

Перспективы использования 3D-печати для изготовления компактных гидроакустических преобразователей продольно-изгибного типа со сложной геометрией излучающей оболочки

А. К. Бритенков^{1,2,*}, Б. Н. Боголюбов^{1,†}, С. А. Смирнов^{1,‡}, В. А. Перфилов^{1,§}

¹Институт прикладной физики РАН

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

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

Россия, 603950, Нижний Новгород, пр-т Гагарина, д. 23

(Статья поступила 14.09.2017; Подписана в печать 20.09.2019)

Низкочастотные гидроакустические излучатели применяются от дальней звукоподводной связи и телеуправления до сейсмоакустической разведки. Разработка компактных преобразователей высокой удельной мощности с достаточно широкой полосой излучаемых частот по-прежнему остаётся актуальной задачей. Изготовление корпуса излучателя является одной из самых трудоёмких и сложных технологических процедур в процессе создания и настройки. С другой стороны, оптимизация излучатели продольно-изгибного типа с пьезоэлектрическим активным элементом приводит к такой геометрии деталей корпуса, которая уже нереализуема с помощью традиционной металлообработки. Применение SLM-технологии послойного лазерного сплавления из металлических порошков путем лазерной 3D-печати корпуса предложенного излучателя со сложной волнообразной излучающей оболочкой позволяет исключить проблему герметизации, устойчивости к гидростатическому давлению, уменьшить разброс параметров и повысить надёжность гидроакустического преобразователя.

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

УДК: 534.87, 534.14, 534.13, 534.4

Ключевые слова: звукоподводная связь, пьезоэлектрический преобразователь, низкочастотный гидроакустический излучатель, гидроакустический модем, подводный автономный необитаемый аппарат.

ВВЕДЕНИЕ

Одним из перспективных направлений для освоения мирового океана является создание подводных автономных необитаемых аппаратов с большой дальностью действия. Обеспечение устойчивой связи для систем телеуправления и коммуникации с центром управления, акустическими и радиобуями [1] на расстояниях в сотни километров связано с использованием компактных низкочастотных гидроакустических излучателей, имеющими высокую удельную мощность в сочетании с достаточной шириной полосы частот [2]. Во время проведения морских испытаний сотрудниками центра гидроакустики ИПФ РАН неоднократно проводились успешные эксперименты по излучению и приёму акустических сигналов на расстояния 400 км и более [3]. Понижение несущей частоты звуковых волн в таких приёмо-передающих системах, так же как и увеличение мощности излучения, сужает полосу частот [4] и уменьшает пропускную способность информационного канала, что накладывает особые требования на конструктивные особенности, расчёт и технологию изготовления низкочастотных гидроакустических излучателей (НЧИ) [5, 6]. Подобные технологии требуются для передачи команд телеуправ-

ления автономными подводными аппаратами, например подводными планерами, а так же для связи с автономными акустическими радиобуями-маяками, являющимися частью систем управления автономными подводными аппаратами.

1. КОМПАКТНЫЕ ГИДРОАКУСТИЧЕСКИЕ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛИ

Преобразователи размером корпуса около 60 см считаются компактными для мощной низкочастотной гидроакустики. Преобразователи меньшего размера можно отнести к малогабаритным. При этом преобразователь с корпусом и меньшего размера способен эффективно излучать в узкой полосе частот, но из-за прямой зависимости излучаемой акустической мощности НЧИ от размера излучающей поверхности [7], чувствительность такого преобразователя недостаточна для создания высокого акустического давления.

Наибольшую эффективность и технологичность изготовления имеют преобразователи продольно-изгибного типа (рис. 1) с пьезоэлектрическими активными элементами [5], использующими принцип электромеханического трансформатора, нагруженного ввиду присоединённой массы воды на активно-реактивную нагрузку [8].

Механический трансформатор (рис. 2) преобразует малые колебания с амплитудой a ($a \ll h$) упругого тела (излучающей оболочки) вдоль продольной оси излучателя в поперечные колебания (аналог пульсирующей

*E-mail: jkd@yandex.ru

†E-mail: boris@appl.sci-nnov.ru

‡E-mail: arraen@mail.ru

§E-mail: v.perfilov@hydro.appl.sci-nnov.ru



Рис. 1: Компактные гидроакустические излучатели продольно-изгибного типа

сферы) с амплитудой A

$$A \approx a \frac{L}{h}, \quad (1)$$

где A — размах колебаний упругого тела, h — начальный прогиб излучающей оболочки, a — размах колебаний активного элемента. Коэффициент механической трансформации

$$k = \frac{A}{a}, \quad (2)$$

как и амплитуда колебаний мембраны A , зависит от отношения длины упругого тела L к его начальному прогибу h (1) и от конструктивных особенностей корпуса излучателя.

2. ПРОБЛЕМЫ ИЗГОТОВЛЕНИЯ НЧИ ПРОДОЛЬНО-ИЗГИБНОГО ТИПА

В технологическом процессе разработки мощных низкочастотных гидроакустических преобразователей выбор типа преобразователя и поиск оптимальной геометрии корпуса определяет дальнейший производственно-технологический процесс. Как в НЧИ силового типа с вогнутым корпусом (рис. 1, справа), так и в НЧИ компенсаторного типа с выпуклым корпусом (рис. 1, слева), узким местом изготовления и сборки НЧИ является герметизация, выполняемая резиновым покрытием прорезей корпуса. Глубина использования подобных излучателей, и как следствие, выбор рабочего давления в гидростатическом компенсаторе [6], накладывает жесткие требования на прочность клеевого соединения покрытия прорезей корпуса. Технология обволакивания НЧИ слоем внешнего гидроизолирующего покрытия не обеспечивает точного соответствия частотных характеристик собранного излучателя расчетным данным [9, 10]. Так, после сборки, асимметрия

НЧИ по коэффициенту трансформации (2) может достигать 18–21% (рис. 3). Подобный эффект говорит о наличии изгибных мод активного элемента пьезокерамического столба [5], что снижает КПД излучателя. Доработка корпуса излучателя для уменьшения асимметрии и осевая юстировка требует проведения дорогостоящих натуральных испытаний после подобных операций.

3. ОПТИМИЗАЦИЯ ИЗЛУЧАЮЩЕГО ЭЛЕМЕНТА

Оптимизация излучающего элемента, связанная с нахождением глобальных экстремумов многопараметрической модели по совокупности критериев (распределению динамических и статических напряжений в металле, геометрических параметров и характеристик материалов) иллюстрирует, что наилучшая геометрия деталей корпуса нереализуема при использовании технологии обычной металлообработки. Поиск при помощи структурно-функционального подхода технических (конструктивных и технологических) решений [11] по разработке, изготовлению и настройке гидроакустических преобразователей приводит к использованию 3D-печати корпуса излучателя из металлических порошков [12, 13] на базе SLM-технологии [14]. Такая технология исключает проблемы герметизации, устойчивости преобразователя с пьезоэлектрическим активным элементом к гидростатическому давлению и уменьшает разброс параметров излучателя для упрощения его настройки.

4. МАЛОГАБАРИТНЫЙ НИЗКОЧАСТОТНЫЙ ГИДРОАКУСТИЧЕСКИЙ ИЗЛУЧАТЕЛЬ ПРОДОЛЬНО-ИЗГИБНОГО ТИПА С ГОФРООБРАЗНОЙ ИЗЛУЧАЮЩЕЙ ОБОЛОЧКОЙ СЛОЖНОЙ ФОРМЫ

Во избежание проблем герметизации и выполнения сложных процедур приклеивания резиновых полос на прорези в оболочке корпуса преобразователя [10], целесообразно исключить такие процедуры из технологического процесса изготовления НЧИ. Оптимизация конструкции НЧИ методами системного анализа [15] приводит к проектированию излучателя со сплошным корпусом в виде вытянутого тела вращения с разной жесткостью в осевом (продольном) и поперечном направлениях. Различная жесткость в продольном и поперечном направлениях для эффективной работы механического трансформатора реализуется с помощью гофрированной поверхности излучающей оболочки корпуса преобразователя (рис. 4).

Выпуклая форма в сочетании с волнообразной поверхностью оболочки увеличивает эффективный размер эквивалентного монополя при тех же габаритах корпуса НЧИ. Такой преобразователь имеет большую эффективность и добротность в низкочастотном диа-

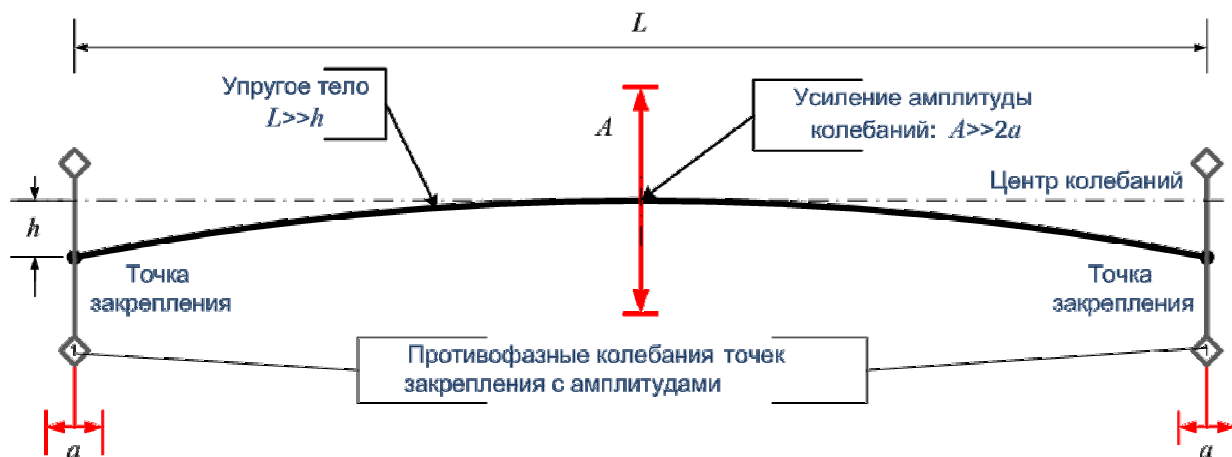


Рис. 2: Принцип работы электромеханического трансформатора преобразователя продольно-изгибного типа

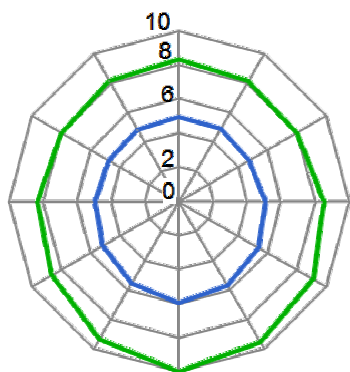


Рис. 3: Осевая неравномерность коэффициента трансформации (2) малогабаритного низкочастотного излучателя продольно-изгибного типа [5]. Синяя линия — коэффициент трансформации на трети длины, зеленая линия — коэффициент трансформации в центре корпуса излучателя

пазоне [13] по сравнению с излучателем, где герметизация и снижение поперечной жесткости выполняется наклейкой резиновых полос на прорези корпуса (рис. 1). Однако, для применения в большем диапазоне глубин, конструкция преобразователя должна включать в себя компенсатор гидростатического давления.

5. 3D-ПЕЧАТЬ КОРПУСА НЧИ МЕТОДОМ ПОСЛОЙНОГО ЛАЗЕРНОГО СПЛАВЛЕНИЯ

Нереализуемую для обычных технологий металлообработки форму корпуса излучателя (рис. 3) можно получить путем селективного лазерного сплавления из металлических порошков (SLM-технологии) [14] по трёхмерной компьютерной STL-модели (рис. 4) для аддитивной 3D-печати. Существующие SLM-установки позволяют выращивать корпуса излучателей размером до 250 мм со скоростью до 25 см³/ч и точностью 0.1%

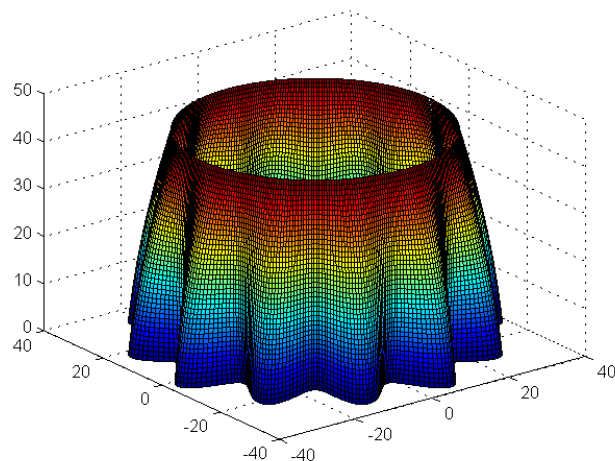


Рис. 4: Излучающая поверхность корпуса (от центра излучателя до торцевого фланца) НЧИ продольно-изгибного типа [13]. Размеры приведены в относительных единицах

от максимального размера (около 0.25 мм) из порошка титана с размером частиц 20–40 мкм [14, 16]. Как показывает практика, преобразователи такого размера эффективны для полосы частот 500–1200 Гц [5, 13]. Технология изготовления корпуса методом 3D-печати не уступает точности механической обработки и удовлетворяет допускам технологической карты, обеспечивая меньший разброс параметров оболочки, что облегчает настройку собранного излучателя. Титан не подвержен коррозии при контакте с углеродными композитами и морской водой, что упрощает гидроизоляцию НЧИ. Кроме того, технология 3D-печати позволяет обойти основной недостаток сплавов титана (плохую обрабатываемость резанием), получая практически любую геометрию корпуса (включая внутренние полости).

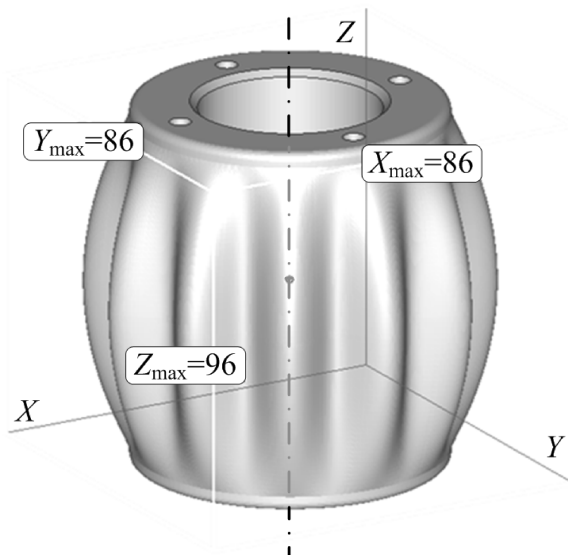


Рис. 5: 3D-компьютерная модель корпуса гидроакустического преобразователя продольно-изгибного типа с волнообразной излучающей поверхностью

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Корпус разработанного в ИПФ РАН излучателя (рис. 5), выполненного из порошка титана Ti-6Al-4V методом послойного лазерного спекания [14] с гофрообразным корпусом с толщиной стенки от 0.6 до 1.4 мм, имеет резонанс на частоте около 3 кГц. Результаты испытаний корпуса излучателя на вибростенде и отклик на воздействие одиночного удара подтверждают результаты моделирования, что позволяет предположить, что такой излучатель на базе пьезокерамического активного элемента из колец ЦТБС-3 [3] может иметь чувствительность 2 Па·м/В в диапазоне 1.6–2.5 кГц. Характеристики таких излучателей позволяют использовать подобные конструктивные решения в системах навигации, связи и телеуправления автономными подводными аппаратами, а также для гидроакустических модемов.

Расчёт, разработка и изготовление экспериментального излучателя с волнообразной излучающей поверхностью выполнены в рамках Государственного задания ИПФ РАН по теме № 0035-2014-0011 «Распространение акустических волн в морской среде и земной коре».

- [1] Корякин Ю. А., Смирнов С. А., Яковлев Г. В. Корабельная гидроакустическая техника. Состояние и актуальные проблемы. Санкт-Петербург: Наука, 2004.
- [2] Mosca F., Matte G., Shimura T. J. Acoust. Soc. Am. 2013. **133**, N 1. P. EL61.
- [3] Luchinin A. G. Hydroacoustics Annual Journal. 2009. **12**. P. 117.
- [4] Quer R., Dasseux Ch. I. Proc. of the Institute of Acoustics. 1999. **21**. P. 117.
- [5] Андреев М. Я., Боголюбов Б. Н., Ключин В. В., Рубанов И. Л. Датчики и системы. 2010. № 12. С. 51.
- [6] Богородский В. В., Зубарев Л. А., Корепин Е. А., Якушев В. И. Подводные электроакустические преобразователи. Л.: Судостроение, 1983.
- [7] Heckl M., Müller H. A. Taschenbuch der Technischen Akustik. Berlin-Heidelberg-New-York: Springer-Verlag, 1975.
- [8] Свердлин Г. М. Гидроакустические преобразователи и антенны. Л.: Судостроение, 1980.
- [9] Боголюбов Б. Н., Кирсанов А. В., Леонов И. И., Смирнов С. А., Фарфель В. А. Гидроакустика. 2015. **23**, № 3. С. 20.
- [10] Бритенков А. К., Боголюбов Б. Н., Кирсанов А. В., Перфилов В. А., Смирнов С. А., Фарфель В. А. Тр. XIII Всерос. конф. «Прикладные технологии гидроакустики и гидрофизики». Санкт-Петербург. 2016. С. 438.
- [11] Джонс Дж. К. Методы проектирования. М.: Мир, 1986.
- [12] Allison M. B., Beth E. C. Journal of The Minerals, Metals & Materials Society. 2016. **68** N 3. P. 724.
- [13] Бритенков А. К., Боголюбов Б. Н., Перфилов В. А., Смирнов С. А., Фарфель В. А. Тр. XX конф. по радиофизике, посвященной 110-летию со дня рождения Г. С. Горелика. Нижний Новгород. 2016. С. 124.
- [14] Назаров А. П. Вестник МГТУ «Станкин». 2011. **1(16)**, № 4. С. 46.
- [15] Бритенков А. К. Обработка информационных представлений сигналов с помощью ОСАМ. Саарбрюккен: LAP Lambert Academic Publishing, 2016.
- [16] Чувильдеев В. Н., Благовещенский Ю. В., Болдин М. С., Сахаров Н. В., Нохрин А. В., Исаева Н. В., Шотин С. В., Лопатин Ю. Г., Белкин О. А., Смирнова Е. С. Письма в ЖТФ. 2015. **41**, № 8. С. 86.

3D-printing possibilities for the manufacturing technology development of hydroacoustic longitudinal-bending type emitters with the complex radiator's body geometry

A. K. Britenkov^{1,2,a}, B. N. Bogolybov^{1,b}, S. A. Smirnov^{1,c}, V. A. Perfilov^{1,d}

¹Center for Hydroacoustics, Institute of Applied Physics of RAS
Nizhny Novgorod, 603950, Russia

²Lobachevsky State University of Nizhni Novgorod. Nizhny Novgorod, 603950, Russia

E-mail: ^ajkd@yandex.ru, ^bboris@appl.sci-nnov.ru, ^carraen@mail.ru, ^dv.perfilov@hydro.appl.sci-nnov.ru

Low-frequency hydroacoustic emitters are being used in a wide range of tasks: from long-distance sound communication and remote control to seismoacoustic reconnaissance. Thus the manufacturing of compact high-power radiators emitting in a sufficiently wide frequency band is an actual task. Making the radiator shell is one of the most laborious and complicated technological operations in the process of creating and customizing hydroacoustic transducers. Unrealizable for the ordinary metalworking complex shapes of radiator's body can be produced by layering laser melting (SLM-technology). Making the radiator shell longitudinal bending-type piezoelectric active element by laser 3D-printing of metal powders eliminates the problem of encapsulation, resistance to hydrostatic pressure and reduce the parameters dispersion of the radiator to facilitate its configuration, as well as improve reliability of the transducer.

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

Keywords: underwater acoustic communication, hydroacoustic modem, piezoelectric hydroacoustics radiator, low-frequency sonar emitter, autonomous unmanned vehicles.

Received 14 September 2017.

Сведения об авторах

1. Бритенков Александр Константинович — канд. физ.-мат. наук, науч. сотрудник, ст. преподаватель; тел.: (831) 416-47-64, e-mail: jkd@yandex.ru.
2. Боголюбов Борис Николаевич — канд. техн. наук, зав. лабораторией; тел.: (831) 436-66-17, e-mail: boris@appl.sci-nnov.ru.
3. Смирнов Сергей Александрович — вед. программист; тел.: (831) 416-06-01, e-mail: arraen@mail.ru.
4. Перфилов Виктор Александрович — зав. лабораторией; тел.: (831) 416-48-80, e-mail: v.perfilov@hydro.appl.sci-nnov.ru.