

## СРАВНИТЕЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ВИБРОМЕХАНИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК КОМПАКТНЫХ ГИДРОАКУСТИЧЕСКИХ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ ПРОДОЛЬНО-ИЗГИБНОГО ТИПА СО СЛОЖНОЙ ФОРМОЙ ИЗЛУЧАЮЩЕЙ ОБОЛОЧКИ

© 2023 г. А. К. Бритенков<sup>a, b, \*</sup>, М. С. Норкин<sup>a, \*\*</sup>, С. Б. Захаров<sup>b, \*\*\*</sup>,  
Р. В. Травин<sup>a, \*\*\*\*</sup>, А. В. Стуленков<sup>a, \*\*\*\*\*</sup>

<sup>a</sup>Институт прикладной физики Российской академии наук,  
ул. Ульянова 46, Нижний Новгород, 603950 Россия

<sup>b</sup>Нижегородский государственный университет им. Н.И. Лобачевского,  
пр. Гагарина 23, Нижний Новгород, 603022 Россия

\*e-mail: brittenkov@ipfran.ru

\*\*e-mail: norkin@ipfran.ru

\*\*\*e-mail: zacharov\_cergey@mail.ru

\*\*\*\*e-mail: travin.roman.nn@mail.ru

\*\*\*\*\*e-mail: stulenkov@ipfran.ru

Поступила в редакцию 13.05.2022 г.

После доработки 10.03.2023 г.

Принята к публикации 16.03.2023 г.

Разработка компактных гидроакустических низкочастотных излучателей высокой удельной мощности связана со сложностями, обусловленными противоречивыми требованиями к габаритам, КПД, излучаемой мощности, ширине рабочей полосы частот, технологичностью изготовления. Для компактных излучателей габариты корпуса ограничивают возможность совмещения резонансов активного элемента и механической колебательной системы, что затрудняет их разработку. Компактный гидроакустический преобразователь продольно-изгибного типа с излучающей поверхностью сложной формы – “3D НЧИ” – разработан для масштабного моделирования и проверки теоретических расчетов такой конструкции, и при сравнительно малых размерах обладает высокой эффективностью. В работе приведены полученные при помощи лазерной виброметрии результаты измерений в воздухе колебательных характеристик двух различных по размеру и вариантам гофрирования титановых корпусов “3D НЧИ” и собранных излучателей. Предложенные конструктивные решения преобразователя с максимальными габаритными размерами менее 100 мм и весом примерно 1 кг обеспечивают чувствительность по напряжению около 1 Па м/В в рабочей полосе частот и основной резонанс в диапазоне 1–2 кГц. “3D НЧИ” обладает высоким значением коэффициента механической трансформации и использования присоединенной массы, а также имеет ряд других преимуществ по сравнению с аналогичными разработками. Показано, что различия в размерах двух представленных излучателей на 10–12% и геометрии излучающих оболочек (12 и 16 волн гофрирования) приводят к различию измеренных в воздухе резонансных частот (4.0 и 3.5 кГц соответственно). При этом излучатель большего размера обладает меньшим разбросом значений механического коэффициента трансформации по гребням и впадинам корпуса, а также более плотным распределением спектральных компонент за пределами основной полосы частот.

*Ключевые слова:* гидроакустика, телеуправление, пьезоэлектрический преобразователь, звукоподводная связь, гидроакустический модем, гидроакустический излучатель, лазерная виброметрия

DOI: 10.31857/S0320791922600251, EDN: UDBQPS

### ВВЕДЕНИЕ

Сфера применения низкочастотных гидроакустических излучателей (НЧИ) непрерывно расширяется, а многочисленные приложения гидроакустики уже не ограничиваются задачами в акваториях морей и океанов [1, 2]. Например, на

самолетах со взлетной массой более 27 т бортовые самописцы содержат гидроакустические маяки для облегчения поиска в случае падения аппарата в водном или заболоченном районе.

Современная тенденция миниатюризации затрагивает и гидроакустические устройства [3].

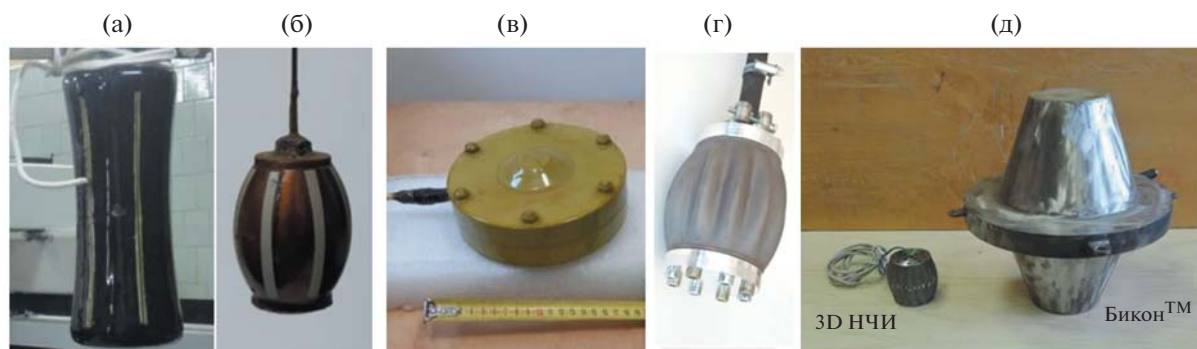


Рис. 1. Компактные низкочастотные излучатели.

Компактные НЧИ требуются во многих задачах гидроакустики [4]. Габариты излучателя наиболее критичны для транспортируемых гидроакустических буев [5], устройств навигации и связи [6], в том числе устанавливаемых на подводных необитаемых аппаратах и системах аварийного оповещения. Все большую актуальность приобретает разработка компактных НЧИ (размером корпуса менее 50 см) высокой удельной мощности [7]. Как известно, КПД и рабочая частота излучателя напрямую зависят от размера излучающей поверхности, который определяется как габаритами преобразователя, так и его конструктивным устройством. Проблематично изготовить компактный НЧИ с высокой эффективностью в широкой полосе частот [8], так как малые размеры преобразователя затрудняют совмещение резонансов активного элемента и механической колебательной системы преобразователя [9].

Наибольшей технологичностью изготовления при ограниченных размерах и высоком КПД обладают преобразователи продольно-изгибного типа (рис. 1а, 1б, 1г) [10]. Кроме того, что параметры излучателей такого типа существенно зависят от формы корпуса и его защитного покрытия, типичной проблемой подобных НЧИ является герметизация продольных прорезей, снижающих поперечную жесткость корпуса и определяющих рабочую частоту. Обычно такая герметизация выполняется эластичными вставками с последующим покрытием всего корпуса слоем полиуретана, что сопряжено с низкой надежностью клеевых соединений и потерями энергии в покрытии. Более эффективным является гофрирование корпуса (рис. 1г), например, в конструкции “3D НЧИ” – преобразователя продольно-изгибного типа с излучающей оболочкой сложной формы, что кроме устойчивости к циклическим нагрузкам (ресурс “3D НЧИ” составляет более  $10^{10}$  циклов) имеет очевидные технологические преимущества при серийном изготовлении.

Корпуса “3D НЧИ” изготовлены из сплава титана Ti–6Al–4V с применением технологии по-

слойного лазерного сплавления, что обеспечивает подтвержденную испытаниями высокую стабильность физико-механических свойств материала [11] в совокупности с повторяемостью других технических параметров.

Использование связанных колебательных систем является одним из способов повышения эффективности НЧИ. Пример подобного конструктивного решения – компактный преобразователь инерционно-изгибного типа с пьезокерамическим активным элементом (рис. 1г). Излучение звука в этом НЧИ основано на преобразовании изгибных колебаний пластин с клееными пьезокерамическими кольцами в возвратно-поступательные колебания излучающих мембран. Активный элемент излучателя имеет поперечную поляризацию, изменяя диаметр при подаче электрического напряжения. Ввиду исключения влияния внешнего гидростатического давления на активный элемент в таком НЧИ практически нет дрейфа частоты по глубине. Однако небольшой размер активного элемента и отсутствие механического трансформатора не позволяет излучать большую акустическую мощность [7].

Для НЧИ размером около 1 м оптимальным техническим решением является Бикон™ – монополюс встречно-поршневого типа с конусообразным излучающим корпусом. НЧИ Бикон™ (рис. 1д) имеет КПД до 70–80%, развивая акустическое давление 10 кПа при ресурсе до  $10^{12}$  циклов. Бикон™ можно использовать без компенсатора гидростатического давления на глубинах до 300–400 м.

Уменьшение габаритных размеров НЧИ подобного типа (менее 0.2 м) снижает чувствительность преобразователя по напряжению из-за сокращения длины активного элемента и падения амплитуды колебаний излучающей оболочки. Миниатюрный Бикон™ будет иметь невысокую удельную мощность, поэтому излучатели встречно-поршневого типа целесообразно использовать при габаритных размерах корпуса НЧИ не

**Таблица 1.** Параметры корпусов “3D НЧИ” № 1 и № 2

| Параметр                                | “3D НЧИ” № 1 | “3D НЧИ” № 2 |
|---|--------------|--------------|
| Размер корпуса (диаметр × длина), мм    | 86 × 90      | 102 × 92     |
| Число волн гофрирования                 | 12           | 16           |
| Максимальная толщина стенки корпуса, мм | 1.40         | 1.46         |
| Минимальная толщина стенки корпуса, мм  | 0.60         | 0.55         |
| Толщина фланца, мм                      | 14           | 18           |
| Амплитуда гофрирования, мм              | 4.1          | 6.0          |
| Масса корпуса, кг                       | 0.42         | 0.61         |

менее 0.2–0.3 м. Кроме того, из-за отсутствия механического трансформатора, увеличивающего амплитуду колебаний активного элемента, коэффициент использования присоединенной массы воды НЧИ типа Бикон™ достаточно низкий. Это обстоятельство не позволяет изготовить компактные и миниатюрные НЧИ такого типа для частот 1 кГц и ниже. Для диапазона частот 1.0–2.0 кГц НЧИ продольно-изгибного типа “3D НЧИ” и НЧИ типа Бикон™ различаются по максимальным габаритам более чем в 4 раза, а по массе – почти в 25 раз. Так, излучатель типа Бикон™ для диапазона частот 1.5–1.6 кГц (рис. 1д, справа) весит 30 кг, а “3D НЧИ” (рис. 1д, слева) для подобного диапазона частот – около 1 кг.

Сравнение разных типов НЧИ приводит к закономерному выводу о том, что баланс между размерами преобразователя, его КПД, полосой излучаемых частот и максимальной излучаемой акустической мощностью достигается при помощи использования излучающих элементов со специальной геометрией и пьезоэлементов, нагруженных через механический трансформатор на присоединенную массу воды. Поскольку параметры НЧИ существенно зависят как от формы излучающих поверхностей, так и от его размеров, анализ резонансных характеристик компактных “3D НЧИ” (как корпусов, так и излучателей в сборе) и сопоставление с результатами электроакустических измерений [12] позволяет скорректировать направление конструкторского поиска при разработке излучателей такой конструкции.

## 1. ИССЛЕДОВАНИЕ КОЛЕБАТЕЛЬНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК И ПРОВЕРКА РАСЧЕТОВ “3D НЧИ”

Разработка низкочастотных акустических излучателей высокой удельной мощности предполагает экспериментальную проверку важнейших параметров “3D НЧИ”, в первую очередь значений основных резонансов с целью совершенствования конструкции и повышения эффективности излучателя.

Определение резонансных характеристик “3D НЧИ” целесообразно проводить бесконтактным способом, например, при помощи лазерной виброметрии, основанной на эффекте Доплера [13]. В отличие от измерений виброакселерометрами, такой подход обеспечивает более точное представление о динамических характеристиках объекта. Немаловажной особенностью лазерной виброметрии является возможность измерения колебательных характеристик оболочек в труднодоступных местах, таких как впадины гофрирования. Возбуждение корпусов НЧИ можно производить на вибростенде, а “3D НЧИ” в сборе – электрическим сигналом, подаваемым на активный элемент излучателя. Такие способы возбуждения при выбранном методе регистрации колебаний наиболее эффективны ввиду минимизации влияния элементов оснастки и измерительного оборудования.

Согласно предварительным расчетам [14], “3D НЧИ” размерами до  $\varnothing 100 \times 100$  мм и массой примерно 1 кг с корпусом из титана устойчив к гидростатическому давлению в эшелоне глубин до 800 м, обладая чувствительностью по напряжению до 2 Па м/В в диапазоне 1.5–2.5 кГц. Величина механического напряжения в корпусе такого “3D НЧИ” достигает  $3.5 \times 10^4$  Па на основном резонансе и  $4.5 \times 10^4$  Па при воздействии гидростатического давления на глубине 1 км, что на несколько порядков ниже предельного значения для титана [15], в том числе полученного при изготовлении методом послойного лазерного сплавления.

Экспериментальные образцы “3D НЧИ” № 1 и № 2 при незначительных различиях в геометрии корпуса и массо-габаритных параметрах (табл. 1) можно считать практически идентичными с использованной в расчетах моделью корпуса излучателя (рис. 2).

Так как в предварительных расчетах при помощи конечно-элементного моделирования использованы приближения и оценки для корпуса, имеющего максимальные размеры  $\varnothing 86 \times 96$  мм и сходную с “3D НЧИ” № 1 амплитуду, число волн гофрирования и толщину оболочки, оба исследу-

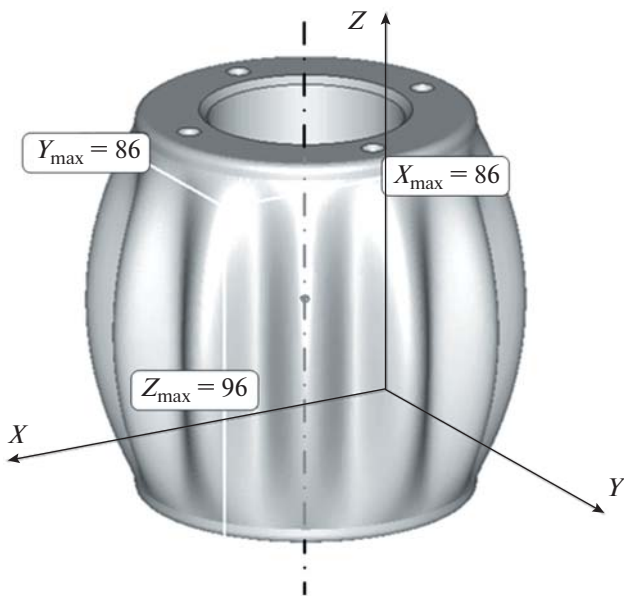


Рис. 2. STL-модель корпуса “3D НЧИ”, использованная для предварительных расчетов характеристик преобразователя.

емых излучателя (№ 1 и 2) можно считать незначительными вариациями расчетной модели. Применение разных виброметров (однолучевого с неподвижным лучом и однолучевого сканирующего), способов возбуждения колебаний (механического и электрического) и типов возбуждающего сигнала (гармонический сигнал, ЛЧМ, розовый шум и т.д.) позволяет построить наиболее полную картину резонансных характеристик. Погрешность измерений лазерным виброметром спектральной плотности амплитуды виброскорости в рассматриваемом частотном диапазоне составляет  $2.0\text{--}4.0 \times 10^{-8}$  мкм/с Гц<sup>-1</sup> при падении лазерного луча по нормали на рассеивающую свет поверхность. С учетом пересчета этих значений в перемещение, погрешность прибора на несколько порядков меньше зарегистрированных в процессе измерений величин. Более значительные погрешности могут возникать при измерении в точках на краях поверхности излучателя, где угол падения луча существенно отличается от нормального и измеряется не нормальная компонента скорости или смещения поверхности излучателя, а ее проекция на луч. Для исследуемых в работе излучателей и расстояния до виброметра, разница составляет не более 3%. В целом же для количественного сравнения амплитуд можно выбрать точки на небольшом удалении от центра области, где падение луча можно считать нормальным. Основные погрешности при таком методе измерений определяются инструментальной ошибкой. Разрешение по частоте составляет не менее 1% для диапазона колебательной скорости до 20 мм/с и

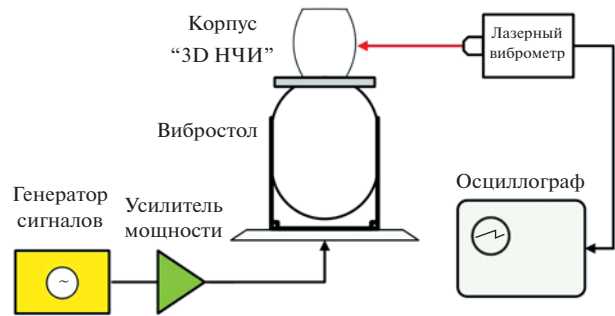


Рис. 3. Схема измерений резонансных характеристик корпусов “3D НЧИ” с использованием лазерного виброметра.

полосы частот до 0.2 МГц при соотношении сигнал/шум более 90 дБ. Таким образом, точность определения частотных характеристик составляет не менее 10–20 Гц, поскольку амплитуда колебаний поверхности не превышает 2 нм.

### 1.1. Резонансные характеристики излучающих оболочек “3D НЧИ”

Схема установки для исследования при помощи лазерного виброметра колебательных характеристик корпуса “3D НЧИ” на вибростенде приведена на рис. 3.

Возбуждение колебаний закрепленного на вибростоле корпуса осуществлялось розовым шумом и ЛЧМ-сигналами длительностью 20 с, где частота нарастала от 100 Гц до 10 кГц. Оба способа в рамках инструментальной точности измерений дают одинаковые частотные спектры. При сходных размерах двух изделий с различными вариантами гофрирования излучающей поверхности (ребри одинаковой высоты для корпуса № 1 и чередование гребней по высоте для корпуса № 2), основные резонансы обеих оболочек различаются на 100–150 Гц и лежат в полосе от 3.1 до 3.3 кГц (рис. 4). Наличие нескольких достаточно узких полос за пределами основного резонанса обоих изделий также связано с геометрией “3D НЧИ”, определяющей соотношение поперечной и продольной жесткости корпуса. Характерное снижение более чем на 20% отклика корпуса “3D НЧИ” № 2 на возбуждение в основной полосе частот по сравнению с “3D НЧИ” № 1 связано с увеличением его продольной жесткости: поперечное гофрирование имеет на 33% больше гребней (переменной высоты) при меньшей на 8% толщине стенки корпуса в поперечнике по сравнению с “3D НЧИ” № 1. Отсутствие явно выраженных резонансов за пределами основной полосы частот для корпуса “3D НЧИ” № 2 (рис. 5) позволяет сделать вывод о его большей эффективности в рабочей полосе частот.

Незначительные различия откликов корпусов “3D НЧИ” в основной полосе частот и сходный характер резонансных кривых (рис. 5 и 6), с одной стороны, указывают на повторяемость параметров подобного конструктивного решения при серийном изготовлении излучателей, а с другой — на возможность разработки изделий с заданными частотными характеристиками. Приведенные в работе [12] результаты измерений зависимости чувствительности по напряжению от частоты собранного излучателя “3D НЧИ” № 1 (рис. 1г) в воде иллюстрируют, что наличие дополнительных резонансов корпуса отражается и на его электроакустических характеристиках. Максимальное значение чувствительности по напряжению “3D НЧИ” № 1 в воде достигается на частотах 20–22 кГц [12], что связано со сближением в диапазонах выше 10–12 кГц резонансов корпуса (рис. 6) и активного элемента.

### 1.2. Механический коэффициент трансформации “3D НЧИ”

Как отмечено выше, преобразователи продольно-изгибного типа при сравнительно высокой технологичности изготовления имеют наибольшую эффективность по сравнению с излучателями, использующими другие способы акустического оформления. Электромеханический трансформатор преобразователя данного типа нагружен на активно-реактивную нагрузку [14], что при компактных размерах НЧИ из-за присоединенной массы  $M_{пр}$  позволяет в основной полосе частот обеспечить низкую частоту собственных колебаний  $f_{НЧИ}$

$$f_{НЧИ} = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{k}{m_{кк} + n^2 M_{пр}}}, \quad (1)$$

где  $k$  — коэффициент упругости механической колебательной системы, определяемый жесткостью конструкции преобразователя,  $m_{кк}$  — эквивалентная масса колебательной системы, зависящая от конструктивного устройства излучателя,  $n$  — механический коэффициент трансформации. Присоединенная масса воды оказывает большое влияние на частотные характеристики НЧИ, так как механический трансформатор преобразует возвратно-поступательные колебания активного элемента с малой амплитудой в поперечные колебания излучающих элементов оболочки с большей амплитудой:

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

где  $a$  — амплитуда продольных колебаний торцевых фланцев корпуса,  $A$  — амплитуда поперечных колебаний поверхности излучающей оболочки. Таким образом, коэффициент механической трансформации является одним из главных фак-

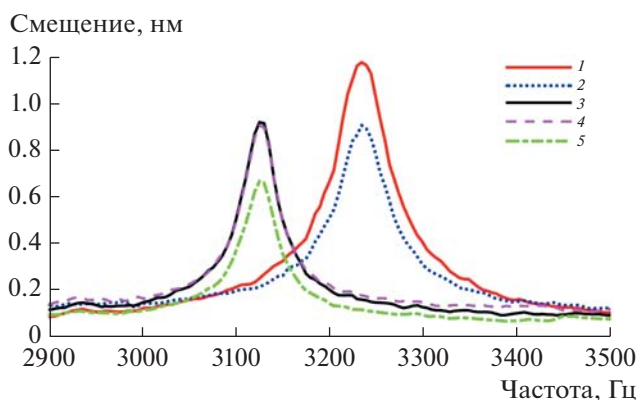


Рис. 4. АЧХ корпусов “3D НЧИ” в основной полосе частот. Для корпуса “3D НЧИ” № 1: 1 — впадина, 2 — гребень; для корпуса “3D НЧИ” № 2: 3 — впадина, 4 — малый гребень, 5 — большой гребень.

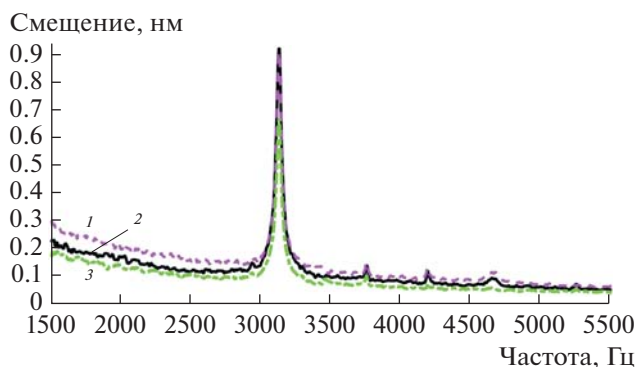


Рис. 5. АЧХ корпуса “3D НЧИ” № 2 при непрерывном воздействии белым (розовым) шумом и ЛЧМ-сигналами на вибростенде. На графике обозначено: 1 — малый гребень, 2 — впадина, 3 — большой гребень.

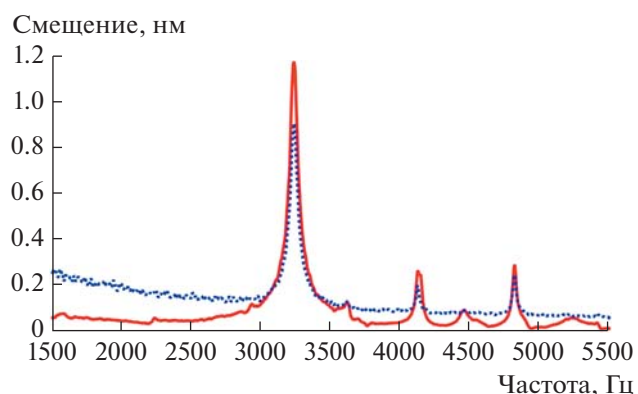


Рис. 6. АЧХ корпуса “3D НЧИ” № 1 при непрерывном воздействии белым (розовым) шумом и ЛЧМ-сигналами на вибростенде. На графике обозначено: синий пунктир — гребень, сплошная красная линия — впадина.



торов, определяющих эффективность НЧИ [5, 16]. Отсутствие присоединенной массы жидкости или ее механического эквивалента не меняет величину механического коэффициента трансформации излучателя, что позволяет рассматривать измерение амплитуды колебаний корпуса НЧИ в колебательной системе “вибростол–оболочка” (рис. 3) или “3D НЧИ” в сборе как независимый метод оценки его эффективности.

Проведенные в воздухе при помощи однолучевого лазерного виброметра измерения амплитуды колебаний корпусов собранных НЧИ показали сходные коэффициенты механической трансформации обоих излучателей. Для усреднения результатов измерение коэффициента трансформации выполнено для нескольких гребней и впадин и в нескольких точках фланца, расположенных на пересекающихся диаметральных секущих от центра к краям с шагом 2–4 мм, как это описано в [14]. Среднее значение коэффициента трансформации по гребням и впадинам для каждого из собранных излучателей “3D НЧИ” № 1 и № 2 составляет около 26. Такая величина согласно (1) характеризует использование значительной присоединенной массы воды по отношению к конструктивной массе самого излучателя, так как эффективность НЧИ (в смысле приближения его к невесомой пульсирующей сфере)

$$\kappa = \frac{1}{\xi + 1} \quad (3)$$

определяется соотношением

$$\xi = \frac{m_{\text{кв}}}{M_{\text{пр}}^*}, \quad (4)$$

где  $M_{\text{пр}}^*$  – приведенная в точку приложения сил присоединенная масса воды.

Поскольку коэффициент механической трансформации излучателя продольно-изгибного типа выражается соотношением прогиба  $d$  и длины  $L$  излучающего элемента, то из геометрических соотношений его предельно возможное значение составляет

$$n_{\text{пр}} \approx \frac{2d}{L \left( 1 - \frac{L}{\sqrt{L^2 + 4d^2}} \right)}. \quad (5)$$

Для корпуса “3D НЧИ” длиной 92 мм, где по внутренней поверхности образующей впадины корпуса прогиб составляет менее 0.5 мм,  $n_{\text{пр}} \geq 45$ . Сложная форма оболочки не позволяет считать это значение ориентиром, однако существенно меньшие значения коэффициента механической трансформации для гребней “3D НЧИ” обеспечивают большую эффективность по сравнению с

излучателями продольно-изгибного типа традиционной конструкции [10].

Деформация геометрии (изменение прогиба) оболочки после сборки НЧИ из-за нагружения активного элемента приводит к изменению значения механического коэффициента трансформации. Тем не менее величину этого коэффициента до сборки и после можно использовать в качестве дополнительного параметра, связанного с электроакустическими характеристиками “3D НЧИ”.

## 2. РЕЗОНАНСНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ СОБРАННЫХ “3D НЧИ” В ВОЗДУХЕ

Для некоторых типов НЧИ можно приближенно рассчитать резонансную частоту преобразователя, пользуясь только данными измерений в воздухе. Предварительная оценка “3D НЧИ” также подразумевает снятие его частотных характеристик в воздухе. Схема измерений собранных излучателей (рис. 7) в воздухе при помощи однолучевого лазерного виброметра приведена на рис. 3 в работе [14].

Сравнение резонансных частот “3D НЧИ” № 1 и № 2 по максимумам амплитуды колебаний корпусов показало, что незначительное увеличение размеров излучающего элемента повлияло на частоту основного резонанса. Так как корпус “3D НЧИ” № 2 имеет несколько большие размеры, чем “3D НЧИ” № 1, частота основного резонанса которого в воздухе равна 4.0 кГц (рис. 8а), резонанс собранного “3D НЧИ” № 2 в воздухе оказался значительно ниже – 3.5 кГц (рис. 8б). Диссипация и различия связанных колебательных систем “оболочка–активный элемент” и “оболочка–торцевые фланцы” приводит также к расхождению АЧХ аксиальных и радиальных колебаний корпуса, а спектры обоих излучателей содержат комбинационные частоты, обусловленные взаимодействием нескольких осцилляторов.

Различие максимального диаметра корпуса “3D НЧИ” № 2 на 14 мм и 2 мм по длине существенно увеличивает объем его присоединенной массы, которая в значительной мере определяет частоту основного резонанса (1). С учетом квадратичной зависимости от коэффициента трансформации (2), вносимая поправка также потребует корректировки для расчета частоты основного резонанса излучателя в воде (1).

Для уточнения полученных результатов и построения более полной картины распределения колебаний излучающей оболочки “3D НЧИ” на торцах проведены измерения с помощью трехкомпонентного сканирующего лазерного виброметра. Наибольшее значение амплитуды колебаний торцевых фланцев обоих излучателей достигается в основной полосе частот. Кроме этого, на разных частотах выявлено несколько мод колеба-



Рис. 7. Излучатели “3D НЧИ” ((а) – № 1, (б) – № 2) в сборе, закрепленные на эластичном подвесе.

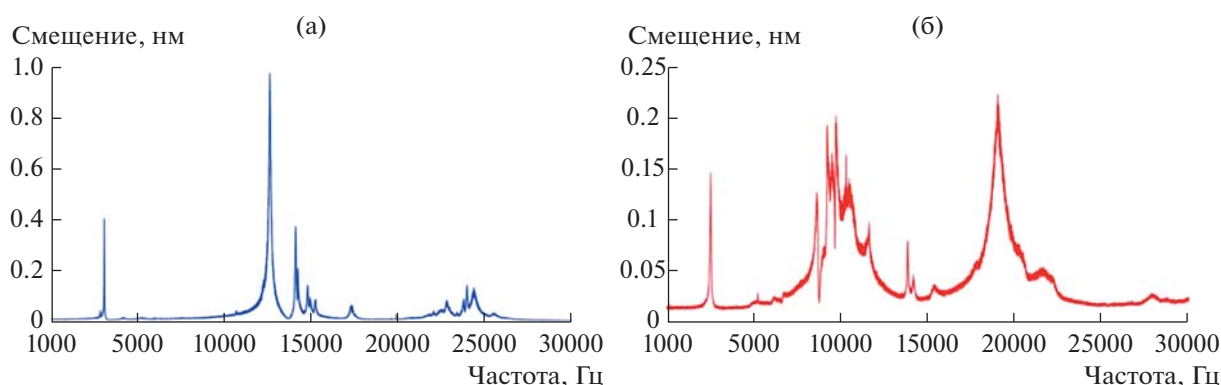


Рис. 8. Спектральные распределения амплитуды колебаний в воздухе на торце собранных преобразователей “3D НЧИ” ((а) – № 1, (б) – № 2).

ний. Распределение амплитуды колебаний фланцев обоих изделий практически повторяет рис. 7 в работе [14]: от центра к краям размах колебаний увеличивается в 5.5–6.0 раз для “3D НЧИ” № 1 и в 3.5–4.2 раза для “3D НЧИ” № 2. Подобное возрастание амплитуды колебаний на краях фланца по отношению к амплитуде колебаний активного элемента связано как с эластичностью резьбовых соединений, так и с конечной жесткостью фланцев, ограниченных размерами корпуса. Различие фланцев “3D НЧИ” № 1 и № 2 закономерно вызывает различие распределения амплитуды колебаний на торцах излучателей.

Оснащение “3D НЧИ” активными элементами, собранными из 8 колец ЦТБС-3, задает толщину торцевых гаек (10–12 мм), что при небольших размерах преобразователя приводит к эластичности как резьбового соединения, так и всего узла торцевого фланца в целом. Габариты корпуса “3D НЧИ” ограничивают максимальную длину и массу активного элемента и определяют эффективность преобразования и чувствительность из-

лучателя по напряжению. Поскольку чувствительность напрямую зависит от количества пьезокерамических колец активного элемента, а его длина обратно пропорциональна частоте основного резонанса, то отсутствие совмещения резонансов этих колебательных систем препятствует повышению эффективности НЧИ и максимальной излучаемой акустической мощности.

### 3. ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ ИЗМЕРЕНИЙ И СРАВНЕНИЕ ИЗЛУЧАТЕЛЕЙ № 1 И № 2

Усредненные для собранных излучателей по гребням и впадинам коэффициенты механической трансформации  $n$  имеют примерно одинаковые значения (табл. 2).

Значение коэффициента  $n$  превосходит показатели более габаритных преобразователей [6, 10], что дополнительно свидетельствует о высокой эффективности конструкции “3D НЧИ”. В силу особенностей геометрии оболочки “3D НЧИ” № 2 в

Таблица 2. Основные характеристики “3D НЧИ” № 1 и № 2

| Параметр  | “3D НЧИ” № 1 | “3D НЧИ” № 2 |
|---|--------------|--------------|
| Размер активного элемента (длина × диаметр), мм                   | 71.2 × 34.2  | 75.6 × 34.3  |
| Масса активного элемента, кг                                      | 0.36         | 0.39         |
| Масса собранного излучателя, кг                                   | 0.95         | 1.20         |
| Основной резонанс корпуса в воздухе, Гц                           | 3250         | 3120         |
| Коэффициент механической трансформации корпуса<br>впадина/гребень | 2.2/1.8      | 6.0/4.4      |
| Резонанс собранного излучателя (в воздухе), кГц                   | 4.0          | 3.5          |
| Коэффициент механической трансформации собранного излучателя      | 24–27        | 26–28        |

отличие от “3D НЧИ” № 1, амплитуды колебаний малых гребней и впадин почти одинаковы, а для больших гребней и впадин практически совпадают с “3D НЧИ” № 1, где различие составляет 1.4 раза [14]. Характер колебаний оболочки “3D НЧИ” при возбуждении шумовыми сигналами позволяет сделать вывод о сходных распределениях мод для обоих изделий.

Увеличение размера корпуса “3D НЧИ” № 2 на 10–12% относительно “3D НЧИ” № 1 и изменение его формы, как видно из частотных характеристик, существенно повлияло на характеристики излучателя: в воздухе резонансные частоты изделий различаются почти на 500 Гц. Предполагая, что оба корпуса имеют одинаковую жесткость и учитывая больший объем “3D НЧИ” № 2, чем “3D НЧИ” № 1, в соответствии с предварительными данными электроакустических измерений “3D НЧИ” № 1 и оценкой резонансной частоты в воде [14], можно ожидать, что “3D НЧИ” № 2 способен излучать гидроакустические сигналы в полосе частот 1.1–1.3 кГц. Однако, ввиду сложности теоретических расчетов, подобные оценки требуют экспериментальной проверки.

Из сравнения “3D НЧИ” № 1 и 2, в частности резонансных кривых в воздухе (рис. 8), видно, что незначительное изменение формы и размеров корпуса на 10–12% подтверждает выбранное направление конструкторского поиска по увеличению удельной мощности НЧИ одновременно с понижением частоты основного резонанса.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведенные исследования показали, что незначительные изменения размеров и геометрии корпуса “3D НЧИ” существенно влияют на характеристики излучателя. Различие вибромеханических характеристик собранных изделий, в частности резонансных частот в воздухе и расположения резонансных полос в спектрах откликов корпусов, позволяет оценить влияние геометрии излучающей оболочки на параметры “3D НЧИ”. Поскольку увеличение размеров “3D НЧИ” на

10–12% и массы на 25% привело к понижению частоты резонанса в воздухе на 13%, можно сделать вывод о том, что увеличение размера корпуса и активного элемента на 30–40% позволит проектировать компактные “3D НЧИ” высокой удельной мощности для диапазона частот 1 кГц и ниже.

Материалы и конструкция “3D НЧИ” допускают транспортировку авиакосмическими носителями, что может быть недопустимо для гидроакустических излучателей другой конструкции из-за особенностей применяемых материалов. “3D НЧИ” в дополнение к достаточно низкой для своих размеров резонансной частоте обладает достаточно высокой удельной акустической мощностью в сравнении с аналогичными по габаритам и массе НЧИ других типов [17].

Исследования виброакустических характеристик “3D НЧИ” подтверждают перспективность такой конструкции и актуальность разработки масштабных моделей при проектировании мощных гидроакустических излучателей.

Авторы выражают благодарность заведующему отделом акустики океана Д.А. Касьянову, заведующему лабораторией экспериментальной электроники В.А. Перфилову, заведующему лабораторией прикладной гидроакустики Б.Н. Боголюбову, заведующему сектором М.С. Дерябину, ведущему электронику О.Р. Фаизову и инженеру В.К. Бахтину за внимание к работе, помощь в подготовке, организации и проведении экспериментальных работ, а также в обсуждении результатов исследований.

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

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Yamaoka H., Kaneko A., Park J.H., Zheng H., Gohda N., Takano T., Zhu X.H., Takasugi Y. Coastal acoustic tomography system and its field application // IEEE J. Ocean. Eng. 2002. V. 27. № 2. P. 283–295. Электронный ресурс.  
<https://doi.org/10.1109/JOE.2002.1002483>



2. *Munk W.* Acoustic thermometry of ocean climate (АТОС) // *J. Acoust. Soc. Am.* 1999. V. 105. № 2. P. 982. <https://doi.org/10.1121/1.425359>
3. *Дикарев А.В., Дмитриев С.М.* Гидроакустическое устройство. Патент РФ: № 2655702 МПК H04R1/44.
4. *Курьянов Б.Ф., Пенкин М.М.* Цифровая акустическая связь в мелком море для океанологических применений // *Акуст. журн.* 2010. Т. 56. № 2. С. 245–255.
5. *Богородский В.В., Зубарев Л.А., Корепин Е.А., Якушев В.И.* Подводные электроакустические преобразователи. Л.: Судостроение, 1983. 248 с.
6. *Корякин Ю.А., Смирнов С.А., Яковлев Г.В.* Корабельная гидроакустическая техника. Состояние и актуальные проблемы. СПб.: Наука, 2004. 410 с.
7. *Бритенков А.К., Фарфель В.А., Боголюбов Б.Н.* Сравнительный анализ электроакустических характеристик компактных низкочастотных гидроакустических излучателей высокой удельной мощности // *Прикладная физика.* 2021. № 3. С. 72–77. <https://doi.org/10.51368/1996-0948-2021-3-72-77>
8. *Шаврин С.А.* Проблемные вопросы изготовления гидроакустических преобразователей // Сб. докл. I научно-практической конф. молодых специалистов “ИСТОК-2016”. СПб.: АО “Концерн “Океан-прибор”, 2016. С. 121–125.
9. *Mosca F., Matte G., Shimura T.* Low-frequency source for very long-range underwater communication // *J. Acoust. Soc. Am.* 2013. V. 133. № 1. P. EL61–EL67. <https://doi.org/10.1121/1.4773199>
10. *Боголюбов Б.Н., Кирсанов 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. Т. 23. № 3. С. 20–26.
11. *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 // *Mater. Phys. Mech.* 2021. Т. 47. № 1. С. 139–158. [https://doi.org/10.18149/mpm.4712021\\_14](https://doi.org/10.18149/mpm.4712021_14)
12. *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 МГУ им. М.В. Ломоносова. 2020. № 1. С. 2010106-1–2010106-5.
13. *Vuchhave P.* Laser Doppler velocimeter with variable optical frequency shift // *Opt. and Laser Technology.* 1975. V. 7. № 1. P. 11–16.
14. *Бритенков А.К., Боголюбов Б.Н., Дерябин М.С., Фарфель В.А.* Измерение электромеханических характеристик компактного низкочастотного гидроакустического излучателя сложной формы // *Труды МАИ.* 2019. № 105. С. 1–24.
15. *Стрельченко С.С., Лебедев В.В.* Соединения А<sup>3</sup>В<sup>5</sup>: Справочник. М.: Металлургия, 1984. 144 с.
16. *Вовк И.В., Мясин Ю.В.* Низкочастотный продольно-изгибный преобразователь с плоской излучающей поверхностью // *Акуст. журн.* 1998. Т. 44. № 3. С. 337–343.
17. *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.