**Сравнительный анализ электроакустических характеристик
компактных низкочастотных гидроакустических излучателей
высокой удельной мощности***А. К. Бритенков, В. А. Фарфель, Б. Н. Боголюбов*

В работе анализируются характерные особенности и принципиальные различия электроакустических характеристик и импедансных спектров компактных низкочастотных гидроакустических пьезоэлектрических излучателей высокой удельной мощности продольно-изгибного, встречно-поршневого и инерционно-изгибного типов. Анализ и сопоставление электроакустических характеристик преобразователей разных типов позволяет определить направление конструкторского поиска и варианты технических решений для преодоления противоречий между компактными размерами, шириной полосы, чувствительностью, низкой резонансной частотой и КПД гидроакустического излучателя. Приведены примеры использования рассмотренных типов преобразователей для разных классов задач гидроакустики.

Ключевые слова: гидроакустический излучатель, пьезоэлектрический преобразователь, электромеханический трансформатор, электрический импеданс, звукоподводная связь, гидроакустический модем.

DOI: 10.51368/1996-0948-2021-3-72-77

Введение

Приложения низкочастотных гидроакустических излучателей (НЧИ) довольно обширны: от дальней звукоподводной связи и телеуправления до сейсмоакустической разведки. КПД излучателя и его рабочая частота напрямую зависят от волнового размера НЧИ,

что определяется как габаритами преобразователя, так и его конструктивным устройством [1]. Так как гидроакустический преобразователь представляет собой совокупность механических и электрических цепей, в которых происходит преобразование электрической энергии сигнала в механические колебания окружающей среды [2], то зависимости от частоты электрического импеданса и чувствительности излучателя по напряжению имеют различия [3]. Ввиду прямой зависимости КПД излучателя и его рабочей частоты от размера излучающей поверхности, проблематично изготовить компактный НЧИ с широкой рабочей полосой частот (порядка 50 % относительно резонансной или более) и высокой эффективностью (более 60 %) [4]. Кроме того, в большинстве случаев габариты НЧИ ограничивают возможность совмещения резонансов активного элемента и механической колебательной системы [5].

Целью данной работы является анализ особенностей и различий электроакустических характеристик (ЭАХ) НЧИ высокой

Бритенков Александр Константинович^{1,2}, с.н.с.,
к.ф.-м.н., доцент.

E-mail: britenkov@ipfran.ru

Фарфель Виктор Александрович¹, н.с.

E-mail: vicfar@ipfran.ru

Боголюбов Борис Николаевич¹, зав. лабораторией,
к.т.н.

E-mail: boris@ipfran.ru

¹ Институт прикладной физики Российской академии наук (ИПФ РАН).

Россия, 603950, г. Нижний Новгород, ул. Ульянова, 46.

² ННГУ им. Н. И. Лобачевского.

Россия, 603095, г. Нижний Новгород, пр. Гагарина, 23.

Статья поступила в редакцию 26 апреля 2021 г.

© Бритенков А. К., Фарфель В. А., Боголюбов Б. Н.,
2021

удельной мощности разных типов (преобразователей с различным акустическим оформлением) в интересах оптимизации конструктивных решений как при расчётах и разработке, так и при изготовлении.

Низкочастотные гидроакустические преобразователи

Низкочастотными обычно называются преобразователи, удовлетворяющие двум критериям, первым из которых является волновой размер [3], удовлетворяющий условию

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

где λ – длина звуковой волны, D – размер излучателя. Излучение в диапазоне частот 1,5–2 кГц и ниже [5, 6] принято считать вторым критерием, определяющим принадлежность преобразователя к низкочастотным.

Компактные и малогабаритные гидроакустические преобразователи размером менее 60 см представляют особую сложность для расчётов и изготовления. КПД излучателя и его рабочая частота напрямую зависят от волнового размера НЧИ [1], что определяется как габаритами преобразователя, так и его конструктивным устройством.

НЧИ высокой удельной мощности

Для частот ниже 100 Гц преобразователи с электромагнитными активными элементами [1] имеют ряд преимуществ по сравнению с НЧИ, использующими другие принципы трансформации энергии в излучение.

При совпадении собственных частот механической колебательной системы и электромеханического преобразователя, КПД излучателя достигает 90 % и более, что, наряду с ресурсом, является важнейшим параметром для автономных излучающих систем. Магниты на основе редкоземельных металлов и магнитомягких материалов при низкой себестоимости обеспечивают акустическую мощность излучения на уровне 250 Вт и более. Пример такого излучателя представлен на рис. 1.

Рис. 1. НЧИ с электромагнитным преобразователем, разработанный в ИПФ РАН для акустической термометрии океанского климата [6].

КПД подобных НЧИ достигает 95 %, а ресурс составляет 10^8 – 10^9 циклов. Зависимость электроакустических параметров электромагнитных НЧИ от стабильности зазора между подвижной системой (катушкой) и магнитами, а также большой вес и габариты электромагнитных НЧИ ограничивает глубокое использование преобразователей этого типа.

Баланс между размерами преобразователя и его КПД, полосой излучаемых частот и акустической мощностью достигается использованием в НЧИ пьезокерамических активных элементов.

Для НЧИ размером около 1 м оптимальным решением является БиконTM – разработанный в ИПФ РАН монополюс встречно-поршневого типа с конусообразным излучающим корпусом.

БиконTM (см. рис. 2) имеет КПД до 70–80 %, развивая акустическое давление 10 кПа при ресурсе до 10^{12} циклов. НЧИ БиконTM можно использовать без компенсатора гидростатического давления на глубинах до 300–400 м.

Рис. 2. Малогабаритный НЧИ типа БиконTM.

Уменьшение габаритных размеров НЧИ подобного типа (менее 0,2 м) ведёт к падению чувствительности преобразователя по напряжению из-за уменьшения длины активного элемента и снижения амплитуды колебаний излучающей оболочки. Миниатюрный БиконTM будет иметь невысокую удельную мощность, поэтому излучатели встречно-поршневого типа целесообразно использовать при габаритных размерах корпуса НЧИ не менее 0,2 м.

Компактные и малогабаритные гидроакустические преобразователи

Наибольшей эффективностью и технологичностью изготовления при ограниченных размерах (0,6 м и менее) обладают преобразователи продольно-изгибного типа (см. рис. 3).

Рис. 3. Компактный НЧИ продольно-изгибного типа с пьезоэлектрическим активным элементом.

Параметры преобразователя такой конструкции существенно зависят от формы и герметизирующего покрытия излучающей оболочки [3, 7].

Проблемой таких преобразователей является герметизация щелей, выполняемых для снижения рабочей частоты, определяемой жёсткостью корпуса. Эффективным способом снижения поперечной жёсткости корпуса НЧИ является гофрирование излучающей оболочки (рис. 4). Преобразователь «3D НЧИ» устойчив к циклическим нагрузкам (ресурс более 10^{10} циклов), имеет очевидные преимущества и малый разброс параметров при серийном изготовлении.

Рис. 4. НЧИ продольно-изгибного типа с излучающей оболочкой сложной формы («3D НЧИ»).

Связанные колебательные системы в конструкции малогабаритных излучателей являются одним из способов повышения эффективности НЧИ.

Примером НЧИ с подобным конструктивным решением является преобразователь инерционно-изгибного типа с пьезокерамическим активным элементом (рис. 5). Работа излучателя этого типа основана на передаче изгибных колебаний пластин с вклеенными пьезокерамическими кольцами на излучающие мембраны. Активный элемент этого излучателя имеет поперечную поляризацию, изменяя диаметр при подаче электрического напряжения.

Рис. 5. НЧИ инерционно-изгибного типа с пьезоэлектрическим активным элементом.

Отличительной особенностью НЧИ инерционно-изгибного типа является исключение влияния внешнего гидростатического давления на активный элемент преобразователя, благодаря чему в таком излучателе практически отсутствует изменение частоты с глубиной.

Сравнение параметров компактных пьезоэлектрических НЧИ

Измерение электроакустических характеристик (ЭАХ) НЧИ проводилось на глубинах от 5 до 70 м по изложенной в работе [7] методике. Глубина места испытаний составляла более 10–15 длин излучаемых звуковых волн. Ввиду малой длины кабеля связи измерения выполнялись без учёта его влияния [2].

Параметры эквивалентной схемы НЧИ, представляющей собой последовательный колебательный контур с параллельно включённой статической ёмкостью активного элемента [2], определены на основе данных о реальной и мнимой частях электрического

импеданса [8]. Результаты измерений ЭАХ компактных гидроакустических излучателей

различных типов и параметры их электрических эквивалентных схем сведены в таблицу.

Таблица

Сравнение компактных НЧИ с пьезоэлектрическими активными элементами

Параметр	Тип НЧИ			
	Встречно-поршневой «Бикон TM »	Продольно-изгибный	Инерционно-изгибный	Продольно-изгибный «3D НЧИ»
Максимальные габариты (длина×диаметр), мм	450×380	139×52	80×170	118×86
Размер активного элемента (длина×диаметр), мм	400×100	114×36,5	14×100	76,6×36,5
Снаряжённая масса в воздухе, кг	40	1,0	3,3	1,0
Максимальная рабочая глубина, м	350	250	300	250
Частота основного резонанса в воздухе, кГц	1,6	3,5	4,5	4
Частота основного резонанса в воде, кГц	1,4	1,5	3,5	1,7
Относительная ширина рабочей полосы частот, % от резонансной частоты	30	13	11	27
Дрейф частоты по глубине, Гц/м	– 0,28	0,35	менее 0,1	0,6
Чувствительность по напряжению на резонансе, Па×м/В	24	1,5	3,0	0,9
Рабочее напряжение, В	600	500	700	700
Развиваемая акустическая мощность, Вт	1700	5	30	3
КПД, %	70	25	50	28
Статическая ёмкость активного элемента, нФ	520	94,1	18,4	53,6
Реальная часть импеданса (на резонансе), кОм	0,18	0,42	0,04	1,75
Удельная мощность, кВт/м ³	75	17	17	10

Для основной (рабочей) полосы частот в диапазоне от 1,2 до 2,2 кГц электромеханический резонанс, за исключением НЧИ инерционно-изгибного типа, обусловлен собственными частотами механической колебательной системы излучателя и активного элемента, и он практически не связан с электрическим резонансом. Все представленные в таблице излучатели предназначены для работы в одинаковом диапазоне глубин, но при этом отрицательный градиент дрейфа частоты с глубиной наблюдается только у НЧИ типа БиконTM. Почти все рассмотренные излучатели имеют практически линейную зависимость излучаемой акустической мощности от размеров активного элемента. Характерно, что КПД излучателя существенно зависит от конструкции НЧИ, т. е. от акустического оформления активного элемента. Механический трансформатор, используемый в малогабаритных НЧИ продольно-изгибного типа, увеличивает влияние присоединённой массы воды, повышая отдачу преобразователя. С другой стороны,

именно эта особенность приводит к дрейфу частоты с глубиной погружения НЧИ, что в некоторых случаях требует компенсатора гидроакустического давления. Однако во многих приложениях гидроакустики [9] с использованием малогабаритных излучателей продольно-изгибного типа [7] с рабочей полосой частот 25–30 %, например, в гидроакустических модемах, дрейф частоты не критичен, поскольку не превышает нескольких десятков Гц на всём эшелоне глубин.

Заключение

Представленные компактные НЧИ разработки ИПФ РАН, несмотря на сходный частотный диапазон, существенно различаются по характеристикам: чувствительность по напряжению – от 0,9 до 24 Па×м/В, относительная ширина полосы частот от 11 до 30 %, КПД от 25 до 70 %, вес от 1 до 40 кг. Интегральное сравнение преобразователей показывает, что наибольшую удельную мощность имеют НЧИ

встречно-поршневого типа – более 75 кВт/м^3 , наименьший дрейф частоты по глубине у преобразователя инерционно-изгибного типа (менее $0,1 \text{ Гц/м}$), а наибольшую эффективность на единицу массы (более $28 \text{ \% /кг}$) продемонстрировал НЧИ продольно-изгибного типа со сложной формой излучающей оболочки «3D НЧИ» [10].

Сравнение представленных в настоящей работе излучателей с известными аналогами [3, 9, 11] позволяет сделать вывод, что их ключевые характеристики ввиду ограничений на массогабаритные показатели НЧИ практически приближены к максимально достижимым.

Каждый из представленных типов преобразователей является оптимальным для определённого класса задач. Так, для автономных излучающих систем малой мощности со сменой рабочей глубины в эшелоне глубин до 400 м оптимальным является использование излучателя инерционно-изгибного типа. Однако в качестве источника полей высокой интенсивности БиконTM является более предпочтительным решением. Излучатели продольно-изгибного типа лучше подходят для протяжённых излучающих фазированных антенных решеток.

Полученные оценки параметров преобразователей следует учитывать при разработке новых изделий на основе системного подхода, используя морфологический метод [12] в неформализованных задачах поиска технических решений. Как показано в работе [12], применение подобного подхода на основе проведённого анализа обеспечивает оптимальный выбор конструктивного устройства и используемых материалов [13, 14] с учётом необходимых характеристик излучателей в рамках гидроакустических приложений, под которые ведётся разработка конкретных моделей НЧИ [4].

Авторы выражают благодарность заведующему лабораторией экспериментальной электроники В. А. Перфилову, заведующему отделом акустики океана Д. А. Касьянову и

заместителю директора по науке ИПФ РАН П. И. Коротину за внимание к работе, помощь в подготовке и организации испытаний, а также обсуждении результатов.

Работа выполнена в рамках государственного задания ИПФ РАН «Распространение звука в морской среде и земной коре» (проект № 0030-2021-0018).

ЛИТЕРАТУРА

1. Woollet R. Sonar Transducer Fundamentals. Newport – New London: Naval Underwater Systems Center, 1986.
2. Бритенков А. К., Канаков О. И. // Учёные записки физического факультета МГУ им. М. В. Ломоносова. 2020. № 1. С. 2010303-1.
3. Андреев М. Я., Боголюбов Б. Н., Ключин В. В., Рубанов И. Л. // Датчики и системы. 2010. № 12. С. 51.
4. Шаврин С. А. Проблемные вопросы изготовления гидроакустических преобразователей. / Сборник докладов Первой научно-практической конференции молодых специалистов интегрированной структуры АО «Концерн «Океанприбор» «ИСТОК-2016» (Санкт-Петербург. 2016). С. 121–125.
5. Mosca F., Matte G., Shimura T. // J. Acoust. Soc. of America. 2013. Vol. 133(1). P. EL61.
6. Козубская Г. И., Кудряшов В. М., Сабинин К. Д. // Акустический журнал. 1999. Т. 45. № 2. С. 250.
7. Бритенков А. К., Боголюбов Б. Н., Дерябин М. С., Фарфель В. А. // Труды МАИ. 2019. № 105. С. 1.
8. Боголюбов Б. Н., Кирсанов А. В., Леонов И. И., Смирнов С. А., Фарфель В. А. // Гидроакустика. 2015. № 23(3). С. 20.
9. Sherman C. H., Butler J. L. Transducers and arrays for underwater sound. – New York: Springer, 2007.
10. Бритенков А. К., Боголюбов Б. Н., Смирнов С. А. Продольно-изгибный гидроакустический преобразователь. Патент RU 2681268. Опубликовано 05.03.2019. Бюл. № 7.
11. Quer R., Dasseux C. // Proc. of the Institute of Acoustics. 1999. Vol. 21. P. 117.
12. Бритенков А. К. Обработка информационных представлений сигналов с помощью ОСАМ. – Саарбрюккен: Lambert Academic Publishing. 2016.
13. Чумаков Д. М. // Труды МАИ. 2014. № 78. С. 31.
14. Бритенков А. К., Боголюбов Б. Н., Смирнов С. А., Перфилов В. А. // Учёные записки физического факультета МГУ им. М. В. Ломоносова. 2017. № 5. С. 1750104-1.

Comparison and analysis of electroacoustic characteristics of high power density compact low frequency hydroacoustic transducers

A. K. Britenkov^{1,2}, V. A. Farfel¹, and B. N. Bogolyubov¹

¹ Institute of Applied Physics of Russian Academy of Sciences (IAP RAS)
46 Ul'yanov st., Nizhny Novgorod, 603950, Russia
E-mail: britenkov@ipfran.ru

² Lobachevsky University
23 Prospekt Gagarina, Nizhny Novgorod, 603095, Russia

Received April 26, 2021

Typical features and principal differences of electroacoustic characteristics and impedance spectra of compact low-frequency hydroacoustic piezoelectric radiators of high power-density to-weight ratio of the longitudinal-bending, oncoming-piston and inertial-bending types are presented in the paper. Analysis and comparison of electroacoustic characteristics of different types transducers allow to clear the direction of design search. This is also important to specify technical solutions to overcome contradictions between compact dimensions, bandwidth, sensitivity, low resonance frequency and efficiency of hydroacoustic radiators. Using the considered types of transducers for different classes of hydroacoustics applications are suggested.

Keywords: hydroacoustic radiator, piezoelectric transducer, electro-mechanical transformer, electrical impedance, underwater communication, hydroacoustic modem.

DOI: 10.51368/1996-0948-2021-3-72-77

REFERENCES

1. R. Woolet, *Sonar Transducer Fundamentals* (Naval Underwater Systems Center, Newport – New London, 1986).
2. A. K. Britenkov and O. I. Kanakov, *Uchenye zapiski fizicheskogo fakul'teta moskovskogo universiteta*, No. 1, 2010303-1 (2020).
3. M. Y. Andreev, B. N. Bogolyubov, V. V. Klyushin, and I. L. Rubanov, *Datchiki & Systemi (Sensors & Systems)*, No. 12, 51 (2010).
4. S. A. Shavrin, in *Proc. of I Workshop «ISTOK-2016»* (S.-Petersburg, 2016). pp. 121–125.
5. F. Mosca, G. Matte, and T. Shimura, *J. Acoust. Soc. of America* **133** (1), EL61 (2013).
6. G. I. Kozubskaya, V. M. Kudryashov, and K. D. Sabinin, *Acoust. Journal* **45** (2), 250 (1999).
7. A. K. Britenkov, B. N. Bogolyubov, M. S. Deryabin, and V. A. Farfel, *Trudi MAI*, No. 105, 1 (2019).
8. B. N. Bogolyubov, A. V. Kirsanov, I. I. Leonov, S. A. Smirnov, and V. A. Farfel, *Hydroacoustics* **23** (3), 20 (2015).
9. C. H. Sherman and J. L. Butler, *Transducers and arrays for underwater sound* (Springer, New York, 2007).
10. A. K. Britenkov, B. N. Bogolyubov, and S. A. Smirnov, *Longitudinal-bending hydroacoustic transducer*. RF Patent 2681268. Bulletin No. 7 (2019).
11. R. Quer and C. Dasseux, *Proc. of the Institute of Acoustics* **21**, 117 (1999).
12. A. K. Britenkov, *Processing of information representations of signals using OSAM* (Lambert Academic Publishing, Saarbrücken, 2016).
13. D. M. Chumakov, *Trudi MAI*, No. 78, 31 (2014).
14. A. K. Britenkov, B. N. Bogolyubov, S. A. Smirnov, and V. A. Perfilov, *Uchenye zapiski fizicheskogo fakul'teta moskovskogo universiteta*, No. 5, 1750104-1 (2017).