

УДК 534.143+534.4+534.873+534.134
 EDN: WEKPYM

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

Экспериментальная оценка параметров гидроакустического продольно-изгибного излучателя

А. И. Хилько, К. А. Сидоров, И. А. Капустин, В. Н. Некрасов,
 А. А. Антонов, В. И. Калинина, В. Е. Коновалов, А. А. Лисин, М. С. Норкин,
 А. И. Корнев, В. В. Коваленко

Приводится анализ перспективы использования малогабаритных продольно-изгибных гидроакустических излучателей для решения прикладных задач гидроакустики: мониторинга океанической среды, задач подводного наблюдения, задач подводной гидроакустической связи. Показаны результаты экспериментального исследования параметров продольно-изгибного гидроакустического излучателя в условиях гидроакустического бассейна и в условиях Горьковского водохранилища. Приводится описание методики условий и средств экспериментальных измерений. С помощью полученных данных проводится оценка резонансной частоты и ширины полосы и коэффициента полезного действия изготовленного излучателя. Эксперимент показал большое влияние границ волновода на результаты проводимых измерений. На основе полученных характеристик, предложены методы использования излучателей подобной конструкции.

Ключевые слова: гидроакустический излучатель; мелкое море; пьезоэлектрический преобразователь; экспериментальное исследование; продольно-изгибный излучателя.

DOI: 10.51368/2307-4469-2025-13-1-70-77

Введение

Гидроакустические излучатели (преобразователи) применяются во многих областях: от дальней звукоподводной связи и теле-

управления до сейсмоакустической разведки. Рабочие частоты излучателей и их коэффициент полезного действия (КПД) существенно зависят как от их конструктивного устройства, так и габаритов преобразователя [1].

Хилько Александр Иванович^{1,2}, зав. лаб., д.ф.-м.н., профессор.

E-mail: a.khil@ipfran.ru

Сидоров Кирилл Андреевич^{1,2}, ст. лаборант-исследователь.

Капустин Иван Александрович^{1,2}, зав. лаб., к.ф.-м.н.

Некрасов Виталий Николаевич³, нач. отделения, д.т.н.

Антонов Андрей Александрович¹, инженер.

Калинина Вера Игоревна¹, н.с., к.ф.-м.н.

Коновалов Владимир Евгеньевич⁴, вед. инженер, д.т.н.

Лисин Артем Алексеевич¹, ст. лаборант-исследователь.

Норкин Максим Сергеевич¹, ст. лаборант-исследователь.

Корнев Анатолий Игнатьевич¹, инженер.

Коваленко Валерий Вениаминович⁴, ученый секретарь.

¹ Институт прикладной физики РАН.

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

² Нижегородский государственный университет им. Н. И. Лобачевского.

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

³ ФГУП ВНИИФТРИ.

Россия, 141570, Московская область, г. Солнечногорск, рабочий поселок Менделеево, промзона.

⁴ АО «Корпорация «СПУ-ЦКБТМ».

Россия, 111024, Москва, ул. Подъёмная, 12а.

Статья поступила в редакцию 22.09.2024

После доработки 18.12.2024

Принята к публикации 10.01.2025

Шифр научной специальности: 2.2.4

© Хилько А. И., Сидоров К. А., Капустин И. А., Некрасов В. Н., Антонов А. А., Калинина В. И., Коновалов В. Е., Лисин А. А., Норкин М. С., Корнев А. И., Коваленко В. В., 2025

В настоящее время для решения ряда прикладных задач гидроакустики в области низких частот используются мощные узкополосные излучатели. Подавляющее большинство излучателей, позволяющих возбуждать широкополосные сигналы, работают лишь в области высоких частот. Ввиду прямой зависимости КПД излучателя и его рабочей частоты от размера излучающей поверхности, проблематично изготовить компактный низкочастотный излучатель с широкой рабочей полосой частот (порядка 50 % относительно резонансной или более) и высоким КПД (более 60 %) [2].

Низкочастотными обычно называются преобразователи, удовлетворяющие двум критериям, первым из которых является волновой размер [3], удовлетворяющий условию $2\pi D/\lambda < 1$, где λ – длина звуковой волны, D – размер излучателя. Излучение в диапазоне частот ниже 1,5–2 кГц [4, 5] принято считать низкочастотным в прикладных задачах.

Преобразователь с корпусом относительно малого размера может излучать в низкочастотном диапазоне в узкой полосе частот, но из-за обратной зависимости между излучаемой акустической мощностью и размерами излучающей поверхности эффективность и чувствительность такого преобразователя недостаточны для создания высокого уровня акустического давления, необходимого для обеспечения гидроакустической связи и зондирования неоднородностей водной толщи.

Как показано в работе [6], излучатели различных принципиальных конструкций, рассчитанные для работы в одном диапазоне частот, в общем случае, будут существенно отличаться по электроакустическим и массогабаритным характеристикам.

Существуют различные типы излучателей. Одними из первых получили широкое распространение электродинамические излучатели мембранного типа. Они имеют высокую добротность, большую мощность, но узкую полосу излучения, порядка 1–2 Гц. Кроме того, параметры таких излучателей весьма чувствительны к вариациям гидростатического давления, что приводит к высоким требованиям при изготовлении систем компенсации давления. Развитие инженерных технологий позволило разработать и создать пьезокерамические излучатели, состоящие из двух конусов, соединенных широкими частями, внут-

ри которых вертикально располагался движитель – пьезокерамический столб [7]. Широкая полоса излучения и высокая мощность были несомненными преимуществами перед их предшественниками. Но большая масса и огромные габариты существенно сужали область их применения и испытания. В конце 80-х годов в Канаде был разработан малогабаритный низкочастотный (по соотношению массогабаритных характеристик) [8] продольно-поперечный излучатель. В акустическом излучателе данной конструкции в качестве движителя используется столб из набора пьезокерамических колец. Пьезокерамический столб стягивается упругим металлическим корпусом. Такая технология позволяет добиться достаточно большого коэффициента трансформации изменения длины пьезокерамического столба к смещению корпуса. Такие излучатели являются перспективными для удовлетворения современных потребностей в гидроакустическом зондировании и гидролокации, а также для использования в подводной звуковой связи из-за возможности излучать сложно-модулированные сигналы. Для снижения рабочей частоты, зависящей в основном от жесткости корпуса, выполняется проточка продольных щелей. Однако вопрос надежной герметизации прорезей в корпусе оставался нерешенным, что напрямую влияло на амплитудно-частотные характеристики.

В настоящей работе представлены результаты экспериментального исследования макета нового низкочастотного малогабаритного излучателя с габаритами (длина, диаметр) 600×260 мм и массой 42 кг, изготовленного с применением оригинальных методов герметизации прорезей корпуса.

На рисунке 1 приведен вид исследуемого продольно-изгибного излучателя.



Рис. 1. Предварительная проверка работоспособности излучателя и схема экспериментальной установки

Предварительным этапом, позволяющим проверить работоспособность излучателя, его герметичность и оценить его частотную характеристику являлись испытания в условиях лабораторного бассейна. Испытания проводились на базе гидроакустического бассейна отделения геофизических исследований ИПФ РАН (размеры бассейна Ш×Д×Г: 3,6×5,3×2,4 м).

Для проверки герметизации производилась подача внутрь излучателя сухого азота давлением 8 атм (что соответствует погружению на глубину 80 м без системы компенсации). Далее, перед погружением излучателя в бассейн производилась проверка изоляции цепей питания пьезокерамического столба. Для этого применялся мегаомметр с испытательным напряжением не менее 1000 В. Величина изоляции меньше 1 мОм свидетельствует о наличии повышенных утечек, которые необходимо устранить перед продолжением испы-

таний. При достаточном уровне изоляции предварительное избыточное давление уменьшается до 2 атм. После погружения герметичность излучателя определяется визуально отсутствием пузырькового шлейфа.

Излучаемый сигнал формируется компьютером с подключенным к нему внешним модулем ЦАП/АЦП. Сформированный сигнал подается на усилитель мощности, включенный в мостовом режиме. Для повышения выходного напряжения усилителя до рабочего напряжения излучателя используется трансформатор с коэффициентом трансформации 1:6. Контроль подаваемого на излучатель напряжения обеспечивается токовым датчиком и замером падения напряжения на резисторе номиналом 33 Ом, включенном в цепь последовательно с входной обмоткой повышающего трансформатора. На рисунке 2 приведена схема подключения аппаратуры, используемая при проведении испытаний.

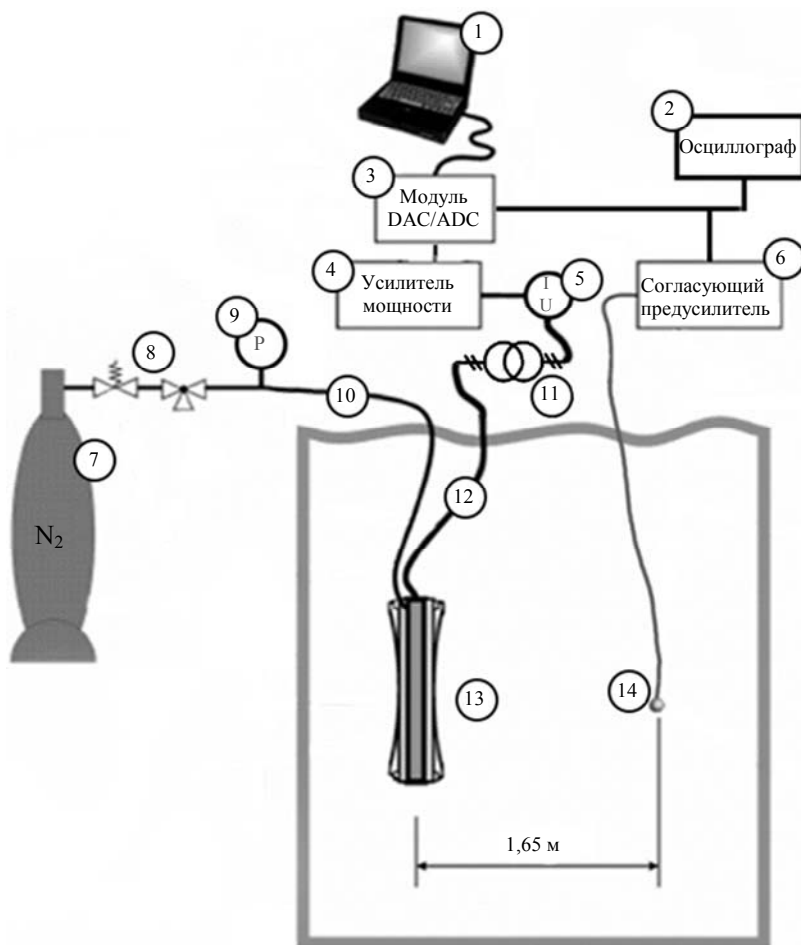


Рис. 2. 1 – ноутбук с пакетом LabVIEW (используется для задания параметров формирования излучаемого сигнала и записи сигналов с гидрофона), 2 – осциллограф, 3 – блок ЦАП/АЦП National Instruments, 4 – усилитель Crown (номинальная мощность 2 кВт), 5 – мультиметры для контроля величины тока и напряжения и токоограничивающий резистор, 6 – согласующий усилитель, 7 – баллон высокого давления с технически чистым азотом, 8 – редуктор давления и трёхходовой вентиль, 9 – контрольный манометр, 10 – соединительный резиновый рукав, 11 – повышающий трансформатор, 12 – кабель, 13 – гидроакустический излучатель, 14 – калиброванный гидрофон (Brüel & Kjær type 8100)

Исследование в морских условиях

Условия проведения измерений

Морские испытания выполнялись в течение одних суток, 14 сентября 2022 года. Измерения проводились в акватории горьковского водохранилища, в районе $56^{\circ}39'38.1''\text{N}$ $43^{\circ}21'51.5''\text{E}$. Эксперименты осуществлялись с использованием НИС «Геофизик». Ветер южный 4–8 м/с с порывами до 11 м/с. Условия водной толщи: глубина места 21 м. Течение

восточное, скоростью до 0,16 м/с. Величина и направление течения, в большей степени, обусловлены работой Нижегородской ГЭС [8]. Условия проведения можно считать стационарными (ветер и течение практически не меняются за время проведения измерений).

На рисунке 3 показана зависимость скорости течения от глубины в районе проведения измерений. На рисунке 4 приведены направление и скорость ветра в районе проведения измерений.

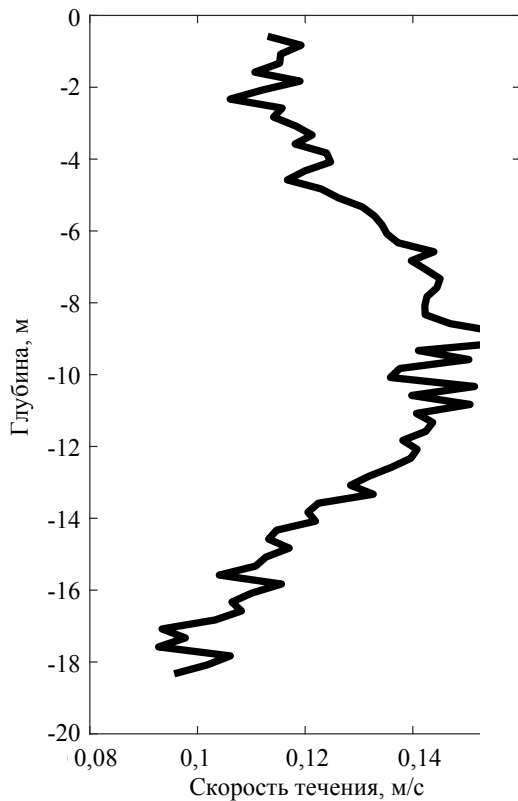


Рис. 3. Зависимость скорости течения от глубины

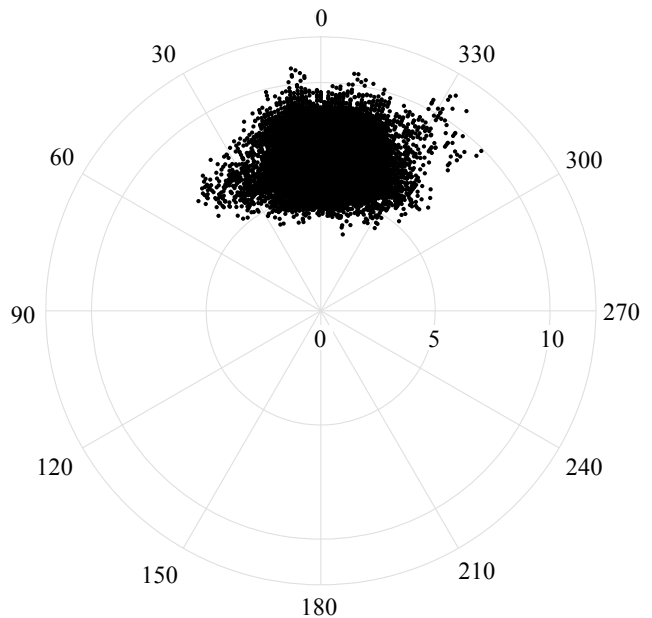


Рис. 4. Направление и скорость ветра

Перед проведением эксперимента была произведена запись шумовой обстановки в области постановки излучателя. Гидрофон за-

писывал в течении некоторого времени фон, его реализация и спектр приведены на рисунках 5 и 6.

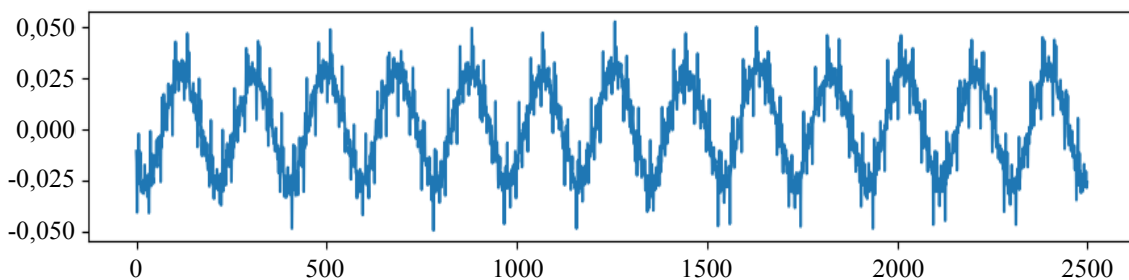


Рис. 5. Временная реализация шумового окружения в районе постановки излучателя

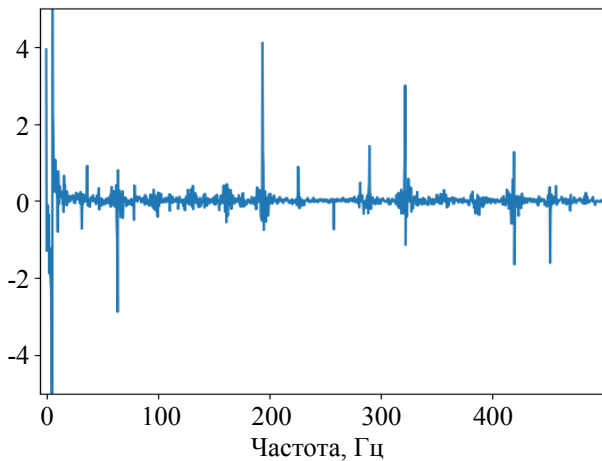


Рис. 6. Спектр шумового окружения в районе постановки излучателя

Во время спуска и подъема излучателя проводилось излучение шумоподобного сигнала (нулевое среднее и единичная дисперсия). На рисунке 7 приведен усредненный спектр сигнала при шумовом возбуждении излучателя.

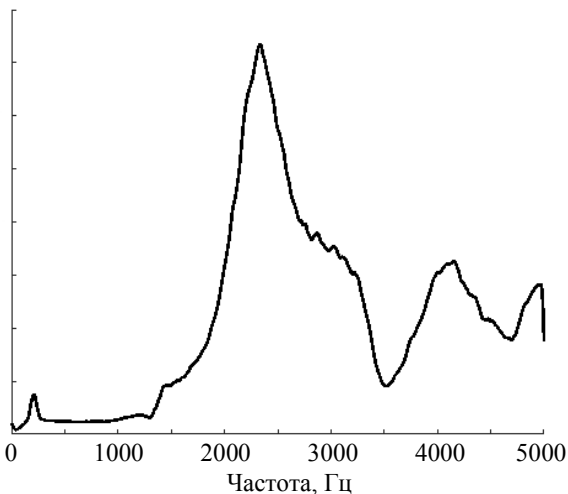


Рис. 7. Усредненный спектр излучения шумового сигнала

Следует отметить, что созданный акустический излучатель обладает наибольшей ин-

тенсивностью излучаемого звукового сигнала в частотном диапазоне 2000–3000 Гц. При этом уровень излучения на частоте 2,5 кГц на порядок выше уровня излучения на частоте порядка 230 Гц, обеспеченного резонансом корпуса излучателя.

Практический интерес представляет низкочастотное излучение, поэтому большое внимание было уделено исследованию характеристики излучателя вблизи низкочастотного резонанса. Для этого проводилось излучение ЛЧМ акустических импульсов. При этом оценивались резонансная частота, полоса излучения и акустическая мощность. Прием сигнала осуществлялся гидрофоном, закрепленным вблизи излучателя на выносе длиной 1 м с помощью виброразвязки. Излучатель спускался с кормы тримарана «Геофизик» до глубины 20 м. Для стабилизации к излучателю был подвешен груз массой 16 кг. Система формирования излучения аналогична используемой при испытаниях в бассейне, за исключением отсутствующей системы подкачки: излучатель был предварительно накачан до давления 2 атм. Частота дискретизации приемной системы составляла 10 кГц.

При спуске и последующем подъеме излучателя через каждые 2 м производилось две серии излучения:

- 1) излучение ЛЧМ импульса в диапазоне частот 100–1000 Гц длительностью 10 секунд;
- 2) излучение шумового сигнала с нулевым средним и единичной дисперсией длительностью 5 секунд.

Излучение ЛЧМ импульса

На рисунке 8 приведена спектральная характеристика принимаемого гидрофоном сигнала при измерении АЧХ излучателя на глубине 16 м.

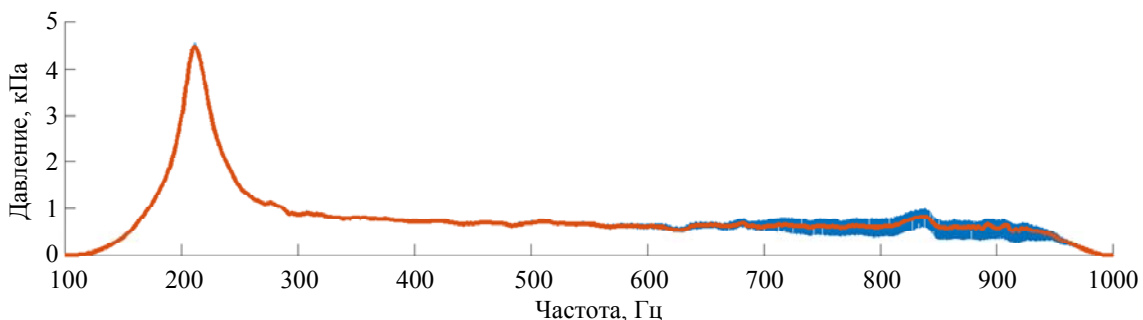


Рис. 8. Спектр излучателя на глубине 16 м

Спектральная характеристика обладает одним выраженным пиком на частоте 215 Гц и однородна в полосе 300–700 Гц.

На рисунке 9 отображена зависимость давления, создаваемого излучателем на резонансной частоте от глубины погружения излучателя. На рисунке 10 показана зависимость резонансной частоты излучателя от глубины погружения излучателя. По рисунку 9 дрейф частоты излучателя составляет 0,25 Гц/м.

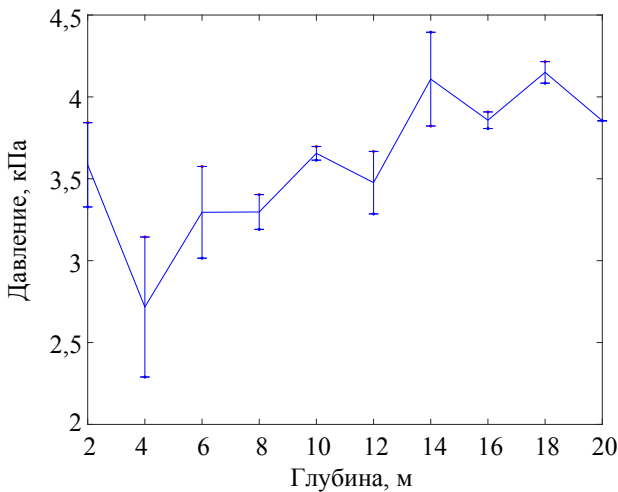


Рис. 9. Давление излучателя на резонансной частоте

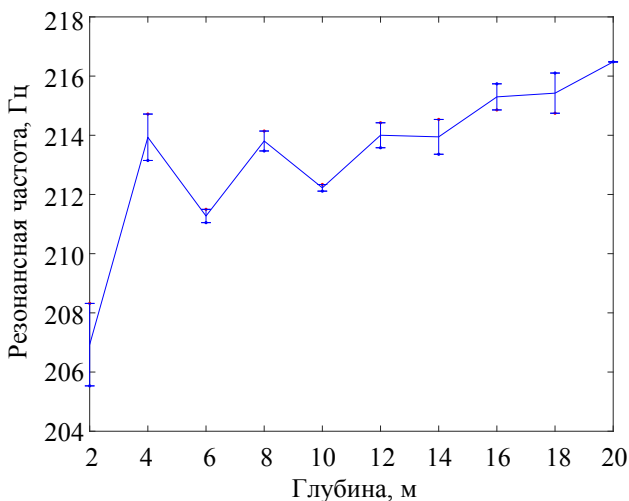


Рис. 10. Зависимость резонансной частоты от глубины

На рисунке 11 представлена зависимость ширины резонансного пика по уровню 0,7 от глубины погружения. Исходя из экспериментальных данных, ширина резонансного пика почти не зависит от глубины погружения, но дисперсия этой величины коррелирует со скоростью течения. На рисунке 12 приведена полная энергия излученного ЛЧМ импульса.

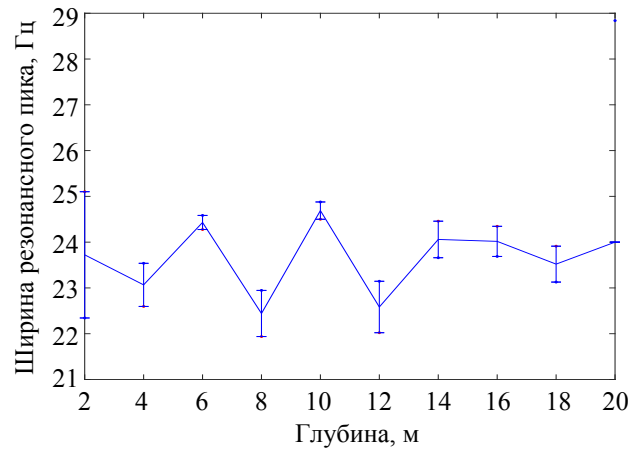


Рис. 11. Ширина резонансного пика

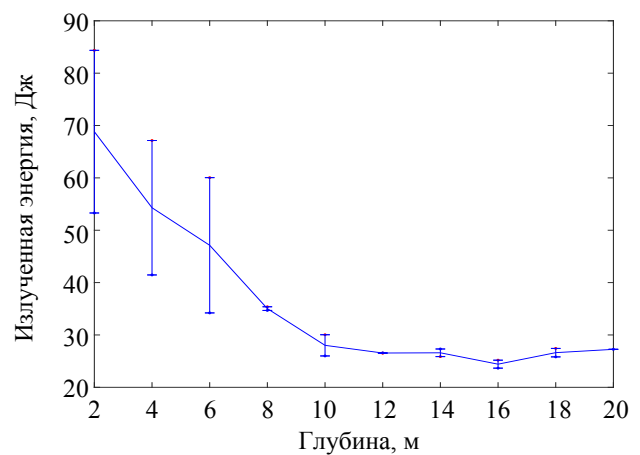


Рис. 12. Полная энергия импульса

Избыточное давление в корпусе излучателя сделало его более упругим. Из-за этого, уровень излучения на высоких частотах несколько вырос. Такой вывод следует из того, что общая энергия излученного ЛЧМ импульса сильно снижается при увеличении глубины, при том, что интенсивность излучения на резонансной частоте растет. Такое возможно при снижении интенсивности излучения в диапазоне 260–1000 Гц в ходе погружения. Не монотонность зависимости резонансной частоты и ширины резонансного пика от глубины вблизи поверхности вызваны интерференционными эффектами. Длительность излучаемых ЛЧМ импульсов составляла 10 сек, в то время как задержки между прямой и поверхностной волноводными компонентами составляли менее 10 мсек, так, что все волноводные компоненты приходили на гидрофоны практически одновременно, что приводило к интерференции. Избавиться от интерференционных эффектов можно при достаточной глубине водоема (интерференция с поверхност-

ной волной ослабевает при расстоянии от поверхности порядка нескольких длин волн).

Оценка КПД излучателя

В ходе проведения эксперимента на повышающий преобразователь подавалось напряжение 220 В. Ток, потребляемый излучателем на частоте основного резонанса, составлял 2,64 А. На токоограничивающем резисторе 33 Ом, в этом случае, выделялась мощность 227,23 Вт. Создаваемое излучателем акустическое давление связано с мощностью излучения следующим соотношением [10]

$$P = 4\pi \frac{p_i^2}{\rho c} = 8,38 \times 10^{-6} p_i^2 \text{ Вт.}$$

Давление 4 кПа, создаваемое излучателем на резонансной частоте, соответствует акустической мощности 134 Вт. Таким образом, КПД излучателя составляет порядка 38 %.

Заключение

Для излучателя размером ~0,6 м и массой порядка 40 кг максимальная мощность (в полосе 100–1000 Гц) составила 170 Вт. В ходе измерений установлено, что КПД от продольно-изгибного излучателя [11] составляет ~40 %, что является очень хорошим показателем для излучателей такого вида [6]. Ширина полосы составляет порядка 10 %, что позволяет классифицировать данный излучатель как узкополосный. Расширить полосу излучения и увеличить КПД можно путем замены ограничивающего резистора на цепь, обеспечивающую согласование усилителя и излучателя (нагрузку).

И поэтому – вследствие малых размеров и высокого КПД данные излучатели представляют интерес как элементы излучающих антенных решеток, решающих ряд прикладных задач, например калибровки приемных систем на гидроакустических полигонах.

Работа по разделу 1 выполнена в рамках государственного задания ИПФ РАН по теме № FFUF-2024-0035. Работа по разделу 2 выполнена в рамках государственного задания ННГУ тема № 0729-2020-0037.

ЛИТЕРАТУРА

1. Woollet R. *Sonar Transducer Fundamentals*. – Newport – New London: Naval Underwater Systems Center, 1986.
2. Шаврин С. А. Проблемные вопросы изготовления гидроакустических преобразователей: сборник докладов Первой науч.-практ. конф. молодых специалистов интегрированной структуры АО «Концерн «Океан-прибор» «ИСТОК-2016». – Санкт-Петербург, 2016. С. 121–125.
3. Андреев М. Я., Боголюбов Б. Н., Ключин В. В., Рубанов И. Л. / Датчики и системы. 2010. № 12. С. 51.
4. Mosca F., Matte G., Shimura T. / J. Acoust. Soc. of America. 2013. Vol. 133(1). P. EL61.
5. Козубская Г. И., Кудряшов В. М., Сабинин К. Д. / Акустический журнал. 1999. Т. 45. № 2. С. 250.
6. Бритенков А. К., Фарфель В. А., Боголюбов Б. Н. / Прикладная физика. 2021. № 3. С. 72.
7. Royster L. H. / The Journal of the Acoustical Society of America. 1969. Vol. 45. № 3. P. 671–682.
8. McMahon G. W. et al. U.S. Patent № 4,922,470.
9. Мольков А. А., Капустин И. А., Ермаков С. А., Сергиевская И. А., Шомина О. В., Лазарева Т. Н., Даниличева О. А., Лецев Г. В. Науч. проблемы оздоровления рос. рек и пути их решения: сб. ст. 2019. С. 214–218.
10. Урик Р. Д. Основы гидроакустики. – Ленинград: Судостроение, 1978.
11. Антонов А. А., Коновалов В. Е., Сидоров К. А., Сорокин А. М., Хилько А. И. Низкочастотный продольно-изгибный пьезокерамический преобразователь. Патент 2785896 (РФ). 2022.

Experimental evaluation of the parameters of the hydroacoustic longitudinal-bending type emitter

A. I. Khilko^{1,2}, *K. A. Sidorov*^{1,2}, *I. A. Kapustin*^{1,2}, *V. N. Nekrasov*³, *A. A. Antonov*¹,
*V. I. Kalinina*¹, *V. E. Konovalov*⁴, *A. A. Lisin*¹, *M. S. Norkin*¹, *A. I. Kornev*¹
and *V. V. Kovalenko*⁴

¹ Institute of Applied Physics RAS
46 Ulyanova st., Nizhny Novgorod, 603950, Russia

² National Research Lobachevsky State University of Nizhny Novgorod
23 Gagarin Ave., Nizhny Novgorod, 603095, Russia

³ VNIIFTRI
Mendeleev work settlement, industrial zone, Solnechnogorsk, Moscow Region, 141570, Russia

⁴ JSC “Strategic Control Points Corporation”
12a ul. Lifting, Moscow, 111024, Russia

Received 22.09.2024; revised 18.12.2024; accepted 10.01.2025

The paper presents an analysis of the prospects for the use of small-sized longitudinally-bent hydroacoustic radiators for solving applied problems of hydroacoustics: monitoring of the oceanic environment, problems of underwater observation, problems of underwater hydroacoustic communication. An analysis is made of the results of an experimental study of the parameters of a longitudinally flexed hydroacoustic radiator in the conditions of a hydroacoustic basin and in the conditions of the Gorky reservoir. The description of the technique of conditions and means of experimental measurements is given. With the help of the obtained data, the resonant frequency and bandwidth and the efficiency of the manufactured radiator are evaluated. The experiment showed a great influence of the waveguide boundaries on the results of measurements. Based on the characteristics obtained in the work, the possibilities of introducing emitters of a similar design are proposed.

Keywords: hydroacoustic transducer; shallow sea; piezoelectric transducer; experimental study; longitudinally bending transducer.

REFERENCES

1. Woollet R. Sonar Transducer Fundamentals. Newport. New London, Naval Underwater Systems Center, 1986.
2. Shavrin S. A. Problematic issues in the manufacture of hydroacoustic transducers. Collection of reports of the First scientific and practical conference of young specialists of the integrated structure of JSC Concern Oceanpribor “ISTOK-2016”. St. Petersburg, 2016, pp. 121–125.
3. Andreev M. Ya., Bogolyubov B. N., Klyushin V. V. and Rubanov I. L., Sensors and systems, № 12, 51 (2010).
4. Mosca F., Matte G. and Shimura T., J. Acoust. Soc. of America **133** (1), EL61 (2013).
5. Kozubskaya G. I., Kudryashov V. M. and Sabinin K. D., Acoustic journal **45** (2), 250 (1999).
6. Britenkov A. K., Farfel V. A. and Bogolyubov B. N., Applied Physics, № 3, 72 (2021) [in Russian].
7. Royster L. H., The Journal of the Acoustical Society of America **45** (3), 671–682 (1969).
8. McMahon G. W. et al. U.S. Patent № 4,922,470.
9. Molkov A. A., Kapustin I. A., Ermakov S. A., Sergievskaya I. A., Shomina O. V., Lazareva T. N., Danilicheva O. A. and Leshchev G. V. Hydrophysical laboratory of the Institute of Applied Physics RAS “Geophysicist” as an effective tool for limnological monitoring. Scientific problems of health improvement rivers and ways to solve them: collection of articles. Art. 2019, pp. 214–218.
10. Urik R. D. Fundamentals of hydroacoustics. Leningrad, Shipbuilding, 1978.
11. Antonov A. A., Konovalov V. E., Sidorov K. A., Sorokin A. M. and Khilko A. I. Low-frequency longitudinal-bending piezoceramic transducer. Patent № 2785896 (RF). 2022.