0) = \frac{i}{2\pi}\left(\int_{U_1}^{U_2} \frac{F(U)}{\sqrt{k^2 - U^2}} e^{i\left((x-x_0)\sqrt{k^2-U^2}+(y-y_0)U\right)} dU + \right.$$
$$\left. + \int_{U_1}^{U_2} V \cdot \frac{F(U)}{\sqrt{k^2 - U^2}} e^{i\left((x-x_0)\sqrt{k^2-U^2}+(y-y_0)U\right)} dU\right) \ ,$$

где

$V = \frac{(Z_1+Z_2)e^{idk\sin\theta}+(Z_1-Z_2)e^{idk\sin\theta}}{(Z_1+Z_2)e^{idk\sin\theta}-(Z_1-Z_2)e^{idk\sin\theta}}$, Z_1 и Z_2- волновые сопротивления кости и мозгового вещества соответственно, d – толщина слоя $F(U) = \begin{cases} 1, \text{ при } U_1 \le U \le U_2 \\ 0, \text{ при всех остальных значения } U; \end{cases}$

$U_1 = k_1 cos\theta$, $U_2 = k_2 cos\theta$ - интервалы углов;

$k_{1,2} = \frac{2\pi}{\lambda_{1,2}}$ - волновые числа в кости и мозговом веществе соответственно.

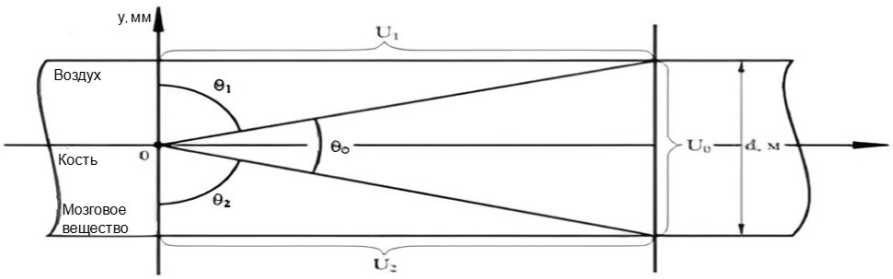

Рисунок 1 - Одна из рассматриваемых плоскостей

DOI: https://doi.org/10.23670/IRJ.2023.138.40.1

Примечание: излучатель устанавливается на поверхности головы

Для вывода формулы колебательной скорости волны, излученной пье-зоэлементом на изучаемый объект, воспользуемся схемой на рисунке 2 [7].

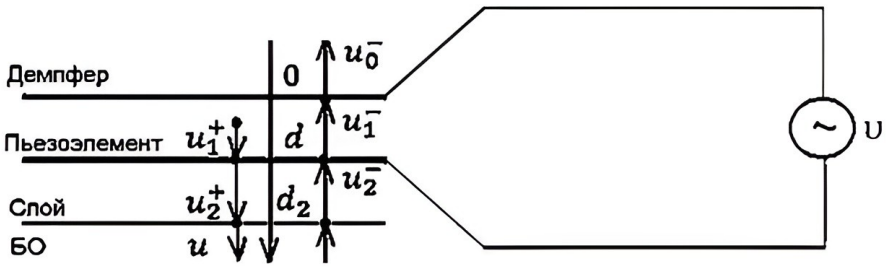

Рисунок 2 - Упрощенная схема преобразователя с демпфером и согласующим слоем
DOI: https://doi.org/10.23670/IRJ.2023.138.40.2

Колебательная скорость определяется по формуле:

$$v = \frac{e_{ii}}{\omega d_2 z_{БО}} |bU| F \ .$$

Здесь $b = \frac{1}{1+\frac{z_{ген}}{z_{БО}} - i\omega C_0 z_{ген}}$, а $F = \frac{A}{\sqrt{B+C}}$ - функция, определяемая параметрами акустических сопротивлений материалов демпфера $z_д$, биологического объекта $z_в$, пьезоэлемента $z_э$ и промежуточного слоя $z_{сл}$, а также волновыми толщинами $k_1 d$ для пьезоэлемента и $k_2 d_2$ для слоя. Параметры A, B и C рассчитываются по формулам [8], [9]:

$$A = \left[(\cos(k_1 d) - 1)^2 + \frac{z_д^2}{z_э^2} \sin^2(k_1 d) \right]^2 ,$$

$$B = \left[\left(\frac{Z_э}{Z_В} + \frac{Z_Д}{Z_э} \right) \sin(k_1 d) \cos(k_2 d_2) + \left(\frac{Z_{сл}}{Z_в} + \frac{z_д}{Z_{сл}} \right) \cos(k_1 d) \sin(k_2 d_2) \right]^2 ,$$

$$C = \left[\left(1 + \frac{Z_д}{Z_В} \right) \cos(k_1 d) \cos(k_2 d_2) - \left(\frac{Z_э}{Z_В} + \frac{Z Z_{сл}}{Z_В Z_э} \right) \sin(k_1 d) \sin(k_2 d_2) \right]^2 .$$

Давление, действующее на биологический объект, найдется как отношение силы, создаваемой акустической волной на БО. Сама же сила, которую создает излученная волна , вычисляется по формуле:

$$F_{БО} = v \cdot z_{БО} \ .$$

Тогда давление будет определяться, как

$$p_{изл} = \frac{F_{БО}}{S_и} \ .$$

Расчет параметров электроакустического тракта для комбинации пьезопленки и пьезокерамики

В данном случае в ультразвуковом датчике находится два пьезоэлемента: пьезокерамика в режиме излучения и пьезопленка в режиме приема. Для расчета формул электроакустического тракта такого преобразователя воспользуемся рассчитанными параметрами для обоих пьезоматериалов и подставим их в конечные выражения чувствительности, напряжения холостого хода, и коэффициента передачи электроакустического тракта, а также построим графики частотной зависимости. Ввиду того, что давление отраженной волны, создаваемой пьезокерамическим элементом в разы выше аналогичной характеристики пленки ПВДФ, а чувствительность холостого хода пленки ПВДФ выше, чем у керамики, общий коэффициент передачи электроакустического тракта растет на порядок [10].

Электроакустические параметры ЦТС-19 и ПВДФ приведены в соответственно таблицах 1 и 2 [5], [11].

$$P_{ак} = \frac{|v_к|^2}{2} \cdot Z_к \ .$$

Чувствительность принимающего элемента:

$$\gamma_{xx} = \left(\frac{1}{z_в} \right) \left(\frac{d_к}{c_к} \right) \left(\frac{e_к}{\varepsilon_0 \varepsilon_к} \right) \left(\frac{1}{i x_к} \right) F_{1пр}(x_к) \ .$$

Коэффициент передачи электроакустического тракта является отношением напряжений на входе при приеме волны к напряжению на излучающем элементе:

$$K_{тр} = \left| \frac{U_{xx}}{U} \right| \ .$$

Таблица 1 - Электроакустические параметры ЦТС-19

DOI: https://doi.org/10.23670/IRJ.2023.138.40.3

Наименование параметра	Обозначение	Ед. измерения	Значение
Скорость звука	$c_к$	м/с	$3 \cdot 10^3$
Плотность	$\rho_к$	кг/м^3	$7{,}5 \cdot 10^3$
Диэлектрическая	ε	-	1800

Наименование параметра	Обозначение	Ед. измерения	Значение
проницаемость			
Абсолютная диэлектрическая проницаемость	$\varepsilon_к$	-	$159{,}3 \cdot 10^{-10}$
КЭМС по толщине	$K_{tк}$	-	0,56
Добротность	$Q_к$	-	50
Податливость	$S_{11к}^{E}$	1/Па	$16{,}3 \cdot 10^{-12}$
Пьезоэлектрическая постоянная	$e_к$	Кл/м^2	15
Тангенс угла диэлектрических потерь	$\tan\delta_к$	-	0,02

Таблица 2 - Электроакустические параметры ПВДФ

DOI: https://doi.org/10.23670/IRJ.2023.138.40.4

Наименование параметра	Обозначение	Ед. измерения	Значение
Скорость звука	$c_{пл}$	м/с	$1{,}5 \cdot 10^{3}$
Плотность	$\rho_{пл}$	кг/м^3	$1{,}8 \cdot 10^{3}$
Диэлектрическая проницаемость	ε	-	12
Абсолютная диэлектрическая проницаемость	$\varepsilon_{пл}$	-	$1{,}062 \cdot 10^{-10}$
КЭМС по толщине	$K_{tк}$	-	0,14
Добротность	$Q_к$	-	15
Податливость	$S_{11пл}^{E}$	1/Па	$280 \cdot 10^{-12}$
Пьезоэлектрическая постоянная	$e_{пл}$	Кл/м^2	0,13
Тангенс угла диэлектрических потерь	$\tan\delta_{пл}$	-	0,02

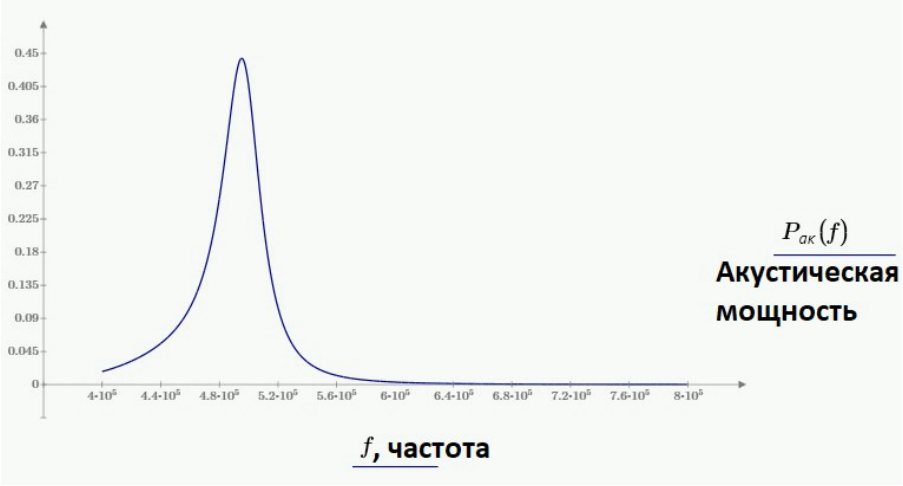

Рисунок 3 - Частотная характеристика излучаемой акустической мощности пьезокерамическим элементом

DOI: https://doi.org/10.23670/IRJ.2023.138.40.5

Примечание: рабочая частота датчика 500 кГц

$$P_{\text{ак}}(f_{\text{р}}) = 0,45 \text{ Вт}$$

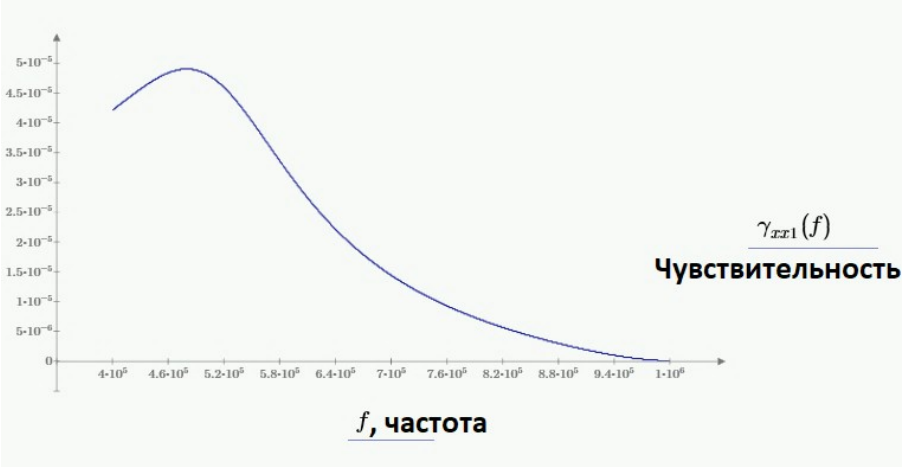

Рисунок 4 - Частотная характеристика чувствительности элемента из пленки ПВДФ
DOI: https://doi.org/10.23670/IRJ.2023.138.40.6

$$\gamma_{xx}(f_{\text{р}}) = 5 \cdot 10^{-5} \frac{\text{В}}{\text{Па}}$$

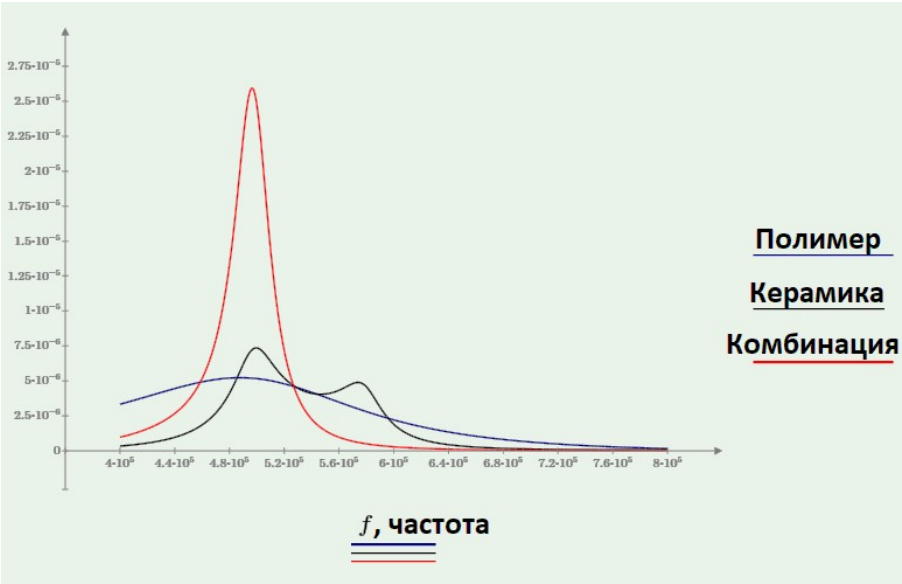

Рисунок 5 - Частотные характеристики коэффициента передачи электроакустического тракта для датчика из ПВДФ, пьезокерамики, и комбинированного датчика
DOI: https://doi.org/10.23670/IRJ.2023.138.40.7

Примечание: керамика излучает, полимер принимает

Значения коэффициентов передачи на рабочей частоте:

$K_{\text{тр1}}(f_p) = 5 \cdot 10^{-6}$ – для полимера ПВДФ.

$K_{\text{тр2}}(f_p) = 7,5 \cdot 10^{-6}$ – для пьезокерамики ЦТС-19.

$K_{\text{тр3}}(f_p) = 2,75 \cdot 10^{-6}$ – для комбинированного датчика.

Обсуждение результатов

В ходе проделанной работы построены частотные характеристики коэффициента передачи электроакустического тракта для датчика из пьезокерамики, пленок полярного полимера, а также комбинированной приёмно-излучающей

системы. В настоящее время в гидроакустической аппаратуре используются элементы из разных видов керамики, пьезокомпозитов, а также ПВДФ. Использование комбинированной системы лучше подходит для взаимодействия с морскими обитателями ввиду того, что акустические свойства полимера близки к таковым у биологической ткани. Это минимизирует потери и побочные эффекты при приёме отраженной волны.

Заключение

Преимущество комбинированного преобразователя не вызывает сомнений. Коэффициент передачи электроакустического тракта выше в несколько раз, что существенно повысит эффективность проводимых исследований и снизит погрешность получаемых данных. Результаты физико-математического моделирования и расчётов параметров распространения акустических волн могут быть использованы при проектировании направленных гидроакустических антенн, предназначенных для работы в малых объёмах сложной формы. Недостаток метода состоит в том, что направленная функция Грина подразумевает интегрирование компоненте волнового вектора. При больших волновых числах имеет место быть накопление ошибки повышение погрешности. При дальнейшей разработке планируется модифицировать расчетные алгоритмы под большие волновые числа так, чтобы минимизировать погрешность.

Конфликт интересов

Не указан.

Рецензия

Все статьи проходят рецензирование. Но рецензент или автор статьи предпочли не публиковать рецензию к этой статье в открытом доступе. Рецензия может быть предоставлена компетентным органам по запросу.

Conflict of Interest

None declared.

Review

All articles are peer-reviewed. But the reviewer or the author of the article chose not to publish a review of this article in the public domain. The review can be provided to the competent authorities upon request.

Список литературы / References

1. Акопьян В.А. Теоретико-экспериментальные методы определения полного набора совместимых материальных констант в теории электроупругости: дисс. канд. тех. наук: 01.02.04: защищена 26.07.2005: утв. 14.12.2006 / Акопьян Владимир Акопович. — Ростов-на-Дону, 2005. — 206 с.

2. Богуш М.В. Проектирование пьезоэлектрических датчиков на основе пространственных электротермоупругих моделей / М.В. Богуш. — М.: Техносфера, 2014. — 325 с.

3. Воронков В.А. К вопросу о выборе модели расчета электроакустического тракта ультразвукового преобразователя / В.А. Воронков, В.Н. Данилов // Дефектоскопия. — 1996. — 27-32 с.

4. Дмитриев И.Ю. Электроактивные полимеры на основе пористых плёнок поливинилиденфторида: дисс. канд. физ.-мат. наук: 02.00.06: защищена 31.05.2007: утв. 18.11.2007 / Дмитриев Иван Юрьевич. — СПб., 2007. — 154 с.

5. Кочервинский В.В. Структурные аспекты в электрофизических свойствах фторсодержащих гибкоцепных кристаллизующихся полимеров / В.В. Кочервинский. — М.: Наука, 2003. — 336 с.

6. Корчака А.В. Математическая модель излучателя сферических волн в слоистой среде / А.В. Корчака, А.А. Эм // Вестник инженерной школы ДВФУ. — 2019. — № 1(38). — С. 128-133.

7. Короченцев В.И. Направленные и фокусирующие антенны в объемах, ограниченных поверхностью произвольной формы / В.И. Короченцев. — Владивосток: Издательство ДВГТУ, 2008. — 301 с.

8. Меркулов Л.Н. Исследование распространения акустических волн в среде «кость – внутричерепное пространство – мозг» / Л.Н. Меркулов // Universum: технические науки. — 2023. — 1(106). — URL: https://7universum.com /ru/tech/archive/item/14919 (дата обращения: 29.10.2023).

9. Шарапов В.М. Электроакустические преобразователи / В.М. Шарапов, И.Г. Минаев. — М.: Техносфера, 2013. — 295 с.

10. Шарапов В.М. Пьезоэлектрические датчики / В.М. Шарапов, М.П. Мусиенко. — М.: Техносфера, 2006. — 635 с.

11. Яффе Б. Пьезоэлектрическая керамика / Б. Яффе, У. Кук, Г. Яффе. — М.: Мир, 1974. — 289 с.

Список литературы на английском языке / References in English

1. Akopyan V.A. Teoretiko-jeksperimental'nye metody opredelenija polnogo nabora sovmestimyh material'nyh konstant v teorii jelektrouprugosti [Theoretical and Experimental Methods for Determining the Complete Set of Compatible Material Constants in the Theory of Electroelasticity]: dis. ... of PhD in Tech. Sciences: 02/01/04: defended 07/26/2005: approved 12/14/2006 / Akopyan Vladimir Akopovich. — Rostov-on-Don, 2005. — 206 p. [in Russian]

2. Bogush M.V. Proektirovanie p'ezojelektricheskih datchikov na osnove prostranstvennyh jelektrotermouprugih modelej [Design of Piezoelectric Sensors Based on Spatial Electrothermoelastic Models] / M.V. Bogush. — M.: Tehnosfera, 2014. — 325 p. [in Russian]

3. Voronkov V.A. K voprosu o vybore modeli rascheta jelektroakusticheskogo trakta ul'trazvukovogo preobrazovatelja [On the Issue of Choosing a Model for Calculating the Electroacoustic Path of an Ultrasonic Transducer] / V.A. Voronkov, V.N. Danilov // Defektoskopija [Defectoscopy]. — 1996. — 27-32 p. [in Russian]

4. Dmitriev I.Ju. Jelektroaktivnye polimery na osnove poristyh pljonok polivinilidenftorida [Electroactive Polymers Based on Porous Films of Polyvinylidene Fluoride]: dis. ... of PhD in Phys. and Math. Sciences: 02.00.06: protected 05.31.2007: approved. 11.18.2007 / Dmitriev Ivan Jur'evich. — SPb., 2007. — 154 p. [in Russian]

5. Kochervinskij V.V. Strukturnye aspekty v jelektrofizicheskih svojstvah ftorsoderzhashhih gibkocepnyh kristallizujushhihsja polimerov [Structural Aspects in the Electrophysical Properties of Fluorine-containing Flexible-chain Crystallizing Polymers] / V.V. Kochervinskij. — M.: Nauka, 2003. — 336 p. [in Russian]

6. Korchaka A.V. Matematicheskaja model' izluchatelja sfericheskih voln v sloistoj srede [Mathematical Model of a Spherical Wave Emitter in a Layered Medium] / A.V. Korchaka, A.A. Jem // Vestnik inzhenernoj shkoly DVFU [Bulletin of the FEFU Engineering School]. — 2019. — № 1(38). — P. 128-133. [in Russian]

7. Korochencev V.I. Napravlennye i fokusirujushhie antenny v ob'emah, ogranichennyh poverhnost'ju proizvol'noj formy [Directional and Focusing Antennas in Volumes Limited by a Surface of Arbitrary Shape] / V.I. Korochencev. — Vladivostok: FEGTU's Publishing House, 2008. — 301 p. [in Russian]

8. Merkulov L.N. Issledovanie rasprostranenija akusticheskih voln v srede «kost' — vnutricherepnoe prostranstvo – mozg» [Study of the Propagation of Acoustic Waves in the Environment "Bone – Intracranial Space – Brain"] / L.N. Merkulov // Universum: tehnicheskie nauki [Universum: Technical Sciences]. — 2023. — 1(106). — URL: https://7universum.com /ru/tech/archive/item/14919 (accessed: 29.10.2023). [in Russian]

9. Sharapov V.M. Jelektroakusticheskie preobrazovateli [Electroacoustic Converters] / V.M. Sharapov, I.G. Minaev. — M.: Tehnosfera, 2013. — 295 p. [in Russian]

10. Sharapov V.M. P'ezojelektricheskie datchiki [Piezoelectric Sensors] / V.M. Sharapov, M.P. Musienko. — M.: Tehnosfera, 2006. — 635 p. [in Russian]

11. Jaffe B. P'ezojelektricheskaja keramika [Piezoelectric Ceramics] / B. Jaffe, U. Kuk, G. Jaffe. — M.: Mir, 1974. — 289 p. [in Russian]