

Электроакустические характеристики экспериментального преобразователя продольно-изгибного типа со сложной формой излучающей оболочки

А. К. Бритенков,^{*} Б. Н. Боголюбов,[†] В. А. Фарфель[‡]
 Институт прикладной физики Российской академии наук
 Россия, 603950, Нижний Новгород, ул. Ульянова, 46
 (Статья поступила 03.12.2019; Подписана в печать 09.01.2020)

Разработанный компактный гидроакустический излучатель с цельнометаллическим корпусом сложной формы из титана лишён проблем с герметизацией, традиционных для преобразователей такого типа, имеет большую эффективную площадь излучающей поверхности и чувствительность при одинаковых размерах с аналогами. Испытания экспериментального излучателя с активным элементом из 8 пьезокерамических колец показали, что на резонансе 1.7 кГц в воде такой излучатель имеет КПД около 30%, излучает акустическую мощность на уровне 70 Вт, демонстрируя ресурс не менее 10^{10} циклов. Высокая удельная мощность (более 300 Вт/м³) при ширине полосы 25% позволяет применять подобный излучатель для малогабаритных и миниатюрных гидроакустических систем, модемов и устройств управления в диапазоне частот от 1.6 – 2.5 кГц и до 12 – 18 кГц.

PACS: 47.35.Rs, 89.20.Bb, 89.20.Kk УДК: 534.873, 534.143, 534.134, 534.4

Ключевые слова: низкочастотный гидроакустический излучатель, пьезоэлектрический преобразователь, звукоподводная связь, гидроакустический модем, подводный автономный необитаемый аппарат с большой дальностью действия, механический трансформатор.

ВВЕДЕНИЕ

Низкочастотные гидроакустические излучатели (НЧИ) применяются в широком спектре практических приложений: от дальней звукоподводной связи и телеуправления до сейсмоакустической разведки [1]. Особую сложность для расчётов и изготовления имеют гидроакустические компактные и малогабаритные преобразователи размером корпуса менее 60 см ввиду прямой зависимости КПД излучателя и его рабочей частоты от волнового размера НЧИ, что больше определяется габаритами преобразователя, чем его конструктивным устройством. Ввиду прямой зависимости КПД излучателя и его рабочей частоты от размера излучающей поверхности, наибольшей эффективностью в сочетании с высокой технологичностью изготовления обладают пьезоэлектрические преобразователи продольно-изгибного типа, использующие принцип электромеханического трансформатора. Проблемой традиционных преобразователей продольно-изгибного типа является герметизация щелей, выполняемых для снижения рабочей частоты, определяемой жёсткостью корпуса. Альтернативным способом снижения поперечной жёсткости корпуса является волнообразное гофрирование излучающего элемента.

1. НИЗКОЧАСТОТНЫЕ ГИДРОАКУСТИЧЕСКИЕ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛИ ВЫСОКОЙ МОЩНОСТИ

Под низкочастотным, как правило, подразумевают излучатели, удовлетворяющие двум критериям, первым из которых является соотношение для волнового размера НЧИ [2]:

$$\frac{2\pi D}{\lambda} < 1, \quad (1)$$

где λ — длина звуковой волны, D — размер излучателя. Вторым критерием, определяющим принадлежность преобразователя к низкочастотным, в прикладных задачах подводной гидроакустики прямо считать излучение в диапазоне частот, находящимся ниже 1.5 – 2 кГц [2, 3].

В диапазоне частот ниже 100 Гц электромагнитные преобразователи [2] имеют ряд преимуществ по сравнению с НЧИ, использующими другие активные элементы. Механическая часть, настроенная на резонанс электромеханического преобразователя, повышает КПД НЧИ, что наряду с ресурсом излучателя является важнейшим параметром автономных излучающих систем. Магниты на основе редкоземельных металлов и магнитомягких материалов позволяют разрабатывать электромагнитные НЧИ с достаточной высокой мощностью при сравнительно низкой себестоимости. КПД НЧИ с электромагнитным преобразователем, разработанного ИПФ РАН для экспериментов по трансарктическому распространению звука и акустической термометрии Северного Ледовитого океана [3] достигал 95%, а ресурс составлял 10^8 – 10^9 циклов. Такие характеристики обеспечили автономность НЧИ в океане более года, в течение которого он излучал сигналы в диапазоне частот 19 – 22 Гц с акустической мощностью 250 Вт.

*E-mail: britenkov@ipfran.ru

†E-mail: boris@ipfran.ru

‡E-mail: vicfar@ipfran.ru

Однако слабой стороной электромагнитных НЧИ является высокая зависимость электроакустических параметров от стабильности рабочего зазора, в котором перемещается катушка преобразователя, что связано с точностью компенсации гидростатического давления. Эта особенность в совокупности с большими габаритами не позволяет использовать электромагнитные НЧИ в составе мобильных или глубоководных систем.

Баланс между размерами преобразователя и его КПД, полосой излучаемых частот и акустической мощностью достигается использованием пьезоэлектрических активных элементов для НЧИ, как правило, в сочетании с механическими трансформаторами. Другие технические решения конструкции НЧИ либо слишком громоздки и дороги [4], либо имеют ограничения диапазона рабочих глубин, а также формы и вида передаваемых сигналов.

Примером разработанного ИПФ РАН мощного пьезоэлектрического НЧИ является БиконTM — монополь поршневого типа с конусообразным излучающим корпусом [5]. БиконTM размером около 1 м имеет КПД до 80%, развивая акустическое давление 10 кПа/м при ресурсе до 10^{12} циклов. НЧИ подобной конструкции может использоваться без компенсатора гидростатического давления на глубинах до 300–400 м. Резонансная частота для данного типа преобразователя определяется размерами корпуса НЧИ и находится в пределах 300 – 1500 Гц. Однако, при уменьшении габаритных размеров НЧИ подобного типа (менее 30 см), чувствительность преобразователя по напряжению падает. Как следствие, миниатюрный и малогабаритный БиконTM будет иметь невысокую удельную мощность.

2. КОМПАКТНЫЕ И МАЛОГАБАРИТНЫЕ ГИДРОАКУСТИЧЕСКИЕ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛИ

НЧИ размером 60 см и менее считаются компактными и малогабаритными для мощной низкочастотной гидроакустики [2]. Наибольшую эффективность и технологичность изготовления для гидроакустических задач имеют преобразователи продольно-изгибного типа с пьезоэлектрическими активными элементами, использующими механический трансформатор, нагруженный на активно-реактивную нагрузку [6]. Такие НЧИ развивают высокую удельную мощность и применяются там, где требуется высокий уровень звукового давления (3 – 4 кПа/м) при малых размерах излучателя. Параметры преобразователя существенно зависят от формы оболочки и конструкции корпуса.

3. МАЛОГАБАРИТНЫЙ НЧИ ПРОДОЛЬНО-ИЗГИБНОГО ТИПА С КОРПУСОМ СЛОЖНОЙ ФОРМЫ

Традиционной проблемой преобразователей продольно-изгибного типа является герметизация

продольных прорезей корпуса, которые снижают рабочую частоту НЧИ, так как она в значительной степени определяется поперечной жёсткостью излучающей оболочки. В разработанном излучателе [7] снижение жёсткости корпуса выполнено волнообразным гофрированием, что снимает проблемы герметизации, увеличивает эффективную площадь излучения и повышает чувствительность НЧИ. Экспериментальный излучатель с корпусом из титана и пьезокерамическим активным элементом из 8 колец ЦТБС-3 размером $36 \times 14 \times 8$ мм при массе до 0.9 кг и габаритах менее 90 мм (рис. 1, а) имеет коэффициент механической трансформации более 25 [8]. Отсутствие поглощающего покрытия и сравнимая с конструктивной массой НЧИ присоединённая массы воды повышают КПД преобразователя по сравнению с излучателями аналогичных габаритов.

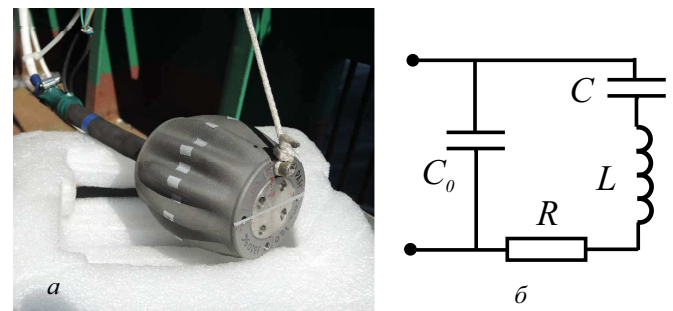


Рис. 1: а — Экспериментальный малогабаритный НЧИ продольно-изгибного типа с корпусом сложной формы и б — его эквивалентная схема в рабочей полосе частот. C_0 — ёмкость активного элемента преобразователя, L — индуктивность, вызванная влиянием присоединённой массы воды, C — ёмкость колебательного контура, определяемая конструктивной жёсткостью, R — сопротивление (потери при электро-механическом преобразовании и затраты энергии на излучение)

4. ЭЛЕКТРОАКУСТИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ И ПАРАМЕТРЫ ЭКВИВАЛЕНТНОЙ СХЕМЫ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОГО НЧИ

Измерение электроакустических характеристик [2] в гидроакустическом бассейне и открытой воде проведены для глубин от 1 до 80 м по методике, описанной в работе [6]. Для формирования ЛЧМ-сигналов и записи данных использованы АЦП и ЦАП на базе шасси NI cRIO-9031 и виртуальные приборы, разработанные на основе ПО LabView 2015. Записи осциллограмм тока, напряжения на НЧИ и сигнала с измерительного гидрофона показали наличие резонансов на частотах 1.7 и 12.5 кГц. Параметры электрической эквивалентной схемы НЧИ (рис. 1, б), определённые для рабочих диапазонов частот [8], приведены в таблице 1.

В диапазоне частот от 1.2 до 2.2 кГц электро-механический резонанс НЧИ на частоте 1.7 кГц обусловлен собственными частотами механической коле-

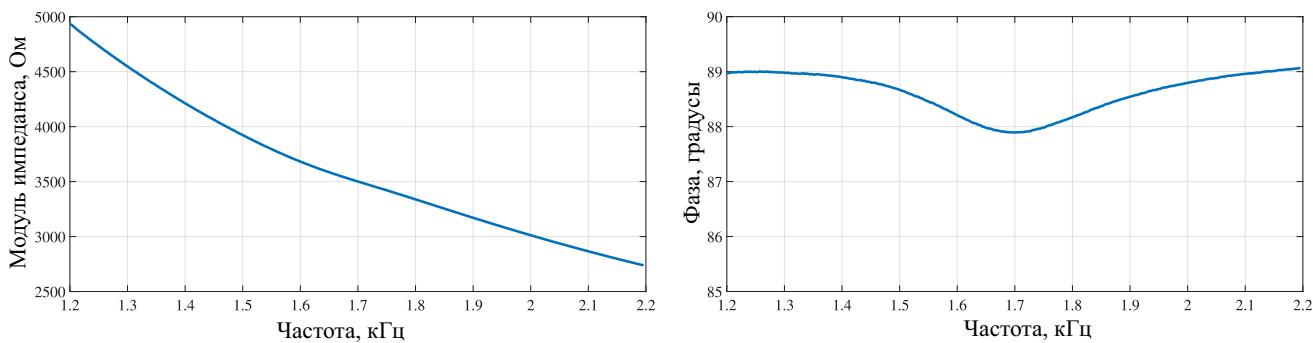


Рис. 2: Зависимость от частоты модуля импеданса и сдвига фаз между напряжением и током экспериментального НЧИ в полосе частот 1.2 – 2.2 кГц

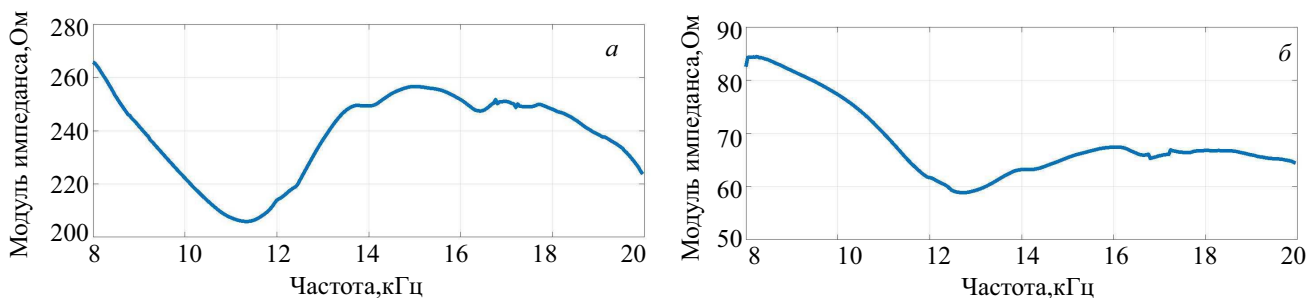


Рис. 3: Зависимость от частоты модуля импеданса и сдвига фаз между напряжением и током экспериментального НЧИ в полосе частот 8 – 20 кГц

Таблица I: Параметры эквивалентной схемы экспериментального НЧИ

Частота, кГц	C_0 , нФ	R , кОм	L , Гн	S , нФ
1.7	53.6	47.8	19.3	0.47
12.5	58.1	0.36	0.015	11.8

частот, приведены в таблице II.

Таблица II: Электроакустические характеристики экспериментального НЧИ

Резонансная частота, кГц	Ширина частотной характеристики, %	Максимальное значение чувствительности, Па×м/В
1.7	27	0.80
12.5	30	0.23

батальной системы излучателя и пьезокерамического столба и практически не связан с электрическим резонансом (рис. 2).

Для диапазона 8 – 20 кГц (рис. 3) электромеханический резонанс НЧИ на частоте 12.5 кГц определяется в большей степени электрическим резонансом, чем свойствами механической колебательной системы излучателя.

На рис. 4 приведены зависимости чувствительности излучателя по напряжению от частоты для частотных диапазонов 1.2 – 2.2 кГц и 8 – 20 кГц.

В связи с рассогласованием электрического и механического резонансов (рис. 3) чувствительность излучателя по напряжению для рабочей полосы частот в диапазоне частот 8 – 20 кГц ниже в 3.5 – 4 раза, чем для диапазона 1.2 – 2.2 кГц.

Основные электроакустические характеристики экспериментального гидроакустического излучателя (рис. 1, а), определённые для рабочих диапазонов

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Параметры экспериментального гидроакустического излучателя свидетельствуют о перспективности предложенной конструкции [3, 8] и технологии его изготовления [9]. Испытания в течение 10^{10} периодов подтверждают устойчивость излучателя к циклическим нагрузкам. Максимальная удельная акустическая мощность существующих компактных излучателей не превышает 250 кВт/м^3 . Для излучателя аналогичного размера и полосы частот [6] максимальная удельная акустическая мощность составляет $220 - 240 \text{ кВт/м}^3$, в то время как для экспериментального излучателя с гофрообразным корпусом эта величина превышает

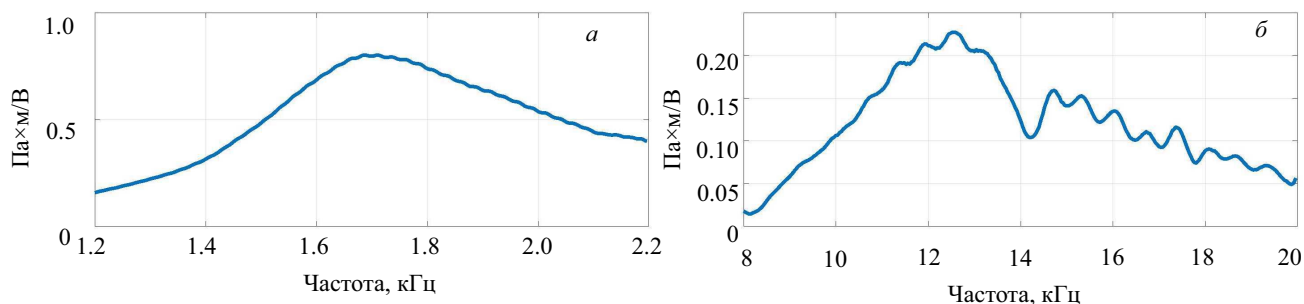


Рис. 4: Чувствительность излучателя в полосе частот 1.2 – 2.2 кГц и 8 – 20 кГц

350 кВт/м³. Для полосы до 2 кГц (рис. 4) излучатель такого размера имеет удельную мощность, большую, чем аналогичные компактные НЧИ. Оптимизация активного элемента и увеличение размера излучателя позволят проектировать компактные и малогабаритные НЧИ высокой удельной мощности для диапазонов частот 1 кГц и ниже.

Высокая удельная мощность и значительная относительная ширина полосы частот (более 25%)

позволяют применять подобный компактный излучатель для малогабаритных и миниатюрных гидроакустических систем, модемов [10], устройств управления, гидролокации и связи [11] в диапазонах частот от сотен герц до десятков килогерц.

Работа выполнена в рамках государственного задания ИПФ РАН (проект 0035-2019-0019).

- [1] Богородский В. В., Зубарев Л. А., Корепин Е. А., Якушев В. И. Подводные электроакустические преобразователи. Судостроение. JL., 1983.
- [2] Woollet R. Sonar Transducer Fundamentals. Newport—New London: Naval Underwater Systems Center, 1986.
- [3] Бритенков А. К., Боголюбов Б. Н., Смирнов С. А., Перфилов В. А. // Учёные записки физического факультета московского университета. 2017. № 5. С. 1750104-1.
- [4] Mosca F., Matte G., Shimura T. // J. Acoust. Soc. Am. 2013. **133**(1). P. EL61.
- [5] Боголюбов Б. Н., Бритенков А. К., Кирсанов А. В., Перфилов В. А., Смирнов С. А., Фарфель В. А. // Тр. Второй российско-белорусской научно-технической конференции «Элементная база отечественной радиоэлектроники: импортозамещение и применение» им. О. В. Лосева. Нижний Новгород. 2015. С. 361.
- [6] Боголюбов Б. Н., Кирсанов А. В., Леонов И. И., Смирнов С. А., Фарфель В. А. // Гидроакустика. 2015. № 23(3). С. 20.
- [7] Бритенков А. К., Боголюбов Б. Н., Смирнов С. А. Продольно-изгибный гидроакустический преобразователь. № 7.
- [8] Бритенков А. К., Боголюбов Б. Н., Дерябин М. С., Фарфель В. А. // Труды МАИ. 2019. № 105. С. 1.
- [9] Назаров А. П. // Вестник МГТУ «Станкин». 2011. **1**(16). № 4. С. 46.
- [10] Шустов А. С. // Сборник научных работ XIII Международной научной конференции Евразийского научного объединения. М.: ЕНО. 2016. С. 45.
- [11] Sherman C. H., Butler J. L. Transducers and arrays for underwater sound. New York: Springer, 2007.

Electro-acoustic characteristics of the experimental transducer of longitudinally flexural type with complex shape of the radiating cover

A. K. Britenkov^a, B. N. Bogolyubov^b, V. A. Farfel^c

Center of Hydro-acoustics, Institute of Applied Physics of the Russian Academy of Sciences
Nizhny Novgorod 603950, Russia

E-mail: ^abritenkov@ipfran.ru, ^bboris@ipfran.ru, ^cvicfar@ipfran.ru

The developed compact hydroacoustic radiator with all-metal titanium case of complex shape has no problem with sealing, typical for such kind of transducers, has big effective radiation area and sensitivity as compared to analogs with similar dimensions. Test results of the radiator with active element, having 8 rings 36 × 14 × 8 mm of composite "TsTBS-3 showed that such radiator has efficiency about 30%, is capable to radiate acoustic power at the level of 70 W in water at resonance frequency of 1.7 kHz, has resource more than 10¹⁰ cycles. High power density (above 300 W/m³) and band width of 25% allow to apply such a transducer for small-size and miniature hydroacoustic systems, modems, control devices in frequency range from 1.6 – 2.5 kHz and up to 12 – 18 kHz.

PACS: 47.35.Rs, 89.20.Bb, 89.20.Kk.

Keywords: low-frequency hydroacoustic radiator, piezoelectric transducer, underwater communication, hydroacoustic modem, autonomous unmanned vehicles with a long range, mechanical transformer.

Received 3 December 2019.

Сведения об авторах

1. Бритенков Александр Константинович — канд. физ.-мат. наук, ст. науч. сотрудник; тел.: (831) 416-47-64, e-mail: britenkov@ipfran.ru.
 2. Боголюбов Борис Николаевич — канд. техн. наук, зав. лаб. прикладной гидроакустики; тел.: (831) 436-66-17, e-mail: bogis@ipfran.ru.
 3. Фарфель Виктор Александрович — науч. сотрудник; тел.: (831) 416-47-64, e-mail: vicfar@ipfran.ru.
-