

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

## **Измерение электромеханических характеристик компактного низкочастотного гидроакустического излучателя сложной формы**

**Бритенков А.К.\*, Боголюбов Б.Н.\*\*, Дерябин М.С.\*\*\*, Фарфель В.А.\*\*\*\***

*Институт прикладной физики РАН,*

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

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

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

*\*\*\*e-mail: mmm1984@inbox.ru*

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

**Статья поступила 10.04.2019**

### **Аннотация**

Низкочастотные гидроакустические излучатели применяются в широком спектре практических приложений: от дальней звукоподводной связи и телеуправления до сейсмоакустической разведки. Изготовление корпуса излучателя является одной из самых сложных технологических процедур в процессе создания и настройки. Предложенная конструкция гидроакустического преобразователя с гофрированной излучающей оболочкой позволяет исключить ряд проблем герметизации, устойчивости к гидростатическому давлению, разбросу параметров и надёжности. Для оценки эффективности предложенного излучателя проведены измерения механического коэффициента трансформации. Распределения амплитуд колебаний излучающей оболочки и активного элемента преобразователя получены методом лазерной виброметрии. Приведено сравнение результатов измерений

электроакустических характеристик излучателя в воде с результатами оценки его резонансной частоты на основе упрощённой теоретической модели. Проведённые исследования показали перспективность предложенной конструкции излучателя для широкого круга акустических приложений.

**Ключевые слова:** звукоподводная связь, гидроакустический модем, электромеханический трансформатор, низкочастотный гидроакустический излучатель.

## Введение

Гидроакустический преобразователь представляет собой технически сложное устройство, являющееся совокупностью механических и электрических цепей, где происходит преобразование электрической энергии сигнала в механические колебания окружающей среды. Гидроакустические излучатели применяются в широком спектре задач: для гидроакустических модемов [1], передачи команд телеуправления [2], для связи с автономными акустическими радиобуями-маяками и систем управления [2], а также для геолого-, сейсмо- и рыбопромысловой разведки [4]. Обеспечение связи с подводными автономными необитаемыми аппаратами [2], коммуникации с радиобуями на больших расстояниях, как правило, базируется на использовании мощных компактных низкочастотных гидроакустических излучателей [5]. Кроме того, включение гидроакустических излучателей в состав авиационных бортовых самописцев может облегчить задачу поиска остатков и расшифровки информации о крушении летательных аппаратов в зоне крупных

акваторий и заболоченных районах. Сфера применения гидроакустических излучателей непрерывно расширяется [6], а многочисленные приложения гидроакустики уже давно не ограничиваются традиционными задачами в акваториях морей и океанов [7].

Цель настоящей работы – измерение коэффициента механической трансформации компактного гидроакустического излучателя для сравнения полученных с помощью упрощённой теоретической модели оценок резонансной частоты в основной полосе с результатами электроакустических измерений в воде. Известно [11], что коэффициент механической трансформации в значительной степени определяет резонансную частоту преобразователя в воде, если известна частота его собственных колебаний в воздухе. Распределения амплитуд колебаний излучающей оболочки и активного элемента преобразователя получены с помощью метода лазерной виброметрии. Результаты измерений электроакустических характеристик излучателя в воде проанализированы в сравнении с результатами оценки резонансной частоты на основе коэффициента механической трансформации и частоты собственных колебаний преобразователя в воздухе.

### **Низкочастотные активные гидроакустические системы и комплексы**

На текущий момент низкочастотная (сотни Гц) «подсветка» акватории при помощи авиационных радиогидроакустических буев (РГАБ) позволяет повысить поисковый потенциал при работе по малозумным целям и в сложных условиях [8]. Буи сбрасываются самолетами или вертолетами с высоты 30–200 м на скоростях до 700 км/ч. РГАБ обеспечивают относительно большую дальность

обнаружения целей при удовлетворительной точности определения координат и непрерывность наблюдения за подводной обстановкой, а также возможность одновременного сбора информации с нескольких буёв.

Перспективным направлением является разработка систем связи с использованием гидроакустических каналов связи. Наиболее сложным вопросом остаётся расчёт и изготовление гидроакустических модемов, в том числе и для связи с дистанционно управляемыми автономными необитаемыми аппаратами неограниченного района дислокации. В качестве основного частотного диапазона для многопозиционной работы современных гидроакустических модемов является диапазон от 5 до 30 кГц, для гидроакустических станций – от 1 до 2 кГц (дополнительный диапазон – до 1 кГц). При этом частотные параметры преобразователя и излучаемая акустическая мощность в значительной степени влияют на дальность действия гидроакустических систем [8] и модемов [9]. Поэтому особую актуальность приобретает конструирование и производство компактных гидроакустических преобразователей (размером корпуса менее 50-60 см) высокой удельной мощности, работающих в низкочастотном диапазоне. Для гидроакустических станций надводных кораблей, буксируемых активных гидроакустических станций, опускаемых гидроакустических станций вертолетов (ОГАС), а также радиогидроакустических авиационных буёв и стационарных гидроакустических средств требуются всё новые и новые образцы гидроакустических преобразователей. Ввиду зависимости КПД излучателя от его волнового размера, в значительной степени определяемого габаритами преобразователя и в меньшей – конструктивным устройством, тип преобразователя

и форма излучающей поверхности являются главными объектами конструкторского поиска при разработке и изготовлении мощных низкочастотных гидроакустических излучателей [10].

### **Малогабаритные гидроакустические преобразователи**

Гидроакустические преобразователи [12] с размером корпуса около 60 см считаются компактными для мощной низкочастотной гидроакустики, где уровни звукового давления достигают десятков тысяч Па. Преобразователи меньшего размера можно отнести к малогабаритным. Вообще говоря, низкочастотным излучателем (НЧИ) является преобразователь, для волнового размера которого справедливо неравенство:

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

где  $\lambda$  длина волны звука,  $D$  – характерный размер излучателя [12], однако для прикладных задач подводной гидроакустики низкочастотными прямо считать преобразователи, работающие в диапазонах, находящиеся ниже 1,5-2 кГц [11, 12].

Преобразователь с корпусом относительно малого размера может излучать в низкочастотном диапазоне в узкой полосе частот, но из-за обратной зависимости между излучаемой акустической мощностью и размерами излучающей поверхности эффективность и чувствительность такого преобразователя недостаточны для создания высокого уровня акустического давления. Ограничения на максимальный уровень излучаемого звукового поля связаны с кавитацией, а также возможными

при больших мощностях нелинейными эффектами, когда происходит перекачка энергии из основного в другие частотные диапазоны.

Выбор типа преобразователя и поиск оптимальной геометрии корпуса в значительной мере определяет процесс разработки мощных низкочастотных гидроакустических преобразователей. Зачастую изготовление корпуса НЧИ оказывается самой ответственной и сложной технологической процедурой [13].

При сравнительно высокой технологичности изготовления наибольшую эффективность имеют преобразователи продольно-изгибного типа [14] с пьезоэлектрическими активными элементами [10]. Принцип работы преобразователя данного типа, использующего электромеханический трансформатор, нагруженный на активно-реактивную нагрузку [15], подробно описан в работах [12-14]. Импеданс преобразователя носит активно-реактивный характер из-за влияния присоединённой массы воды [11] на колебательную систему. Частота  $\omega_{\text{возд}}$  собственных колебаний преобразователя в основной полосе на воздухе

$$\omega_{\text{возд}} = \sqrt{\frac{k}{m_{\text{кс}}}}, \quad (2)$$

где  $k$  – коэффициент упругости, определяемый жёсткостью конструкции преобразователя,  $m_{\text{кс}}$  – эквивалентная масса колебательной системы, зависящая от конструктивного устройства излучателя. Погружение преобразователя в воду практически не меняет конструктивной жёсткости колебательной системы  $k$ , однако частота собственных колебаний излучателя в основной полосе уменьшается из-за присоединённой массы

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

где  $M_{\text{пр}}$  – присоединённая масса среды [16],  $n$  – механический коэффициент трансформации. Присоединённая масса оказывает большое влияние на частотные характеристики НЧИ, так как механический трансформатор [13] преобразует возвратно-поступательные колебания активного элемента с малой амплитудой  $a$  в поперечные колебания излучающей оболочки с большей амплитудой  $A$ :

$$n = \frac{A}{a}. \quad (4)$$

В упрощённой кинематической модели колебательной системы НЧИ в виде гармонического осциллятора, где распределённые массы и жесткость заменены сосредоточенными (рис. 1), коэффициент механической трансформации

$$n = \frac{L}{l}, \quad (5)$$

где  $L$  и  $l$  – плечи рычага (механического трансформатора), связывающего в точке приведения присоединённую и конструктивную массы колебательной системы.

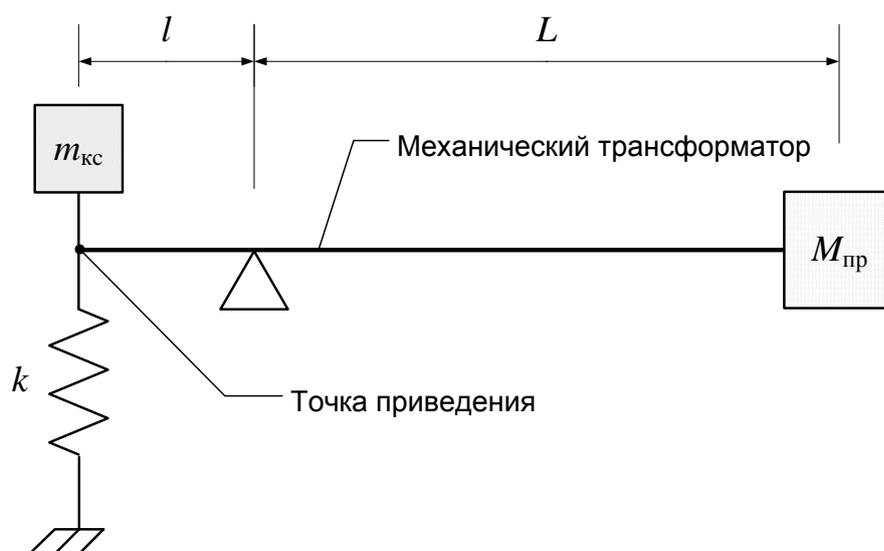


Рис. 1. Упрощённая кинематическая модель механической колебательной системы гидроакустического преобразователя продольно-изгибного типа.

Следует заметить, что выражение (3) справедливо, если точку приведения действующих на колебательную систему сил располагать вместе с массой колебательной системы (на торце преобразователя продольно-изгибного типа).  
Соотношение

$$\kappa = \frac{M_{\text{пр}}}{m_{\text{кс}} + M_{\text{пр}}} \quad (6)$$

позволяет оценить, насколько эффективен гидроакустический преобразователь в смысле приближения к невесомой пульсирующей оболочке, для которой  $\kappa=1$ .

С помощью соотношения масс

$$\xi = \frac{m_{\text{кс}}}{M_{\text{пр}}}, \quad (7)$$

можно получить выражение эффективности преобразователя в виде

$$\kappa = \frac{1}{\xi + 1}. \quad (8)$$

Исходя из равенства площади поверхности эквивалентной сферы и площади излучающей поверхности исследуемого преобразователя (за вычетом площади поверхности торцевых фланцев, оказывающих незначительное влияние на  $\omega_{\text{вод}}$  ввиду малой амплитуды колебаний и меньшей по сравнению с гофрированной оболочкой площади поверхности), радиус эквивалентной сферы

$$R_3 = 0,5 \sqrt{\frac{S}{\pi}}, \quad (9)$$

где  $S$  – площадь излучающей поверхности. Тогда, принимая на низких частотах  $M_{\text{пр}}$  пульсирующей сферы радиуса  $R_3$  как утроенную вытесненную этой сферой массу воды [17], для идеального эквивалентного по размерам излучателя

$$M_{\text{пр}} = 4\pi\rho R_3^3, \quad (10)$$

где  $\rho$  – плотность воды. Масса колебательной системы преобразователя с учётом пересчёта действующих на активный элемент сил в точку приведения [18] для механического осциллятора с сосредоточенными параметрами (рис. 1)

$$m_{\text{кс}} = m_{\text{об}}^* + m_3^* + 2m_{\Gamma} + 2m_{\Phi}, \quad (11)$$

где  $m_{\text{об}}^*$  – масса оболочки, приведённая к точке приложения,  $m_3^*$  – приведённая масса активного элемента (пьезокерамического столба),  $m_{\Gamma}$  – масса гайки,  $m_{\Phi}$  – масса торцевого фланца, причём  $m_{\text{об}} \ll m_3 + 2m_{\Gamma} + 2m_{\Phi}$ .

Поскольку масса корпуса излучателя продольно-изгибного типа [14] в основном определяется массой фланцев

$$M_{\text{корп}} = m_{\text{об}} + 2m_{\Phi}, \quad (12)$$

то, учитывая массу оболочки в точке приведения

$$m_{\text{об}}^* \approx n^2 \frac{m_{\text{об}}}{\beta}, \quad (13)$$

где  $\beta$  – определяемый опытным путём коэффициент, зависящий от размеров и формы оболочки ( $2 < \beta < 10$ ), и принимая во внимание что

$$m_3^* = \frac{m_3}{2}, \quad (14)$$

где  $m_3$  – масса стержневого активного элемента [15], можно считать

$$m_{\text{кс}} \approx \frac{m_3}{2} + M_{\text{корп}} + 2m_{\Gamma} + n^2 \frac{m_{\text{об}}}{\beta}. \quad (15)$$

Для оценки на основе упрощённой модели с сосредоточенными параметрами (рис. 1) жёсткость колебательной системы излучателя определяется из формулы (2)

$$k \approx 4\pi^2 f_{\text{возд}}^2 \left( \frac{m_3}{2} + M_{\text{корп}} + 2m_{\Gamma} + n^2 \frac{m_{\text{об}}}{\beta} \right), \quad (16)$$

где  $f_{\text{возд}} = \omega_{\text{возд}} / 2\pi$  – частота основного резонанса преобразователя в воздухе [18].

### **Малогабаритный преобразователь с излучающей оболочкой сложной формы**

Для оптимизации излучающего элемента и снижения конструктивной жёсткости колебательной системы [13] корпус излучателя имеет волнообразную форму с 12 продольными гофрами (рис. 2). Корпус, состоящий из фланцев и излучающей оболочки переменной толщины от 0,6 до 1,5 мм, выполнен в виде единого элемента по аддитивной технологии методом последовательного лазерного сплавления из порошка титанового сплава Ti-6Al-4V. Такая конструкция практически исключает проблемы герметизации, а выбранная технология изготовления корпуса уменьшает разброс параметров излучателя при серийном изготовлении [19].



Рис. 2. Малогабаритный преобразователь с излучающей оболочкой сложной формы.

Гофрирование излучающего элемента корпуса дополнительно увеличивает эффективную площадь излучающей поверхности преобразователя, что понижает рабочую частоту и увеличивает его КПД. Удельная мощность преобразователя со

сложной формой излучающей оболочки на 50-70 % выше, чем у аналогичных излучателей продольно-изгибного типа [14, 20, 21].

Размеры корпуса экспериментального преобразователя – 90,6×86 мм (длина×диаметр). Вес излучателя в воздухе равен 0,87 кг, а эквивалентная масса его колебательной системы (15) около 0,5 кг при массе корпуса 0,42 кг. Площадь излучающей оболочки (рис. 2) достигает 22880 мм<sup>2</sup>, диаметр торцевых фланцев – 70 мм, что соответствует площади сферы радиуса  $R_3=39$  мм. Согласно предположению (10) для идеального сферического излучателя такого размера  $M_{пр} \approx 0,70$  кг.

### **Коэффициент механической трансформации НЧИ со сложной формой корпуса**

Как показано выше, коэффициент механической трансформации на основе соотношений (3) и (7) позволяет оценить влияние присоединённой массы для качественной оценки эффективности излучателя. Кроме того, с помощью измерений частоты резонанса преобразователя в воздухе  $f_{возд}$  и коэффициента механической трансформации  $n$ , при известных размерах и геометрии излучающих элементов, формула (3) даёт предварительное значение частоты резонанса преобразователя в воде  $f_{вод}$ , так как присоединённая масса, коэффициент трансформации и резонансные частоты в воздухе и воде связаны соотношением

$$f_{вод} = f_{возд} \sqrt{\frac{1}{1 + \frac{n^2}{\xi}}} \quad (17)$$

Определение рабочей частоты гидроакустического излучателя в воде имеет большое значение, так как натурные испытания с измерением электроакустических параметров [22] низкочастотных гидроакустических излучателей на рабочих

глубинах сложны как технически, так и организационно [23]. С другой стороны, измерение механического коэффициента трансформации гидроакустического излучателя можно проводить в воздухе.

Коэффициент трансформации излучателя продольно-изгибного типа со сложной формой корпуса наиболее точно можно получить при помощи лазерной виброметрии. Схема лабораторного стенда для измерений изображена на рис. 3.

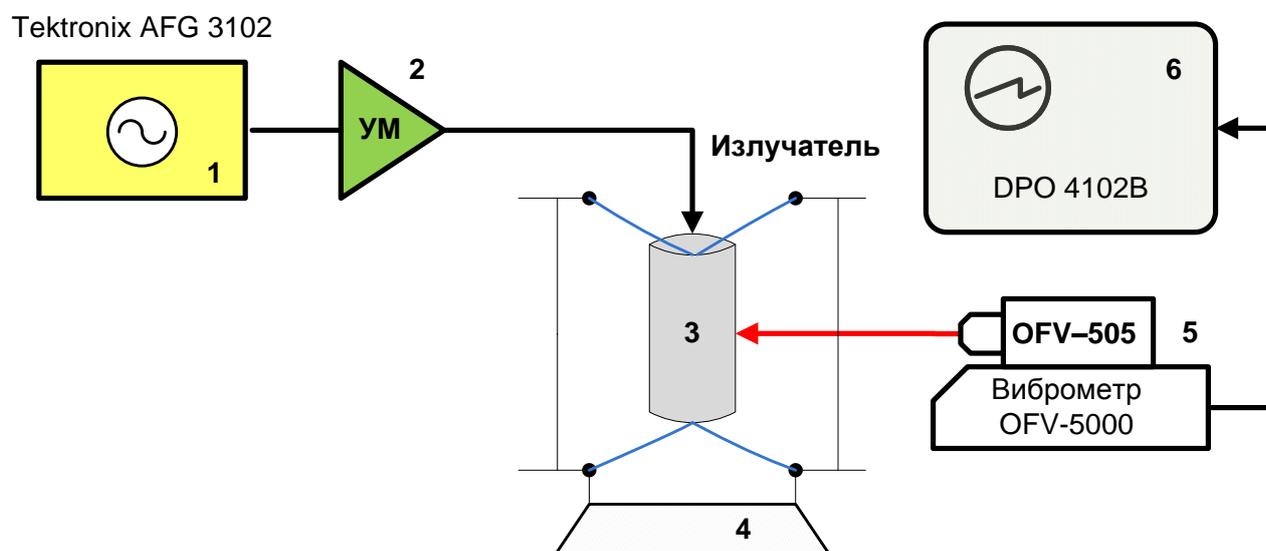


Рис. 3. Схема измерения механического коэффициента трансформации НЧИ продольно-изгибного типа. 1 – генератор Tektronix AFG 3102, 2 – усилитель У7-5, 3 – излучатель, 4 – подвижный стол с эластичным подвесом, 5 – лазерный виброметр OFV-5000 с модулем OFV–505 и декодером vd-02, 6 – осциллограф DPO 4102B.

Первоначально была определена резонансная частота преобразователя, закреплённого на эластичном подвесе (рис. 4).

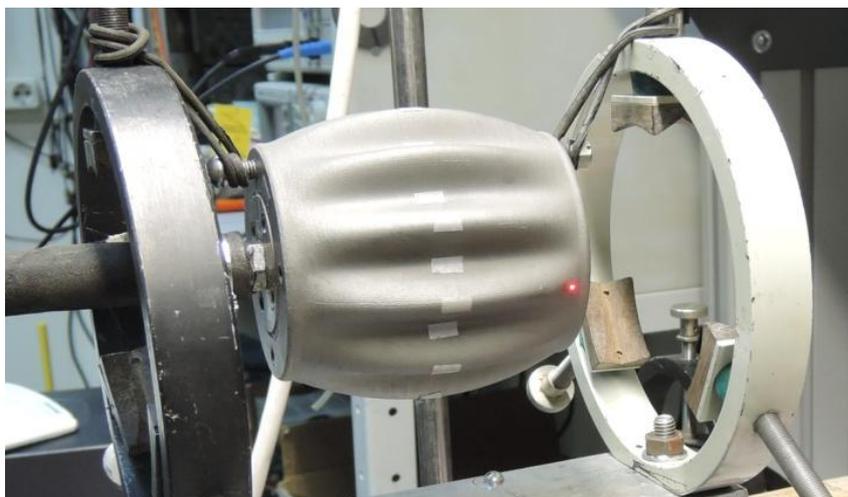


Рис. 4. Снятие профиля амплитуды поперечных (радиальных) колебаний излучающей оболочки гидроакустического излучателя продольно-изгибного типа.

Следует отметить, что установка преобразователя в конкретных образцах гидроакустических устройств требует модельного расчёта и экспериментальной проверки влияния способа закрепления на электроакустические характеристики излучателя, однако коэффициент механической трансформации преобразователя практически не зависит от способа крепления и конструктивного исполнения виброразвязки. Гармонический сигнал, формируемый генератором Tektronix AFG 3102, усиливался при помощи усилителя У7-5 и подавался на излучатель. Колебательная скорость излучающей оболочки регистрировалась на поверхности корпуса преобразователя лазерным виброметром OFV-5000 (включающем в себя лазерный модуль OFV-505 и декодер vd-02). Резонансная частота излучателя определялась по показаниям осциллографа DPO 4102B. Для снятия профиля распределения амплитуды колебаний преобразователь при помощи суппорта перемещался перпендикулярно направлению лазерного луча.

Частота основного резонанса в воздухе гидроакустического излучателя с корпусом сложной формы  $f_{\text{возд}}=4003$  Гц. Коэффициент механической трансформации (5) в воздухе рассчитан на основе профилей распределения амплитуды радиальных (рис. 4) и осевых (рис. 5) колебаний на резонансной частоте.

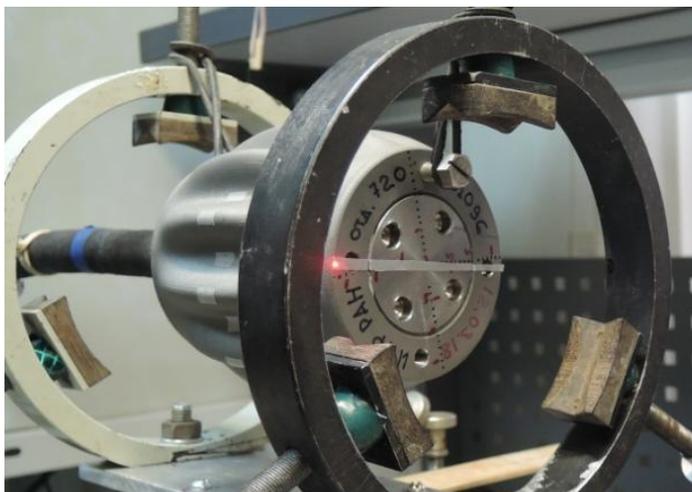


Рис. 5. Снятие профиля амплитуды продольных колебаний активного элемента и торцевого фланца излучателя с помощью метода лазерной виброметрии.

С целью увеличения точности определения коэффициента трансформации измерения проведены с шагом 2-5 мм для нескольких гребней и впадин, а также по пересекающимся радиальным направлениям на торцевом фланце. На рис. 6 приведены графики распределения амплитуд радиальных колебаний излучающей оболочки корпуса излучателя вдоль его продольной оси.

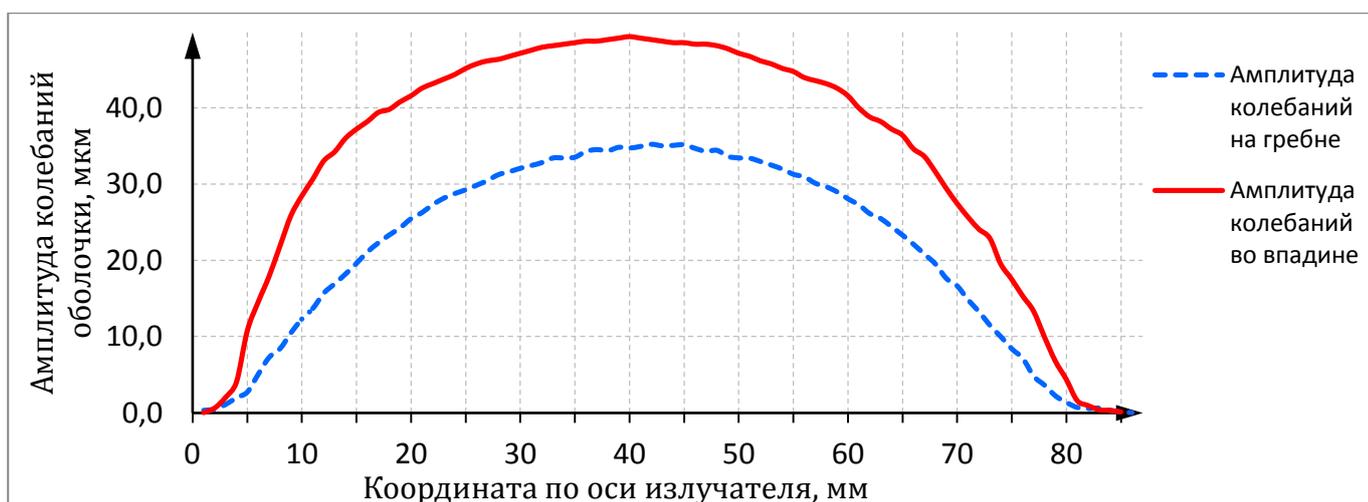


Рис. 6. Распределение амплитуды колебаний оболочки вдоль оси излучателя.

Различием в 5-10 % амплитуды колебаний оболочки во впадинах по одному поперечному сечению, связанным как с погрешностью измерений, так и с асимметрией исследуемого излучателя, для оценки коэффициента трансформации можно пренебречь. График распределения амплитуд колебаний фланца (рис. 7) иллюстрирует существенное различие амплитуды колебаний на краях торцевого фланца и в месте контакта активного элемента преобразователя с торцевой гайкой.

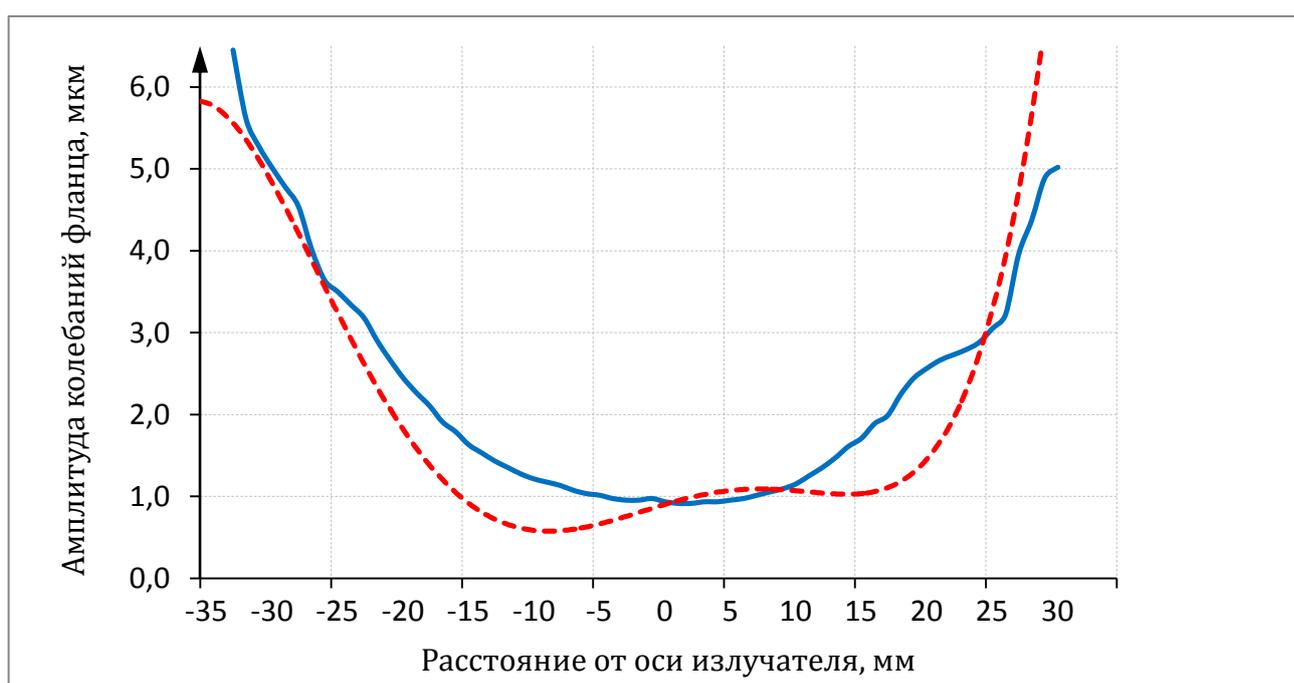


Рис. 7. Распределение амплитуд продольных колебаний активного элемента и на торце излучателя. Амплитуда колебаний фиксировалась при смещении корпуса излучателя относительно центральной оси с шагом 2 мм в двух сечениях между гребнями №№ 6-12 (сплошная линия) и 3-9 (пунктир) излучающей оболочки.

Более чем шестикратное превышение амплитуды колебаний на краях фланца по отношению к амплитуде колебаний вдоль оси преобразователя связано с эластичностью резьбовых соединений и недостаточной жёсткостью фланцев, ограниченных размерами корпуса излучателя. Размер корпуса преобразователя накладывает также и ограничения на максимальную длину активного элемента, количество элементов которого пропорционально чувствительности излучателя [23].

Установка в корпусе излучателя пьезокерамического столба размером  $76,6 \times 36,5$  мм (длина  $\times$  диаметр), собранного из 8 колец ЦТБС-3 [11]  $36 \times 14 \times 7$  мм (рис. 8), определяет толщину торцевых гаек (10 мм), что при небольших размерах преобразователя приводит к эластичности как резьбового соединения, так и всего фланца (который незначительно превосходит торцевые гайки по толщине) в целом.



Рис. 8. Активный элемент излучателя, собранный из 8 пьезокерамических колец.

При расчёте коэффициента трансформации учитывается амплитуда колебаний активного элемента, поэтому для (5) результаты измерений усреднялись в точках, не выходящих за осевую проекцию пьезокерамического столба. Коэффициент трансформации (5), где  $a = a_{cp}$  – средняя амплитуда колебаний торца в проекции активного элемента ( $a_{cp} = 1,06$  мкм) при максимальной амплитуде колебаний в центральном поперечном сечении корпуса излучателя составляет  $n_{min} = 38$  для гребней и  $n_{max} = 52$  впадин. Среднее значение  $n$  по 12 впадинам и 12 гребням

$$n_{cp} = \frac{q \sum_{j=1}^{12} A_j}{12 \sum_{i=1}^q a_i} = 26, \quad (19)$$

где  $A_j$  – амплитуда поперечных (радиальных) колебаний излучающей оболочки на гребне/впадине №  $j$ ,  $a_i$  – амплитуда продольных колебаний на торце в точке  $i$ ,  $q$  – количество точек, в которых измерялась амплитуда продольных колебаний. Следует отметить, что среднее значение коэффициента трансформации экспериментального излучателя превосходит показатели более крупных по размерам низкочастотных преобразователей [14, 24], где торцевые фланцы конструктивно более жёсткие.

### **Измерения электроакустических характеристик НЧИ сложной формы**

Для получения оценок (7) и проверки соотношений (15-17) электроакустические параметры [25] излучателя измерялись в гидроакустическом бассейне на глубине до 5 м и в открытой воде (рис. 9) на глубине до 80 м. Методика измерений и схема проведения эксперимента приведены в работе [21].



Рис. 9. Излучатель с закреплённым гидрофоном и грузом-заглубителем перед погружением для измерения электроакустических параметров в открытой воде.

Измерения электроакустических характеристик показали, что излучатель с гофрообразным корпусом (рис. 2) и пьезокерамическим активным элементом (рис. 8) обладает на частоте резонанса 1710 Гц (рис. 10) чувствительностью до  $1 \text{ Па} \times \text{м/В}$  при ширине полосы частот 25 %, имеет КПД около 30 %, обеспечивая уровень излучения 175 дБ относительно 1 мкПа.

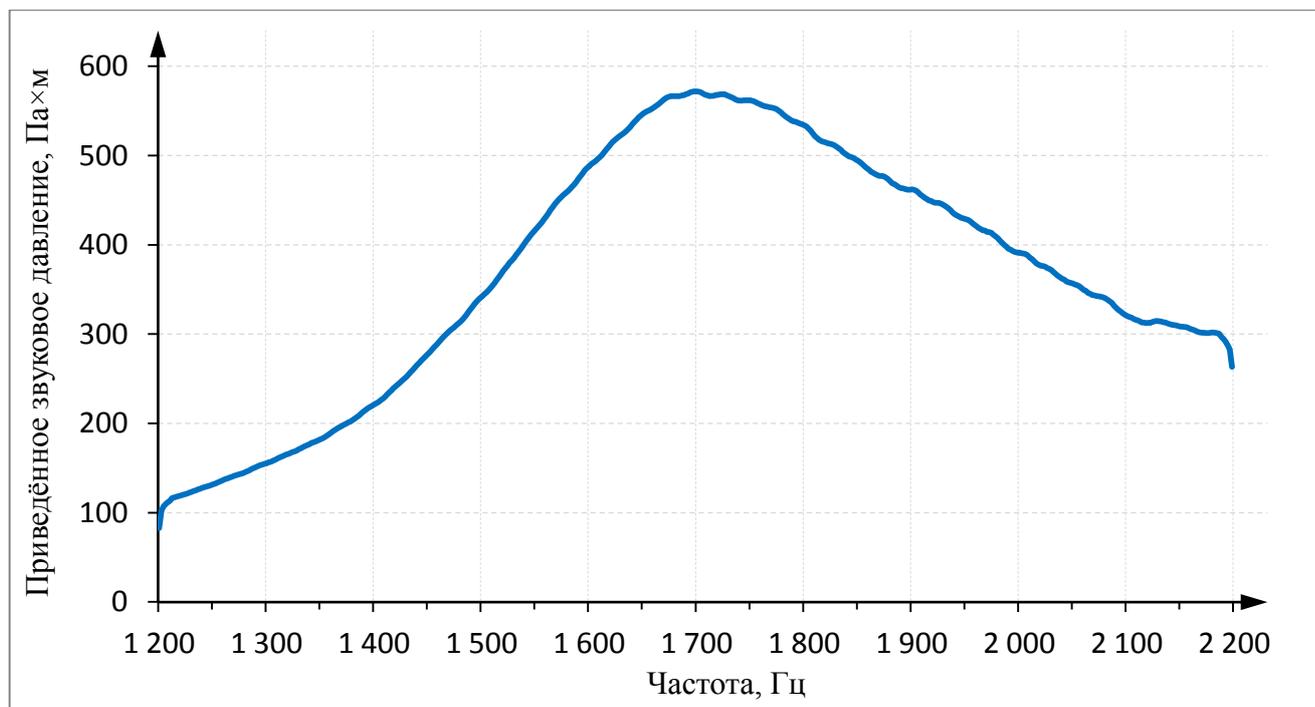


Рис. 10. Зависимость от частоты звукового давления, развиваемого преобразователем в основной (низкочастотной) полосе.

Близость экспериментально измеренного значения резонансной частоты и значения резонансной частоты (15), полученного расчётным путём из (17) на основе измерения механического коэффициента трансформации (5), позволяют использовать приведённую на рис. 1 упрощённую модель для оценки частотных характеристик компактных низкочастотных излучателей продольно-изгибного типа.

### Выводы

Параметры предложенного гидроакустического излучателя свидетельствуют о перспективности такой конструкции и технологии изготовления преобразователя [26]. Максимальная удельная акустическая мощность существующих компактных излучателей не превышает  $250 \text{ кВт/м}^3$ . Например, для излучателя аналогичного

размера и полосы частот [14] максимальная удельная акустическая мощность составляет 220–240 кВт/м<sup>3</sup>, а для экспериментального излучателя с гофрообразным корпусом эта величина превышает 360 кВт/м<sup>3</sup>. Материал и конструкция корпуса допускают транспортировку такого излучателя при помощи авиакосмических носителей, что может быть недоступно для низкочастотных гидроакустических излучателей других типов в силу конструктивных особенностей и применяемых материалов. Компактные излучатели подобной конструкции с перспективными пьезоматериалами [27, 28] могут найти применение в малогабаритных и миниатюрных гидроакустических системах [24], модемах [29], устройствах управления, гидролокации и связи [23] для частот от сотен Гц до десятков кГц.

*Авторы выражают благодарность ведущему конструктору*

*А.В. Болотникову, заведующему лабораторией В.А. Перфилову, заведующему отделом Д.А. Касьянову и заместителю директора по науке П.И. Коротину за внимание к работе, помощь в подготовке и организации испытаний, а так же обсуждению результатов.*

*Работа выполнена в рамках государственного задания ИПФ РАН (проект 0035-2019-0019).*

### **Библиографический список**

1. Родионов А.Ю., Дубровин Ф.С., Унру П.П., Кулик С.Ю. Экспериментальное исследование точности измерения дистанции при помощи гидроакустических модемов для обеспечения навигации подводных объектов // Материалы XXIV

Санкт-Петербургской международной конференции по интегрированным навигационным схемам (29 -31 мая 2017, Санкт-Петербург). - СПб.: ЦНИИ Электроприбор, 2017. С. 153 - 156.

2. Новиков А.В., Форостяный А.А., Черных А.В., Федотенков А.П., Жаров А.К., Бабкин И.Ч. Система телеуправления подводным аппаратом. Патент № 2551834 С1. Бюлл. № 15, 27.05.2015.

3. Гайкович Б.А., Занин В.Ю., Кожемякин И.В., Смольников А.В. Бесшумная революция // Новый оборонный заказ. Стратегии. 2016. № 2 (39). С. 76 – 79.

4. Dellinger J., Ross A., Meaux D., Brenders A., Gesoff G., Etgen J.T., Naranjo J., Openshaw G., Harper M. Wolf-spar, an “FWI-friendly” ultra-low-frequency marine seismic source // Abstracts of the 86<sup>th</sup> Annual Int. Meeting SEG, Cambridge Applied Physics. 2016, pp. 4891 – 4895.

5. Богородский В.В., Зубарев Л.А., Корепин Е.А., Якушев В.И. Подводные электроакустические преобразователи. - Л.: Судостроение, 1983. - 248 с.

6. Rolt K.D. History of flextensional electroacoustic transducers // Journal of the Acoustical Society of America, 1990, vol. 87, pp. 1340 - 1349.

7. Сапронов А.А., Зибров В.А., Воробьев С.В. Применение пьезоэлектрических преобразователей в системе дистанционного мониторинга потребляемых водных ресурсов в сфере жилищно-коммунального хозяйства // Электротехнические и информационные комплексы и системы. 2010. Т. 6. № 1. С. 35 – 40.

8. Климов М.А. Проблемы отечественной гидроакустики // Независимое военное обозрение. 2014. URL: [http://nvo.ng.ru/armament/2014-08-22/13\\_gidroakustika.html](http://nvo.ng.ru/armament/2014-08-22/13_gidroakustika.html)

9. Шустов А.С. Высокоскоростной гидроакустический OFDM модем // XIII Международной научной конференции Евразийского научного объединения: Сборник научных работ. - М.: ЕНО, 2016. С. 45 – 48.
10. Mosca F., Matte G., Shimura T. Low-frequency source for very long-range underwater communication // Journal Acoustical Society, Am. 2013, vol. 133(1), pp. EL61 - EL67.
11. Woollet R. Sonar Transducer Fundamentals, Newport - New London, Naval Underwater Systems Center, 1986, 102 p.
12. Свердлин Г.М. Гидроакустические преобразователи и антенны. - Л.: Судостроение, 1980. - 232 с.
13. 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 // Учёные записки физического факультета Московского университета. 2017. № 5. С. 1750104-1–1750104-1.
14. 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.
15. Ермолаев Э.В., Махов В.И. Анализ колебаний пьезокерамического стержня с накладкой // Труды XIV Всероссийской конференции «Прикладные технологии гидроакустики и гидрофизики». - Санкт Петербург: Изд-во Лема, 2018. С. 637 – 639.
16. Сысоев О.Е., Добрышкин А.Ю., Нейн С.Н. Аналитическое и экспериментальное исследование свободных колебаний разомкнутых оболочек из сплава д19, несущих

- систему присоединенных масс // Труды МАИ. 2018. № 98. URL: <http://trudymai.ru/published.php?ID=90079>
17. Лепендин Л.Ф. Акустика. - М.: Высшая школа, 1978. - 448 с.
18. Свердлин Г.М. Прикладная гидроакустика. - Л.: Судостроение, 1990. - 320 с.
19. Чумаков Д.М. Перспективы использования аддитивных технологий при создании авиационной и ракетно-космической техники // Труды МАИ. 2014. № 78. URL: <http://trudymai.ru/published.php?ID=53682>
20. Quer R., Dasseux C. Increasing depth capability of “Diabolo” flextensional transducer for active linear arrays // Proceedings of the Institute of Acoustics, 1999, vol. 21, pp. 117 - 125.
21. Боголюбов Б.Н., Кирсанов А.В., Леонов И.И., Смирнов С.А., Фарфель В.А. Расчёт и экспериментальные исследования компактного продольно-изгибного гидроакустического преобразователя с центральной частотой излучения 520 Гц // Гидроакустика. 2015. № 23 (3). С. 20 - 26.
22. Смаришев М.Д., Добровольский Ю.Ю. Гидроакустические антенны. - Л.: Судостроение, 1984. - 304 с.
23. Корякин Ю.А., Смирнов С.А., Яковлев Г.В. Корабельная гидроакустическая техника. Состояние и актуальные проблемы. - Санкт-Петербург: Наука, 2004. - 410 с.
24. Butler J.L., Charles H.S. Transducers and Arrays for Underwater Sound, Switzerland, Springer, 2007, 610 p.
25. Римский-Корсаков А.В. Электроакустика. - М.: Связь, 1973. - 272 с.
26. Бритенков А.К., Боголюбов Б.Н., Смирнов С.А. Продольно-изгибный гидроакустический преобразователь. Патент RU 2681268. Бюлл. № 7, 05.03.2019.

27. Панич А.А., Скрылёв А.В., Доля В.К., Свирская С.Н., Дыкина Л.А., Карюков Е.В., Нагаенко А.В. Обзор перспективных пьезокомполитов для применения в акустике и гидроакустике // Труды XIV Всероссийской конференции «Прикладные технологии гидроакустики и гидрофизики». - Санкт-Петербург: Изд-во Лема, 2018. С. 470 – 473.
28. Нестеров А.А., Панич А.А., Свирская С.Н., Малыхин А.Ю., Скрылёв А.В., Панич Е.А. Способы формирования микроструктуры пористых пьезокерамических каркасов // Инженерный вестник Дона. 2012. № 3 (21). С. 497 – 501.
29. Дикарёв А.В., Дмитриев С.М. Гидроакустическое устройство. Патент RU 2655702. Бюлл. № 16, 29.05.2018.