

УДК 534.13, 534.14, 534.4, 534.143, 534.87, 621.3.019.1

© А. К. Бритенков, М. С. Норкин, А. В. Стуленков, Р. В. Травин, 2023

ИССЛЕДОВАНИЕ ЭЛЕКТРОАКУСТИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК КОМПАКТНОГО 3D НЧИ — НИЗКОЧАСТОТНОГО ГИДРОАКУСТИЧЕСКОГО ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ ПРОДОЛЬНО-ИЗГИБНОГО ТИПА СЛОЖНОЙ ФОРМЫ

Приведены результаты исследований в воздухе резонансных характеристик компактного гидроакустического преобразователя продольно-изгибного типа с цельнометаллической излучающей оболочкой сложной формы — 3D НЧИ — и анализ его электроакустических характеристик в воде. Исследование распределения по поверхности преобразователя амплитуды колебаний в воздухе и электроакустических параметров в воде, полученных в ходе натурных испытаний, подтверждает, что представленный в работе излучатель с габаритными размерами менее 120 мм и массой до 1.2 кг превосходит излучатели подобных размеров по ряду параметров, в частности, обладает более высокими значениями коэффициента механической трансформации и использования присоединенной массы воды. Несмотря на компактные размеры, представленный в работе 3D НЧИ имеет в воде чувствительность по напряжению 1.6 Па·м/В на частоте основного резонанса 1.6 кГц при относительной ширине полосы частот не менее 16% и КПД в рабочей полосе частот до 90%. Показано, что при помощи установки дополнительных элементов происходит повышение эффективности 3D НЧИ за счет снижения уровня колебаний торцевых фланцев за пределами основной полосы частот. Согласно расчетам, излучаемая акустическая мощность такого 3D НЧИ в режиме передачи бинарных фазоманипулированных сигналов может достигать 50 Вт и более, что позволяет с учетом высокой надежности (подтвержденный ресурс более 10^{11} циклов) и технологичности изготовления успешно применять подобные гидроакустические преобразователи для широкого спектра задач подводной гидроакустики, навигации и телекоммуникации.

Кл. сл.: звукоподводная связь, гидроакустический модем, электромеханический трансформатор, низкочастотный гидроакустический излучатель, аддитивные технологии, акустическая мощность, лазерная виброметрия

ВВЕДЕНИЕ

Область применения низкочастотных гидроакустических излучателей (НЧИ) довольно обширна и включает разнообразные направления — от дальней звукоподводной связи, телеуправления и освещения подводной обстановки до сейсмоакустической разведки, акустической термометрии и изучения влияния воздействия шумового загрязнения на экосистемы. При разработке компактных преобразователей высокой удельной мощности расчет геометрии излучающих элементов и изготовление корпуса НЧИ являются определяющими процедурами, поскольку малые габариты изделия затрудняют возможность совмещения резонансов активного элемента и механической колебательной системы. С другой стороны, квадратичная пропорциональность величины излучаемой акустической мощности частоте колебаний дополнительно осложняет разработку мощных НЧИ. Излучающие элементы передают колебания активного элемента во внешнюю среду,

вследствие чего изготовление корпуса НЧИ является ответственной технологической процедурой [1].

С развитием аддитивных технологий перспективным направлением в разработке НЧИ продольно-изгибного типа является изготовление 3D-корпусов преобразователей из металлических порошков методом послойного лазерного сплавления [2]. По ряду эксплуатационных и технологических параметров такие 3D НЧИ превосходят изделия подобных размеров, изготовленные по другим технологиям, однако требуют всесторонних испытаний для уточнения предельных режимов и выбора направления конструкторского поиска.

В рамках проверки разработанного в ИПФ РАН компактного 3D НЧИ проведены исследования его резонансных характеристик в воздухе, а также измерения электроакустических характеристик в воде. Измерения в воздухе проводились бесконтактным методом при помощи сканирующего лазерного виброметра. Задача исследований заключалась в проверке эксплуа-

тационных и электроакустических параметров 3D НЧИ и поиске путей улучшения технических показателей изделия. Новизна исследований заключалась в построении полной картины модовой структуры колебаний излучающей поверхности преобразователя и анализе коэффициента механической трансформации и характера спектрального состава 3D НЧИ.

КОМПАКТНЫЕ ГИДРОАКУСТИЧЕСКИЕ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛИ

Гидроакустический преобразователь представляет собой совокупность механических и электрических цепей, в которых происходит преобразование электрической энергии в акустическую энергию излучения звуковых волн в окружающую среду [3]. Низкочастотным принято считать излучатель, верхняя граница рабочего диапазона частот которого не превышает 1.0–1.5 кГц, а размер удовлетворяет условию

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

где λ — длина звуковой волны, D — размер излучателя. Для мощной низкочастотной гидроакустики преобразователи размером менее полуметра считаются компактными или малогабаритными.

Преобразователь с корпусом относительно малого размера может излучать в низкочастотном диапазоне в узкой полосе частот, однако эффективность и чувствительность такого преобразователя недостаточны для создания высоких уровней акустического давления [2]. Ограничения на максимальный уровень излучаемой акустической мощности связаны как с кавитацией, так и с обратной зависимостью эффективной величины звукового давления от частоты колебаний ω

$$(p^2) = \rho c^2 \omega^2 p_0 x^2, \quad (2)$$

где ρ — плотность среды, c — скорость звука, p_0 — амплитуда колебательной составляющей звукового давления акустической волны, x — амплитуда смещения частиц среды [4]. Кроме того, при больших мощностях в НЧИ возможны нелинейные эффекты, когда происходит перекачка энергии из рабочей полосы частот в более высокочастотные диапазоны.

Резонансная частота собственных колебаний для основной полосы частот в воздухе $f_{\text{возд}}$ определяется массой колебательной системы излучателя, зависящей от его устройства, и коэффициентом упругости k , связанным с конструктивной жесткостью [5]. В воде k не меняется, но частота собственных колебаний преобразователя продольно-

изгибного типа из-за присоединенной массы существенно снижается:

$$f_{\text{вод}} = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{k}{m_{\text{кс}} + n^2 M_{\text{пр}}}}, \quad (3)$$

где $m_{\text{кс}}$ — масса колебательной системы, $M_{\text{пр}}$ — присоединенная масса воды, n — механический коэффициент трансформации. В упрощенной кинематической модели колебательной системы НЧИ, приведенной в работе [5], где распределенные массы и жесткость заменены сосредоточенными, показано, что для грубой оценки частоты собственных колебаний НЧИ в основной полосе в воде $f_{\text{вод}}$ для излучателя продольно-изгибного типа определяющим параметром выступает коэффициент трансформации n , если известна $f_{\text{возд}}$ — частота собственных колебаний НЧИ в воздухе. Таким образом, выбор типа преобразователя [6] и поиск наилучшей геометрии излучающей поверхности существенно определяют его электроакустические параметры и эффективность.

3D НЧИ — МАЛОГАБАРИТНЫЙ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЬ С ИЗЛУЧАЮЩЕЙ ОБОЛОЧКОЙ СЛОЖНОЙ ФОРМЫ

Использование аддитивных технологий для изготовления корпусов НЧИ продольно-изгибного типа [2] из металлических порошков позволяет реализовать излучающую поверхность сложной формы, сопряженную с конструктивными элементами преобразователя. Снижение поперечной жесткости цельнометаллического корпуса такого 3D НЧИ [7] достигается путем гофрирования излучающей оболочки параллельно основной оси симметрии (рис. 1).

Подобная конструкция исключает проблемы герметизации и уменьшает разброс параметров излучателя при серийном изготовлении. Гофрирование оболочки дополнительно увеличивает площадь излучающей поверхности, что несколько снижает рабочую частоту при сохранении компактных габаритных размеров преобразователя.

Корпус исследуемого 3D НЧИ изготовлен при помощи SLM-технологии (Selective laser melting, лазерного плавления металлического порошка) из титанового порошка Ti-6Al-4V. Характеристики полученного таким способом материала исследованы в работе [8], где показано, что они практически идентичны изделиям и сплавам, получаемым по традиционным технологиям, а по некоторым показателям превосходят последние. Внешний вид 3D НЧИ приведен на рис. 1, в. Основные параметры корпуса и излучателя в сборе приведены в табл.

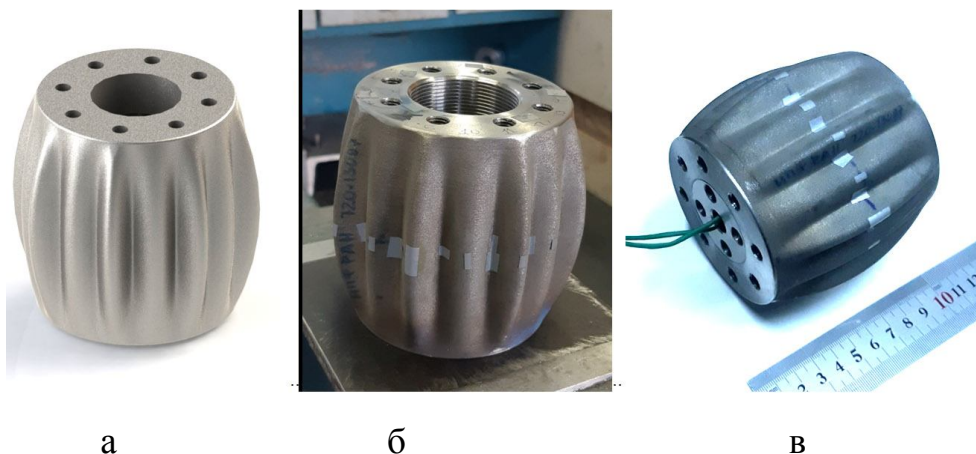


Рис. 1. STL-модель корпуса (файл-проект для 3D-печати) (а), цельнометаллический корпус (б) и внешний вид собранного 3D НЧИ (в)

Табл. Параметры корпуса 3D НЧИ и преобразователя в сборе

Параметр	Значение, характеристика
Размер корпуса (диаметр×длина), мм	102×92
Максимальная толщина стенки корпуса, мм	1.46
Минимальная толщина стенки корпуса, мм	0.55
Число волн гофрирования	16
Амплитуда гофрирования, мм	6.0
Тип гофрирования	Синус переменной амплитуды
Толщина торцевого фланца, мм	18
Масса корпуса, кг	0.61
Основной резонанс корпуса в воздухе, Гц	3120
Максимальный коэффициент механической трансформации корпуса (во впадине)	6.0
Минимальный коэффициент механической трансформации корпуса (на гребене)	4.4
Количество колец пьезокерамического столба, шт.	8
Размер активного элемента (длина×диаметр), мм	75.6×34.3
Масса активного элемента, кг	0.39
Масса собранного излучателя, кг	1.20
Резонанс собранного излучателя в воздухе, кГц	3.7
Коэффициент механической трансформации излучателя в сборе	26÷28

СХЕМА ИЗМЕРЕНИЙ ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК 3D НЧИ В ВОЗДУХЕ

Рабочая частота в воде и чувствительность по напряжению являются определяющими величинами

электроакустических параметров НЧИ. Проведение натуральных испытаний НЧИ достаточно сложно, поэтому измерения колебательных характеристик преобразователя в воздухе (частота резонанса $f_{\text{возд}}$ и коэффициент механической трансформации n) могут использоваться для предварительной оценки

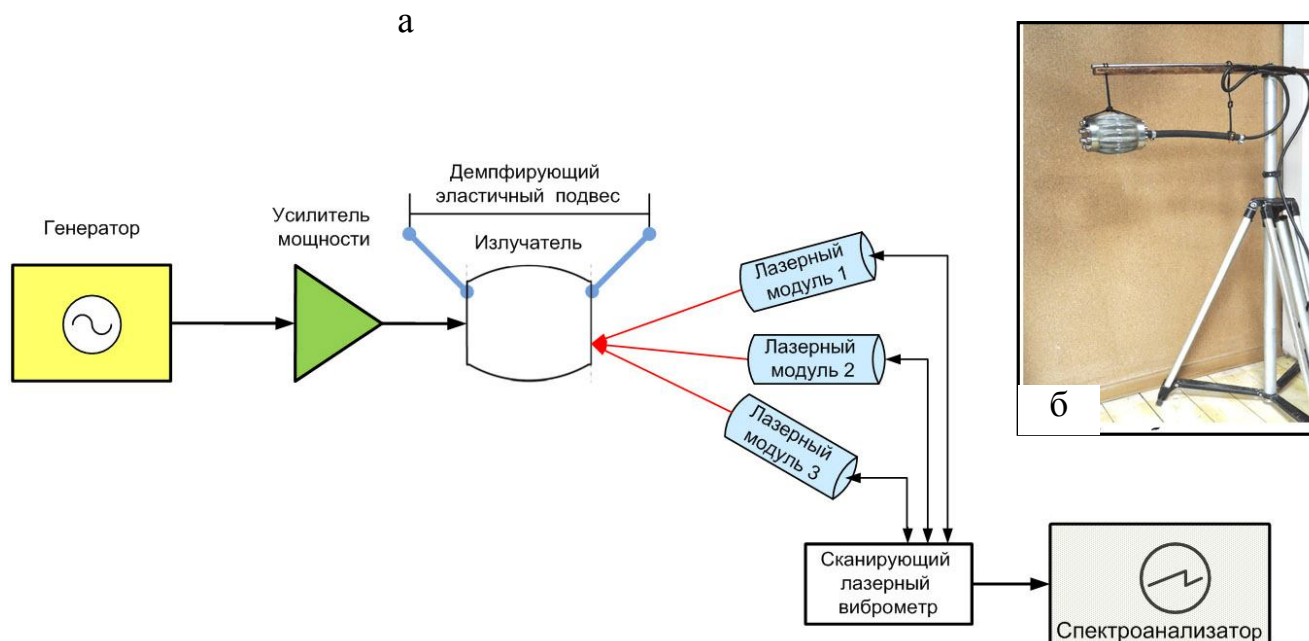


Рис. 2. Схема установки регистрации колебаний 3D НЧИ при помощи сканирующего лазерного виброметра (а).
На врезке (б) — излучатель, закрепленный в виброразвязывающем эластичном подвесе

частоты резонанса преобразователя в воде $f_{\text{вод}}$ по методике, приведенной в [5]. Соотношение (3) позволяет проанализировать влияние присоединенной массы на эффективность излучателя с учетом механического коэффициента трансформации n .

Исследование вибромеханических характеристик 3D НЧИ в воздухе целесообразно проводить бесконтактным методом [9] при помощи лазерного виброметра (рис. 2). Для исключения влияния внешней вибрации во время измерений излучатель располагался на эластичном подвесе (рис. 2, б) при возбуждении активного элемента сигналом с внешнего генератора.

Основные погрешности при выбранном способе измерений определяются инструментальной ошибкой, которая для использованного виброметра не превышает $(2.0\text{--}4.0) \times 10^{-8}$ мкм/с·Гц⁻¹ при нормальном падении лазерного луча на поверхность излучателя. С учетом перевода этих значений в перемещение погрешность прибора оказалась на несколько порядков меньше зарегистрированных в процессе измерений величин, поскольку максимальная амплитуда колебаний поверхности

(при возбуждении шумовым сигналом) не превышала 2 нм. Разрешение по частоте составляет не менее 1% для колебательной скорости до 20 мм/с и полосы частот до 0.2 МГц при соотношении сигнал/шум более 90 дБ, что вполне достаточно для корректного построения распределения амплитуд при использовании тональных или ЛЧМ-сигналов возбуждения излучателя.

ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ 3D НЧИ

Исследования частотных характеристик излучателя в воздухе $f_{\text{возд}}$ (рис. 3) показали наличие нескольких резонансов из-за особенностей геометрии корпуса и взаимодействия связанных колебательных систем.

Незначительный уровень резонансов за пределами основной полосы частот для 3D НЧИ также связан с особой геометрией корпуса (чередование амплитуды гофрирования), что позволяет сделать вывод об эффективности преобразователя в основной полосе частот.

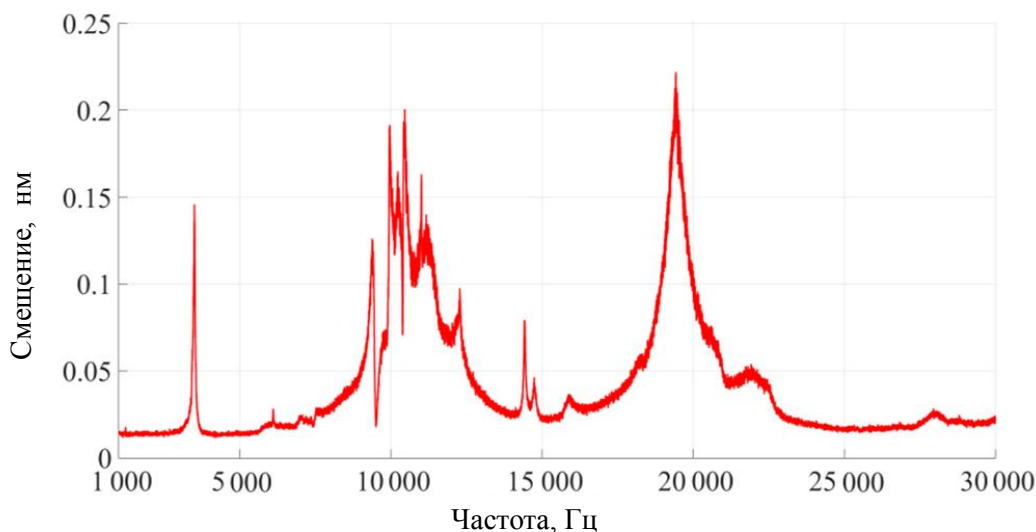


Рис. 3. Спектральное распределение амплитуды колебаний на торце преобразователя

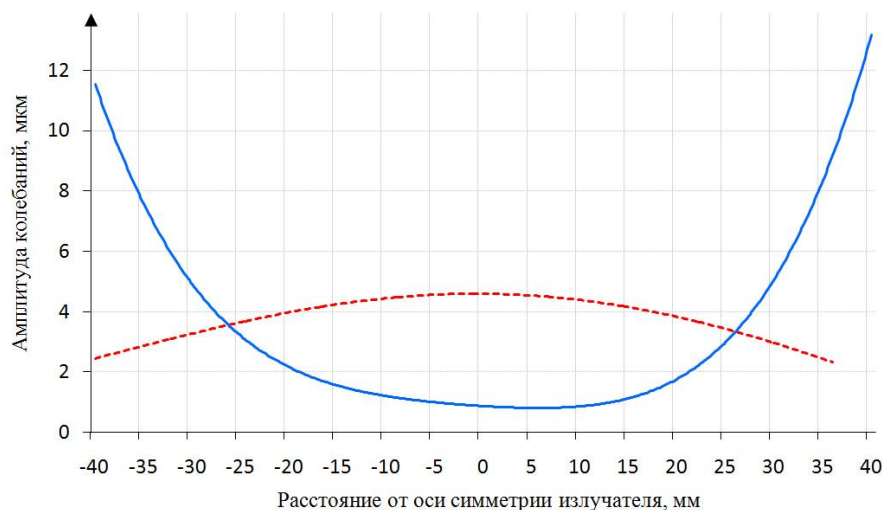


Рис. 4. Распределение амплитуды колебаний на торце излучателя. Сплошная линия — фланец 3D НЧИ, пунктир — колебания поверхности дополнительного элемента на фланце 3D НЧИ

Для определения механического коэффициента трансформации проведены измерения амплитуды колебаний для нескольких гребней и впадин, а также торцевых фланцев излучателя по пересекающимся радиальным направлениям с шагом от 2 до 5 мм при возбуждении тональным сигналом на частоте основного резонанса в воздухе. Измерения показали, что размах колебаний поверхности существенно различается на краях и в центре торца излучателя (рис. 4).

Увеличение амплитуды колебаний от центра к краям торца связано с эластичностью соединений и упругими свойствами фланца, ограниченного размерами корпуса излучателя. Размеры корпуса накладывают ограничения и на длину активного элемента. С учетом максимально

возможной длины активного элемента, состоящего из пьезокерамических колец ЦТБС-3 и изоляторов размером $34 \times 14 \times 7$ мм [10], габариты преобразователя не позволяют обеспечить высокую жесткость торцевых гаек (12 мм), как и всего узла резьбового соединения фланца в целом.

ФОРМА КОЛЕБАНИЙ ТОРЦЕВОГО ФЛАНЦА 3D НЧИ

Исследование колебаний 3D НЧИ при помощи сканирующего лазерного виброметра [11] показало наличие нескольких изгибных мод на торцах преобразователя. На рис. 5 приведена сетка разбиения поверхности фланца 3D НЧИ для исследования колебаний при возбуждении



Рис. 5. Сетка контрольных точек для фиксации смещений поверхностей торцевого фланца 3D НЧИ

излучателя шумовым сигналом с равномерной спектральной характеристикой в полосе частот до 1 МГц.

В Приложении, рис. П1, приведены профили изгиба торца излучателя на резонансных частотах. Характер колебаний торцевого фланца идентичен профилю амплитудно-частотной характеристики 3D НЧИ и является иллюстрацией зависимости размаха колебаний поверхности фланца от расстояния до центра (рис. 4), построенной по резонансным кривым в воздухе.

Кроме приведенных примеров колебаний торцевых фланцев, в спектре 3D НЧИ содержатся компоненты изгибных мод и на более высоких частотах, например на 19.5 кГц. Наличие таких мод колебаний объясняется сложной геометрией излучателя, влияющей и на частотные свойства как торцевых фланцев, так и корпусов в целом.

КОЛЕБАНИЯ ТОРЦЕВЫХ ФЛАНЦЕВ С ДОПОЛНИТЕЛЬНЫМИ ЭЛЕМЕНТАМИ

Для увеличения жесткости и улучшения герметизации на оба торцевых фланца излучателя на герметизирующее полиуретановое покрытие были установлены дополнительные элементы [12] (титановые шайбы толщиной 16 мм), после чего повторно проведены исследования характера колебаний поверхностей. Аналогично предыдущим измерениям по приведенной на рис. 2 схеме излучатель возбуждался шумовым сигналом

с равномерной спектральной характеристикой в полосе частот до 1 МГц.

Ввиду изменения массогабаритных характеристик 3D НЧИ [13], частоты основных мод незначительно изменились при сохранении основного резонанса в воздухе, а размах распределения амплитуды колебаний торцевых фланцев снизился более чем в 2.5 раза (рис. 4).

С установкой дополнительных элементов на частоте основного резонанса характер распределения амплитуды на торцевых фланцах поменялся на противоположный — на краях фланца амплитуда колебаний оказалась ниже, чем в области контакта с активным элементом. С учетом различий в спектральном составе характер деформации доработанных торцевых узлов практически идентичен колебаниям фланца без дополнительных элементов (см. Приложение, рис. П2).

Таким образом, с учетом увеличения жесткости узла фланца 3D НЧИ путем установки дополнительных элементов, снижения размаха распределения амплитуд колебаний поверхности и изменения характера распределения на противоположный вид (амплитуда колебаний на краях в 1.6–1.8 раза ниже, чем в центре) соотношение зависимостей на рис. 4 позволяет определить необходимую толщину шайб для повышения эффективности компактного 3D НЧИ.

ЭЛЕКТРОАКУСТИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ 3D НЧИ С ДОПОЛНИТЕЛЬНЫМИ ЭЛЕМЕНТАМИ

Изгибные колебания торцевых фланцев наряду с компактностью активного элемента объясняют относительно низкую чувствительность аналогичного 3D НЧИ, подробно описанного в работе [14]. Для проверки и сравнения с описанным в этой работе изделием при измерениях использовалась такая же аппаратура и средства измерения. Для проведения измерений в воде излучатель закреплялся в оснастке на гидроакустической штанге с заглубляющим грузом и измерительным гидрофоном Г61Н, расположенным на расстоянии 1.8 м от излучателя (рис. 6).

Электроакустические измерения на открытой воде 3D НЧИ с дополнительными элементами [12], проведенные по методике [14, 15], показали, что компенсация изгибных колебаний торцевых фланцев повысила чувствительность преобразователя по напряжению более чем на 50% (рис. 7).

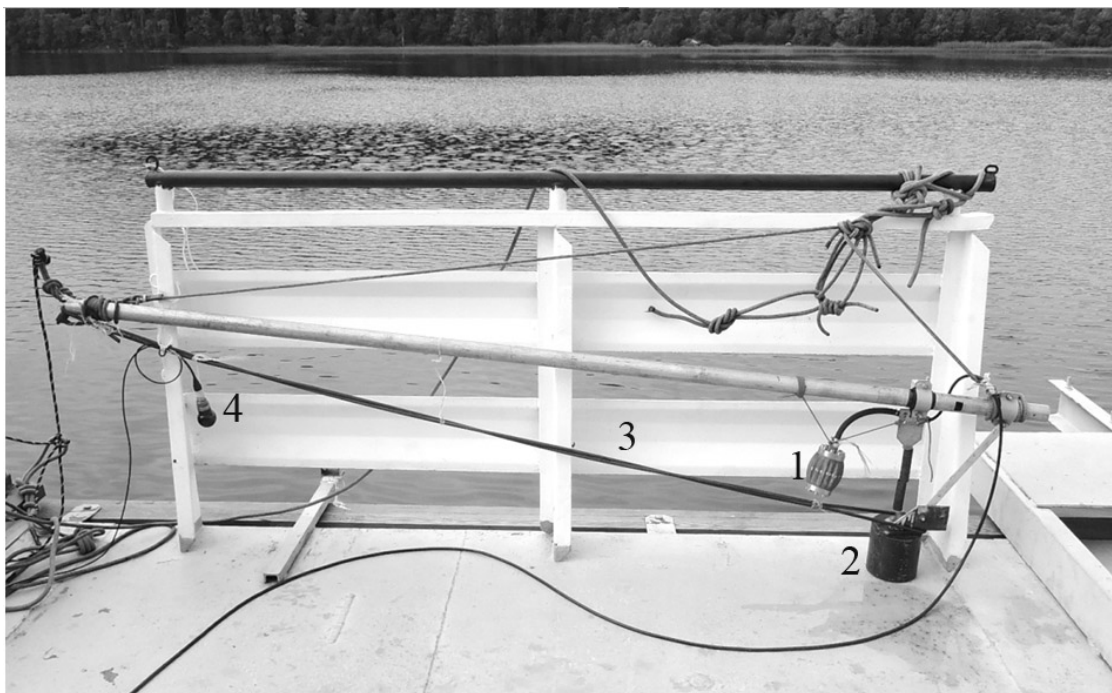


Рис. 6. Преобразователь 3D НЧИ (1), закрепленный в технологической оснастке с заглубляющим грузом (2), виброразвязкой (3) и измерительным гидрофоном (4)

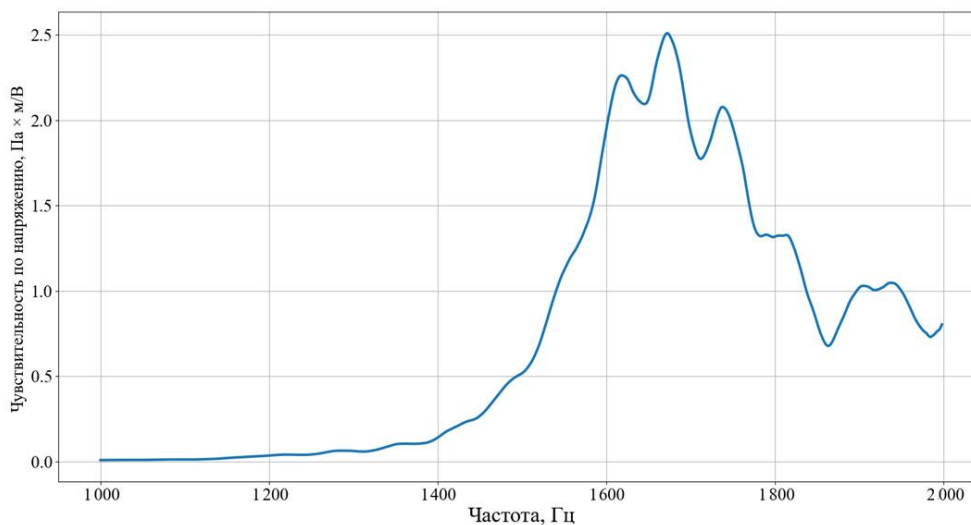


Рис. 7. Зависимость чувствительности по напряжению 3D НЧИ от частоты на глубине 14 м

Как видно из рис. 7, доработанный излучатель демонстрирует чувствительность по напряжению на частоте основного резонанса на уровне 1.75 Па×м/В. Эффективность такого преобразователя по сравнению с аналогичным изделием, оснащенный таким же активным элементом,

но без дополнительных элементов [14], возросла почти в 2.5 раза: после установки дополнительных элементов максимальный КПД превышает 90% при относительной ширине рабочей полосы частот 14–16% (рис. 8).

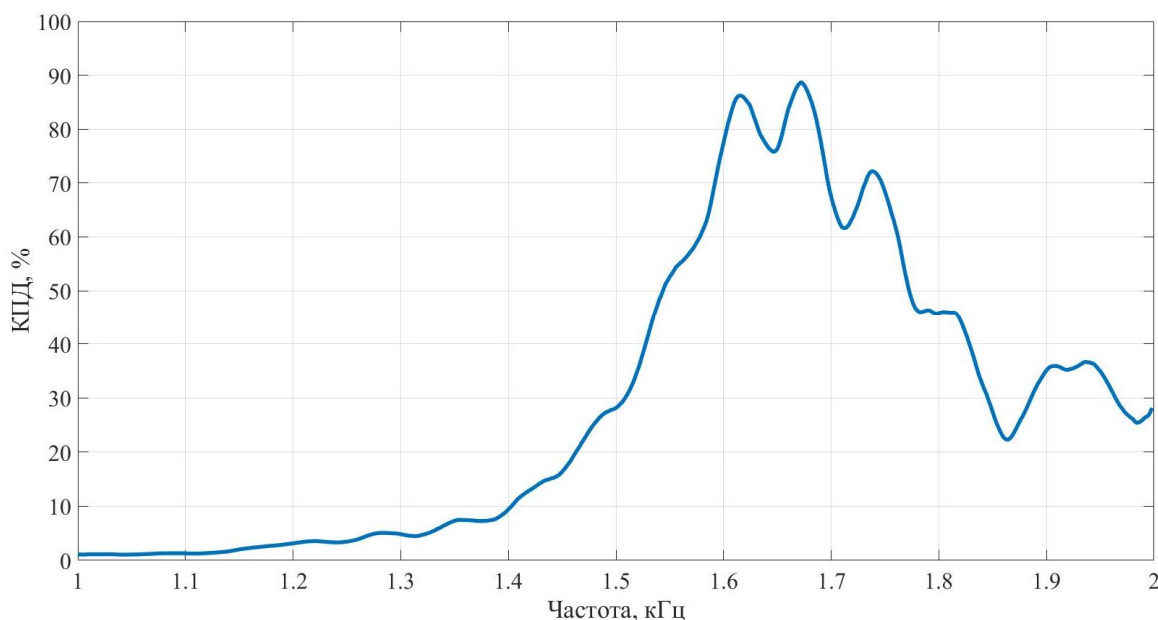


Рис. 8. Зависимость КПД 3D НЧИ от частоты на глубине 14 м

Локальные максимумы на графике зависимости эффективности от частоты доработанного 3D НЧИ (рис. 8) на частотах 1745, 1820, 1900 Гц и т.д. вызваны реверберацией от поверхности и дна и в целом не меняют характера кривой.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведенные исследования подтверждают эффективность конструкции и целесообразность технических решений по доработке компактных 3D НЧИ, практически исключая проблему герметизации и повышающих надежность и устойчивость к гидростатическому давлению. Исследование характера колебаний 3D НЧИ после установки дополнительных элементов на торцевые фланцы показало снижение амплитуды изгибных мод на торцах преобразователя более чем на 25–30%. Снижение уровня изгибных колебаний положительно влияет на КПД преобразователя, что подтверждают электроакустические измерения. Предложенные конструктивные решения обеспечивают чувствительность по напряжению в основной полосе частот более 1.6 Па×м/В

и основной резонанс в диапазоне до 2 кГц, а также дают 3D НЧИ ряд преимуществ по сравнению с аналогичными разработками, в том числе и с известными преобразователями продольно-изгибного типа [16].

Компактные излучатели подобной конструкции на основе активных элементов из перспективных пьезоматериалов [167] могут найти применение в малогабаритных и миниатюрных гидроакустических системах [18], модемах, устройствах управления, гидролокации и связи [19] для частот от сотен Гц до десятков кГц.

Авторы выражают благодарность заведующему лабораторией прикладной гидроакустики Б.Н. Боголюбову, заведующему лабораторией виброакустики М.Б. Салину, заведующему сектором акустических технологий М.С. Дерябину, научному сотруднику В.Ф. Фарфелю, младшему научному сотруднику В.К. Бахтину и заведующему отделом акустики океана Д.А. Касьянову за помощь в проведении исследований и обсуждении результатов.

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

ПРИЛОЖЕНИЕ

Примечание. На рис. П1, П2 цифрами обозначены: 1 — деформация без установки дополнительных элементов, 2 — деформация с дополнительными элементами.

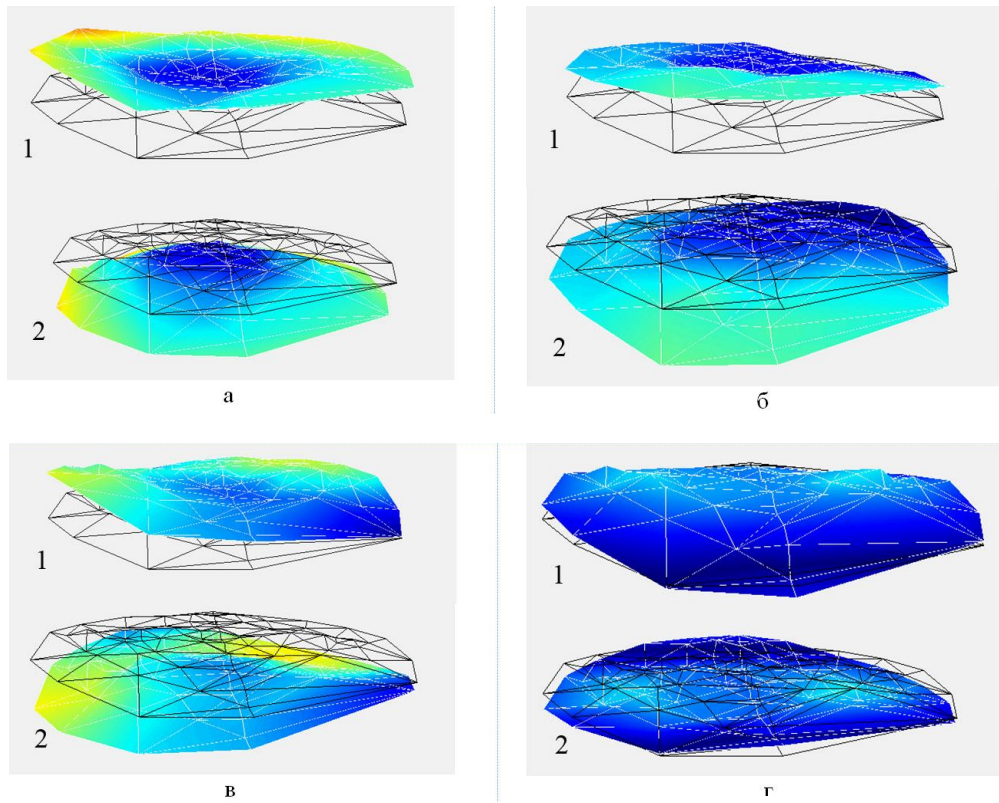


Рис. П1. Деформация на частотах 3.5 кГц (а), 9.4 кГц (б), 10.5 кГц (в), 14.4 кГц (г) торцевого фланца 3D НЧИ при возбуждении активного элемента шумом, белым в полосе до 1 МГц

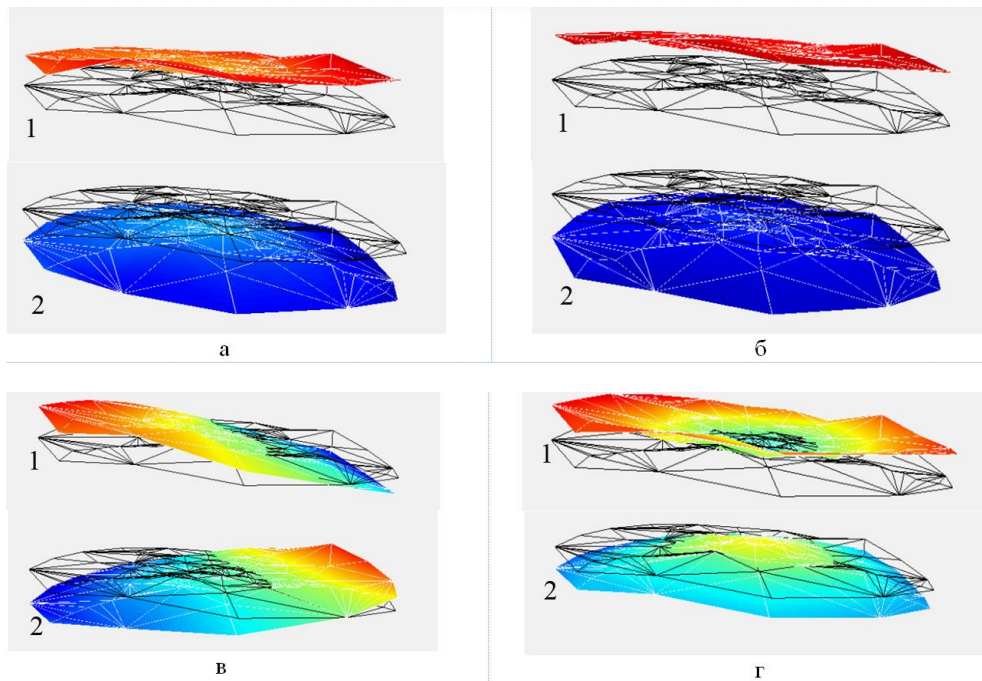


Рис. П2. Деформация на частотах 3.7 кГц (а), 8.5 кГц (б), 12.1 кГц (в), 14.6 кГц (г) торцевой поверхности 3D НЧИ после установки дополнительных элементов при возбуждении активного элемента на воздухе шумом, белым в полосе до 1 МГц

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Бритенков А.К., Боголюбов Б.Н., Смирнов С.А., Перфилов В.А. Перспективы использования 3D-печати для изготовления компактных гидроакустических преобразователей продольно-изгибного типа со сложной геометрией излучающей оболочки // Ученые записки физического факультета Московского университета. 2017. № 5. Id. 1750104.
URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=32451211>.
2. Sreejith V.S., Tiwari N. Modelling of a hydroacoustic projector to produce low frequency sound // The Journal of the Acoustical Society of America. 2020. Vol. 147, iss. 4. P. 2682–2693. DOI: 10.1121/10.0001133
3. Свердлин Г.М. Гидроакустические преобразователи и антенны. Л.: Судостроение, 1980. 232 с
4. Урик Р.Д. Основы гидроакустики. Л.: Судостроение, 1978. 448 с.
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.
URL: <https://trudymai.ru/published.php?ID=104035>
6. Богородский В.В., Зубарев Л.А., Корепин Е.А., Якушев В.И. Подводные электроакустические преобразователи. Л.: Судостроение, 1983. 248 с.
7. Бритенков А.К., Боголюбов Б.Н., Смирнов С.А. Продольно-изгибный гидроакустический преобразователь. Патент RU 2681268. Дата подачи заявки 04.04.2018, рег. № 2018112134, Опубликовано 05.03.2019. URL: https://yandex.ru/patents/doc/RU2681268C1_20190305
8. Бритенков А.К., Родюшкин В.М., Иляхинский А.В. Исследование методом акустического зондирования физико-механических свойств титанового сплава Ti-6Al-4V, полученного методом послойного лазерного сплавления // Materials Physics and Mechanics. 2021. Vol. 47, no. 1. P. 139–158.
URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=44929220>
9. Buchhave P. Laser Doppler velocimeter with variable optical frequency shift // Opt. and Laser Technology. 1975. Vol. 7, iss. 1. P. 11–16.
DOI: 10.1016/0030-3992(75)90088-2
10. Britenkov A.K., Bogolybov B.N., Norkin M.S., Travin R.V., Zakharov S.B. Vibromechanical characteristics of the emitting shells of small-sized low-frequency hydroacoustic piezoelectric high power density transducers // IEEE Xplore Digital Library. 2022. Published in: 2022 International Conference on Dynamics and Vibroacoustics of Machines (DVM).
DOI: 10.1109/DVM55487.2022.9930906
11. Rothberg S.J., Allen M.S., Castellini P., Di Maio D., Dirckx J.J.J., Ewins D.J., Halkon B.J., Muyshondt P., Paone N., Rayan T., Steger H., Tomashi E.P., Vanlanduit S., Vignola J.F. An international review of laser Doppler vibrometry: Making light work of vibration measurement // Opt. and Lasers in Engineering. 2017. Vol. 99, no. 1. P. 11–22. DOI: 10.1016/j.optlaseng.2016.10.023
12. Бритенков А.К., Сорокин А.М. Продольно-изгибный гидроакустический преобразователь. Патент RU 196335. Дата подачи заявки 07.10.2019, рег. № 2019131544. Опубликовано 26.02.2020. URL: https://yandex.ru/patents/doc/RU196335U1_20200226
13. Ермолаев Э.В., Махов В.И. Анализ колебаний пьезо-керамического стержня с накладкой // Труды XIV Всероссийской конференции "Прикладные технологии гидроакустики и гидрофизики" ГА-2018. Санкт-Петербург. 2018. С. 637–639.
URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=35640016>
14. Бритенков А.К., Боголюбов Б.Н., Фарфель В.А. Электроакустические характеристики экспериментального преобразователя продольно-изгибного типа со сложной формой излучающей оболочки // Ученые записки физического факультета Московского университета, 2020. № 1. Id. 2010106.
URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=42605657>
15. Боголюбов Б.Н., Курсанов А.В., Леонов И.И., Смирнов С.А., Фарфель В.А. Расчет и экспериментальные исследования компактного продольно-изгибного гидроакустического преобразователя с центральной частотой излучения 520 Гц // Гидроакустика. 2015. № 23(3). С. 20–26.
URL: <https://www.oceanpribor.ru/docs/SbGA23.pdf>
16. 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. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=15282942>
17. Панич А.А., Скрялев А.В., Доля В.К., Свирская С.Н., Дыкина Л.А., Карюков Е.В., Нагаенко А.В. Обзор перспективных пьезокомпозиатов для применения в акустике и гидроакустике // Тр. XIV Всероссийской конф. "Прикладные технологии гидроакустики и гидрофизики" ГА-2018. Санкт-Петербург. 2018. С. 470–473. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=35640016>
18. Butler J.L., Charles H.S. Transducers and arrays for underwater sound. Switzerland: Springer, 2007. 610 p.
19. Корякин Ю.А., Смирнов С.А., Яковлев Г.В. Корабельная гидроакустическая техника. Состояние и актуальные проблемы. Санкт-Петербург: Наука, 2004. 410 с.

Институт прикладной физики им. А.В. Гапонова-Грехова Российской академии наук (ИПФ РАН), Нижний Новгород, Россия

Контакты: Бритенков Александр Константинович, britenkov@ipfran.ru

Материал поступил в редакцию 29.06.2023

STUDY OF THE ELECTROACOUSTIC CHARACTERISTICS OF THE COMPACT LOW-FREQUENCY HYDROACOUSTIC TRANSDUCER (3D LFHE) OF A LONGITUDINAL-BENDING TYPE AND A COMPLEX SHAPE

A. K. Britenkov, M. S. Norkin, A. V. Stulenkov, R. V. Travin

A. V. Gaponov-Grekhov Institute of Applied Physics of the RAS, Nizhny Novgorod, Russia

The results of studies of the resonant characteristics of a compact longitudinal-bending hydroacoustic transducer with an all-metal radiating shell of a complex shape — 3D LFHE — in air and an analysis of its electroacoustic characteristics in water are presented. An analysis of the distribution of the amplitude of vibrations over the device surface in air and electroacoustic parameters in water, obtained during full-scale tests, confirms that the radiator presented in the work with overall dimensions less than 120 mm and a weight of up to 1.2 kg is superior in a number of parameters to radiators of similar sizes, in particular, it has a higher values of the coefficient of mechanical transformation and the use of the added mass of water. Despite its compact size, the 3D LFHE presented in the paper has a voltage sensitivity of 1.6 Pa×m/V in water at a fundamental resonance frequency of 1.6 kHz, a relative bandwidth of at least 16%, and an efficiency in the operating frequency band of up to 90%. It is shown that after installing additional elements, the efficiency of 3D LFHE is increased due to reducing the level of vibrations of the end flanges outside the main frequency band. According to the calculations, the radiated acoustic power of such a 3D LFHE in the mode of transmission of binary phase-shift keyed signals can reach 50 W or more, which allows, taking into account the high reliability (confirmed service life of more than 1011 cycles) and manufacturability, to successfully use such hydroacoustic transducers for a wide range of problems in underwater hydroacoustics, navigation, and telecommunications.

Keywords: underwater communication, hydroacoustic modem, electromechanical transformer, low-frequency hydroacoustic emitter, additive technologies, acoustic power, laser vibrometry

REFERENCES

1. Britenkov A.K., Bogolybov B.N., Smirnov S.A., Perfilov V.A. [3D-printing possibilities for the manufacturing technology development of hydroacoustic longitudinal-bending type emitters with the complex radiator's body geometry]. *Uchenye zapiski fizicheskogo fakul'teta Moskovskogo universiteta* [Journals of Faculty of Physics Lomonosov Moscow State University], 2017, no. 5, Id. 1750104. (In Russ.).
URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=32451211>.
2. Sreejith V.S., Tiwari N. Modelling of a hydroacoustic projector to produce low frequency sound. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 2020, vol. 147, iss. 4, pp. 2682–2693. DOI: 10.1121/10.0001133
3. Sverdlin G.M. *Gidroakusticheskie preobrazovateli i anteny* [Hydroacoustic transducers and antennas]. Leningrad, Sudostroenie Publ., 1980. 232 p. (In Russ.).
4. Urick R.J. *Principles of Underwater Sound*. McGraw Hill. (Russ. ed.: Urlik R.D. *Osnovy gidroakustiki*. Translate from English. Leningrad, Sudostroenie Publ., 1978. 448 p.).
5. Britenkov A.K., Bogolybov B.N., Deryabin M.S., Farfel V.A. [Measuring electromechanical characteristics of a complex shape compact low-frequency hydro-acoustic irradiator]. *Trudy MAI* [Proceedings of the Moscow Aviation Institute], 2019, no. 105. (In Russ.).
URL: <https://trudymai.ru/published.php?ID=104035>
6. Bogorodskii V.V., Zubarev L.A., Korepin E.A., Yakushev V.I. *Podvodnye ehlektroakusticheskie preobrazovateli* [Underwater electroacoustic transducers]. Leningrad, Sudostroenie Publ., 1983. 248 p. (In Russ.).
7. Britenkov A.K., Bogolybov B.N., Smirnov S.A. Prodol'no-izgibnyi gidroakusticheskii preobrazovatel' [Longitudinal-bending hydroacoustic transducer]. *Patent RF no. 2681268*. Data podachi zayavki 04.04.2018, reg. № 2018112134. Prioritet 05.03.2019. (In Russ.). URL: https://yandex.ru/patents/doc/RU2681268C1_20190305
8. Britenkov A.K., Rodyushkin V.M., Ilyakhinsky A.V. [Acoustic sensing study of the physical and mechanical properties of titanium alloy Ti-6Al-4V, made by selective laser melting]. *Fizika i mekhanika materialov* [Materials Physics and Mechanics], 2021, vol. 47, no. 1, pp. 139–158. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=44929220> (In Russ.).
9. Buchhave P. Laser Doppler velocimeter with variable optical frequency shift. *Opt. and Laser Technology*, 1975, vol. 7, iss. 1, pp. 11–16.
DOI: 10.1016/0030-3992(75)90088-2
10. Britenkov A.K., Bogolybov B.N., Norkin M.S., Travin R.V., Zakharov S.B. "Vibromechanical Characteristics of the Emitting Shells of Small-Sized Low-Frequency

- Hydroacoustic Piezoelectric High Power Density Transducers," *2022 International Conference on Dynamics and Vibroacoustics of Machines (DVM)*, Samara, Russian Federation, 2022, pp. 1–6.
DOI: 10.1109/DVM55487.2022.9930906
11. Rothberg S.J., Allen M.S., Castellini P., Di Maio D., Dirckx J.J.J., Ewins D.J., Halkon B.J., Muyschondt P., Paone N., Rayan T., Steger H., Tomashi E.P., Vanlanduit S., Vignola J.F. An international review of laser Doppler vibrometry: Making light work of vibration measurement. *Opt. and Lasers in Engineering*. 2017, vol. 99, no. 1, pp. 11–22. DOI: 10.1016/j.optlaseng.2016.10.023
 12. Britenkov A.K., Sorokin A.M. Prodol'no-izgibnyi gidroakusticheskii preobrazovatel' [Longitudinal-bending hydroacoustic transducer]. *Patent RF no. 196335*. Data podachi zayavki 07.10.2019, reg. № 2019131544. Prioritet 26.02.2020. (In Russ.). URL: https://yandex.ru/patents/doc/RU196335U1_20200226
 13. Ermolaev E.V., Machov V.I. [Vibration analysis of the piezoceramic rod with cover]. *Trudy XIV Vserossiiskoi konferentsii "Prikladnye tekhnologii gidroakustiki i gidrofiziki" GA-2018* [Proc. XIV All-Russ. Conf. "Applied technologies of hydroacoustics and hydrophysics" GA-2018]. Saint Petersburg, 2018, pp. 637–639. (In Russ.). URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=35640016>
 14. Britenkov A.K., Bogolyubov B.N., Farfel V.A. [Electro-acoustic characteristics of the experimental transducer of longitudinally flexural type with complex shape of the radiating cover]. *Uchenye zapiski fizicheskogo fakul'teta Moskovskogo universiteta* [Journals of Faculty of Physics Lomonosov Moscow State University], 2020, no. 1, Id. 2010106. (In Russ.). URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=42605657>
 15. Bogolyubov B.N., Kirsanov A.V., Leonov I.I., Smirnov C.A., Farfel V.A. [Design And Experimental Testing Of Compact Flextensional Hydroacoustic Transducer With Central Radiation Frequency 520 Hz]. *Gidroakustika* [Hydroacoustics], 2015, no. 23(3), pp. 20–26. (In Russ.). URL: <https://www.oceanpribor.ru/docs/SbGA23.pdf>
 16. Andreev M.Ya., Klyushin V.V., Rubanov I.L., Bogolyubov B.N. [Low-frequency small-sized longitudinal flexural electroacoustical converter]. *Datchiki i Systemi* [Sensors and Systems], 2010, no. 12, pp. 51–55. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=15282942> (In Russ.).
 17. Panich A.A., Skrylev A.V., Dolya V.K., Swirskaya S.N., Dykina L.A., Karyukov E.V., Nagaenko A.V. [Overview of perspective piezocomposites for application in acoustic and hydroacoustics]. *Trudy XIV Vserossiiskoi konferentsii "Prikladnye tekhnologii gidroakustiki i gidrofiziki" GA-2018* [Proc. XIV All-Russ. Conf. "Applied technologies of hydroacoustics and hydrophysics" GA-2018]. Saint Petersburg, 2018, pp. 470–473. (In Russ.). URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=35640016>
 18. Butler J.L., Charles H.S. *Transducers and arrays for underwater sound*. Switzerland, Springer, 2007. 610 p.
 19. Koryakin Yu.A., Smirnov S.A., Yakovlev G.V. *Korabel'naya gidroakusticheskaya tekhnika. Sostoyanie i aktual'nye problemy* [Ship sonar equipment. Status and current issues]. Saint Petersburg, Nauka Publ., 2004. 410 p. (In Russ.).

Contacts: Britenkov Alexander Konstantinovich,
brittenkov@ipfran.ru

Article received by the editorial office on 29.06.2023

INTRODUCTION

The field of application of low-frequency hydroacoustic emitters (LFHEs) is quite extensive and includes a variety of areas — from long-range underwater sound communication, telecontrol, and illumination of the underwater location to seismo-acoustic reconnaissance, acoustic thermometry, and studying the impact of noise pollution on ecosystems. In the development of compact transducers of high power density, the calculation of the geometry of the emitting elements and the manufacture of the LFHE housing are the crucial procedures, since the small dimensions of the product make it difficult to combine the resonances of the active element and the mechanical oscillatory system. On the other hand, the quadratic proportionality of the emitted acoustic power to the oscillation frequency further complicates the development of high-power LFHEs. The emitting elements transmit

the vibrations of the active element to the external environment, as a result of which the manufacture of the LFHE body is an important technological procedure [1].

In the development of LFHEs of longitudinal-bending type, an advance in additive technologies leads to a promising direction of the manufacture of 3D transducer cases from metal powders by layer-by-layer laser alloying [2]. In terms of a number of operational and technological parameters, such 3D LFHEs surpass products of similar sizes manufactured using other technologies, but they require comprehensive tests to clarify the limiting modes and select the direction of design research.

As part of the verification of the compact 3D LFHE developed at the A.V. Gaponov-Grekhov Institute of Applied Physics of the Russian Academy of Sciences, studies of its resonant characteristics in air, as well as measurements of electroacoustic character-

ristics in water were carried out. Air measurements were taken using a scanning laser vibrometer without a contact. The task of the research was to check the operational and electro-acoustic parameters of the 3D LFHE and find ways to improve the technical performance of the product. The novelty of the research lies in the construction of a complete picture of the mode structure of the oscillations of the emitting surface of the transducer, and the analysis of the mechanical transformation coefficient and the nature of the spectral composition of the 3D LFHE.

COMPACT HYDRO-ACOUSTIC TRANSDUCERS

A hydroacoustic transducer is a combination of mechanical and electrical circuits in which electrical energy is converted into acoustic energy of sound waves emitted into the environment [3]. An emitter is considered low-frequency if the upper limit of the operating frequency range does not exceed 1.0–1.5 kHz, and the size satisfies the condition

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

where λ is the length of the sound wave, D is the emitter dimension. For powerful low-frequency hydroacoustics, transducers less than half a meter in size are considered compact or small-sized.

A transducer with a relatively small housing can emit in the low-frequency range in a narrow frequency band, however, the efficiency and sensitivity of such a transducer are insufficient to create high levels of acoustic pressure [2]. Limitations on the maximum level of emitted acoustic power are associated both with cavitation and with the inverse dependence of the effective value of the sound pressure on the oscillation frequency ω

$$(p^2) = \rho c^2 \omega^2 p_0 x^2, \quad (2)$$

where ρ is the density of the medium, c is the speed of sound, p_0 is the amplitude of the vibrational component of the sound pressure of the acoustic wave, x is the amplitude of displacement of the particles of the medium [4]. In addition, when a large amount of power is applied to the LFHE, nonlinear effects are possible when energy is transferred from the operating frequency band to higher frequency bands.

The resonant frequency of normal vibrations for the main frequency band in air $f_{\text{возд}}$ is set by the mass of the oscillatory system of the emitter, which depends on its device, and the coefficient of elasticity k , associated with structural rigidity [5]. In water, k does not change, but the frequency of normal vibrations of

the transducer of the longitudinal-bending type decreases significantly due to the added mass:

$$f_{\text{вод}} = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{k}{m_{\text{кс}} + n^2 M_{\text{np}}}}, \quad (3)$$

where $m_{\text{кс}}$ is the mass of the oscillatory system, M_{np} is the added mass of water, n is the mechanical transformation ratio. In the simplified kinematic model of the oscillatory system of the LFHE, given in [5], where the distributed masses and stiffness are replaced by lumped ones, it is shown that for a rough estimate of the normal vibrations of the LFHE in the main band in water $f_{\text{вод}}$ for a longitudinal-bending type emitter, the defining parameter is the transformation coefficient n , if the frequency of the LFHE normal vibrations in air $f_{\text{возд}}$ is known. Thus, the choice of the transducer type [6] and the search for the best geometry of the emitting surface significantly determine its electroacoustic parameters and efficiency.

3D LFHE – SMALL-SIZED TRANSDUCER WITH A RADIANT SHELL OF A COMPLEX SHAPE

An emitting surface with a complicated shape can be used in conjunction with the structural components of the transducer when longitudinal-bending type LFHE cases [2] are manufactured using additive technologies. A decrease in the transverse rigidity of the all-metal body of such a 3D LFHE [7] is achieved by corrugating the emitting shell parallel to the main symmetry axis (Fig. 1).

Fig. 1. STL-model of the body (project file for 3D printing) (a), full metal body (б) and appearance of the assembled 3D LFHE (в)

This design eliminates sealing problems and reduces the spread of the emitter parameters in serial production. The corrugation of the shell additionally increases the area of the emitting surface, which somewhat reduces the operating frequency while maintaining the compact overall dimensions of the transducer.

The case of the investigated 3D LFHE is made using SLM (Selective laser melting of metal powder) technology from titanium powder Ti-6Al-4V. The characteristics of the material obtained in this way are studied in [8], where it is shown that they are almost identical to products and alloys obtained according to traditional technologies, and surpass the latter by some indicators. The appearance of the 3D LFHE is shown in Fig. 1, в.

The main parameters of the body and emitter assembled are given in the Table.

Table. Parameters of 3D LFHE housing and transducer assembly

SCHEME OF MEASUREMENT OF 3D LFHE ELECTROMECHANICAL CHARACTERISTICS IN AIR

Operating frequency in water and voltage sensitivity are the determining electroacoustic factors of LFHE. Conducting full-scale tests of LFHEs is rather complicated, therefore, measurements of the vibrational characteristics of the transducer in air (resonance frequency $f_{\text{в03д}}$ and mechanical transformation coefficient n) can be used for a preliminary assessment of the resonance frequency of the transducer in water $f_{\text{в0д}}$ according to the method given in [5]. Relation (3) allows us to analyze the effect of the added mass on the efficiency of the emitter, taking into account the mechanical transformation ratio n .

It is advisable to study the vibromechanical characteristics of 3D LFHE in air using a laser vibrometer (Fig. 2) without a contact [9]. To eliminate the influence of external vibration during measurements, the emitter was placed on an elastic suspension (Fig. 2, б) when the active element was excited by a signal from an external generator.

Fig. 2. Scheme of the setup for recording 3D LFHE oscillations using a scanning laser vibrometer (a). Inset (б) shows an emitter fixed in a vibration-decoupling elastic suspension

The main errors in the chosen measurement method are related to the instrumental error, which for the used vibrometer does not exceed $(2.0\text{--}4.0)\times 10^{-8} \mu\text{m/s}\times\text{Hz}^{-1}$ in the case of normal incidence of the laser beam on the emitter surface. Taking into account the conversion of these values into displacement, the error of the device turned out to be several orders of magnitude smaller than the values recorded in the measurement process, since the maximum amplitude of surface oscillations (when excited by a noise signal) did not exceed 2 nm. Frequency resolution is at least 1% for vibrational velocity up to 20 mm/s and bandwidth up to 0.2 MHz with a signal-to-noise ratio of more than 90 dB, which is quite sufficient for the correct construction of the amplitude distribution when using tonal or chirp excitation signals of the emitter.

3D LFHE ELECTROMECHANICAL CHARACTERISTICS

Studies of the frequency characteristics of the emitter in air $f_{\text{в03д}}$ (Fig. 3) showed the presence of several resonances due to the geometry of the housing and the interaction of coupled oscillatory systems.

Fig. 3. Spectral distribution of oscillation amplitude at the transducer end

The unique geometry of the housing (alteration of the corrugation amplitude) is likewise related with a negligible level of resonances beyond the baseband for 3D LFHE, allowing us to draw the conclusion that the transducer is effective in the baseband.

To determine the mechanical transformation ratio, measurements of the oscillation amplitude were carried out for several ridges and troughs, as well as the end flanges of the emitter along intersecting radial directions with a step of 2 to 5 mm when excited by a tone signal at the frequency of the fundamental resonance in the air. Measurements have shown that the range of surface oscillations differs significantly at the edges and in the center of the emitter end (Fig. 4).

Fig. 4. Oscillation amplitude distribution at the emitter end. The solid line is the 3D LFHE flange, the dotted line is the vibrations of the surface of the additional element on the 3D LFHE flange

Increasing the amplitude of vibrations from the center to the edges of the end is associated with the elasticity of the joints and the elastic properties of the flange, limited by the size of the emitter housing. The body dimensions also impose restrictions on the length of the active element. Taking into account the maximum possible length of the active element, consisting of piezoceramic rings ЦТБС-3 and insulators $34\times 14\times 7$ mm in size [10], the dimensions of the transducer do not allow for high rigidity of the end nuts (12 mm), as well as of the entire threaded flange assembly as a whole.

SHAPE OF OSCILLATIONS OF 3D LFHE END FLANGE

The study of 3D LFHE oscillations using a scanning laser vibrometer [11] showed the presence of several bending modes at the ends of the transducer. Fig. 5 shows the grid of the 3D LFHE flange surface for the study of oscillations when the emitter is excited by a noise signal with a uniform spectral charac-

teristic in the frequency band up to 1 MHz.

Fig. 5. Grid of control points for fixing displacements of the surfaces of the end flange of 3D LFHE

In the Appendix, Fig. П1, the profiles of the emitter end bending at resonant frequencies are given. The nature of the oscillations of the end flange is identical to the profile of the amplitude-frequency characteristic of the 3D LFHE and is an illustration of the dependence of the amplitude of the oscillations of the flange surface on the distance to the center (Fig. 4), constructed from resonance curves in air.

In addition to the above examples of vibrations of the end flanges, the 3D LFHE spectrum also contains bending mode components at higher frequencies, for example, at 19.5 kHz. The presence of such oscillation modes is explained by the complex geometry of the emitter, which also affects the frequency properties of both the end flanges and the housing as a whole.

OSCILLATIONS OF END FLANGES WITH ADDITIONAL ELEMENTS

To increase rigidity and improve sealing, additional elements [12] (titanium washers 16 mm thick) were installed on a sealing polyurethane coating on both end flanges of the emitter. Then the properties of surface vibrations were re-investigated. Similar to the previous measurements, according to the one shown in Fig. 2, the emitter was excited by a noise signal with a uniform spectral response in the frequency band up to 1 MHz.

Due to the change in the weight and size characteristics of the 3D LFHE [13], the frequencies of the principal modes changed slightly while maintaining the fundamental resonance in air, and the amplitude of the oscillation of the end flanges decreased by more than 2.5 times (Fig. 4).

After the installation of additional elements at the frequency of the fundamental resonance, the nature of the amplitude distribution on the end flanges reversed: the oscillation amplitude turned out to be lower at the edges of the flange than in the area of contact with the active element.

Taking into account the differences in the spectral composition, the nature of the deformation of the modified end assemblies is almost identical to the oscillations of the flange without additional elements (see Appendix, Fig. П2).

Thus, taking into account the increase in the rigidity of the 3D LFHE flange assembly by installing additional elements, the reduction in the range of distribution of the amplitudes of surface oscillations, and the

change in the nature of the distribution to the opposite form (the amplitude of oscillations at the edges is 1.6–1.8 times lower than in the center); the ratio of dependences in Fig. 4 allows you to determine the required thickness of the washers to improve the efficiency of the compact 3D LFHE.

ELECTRIC ACOUSTIC CHARACTERISTICS OF 3D LFHE WITH ADDITIONAL ELEMENTS

The bending oscillations of the end flanges, along with the compactness of the active element, explain the relatively low sensitivity of a similar 3D LFHE, described in detail in [14]. For verification and comparison with the device described in this work, we used the same equipment and measuring instruments. To carry out measurements in water, the emitter was fixed in a tooling on a hydro-acoustic rod with a deepening weight and a measuring hydrophone Г61Н, located at a distance of 1.8 m from the emitter (Fig. 6).

Fig. 6. 3D LFHE transducer (1) fixed in the tooling with a deepening weight (2), vibration decoupling (3), and a measuring hydrophone (4)

According to the methodology described in [14, 15], electroacoustic measurements of a 3D LFHE with additional elements [12] performed in open water revealed that compensating for end flange bending vibrations increased the voltage sensitivity of the transducer by more than 50% (Fig. 7).

Fig. 7. 3D LFHE voltage sensitivity versus frequency at a depth of 14 m

As can be seen in Fig. 7, the modified transducer demonstrates sensitivity at a fundamental resonance frequency of 1.75 Pa×m/V. The efficiency of such a transducer, as compared with a product equipped with the same active element, but without additional elements [14], increased by almost 2.5 times: after installing additional elements, the maximum efficiency exceeds 90% with an operating frequency band of 14–16% (Fig. 8).

Fig. 8. Frequency dependence of 3D LFHE efficiency at a depth of 14 m

The improved 3D LFHE efficiency vs frequency graph (Fig. 8) shows additional maxima at frequencies of 1745, 1820, 1900 Hz, etc. that are brought on by

reverberation from the surface and bottom but do not typically alter the shape of the curve.

CONCLUSION

The conducted studies confirm the effectiveness of the design and the feasibility of technical solutions for the refinement of compact 3D LFHEs, which practically eliminate the problem of sealing and increase reliability and resistance to hydrostatic pressure. A study of the nature of oscillations in the 3D LFHE after installing additional elements on the end flanges showed a decrease in the amplitude of bending modes at the ends of the transducer by more than 25–30%. Reducing the level of bending vibrations has a positive effect on the transducer efficiency, which is confirmed by electroacoustic measurements. The proposed design solutions provide voltage sensitivity in the baseband of more than $1.6 \text{ Pa}\cdot\text{m}/\text{V}$ and fundamental resonance in the range up to 2 kHz, and also provide 3D LFHE with a number of advantages over similar developments, including well-known transducers of the longitudinal-bending type [16].

Compact emitters of a similar design based on active elements made of advanced piezomaterials [17] can be used in small-sized and miniature hydroacoustic systems [18], modems, control devices, sonar, and communication [19] for frequencies from hundreds of Hz to tens of kHz.

APPENDIX

Note. In Fig. П1, П2 numbers indicate: 1 — deformation without installation of additional elements, 2 — deformation with additional elements.

Fig. П1. Deformation of the 3D LFHE end flange at frequencies of 3.5 kHz (a), 9.4 kHz (б), 10.5 kHz (в), 14.4 kHz (г) when the active element is excited by noise, white in the band up to 1 MHz

Fig. П2. Deformation of the 3D LFHE end surface at frequencies of 3.7 kHz (a), 8.5 kHz (б), 12.1 kHz (в), 14.6 kHz (г) after installing additional elements when the active element is excited in the air by noise, white in the band up to 1 MHz