

Характеристики компактного гидроакустического преобразователя высокой удельной мощности в режимах излучения и приёма

© А. К. Бритенков^{1,2*}, Б. Н. Боголюбов¹, Р. В. Травин¹, В. А. Фарфель¹, И. И. Леонов¹,
Д. А. Костеев¹

¹ Институт прикладной физики им. А. В. Гапонова-Грехова Российской академии наук,
г. Нижний Новгород, 603951 Россия
* E-mail: britenkov@ipfran.ru

² Нижегородский государственный университет им. Н. И. Лобачевского,
г. Нижний Новгород, 603022, Россия

Статья поступила в редакцию 5.11.2025; после доработки 27.11.2025; принята к публикации 27.04.2026
Шифр научной специальности: 1.3.4

Представлены результаты электроакустических измерений компактного преобразователя со сложной формой цельнометаллического корпуса, как в режиме излучения, так и приёма гидроакустических сигналов. Излучаемая таким преобразователем акустическая мощность превышает 38 Вт для квазигармонических сигналов и достигает 12 Вт для сложных импульсных сигналов. Амплитуда напряжения на выходе преобразователя, работающего в режиме приёма, находится на уровне около 1500 мВ в рабочей полосе частот и 200–400 мВ – вне его рабочей полосы, что в несколько раз выше показателей существующих обратимых гидрофонов при аналогичных значениях принимаемого звукового давления. Применение обратимых компактных преобразователей в составе гидроакустических ретрансляторов, предназначенных для использования на расстояниях до нескольких десятков километров, позволяет снизить массу и габариты таких устройств.

Ключевые слова: гидроакустика, звукоподводная связь, пьезоэлектрический преобразователь, гидроакустический излучатель, гидроакустический ретранслятор, обратимый гидрофон, электроакустика.

DOI: 10.51368/1996-0948-2026-2-86-93

Введение

Особенностью гидроакустических измерений в морских условиях является зависимость от погрешностей позиционирования компонентов измерительной системы, что наряду с влиянием на распространение звука флуктуаций параметров среды снижает точность измерений. Применение ретрансляторов (маяков-ответчиков), излучающих после регистрации такой же или заранее заданный сигнал, снижает ошибки позиционирования и зависимость от изменений параметров среды. Маяки-ответчики получили распространение в

навигации [1], в том числе беспилотных судов [2], управлении автономными подводными аппаратами и передаче телеметрической информации, а также для маркировки подводного оборудования с целью облегчения поисковых работ [3] и в других приложениях гидроакустики.

К приборам такого типа предъявляются взаимоисключающие требования повышения длительности автономной работы и энергии излучаемых сигналов. Для удовлетворения подобных требований прибор должен содержать излучатель с высоким КПД наряду с энергоэффективным трактом возбуждения.

Ввиду этого разработка излучателей малого волнового размера высокой удельной мощности [4] является одной из актуальных задач инженерного обеспечения гидроакустических измерений.

Компактный 3D НЧИ – преобразователь высокой удельной мощности

Компактными низкочастотными, как правило, называются преобразователи, удовлетворяющие соотношению $\lambda > 2\pi D$ (λ – длина звуковой волны, D – характерный размер излучателя), если $D < 0,5$ м, а частота основного резонанса не превышает 2 кГц. При малых волновых размерах излучающей поверхности компактные преобразователи в низкочастотном диапазоне обычно имеют невысокую эффективность и незначительную ширину рабочей полосы частот. Для большей эффективности и повышения уровня создаваемого излучателем звукового давления используются технические решения, в первую очередь направленные на увеличение амплитуды колебаний и площади излучающей по-

верхности. Удачным примером компромисса между развиваемой акустической мощностью, КПД, шириной рабочей полосы частот и частотой основного резонанса можно считать 3D НЧИ – гидроакустический преобразователь продольно-изгибного типа с цельнометаллическим корпусом со сложной геометрией [5].

Описанный в работе [6] компактный 3D НЧИ размером 96×130 (диаметр×длина) мм и весом менее 1,5 кг при конструктивном объёме 735 см³ имеет основной резонанс в диапазоне до 2 кГц и при относительной ширине рабочей полосы частот 25–30 %, что позволяет использовать его для излучения до 40 Вт акустической мощности тональными и ЛЧМ сигналами (более 2,0 кПа приведённого к 1 м эффективного значения звукового давления). Для сложных сигналов излучаемая таким преобразователем акустическая мощность достигает 12 Вт. На рис. 1а приведена излучаемая акустическая мощность для импульсных сигналов с фазовой модуляцией, коэффициентом амплитуды до 1,6 при близком к 100 % коэффициенте заполнения и эффективном значении подводимого к излучателю напряжения возбуждения около 700 В (рис. 1б).

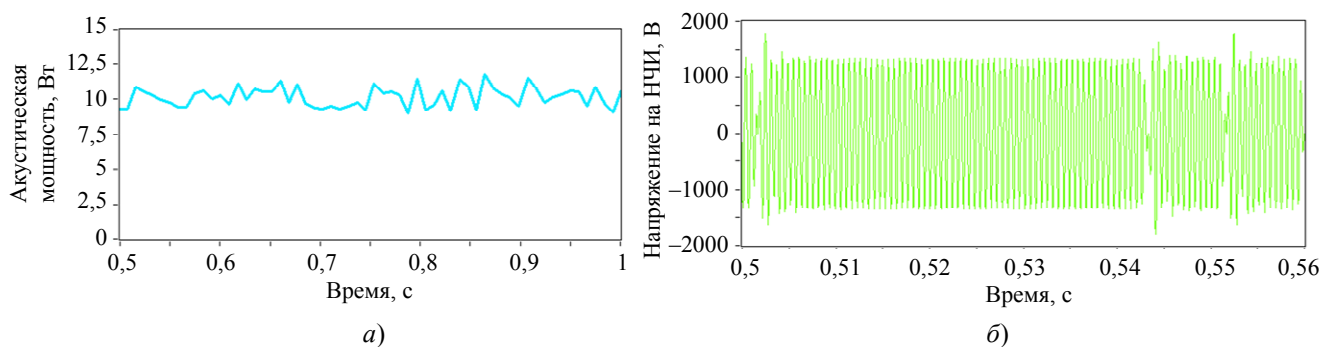


Рис. 1. Излучаемая акустическая мощность и напряжение возбуждения на 3D НЧИ для сложных импульсных сигналов малой скважности

Акустическая мощность излучения сложных сигналов ниже, чем для квазинепрерывных квазигармонических сигналов, так как при быстрых изменениях фазы сигнала 3D НЧИ, как колебательной системе с высокой добротностью, требуется некоторое время для выхода на режим с максимальной амплитудой. На рис. 1б видно, что амплитуда напряжения возбуждения в отдельные моменты времени при изменениях фазы сигнала несущей частоты достигает 1800 В. Различие уровней излучаемой акустической мощности для непре-

рывных и сложных сигналов напрямую зависит от скорости передачи информации [7], так как число передаваемых элементов алфавита определяет количество переключений колебательной системы преобразователя в единицу времени, и соответственно, общую продолжительность излучения с максимальной мощностью.

Излучаемая акустическая мощность выпускаемых маяков-ответчиков и гидроакустических модемов составляет 10–20 Вт для расстояний от нескольких тысяч м до нескольких

десятков км. Например, максимальный уровень акустической мощности гидроакустического модема Evo Logics S2CR 12/24 составляет 57 Вт в полосе частот 13–24 кГц, при этом для передачи информации со скоростью до 9,2 кбит/с на дистанции 6 км устройство излучает до 15 Вт акустической мощности. Аналогичную дальность действия ретранслятора можно обеспечить при использовании компактного 3D НЧИ в диапазоне до 2 кГц с учётом меньшего затухания на подобных расстояниях при увеличении длины волны излучаемого звука [8]. С учётом экспериментальных данных (см. рис. 1), можно повысить средний уровень излучаемой подобным 3D НЧИ акустической мощности на сложных сигналах до 15–20 Вт, что в сочетании с высоким КПД (более 60 %) позволяет использовать такие преобразователи в автономных системах [9].

Измерение характеристик компактного 3D НЧИ как приёмника

Чувствительность по напряжению работающего на приём преобразователя определяется сравнением чувствительности эталонного излучателя, приведённого к 1 м:

$$\xi = \frac{U_r L_r}{\gamma_r(f) U_{\text{НЧИ}}^r}, \quad (1)$$

где L_r – расстояние от измерительного гидрофона до контрольного НЧИ, U_r – напряжение на измерительном гидрофоне, $\gamma_r(f)$ – чувствительность измерительного гидрофона, $U_{\text{НЧИ}}^r$ – напряжение сигнала возбуждения на эталонном излучателе с аналогичной зависимостью, снятой при помощи 3D НЧИ, работающего на приём. Нормировка такой зависимости соотношением расстояний от контрольного НЧИ приёмников и чувствительности измерительного гидрофона позволяет получить зависимость по напряжению от частоты чувствительности преобразователя на приём:

$$\gamma_{3\text{ДНЧИ}} = \gamma_r(f) \frac{U_{3\text{ДНЧИ}} L_{3\text{ДНЧИ}}}{U_r L_r} \text{ [В/Па]}, \quad (2)$$

где $L_{3\text{ДНЧИ}}$ – расстояние от приёмника (3D НЧИ) до эталонного излучателя, $U_{3\text{ДНЧИ}}$ – напряже-

ние на 3D НЧИ. Следует отметить, что для уменьшения влияния аппаратных погрешностей при измерениях устанавливаются одинаковые амплитуды напряжений возбуждения на эталонном излучателе при регистрации звукового давления контрольным измерительным гидрофоном и 3D НЧИ, что исключает необходимость учёта соотношения этих величин в правой части формулы (2). Согласно некоторым работам [10, 11], коэффициент взаимности, равный отношению чувствительности преобразователя по напряжению на излучение к его чувствительности на приём, не зависит от конструкции, а определяется условиями излучения, приёма и свойствами акустической среды. Однако на практике для оценки коэффициента взаимности необходимы измерения в натуральных условиях именно из-за конструктивного устройства преобразователя, условий излучения и приёма.

Определение электроакустических характеристик на излучение и приём проведено на открытой воде в эшелоне глубин от 5 до 70 м. Преобразователь, закреплённый на акустической штанге длиной 3 м в 1 м от контрольного гидрофона и 2 м от эталонного излучателя, опускался в воду при помощи оснастки, конструктивно соединяющей эталонный излучатель, 3D НЧИ и гидрофон (рис. 2).

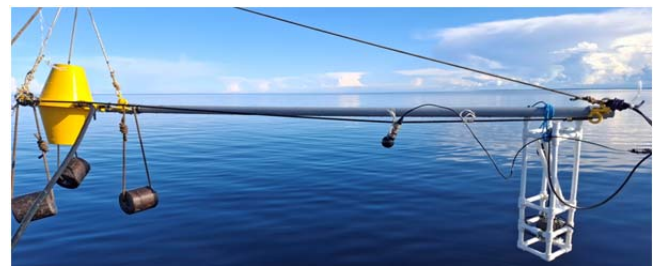


Рис. 2. Оснастка для измерения электроакустических характеристик 3D НЧИ

Для измерений и регистрации данных использовались модули АЦП NI 9215 и ЦАП NI 9263 в комплекте с шасси «National Instruments» NI cRIO-9031, гидрофон Г61Н и дифференциальный пробник напряжения 4241А «Probe Master». В качестве эталонного применялся НЧИ встречно-поршневого типа Бикон (акустический монополь) [4]. В соответствии с методикой измерений [12], излучаемый сигнал, ток, напряжение на эталонном излучателе, а также напряжение с гидрофона и 3D НЧИ синхронно регистрировались

при помощи системы сбора данных на базе LabView 2015.

Характеристики чувствительности компактного 3D НЧИ как приёмника гидроакустических сигналов превышают характеристики чувствительности гидрофона. Характер зависимости снимаемого с работающего в режиме приёмника 3D НЧИ напряжения от частоты практически совпадает с характеристикой его чувствительности по напряжению на излучение [6]. Незначительное различие частот максимумов характеристик, построенных

для приёма и излучения, связано с различием типов резонансных явлений в колебательной системе преобразователя 3D НЧИ и не превышает диапазона инструментальных погрешностей электроакустических измерений. На рис. 3 приведены зависимости напряжения на выходе 3D НЧИ в режиме приёма от волнового размера kr , где k – волновое число, r – эквивалентный радиус излучателя, определяемый как радиус сферы объёмом, равным вытесняемому конструкцией 3D НЧИ объёму воды.

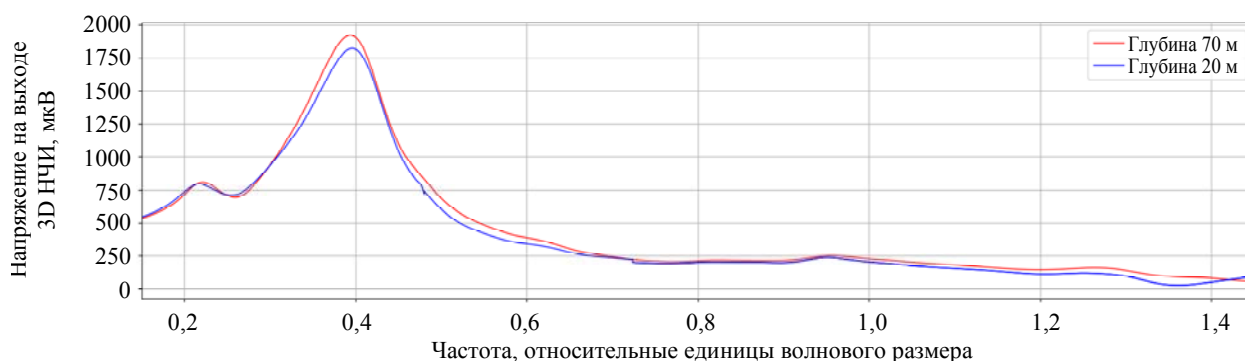


Рис. 3. Напряжение на выходе расположенного на глубине 20 и 70 м компактного 3D НЧИ при использовании его в качестве приёмного гидрофона

Благодаря специальной геометрии корпуса 3D НЧИ кривые его чувствительности как приёмника практически не меняются в эшелоне глубин до 100 м. Учитывая характеристики компактного 3D НЧИ при работе на приём, сопоставимые с параметрами серийно выпускаемых гидрофонов (например, Г61Н, Г3301, ZET 311 и т. д.), применение такого преобразователя в составе ретранслятора [13] вполне обоснованно.

Использование компактного 3D НЧИ в составе ретранслятора

Высокий коэффициент механической трансформации компактного 3D НЧИ и развитая поверхность корпуса обеспечивает за пределами его рабочей полосы частот в 5–10 раз большую чувствительность по сравнению с обратимыми гидрофонами. Для большинства обратимых гидрофонов, например, ZETLAB ZET 351 (выпускаемого компанией «Электронные технологии и метрологические системы»), максимальная акустическая мощность излучения составляет менее 1,0 Вт

(чувствительность на приём 160 мкВ/Па, рабочая полоса частот от 3 до 2500 Гц). Таким образом, 3D НЧИ в качестве гидроакустического приёмника позволит обеспечить полудуплексный режим работы ретранслятора, когда излучение ответного сигнала на другой частоте выполняется с задержкой относительно входящей посылки. Совмещение приёмника и излучателя в одном устройстве снижает габариты гидроакустического маяка, работающего в таком режиме и использующего 3D НЧИ в полосе частот за пределами основного резонанса.

Для работы в дуплексном режиме из-за высокой амплитуды напряжения на излучателе, во избежание повреждения приёмного тракта ретранслятора, необходимо использование фильтров с разделением между полосами около 120 дБ. Подобная характеристика может быть реализована на основе модели активного фильтра [14], состоящего из нескольких каскадов на операционных усилителях (рис. 4).

Ввиду ограничений существующей элементной базы по максимальным уровням входного напряжения, обеспечение работы ретранслятора в дуплексном режиме сопряже-

но с заменой интегральных микросхем первых каскадов разделительного фильтра на схемы из дискретных элементов с требуемой электрической прочностью. Таким образом, с учётом параметров существующих высоковольт-

ных транзисторов (таких, как 2SC5411, 1N4007 или 2T839A/ИМ), реализация фильтра с разделением между полосами не менее 120 дБ представляется технически возможной.

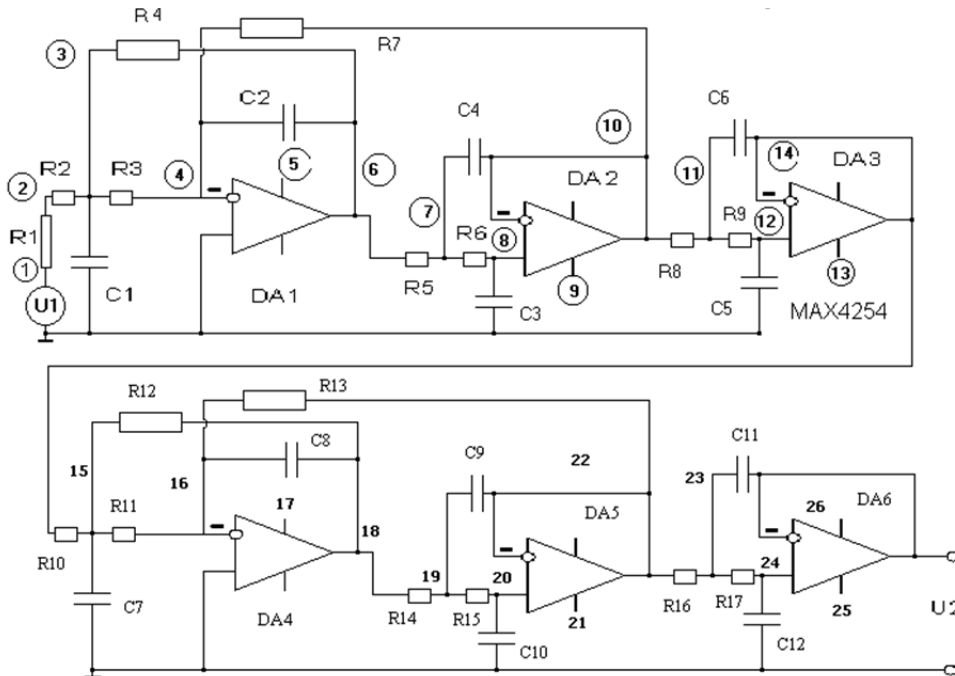


Рис. 4. Схема активного полиномиального фильтра 12-го порядка с крутизной спада более 120 дБ на октаву

Влияние глубины на характеристики излучателя

Электроакустические характеристики излучателя зависят от множества факторов, в частности – от внешнего гидростатического давления. Ввиду особой геометрии корпуса 3D НЧИ в диапазоне глубин 10–70 м жёсткость колебательной системы практически не меняется. Однако при увеличении глубины погружения под влиянием внешнего гидро-

статического давления корпус излучателя испытывает некоторую деформацию. С уменьшением прогиба оболочки незначительно падает добротность преобразователя и снижается его резонансная частота f_p , вызывая увеличение ширины частотной характеристики с 16 % (от f_p) на глубине 10 м до 20–24 % на 70 м. Дрейф f_p составляет менее 2,5 % на 100 м (рис. 5), что ниже показателей традиционных излучателей аналогичного размера продольно-изгибного типа силовой конструкции [15].

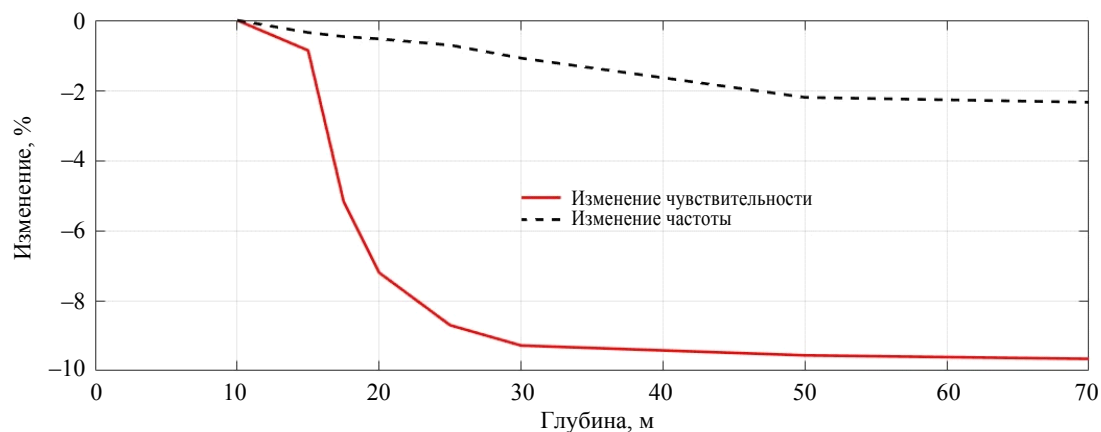


Рис. 5. Зависимость электроакустических параметров компактного 3D НЧИ от глубины

В известных преобразователях [16] с ростом глубины частота основного резонанса обычно возрастает из-за совокупного увеличения жёсткости колебательной системы преобразователя. Так, резонансная частота компактного НЧИ продольно-изгибного типа традиционной конструкции с компенсатором гидростатического давления на 200 м может подниматься на 10 % и более от f_p на глубине 30–50 м, возрастая с увеличением глубины более, чем на 3,5 % за 100 м [17].

Снижение чувствительности 3D НЧИ по напряжению, вызванное ростом сопротивления излучению при увеличении глубины, составляет около 5 % на 100 м (рис. 5), что не выходит за пределы погрешности измерений. Относительная погрешность измерения напряжения в соответствии с ГОСТ Р 8.736-2011 и погрешностями АЦП $\delta_{\text{АЦП}} = \pm 1\%$, гидрофона – $\delta_r = \pm 12\%$, дифференциального высоковольтного пробника – $\delta_U = \pm 2\%$ и измерения расстояния до излучателя – $\delta_L = \pm 0,5\%$, определяется по формуле

$$\delta_{\gamma_{3D\text{НЧИ}}} = \sqrt{\sum_i \delta_i^2}, \quad (3)$$

где δ_i – относительные погрешности измерений, включающие погрешности измерения напряжения возбуждения (погрешности дифференциального пробника δ_U и АЦП $\delta_{\text{АЦП}}$), погрешности измерения напряжения на гидрофоне (δ_r и $\delta_{\text{АЦП}}$), расстояния от НЧИ до гидрофона δ_L и т. д. Таким образом, результирующая погрешность измерений чувствительности находится в пределах $\pm 14\text{--}15\%$ (приём) и $\pm 10\text{--}12\%$ (излучение).

Как видно из рис. 5, влияние внешнего гидростатического давления в эшелоне глубин от 20 до 50 м на параметры излучателя несущественно, однако в некоторых приложениях его нужно учитывать из-за требований к уровню развиваемого звукового давления при ограниченных энергетических ресурсах системы возбуждения.

Заключение

3D НЧИ обладает достаточной электрической прочностью, позволяющей излучать сложные сигналы с коэффициентом амплиту-

ды 1,6 и более на уровне 10–15 Вт. Неравномерность частотной характеристики работающего в режиме приёмника компактного 3D НЧИ в низкочастотном диапазоне не играет существенной роли для акустического ретранслятора ввиду возможности частотной коррекции в предварительном усилителе, а приём сигналов определённого вида не связан с требованиями высокой степени линейности частотной характеристики приёмного тракта. Сочетание компактных размеров с электроакустическими характеристиками, в частности, с высокой удельной излучаемой акустической мощностью и широкой полосой частот для приёма акустических сигналов позволяют использовать подобные 3D НЧИ в различных приложениях гидроакустики: модемах, системах звукоподводной связи, маяках-ответчиках, в том числе работающих в дуплексном режиме.

Авторы выражают благодарность доценту кафедры радиотехники радиофизического факультета ННГУ им. Н. И. Лобачевского В. Н. Бугрову, ведущему программисту отдела автоматизации научных исследований А. И. Черновой, заведующему лабораторией экспериментальной электроники В. А. Перфилову, заведующему лабораторией виброакустики М. Б. Салину и руководителю центра гидроакустики П. И. Коротину за внимание к работе, помощь в подготовке организации и проведении исследований, а также замечания при обсуждении результатов.

Работа выполнена в рамках государственного задания ИПФ РАН «Распространение акустических волн в морской среде и верхнем слое земной коры» (проект FFUF-2024-0041).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Богданович М. Л., Бородин М. А., Коваленко Ю. А., Хаматов Р. К. / Гидроакустика. 2020. № 44 (4). С. 37–44.
2. Зайцев А. И., Каретников В. В., Сикарев А. А. / Морская радиоэлектроника. 2017. № 3 (61). С. 6–9.
3. Каралюн В. Ю. Гидроакустический маяк-ответчик. Патент на изобретение № 2125733 С1 (РФ). 1999.
4. Бритенков А. К., Фарфель В. А., Боголюбов Б. Н. / Прикладная физика. 2021. № 3. С. 72–77.
5. Бритенков А. К., Боголюбов Б. Н., Смирнов С. А. Продольно-изгибный гидроакустический пре-

образователь. Патент на изобретение № 2681268 (РФ). 2019.

6. Бритенков А. К., Норкин М. С., Стуленков А. В., Травин Р. В. / Научное приборостроение. 2023. Т. 33. № 4. С. 28–39.

7. Шавенько Н. К. Основы теории информации и кодирования. – М.: МИИГАиК, 2012.

8. Sheehy M. J., Halley M. R. / J. Acoust. Soc. Amer. 1957. Vol. 29. № 4. P. 464–469.

9. Вершинин А. С. / Молодой учёный. 2015. № 12 (92). С. 156–161.

10. Белоусов Ю. И., Римский-Корсаков А. В. / Акустический журнал. 1975. Т. 21. № 2. С. 161–172.

11. Колесников А. Е. Акустические измерения. – Л.: Судостроение, 1983.

12. Бритенков А. К., Боголюбов Б. Н., Фарфель В. А. / Учёные записки физического факультета Московского университета. 2020. № 1. С. 2010106.

13. Костеев Д. А., Бритенков А. К., Землюков Н. Е., Львов А. В., Салин М. Б. / Научное приборостроение. 2024. Т. 34. № 3. С. 54–63.

14. Бугров Б. Н., Макарова Ю. М. / Современная электроника и технологии автоматизации. 2017. № 1. С. 76–81.

15. Андреев М. Я., Боголюбов Б. Н., Ключин В. В., Рубанов И. Л. / Датчики и системы. 2010. № 12. С. 51–55.

16. Евтютов А. П., Ляликов А. П., Митько В. Б., Пономаренко В. И., Простаков А. Л., Свердлин Г. М., Смаришев М. Д., Тарасюк Ю. Ф., Колесников А. Е. Справочник по гидроакустике. – Л.: Судостроение, 1982.

17. Бритенков А. К., Захаров С. Б., Травин Р. В., Фарфель В. А. Моделирование управляемого электрического эквивалента мощного гидроакустического излучателя со сложным импедансным спектром на основе гиратора / Тр. XXXVI сессии РАО. – Москва, 2024. С. 649–655.

PACS: 43.30.-k, 43.30.+m

Characteristics of a compact hydroacoustic transducer with high power density in transmission and reception modes

A. K. Britenkov^{1,2*}, B. N. Bogolyubov¹, R. V. Travin¹, V. A. Farfel¹,
I. I. Leonov¹, and D. A. Kosteev¹

¹ A. V. Gaponov-Grekhov Institute of Applied Physics of the Russian Academy of Sciences,
Nizhny Novgorod, 603951 Russia
* E-mail: britenkov@ipfran.ru

² National Research Lobachevsky State University of Nizhny Novgorod, Nizhny Novgorod, 603022 Russia

Received 5.11.2025; revised 27.11.2025; accepted 27.04.2026

The use of reversible compact low-frequency transducers in hydroacoustic repeaters designed for use at distances of up to several tens of kilometers allows reducing the mass and dimensions of such devices. The paper presents the results of electroacoustic measurements of a compact transducer with a complex shape of an all-metal case both in the emission and reception modes of hydroacoustic signals. The acoustic power emitted by such a transducer exceeds 38 W for quasi-harmonic signals and reaches 12 W for complex pulse signals. The voltage amplitude at the output of the transducer operating in the reception mode is at a level of about 1500 mV in the operating frequency band and 200–400 mV outside its operating band, which is several times higher than the indicators of existing reversible hydrophones at similar values of the received sound pressure.

Keywords: hydroacoustics; underwater sonar communication; piezoelectric transducer; hydroacoustic emitter; hydroacoustic repeater, reversible hydrophone, electroacoustics.

REFERENCES

1. Bogdanovich M. L., Borodin M. A., Kovalenko Yu. A., and Khametov R. K., Hydroacoustics, № 44 (4), 37–44 (2020) [in Russian].
2. Zaitsev A. I., Karetnikov V. V., and Sikarev A. A., Marine Radioelectronics, № 3 (61), 6–9 (2017) [in Russian].

3. Karalyun V. Yu. Underwater acoustic beacon-responder. Patent for invention № 2125733 C1 (RF). 1999.
4. Britenkov A. K., Farfel V. A., and Bogolyubov B. N., Applied Physics, № 3, 72–77 (2021) [in Russian].
5. Britenkov A. K., Bogolyubov B. N., and Smirnov S. A. Longitudinal-bending hydroacoustic transducer. Patent for invention № 2681268 (RF). 2019.
6. Britenkov A. K., Norkin M. S., Stulenkov A. V., and Travin R. V. Nauchnoe Priborostroenie **33** (4), 28–39 (2023).
7. Shavenko N. K. Fundamentals of information theory and coding. MIIGAiK, 2012 [in Russian].
8. Sheehy M. J. and Halley M. R., J. Acoust. Soc. Amer. **29** (4), 464–469 (1957).
9. Vershinin A. S., Molodoy uchenyy, № 12 (92), 156–161 (2015) [in Russian].
10. Belousov Yu. I. and Rimsky-Korsakov A. V., Acoustical Physics **21** (2), 161–172 (1975) [in Russian].
11. Kolesnikov A. E. Acoustic measurements. Sudostroenie, 1983 [in Russian].
12. Britenkov A. K., Bogolyubov B. N., and Farfel V. A., Memoirs of the Faculty of Physics. Lomonosov Moscow State University, № 1, 2010106 (2020) [in Russian].
13. Kosteev D. A., Britenkov A. K., Zemnyukov N. E., Lvov A. V., and Salin M. B. Nauchnoe Priborostroenie **34** (3), 54–63 (2024) [in Russian].
14. Bugrov B. N. and Makarova Yu. M., Sovremennaya elektronika i tekhnologii avtomatizacii, № 1, 76–81 (2017) [in Russian].
15. Andreev M. Ya., Bogolyubov B. N., Klyushin V. V., and Rubanov I. L., Sensors and systems, № 12, 51–55 (2010) [in Russian].
16. Evtuytov A. P., Lyalikov A. P., Mitko V. B., Ponomarenko V. I., Prostakov A. L., Sverdlin G. M., Smaryshev M. D., Tarasyuk Yu. F., and Kolesnikov A. E., Handbook of hydroacoustics. Sudostroenie, 1982 [in Russian].
17. Britenkov A. K., Zakharov S. B., Travin R. V., and Farfel V. A. Proc. of the XXXVI session of the Russian Acoustic Society (RAO). Moscow, 2024, pp. 649–655 [in Russian].

Об авторах

Бритенков Александр Константинович, к.ф.-м.н., старший научный сотрудник отдела акустики океана, Институт прикладной физики им. А. В. Гапонова-Грехова Российской академии наук (603950, Россия, Нижний Новгород, ул. Ульянова, 46); доцент кафедры радиотехники РФФ, ННГУ им. Н. И. Лобачевского. E-mail: britenkov@ipfran.ru SPIN-код: 9041-7248, AuthorID: 117978 WoS ID: AAF-4262-2022, ORCID ID: 0000-0002-0885-2510, Scopus Author ID: 57224398205

Боголюбов Борис Николаевич, к.т.н., заведующий лабораторией прикладной гидроакустики, Институт прикладной физики им. А. В. Гапонова-Грехова Российской академии наук (603950, Россия, Нижний Новгород, ул. Ульянова, 46). E-mail: boris@ipfran.ru AuthorID: 33193

Травин Роман Вадимович, старший лаборант-исследователь лаборатории прикладной гидроакустики, Институт прикладной физики им. А. В. Гапонова-Грехова Российской академии наук (603950, Россия, Нижний Новгород, ул. Ульянова, 46). E-mail: r.travin@ipfran.ru SPIN-код: 3323-6940, AuthorID: 1199264

Фарфель Виктор Александрович, научный сотрудник отдела акустики океана, Институт прикладной физики им. А. В. Гапонова-Грехова Российской академии наук (603950, Россия, Нижний Новгород, ул. Ульянова, 46). E-mail: vicfar@ipfran.ru AuthorID: 27023

Леонов Игорь Иванович, заведующий сектором программного обеспечения, Институт прикладной физики им. А. В. Гапонова-Грехова Российской академии наук (603950, Россия, Нижний Новгород, ул. Ульянова, 46). E-mail: leonov@ipfran.ru AuthorID: 36697

Костеев Дмитрий Алексеевич, младший научный сотрудник лаборатории виброакустики, Институт прикладной физики им. А. В. Гапонова-Грехова Российской академии наук (603950, Россия, Нижний Новгород, ул. Ульянова, 46). E-mail: dkosteev@ipfran.ru SPIN-код: 5368-6339, AuthorID: 1048062