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

**СРАВНЕНИЕ И АНАЛИЗ ЭЛЕКТРОАКУСТИЧЕСКИХ
ХАРАКТЕРИСТИК НИЗКОЧАСТОТНЫХ
ГИДРОАКУСТИЧЕСКИХ ИЗЛУЧАТЕЛЕЙ ВЫСОКОЙ
УДЕЛЬНОЙ МОЩНОСТИ**

*Институт прикладной физики Российской академии наук
Россия, 603950, Нижний Новгород, ул. Ульянова, д. 46,
Тел.: +7-(831) 416-47-64,
E-mail: britenkov@ipfran.ru, vicfar@ipfran.ru, boris@ipfran*

Конструктивные и физические ограничения затрудняют возможности разработки компактных низкочастотных гидроакустических излучателей с полосой более 30% от резонансной частоты и высоким КПД. Вследствие этого анализ и сопоставление электроакустических характеристик преобразователей разных типов позволяет определить направление конструкторского поиска и технические решения для преодоления противоречий между компактными размерами, шириной полосы, чувствительностью, низкой резонансной частотой и КПД гидроакустического излучателя. В работе приведены характерные особенности и различия электроакустических характеристик и импедансных спектров компактных низкочастотных гидроакустических пьезоэлектрических излучателей высокой удельной мощности продольно-изгибного, встречно-поршневого и инерционно-изгибного типов.

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

Компактные и малогабаритные гидроакустические преобразователи размером менее 60 см имеют особую сложность для расчетов 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. Совокупность механических и электрических цепей НЧИ, в которых происходит преобразование электрической энергии в механические колебания окружающей среды [2], приводит к различиям в характере электрического импеданса

и других электроакустических характеристик [3]. Зависимость КПД излучателя и его рабочей частоты от размера излучающей поверхности осложняет разработку компактных НЧИ с полосой более 40% и КПД более 60%. Габаритные размеры накладывают конструктивные ограничения и на возможность совмещения резонансов активного элемента и механической колебательной системы [3]. Анализ особенностей НЧИ высокой удельной мощности разных типов позволяет оптимизировать конструктивные решения при их разработке и изготовлении.

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.

Рис. 1. НЧИ с электромагнитным преобразователем, разработанный ИПФ РАН для акустической термометрии океанского климата [4].

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 (рис. 1). 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, 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.

Рис. 2. Малогабаритный НЧИ типа БиконТМ.

Для НЧИ размером около 1 м оптимальным решением является БиконТМ – разработанный в ИПФ монополь встречно-поршневого типа с конусообразным излучающим корпусом. БиконТМ (рис. 2) имеет КПД до 70–80%, развивая акустическое давление 10 кПа×м при ресурсе до 1012 циклов. НЧИ БиконТМ можно использовать без компенсатора гидростатического давления на глубинах до 300–400 м.

Уменьшение габаритных размеров НЧИ подобного типа (менее 0.2 м) ведет к падению чувствительности преобразователя по напряжению из-за уменьшения длины активного элемента и снижения амплитуды колебаний излучающей оболочки. Миниатюрный БиконТМ будет иметь невысокую удельную мощность, поэтому излучатели встречно-поршневого типа целесообразно использовать при размерах корпуса НЧИ не менее 0.2–0.5 м.

Компактные и малогабаритные гидроакустические преобразователи. Наибольшей эффективностью и технологичностью изготовления при ограниченных размерах (0.6 м и менее) обладают преобразователи **продольно-изгибного типа** (рис. 3). Параметры преобразователя такой конструкции существенно зависят от формы и герметизирующего покрытия излучающей оболочки [2, 5].

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

Проблемой таких преобразователей является герметизация щелей, выполняемых для снижения рабочей частоты, определяемой жесткостью корпуса. Эффективным способом снижения поперечной жесткости корпуса НЧИ является гофрирование излучающей оболочки (рис. 4). «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 клеенными 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 пьезоэлементом.

В таком НЧИ гидростатическое давление не влияет на активный элемент.

Сравнение параметров компактных пьезоэлектрических НЧИ. Измерение электроакустических характеристик (ЭАХ) НЧИ проведено

на глубинах от 5 до 70 м по изложенной в работе [5] методике. Глубина места составляла более 10–15 длин излучаемых звуковых волн. Ввиду малой длины кабеля связи измерения выполнялись без учета его влияния [6].

Результаты измерений ЭАХ НЧИ различных типов приведены в таблице 1.

Таблица 1. Сравнение компактных НЧИ с пьезоэлектрическими активными элементами

Тип НЧИ	Встречно-поршневой «Би-конТМ»	Продольно-изгибный	Инерционно-изгибный	Продольно-изгибный «3D НЧИ»
Параметр				
Максимальные габариты (длина×диаметр), мм	450×380	139×52	170×80	118×86
Активный элемент (длина×диаметр), мм	400×100	114×36.5	14×100	76.6×36.5
Снаряженная масса в воздухе, кг	40	1	3.3	0.98
Максимальная 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
Ширина рабочей полосы частот, %	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 емкость активного элемента, нФ	520	94.1	18.4	53.6
Реальная часть импеданса на резонансе, кОм	0.18	0.42	0.04	1.75

Для основного резонанса в диапазоне частот 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 практически не связан с электрическим резонансом. Все излучатели предназначены для работы в одинаковом диапазоне глубин, при этом отрицательный градиент дрейфа частоты с глубиной наблюдается только у НЧИ типа БиконТМ. Почти все рассмотренные излучатели показали прямую 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 присоединенной массы воды, повышая отдачу преобразователя. С другой стороны, именно это обстоятельство приводит к дрейфу частоты с глубиной погружения НЧИ, что в некоторых случаях требует компенсатора гидроакустического давления. Однако во многих приложениях гидроакустики с использованием малогабаритных излучателей продольно-изгибного типа [2, 5] с рабочей полосой частот более 20–25 %, дрейф частоты не критичен, поскольку не превышает нескольких десятков Гц во всем диапазоне глубин.

Выводы. Представленные компактные НЧИ, разработанные в ИПФ РАН, не смотря на сходный частотный диапазон, существенно различаются по характеристикам: чувствительность – от 0,9 до 24 Па×м/В, ширина полосы – 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 и инерционно-изгибного типа – более 8 кВт/м³, наивысшей стабильностью частоты по глубине обладает преобразователь инерционно-изгибного типа (менее 2%), а наибольшую эффективность на единицу массы (более 28%/кг) продемонстрировал НЧИ продольно-изгибного типа со сложной формой излучающей оболочки «3D НЧИ».

Литература

1. Woollet R. Sonar Transducer Fundamentals. Newport – New London: Naval Underwater Systems Center, 1986. 102 p.
2. Андреев М.Я., Боголюбов Б.Н., Ключин В.В., Рубанов И.Л. Низкочастотный малогабаритный продольно-изгибный электроакустический преобразователь // Датчики и системы. 2010. № 12. С. 51–55.
3. Mosca F., Matte G., Shimura T. Low frequency source for very long-range underwater communication // Journal of the Acoustical Society of America. 2013. Vol. 133 (1). P. EL61–EL67.

4. Козубская Г.И., Кудряшов В.М., Сабинин К.Д. О возможности акустической галинометрии Арктического бассейна // Акустический журнал. 1999. Т. 45. № 2. С. 250–257.
5. Бритенков А.К., Боголюбов Б.Н., Дерябин М.С., Фарфель В.А. Измерение электромеханических характеристик компактного низкочастотного гидроакустического излучателя сложной формы // Труды МАИ. 2019. № 105. С. 1–24.
6. Бритенков А.К., Канаков О.И. Влияние первичных параметров соединительного кабеля на точность измерений электроакустических характеристик мощных низкочастотных гидроакустических излучателей // Ученые записки физического факультета МГУ им. М.В. Ломоносова. 2020. № 1. С. 2010303–12010303-4.

A.K. Britenkov, V.A. Farfel, B.N. Bogolyubov

COMPARISON AND ANALYSIS OF ELECTROACOUSTIC CHARACTERISTICS HIGH POWER DENSITY LOW FREQUENCY HYDROACOUSTIC TRANSDUCERS

*Institute of Applied Physics of the Russian Academy of Sciences
Ul'yanov Street, 46, Nizhny Novgorod, 603950, Russia,
Tel: +7-(831) 416-47-64,
E-mail: britenkov@ipfran.ru, vicfar@ipfran.ru, boris@ipfran.ru*

Structural and physical constraints make it difficult to develop compact low-frequency hydroacoustic emitters with a bandwidth of more than 30 % of the resonant frequency and high efficiency. As a result, the analysis and comparison of electroacoustic characteristics of transducers of different types makes it possible to determine the direction of the design search and technical solutions to overcome the contradictions between compact dimensions, bandwidth, sensitivity, low resonance frequency and efficiency of the hydroacoustic emitter. The paper presents the characteristic features and differences in the electroacoustic characteristics and impedance spectra of compact low-frequency hydroacoustic piezoelectric emitters of high specific power of the longitudinal-bending, counter-piston and inertial-bending types obtained during field tests.

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

References

1. Woollet R. Sonar Transducer Fundamentals. Newport – New London: Naval Underwater Systems Center, 1986, 102 p.
2. Andreev M.Y., Bogolybov B.N., Rkyshin V.V., and Rubanov I.L. Low-frequency small-sized longitudinal-bending electroacoustics transducer. Datchiki & Systemi (Sensors & Systems), 2010, Vol. 12, pp. 51–55.2.

3. Mosca F., Matte G., and Shimura T. Low-frequency source for very long-range underwater communication. *Journal of the Acoustical Society of America*, 2013, Vol. 133, No. 1, pp. EL61–EL67.
4. Kozubskaya G.I., Kudryashov V.M., and Sabinin K.D. On the Possibility of Acoustic Galinometry of the Arctic Basin. *Acoustic Journal*, 1999, Vol. 45, No. 2, pp. 250–257.
5. Britenkov A.K., Bogolyubov B.N., Deryabin M.S., and Farfel V.A. Electromechanical characteristics of a compact low-frequency hydroacoustics transducer with complex radiator's shape. *Trudi MAI*, 2019, No. 105, pp. 1–24.
6. Britenkov A.K. and Kanakov O.I. Influence of feeder cable parameters upon accuracy in measurements of characteristics of powerful low-frequency underwater electroacoustic transducers. *Uchenye zapiski fizicheskogo fakul'teta moskovskogo universiteta*, 2020, No. 1, pp. 2010303-12010303-4.