

УДК 534.232

Б. Г. Степанов

*Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ» им. В. И. Ульянова (Ленина)*

## Однонаправленные стержневые преобразователи с накладками клиновидной формы

*Рассмотрен принцип построения и приведены результаты экспериментальных исследований безэкранных однонаправленных преобразователей, построенных на базе пьезостержня и двух идентичных клиновидных накладок, закрепленных на его торцах. Преобразователи имеют сокращенные почти в два раза размеры в направлении излучения (приема) звуковых волн по сравнению с традиционными стержневыми преобразователями и удобны для компоновки в антенных решетках. Стержневые преобразователи с клиновидными накладками эффективны в режиме как излучения, так и приема. Проведено сравнение между преобразователями, имеющими различные по конфигурации формы излучающей (принимающей) поверхности. Показана возможность сканирования характеристики направленности для антенн, составленных из преобразователей с клиновидными накладками, в двух взаимно-перпендикулярных плоскостях.*

### Стержневой преобразователь, клиновидные накладки, однонаправленность излучения и приема

Направленные свойства преобразователей и антенн определяются их внешней поверхностью, ее волновыми размерами, характером распределения по ней нормальной компоненты колебательной скорости, а также наличием и влиянием дополнительных экранирующих устройств. Последние могут существенно увеличить массогабаритные характеристики преобразователей и антенн особенно при их работе в области сравнительно низких частот. Вопросы построения и использования различных типов экранов достаточно подробно рассмотрены в [1]–[3]. Разработка безэкранных однонаправленных преобразователей позволяет заметно уменьшить массогабаритные характеристики как самих преобразователей, так и составленных из них антенн. К безэкранным однонаправленным преобразователям относятся устройства, которые благодаря своей конструкции или способу возбуждения без дополнительных экранов излучают (принимают) звуковые волны преимущественно в полупространство [4, с. 75–77]. Основными механизмами, используемыми при построении безэкранных однонаправленных преоб-

разователей, приводящими к минимизации тыльного излучения (приема), являются:

1. Асимметрия распределения нормальной составляющей упругого смещения (колебательной скорости) на фронтальной и тыльной поверхностях преобразователя, которая может быть обеспечена:

– выбором формы внешней поверхности преобразователя [5];

– построением колебательной системы преобразователя, приводящей к согласованию со средой его фронтальной поверхности [6] или рассогласованию тыльной поверхности [4, с. 599–600], [7];

– управлением колебательной системы преобразователя с помощью амплитудно-фазового распределения напряженности электрического или магнитного поля в его активном элементе [8], [9].

2. Интерференционное гашение звуковых волн в воде в тыльном направлении [9]–[12].

3. Трансформация колебаний в тыльном направлении в волны, быстро затухающие в воде (например, крутильные волны) или приводящие к компенсационным явлениям (изгибные волны высших порядков) [13], [14].

При построении безэкранных однонаправленных преобразователей одновременно могут быть задействованы разные механизмы минимизации тыльного излучения (приема) звуковых волн. Некоторые преобразователи могут работать в условиях свободного поля, но в большинстве своем использование безэкранных преобразователей предполагает их работу в составе антенн, когда минимизированы дифракционные эффекты.

**Принцип построения и основные результаты исследований в режиме излучения.** Рассмотрим конструкцию безэкранный однонаправленного преобразователя, схематически показанного на рис. 1 и использующего принцип построения, аналогичный [5]: тыльная поверхность преобразователя выполняется плоской и параллельной направлению колебаний пьезоактивного элемента, а его рабочая поверхность – выпуклой и в общем случае – криволинейной. При таком построении преобразователя ввиду отсутствия сдвиговых деформаций в водной среде к излучению звука будет приводить лишь нормальная компонента колебательной скорости  $v_n$ , имеющаяся на его выпуклой рабочей поверхности. Преобразователь является безэкранным и обладает уменьшенными в направлении излучения размерами. Основные его элементы – пьезостержень 1 и две идентичные клиновидные накладки 2, выполненные в виде остроконечного, в общем случае криволинейного клина с тремя плоскими, параллельными оси пьезостержня гранями. В основании каждой клиновидной накладки, расположенном против острого угла клина  $\alpha$ , имеется глухое отверстие, не превышающее по глубине половины длины пьезостержня. Последний, располагаясь внутри отверстий клиновидных накладок, жестко соединяется с ними только своими торцами. Клиновидные накладки – это, по сути, корпус преобразователя, определяющий его

внешнюю поверхность. На рис. 1 также показаны: 3 – гибкая прокладка; 4 – зазор; 5 – направление колебаний;  $v_n$  – эпюр распределения нормальной компоненты колебательной скорости; принятая система координат и характерные размеры  $l_{\text{п}}$ ,  $L$ ,  $H$  и  $b$  – длины пьезостержня и преобразователя, его максимальная высота и ширина соответственно.

Герметизация преобразователя может быть осуществлена с помощью уплотнительных резиновых прокладок 3, металлических гофрированных полос или другим способом. Зазоры, образуемые основаниями клиновидных накладок, следует выполнять по возможности малыми, обеспечивая, в то же время, акустическую развязку между ними. Преобразователи стержневого типа, особенно предназначенные для работы в области сравнительно низких частот, обычно армируются стяжкой. Ввиду симметрии конструкции преобразователя его крепление удобно располагать в узловой плоскости пьезостержня или армирующей стяжки, которую в этом случае целесообразно выполнять в виде элементов, симметрично расположенных с внешней стороны пьезостержня [15].

Рассмотрим основные характеристики преобразователей с клиновидными накладками, ограничиваясь приближенными методами расчетов и результатами экспериментальных исследований. Воспользуемся выражением для колебательной скорости торцов армированного стяжкой пьезостержня [16] при его синфазном возбуждении и при условии идентичности накладок и равенства их входных импедансов  $Z_V = Z_W = Z_H$ :

$$\xi_{0,l_{\text{п}}} = \pm \frac{N}{\Delta(\psi)} \left\{ (1 - \cos \psi) \sin \alpha_{\text{ст}} \psi + \gamma_{\text{ст}} \frac{z_{\text{ст}}}{z_{\text{п}}} \sin \psi - \left( \gamma_{\text{ст}} \frac{z_{\text{ст}}}{z_{\text{п}}} \cos \alpha_{\text{ст}} \psi - j \frac{Z_H}{z_{\text{п}} S_{\text{п}}} \sin \alpha_{\text{ст}} \psi \right) \sin \psi \right\}, \quad (1)$$

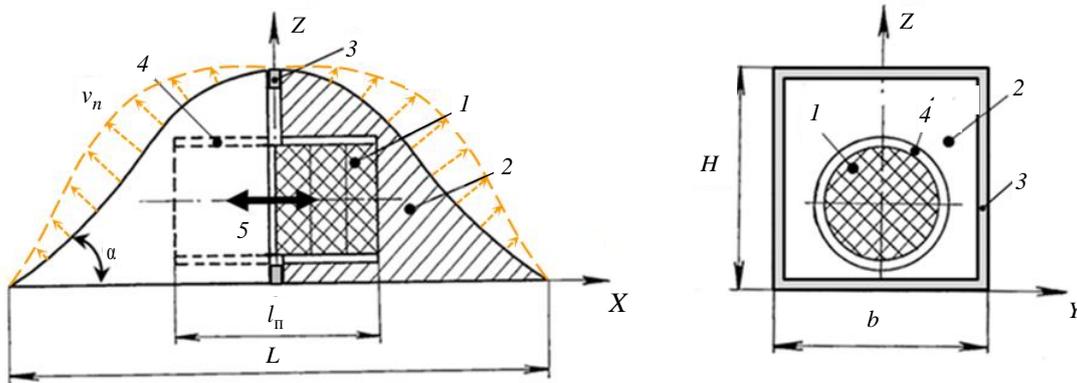


Рис. 1

где

$$\Delta(\psi) = \frac{2Z_H}{z_{\Pi}S_{\Pi}} \left( \sin \alpha_{CT} \psi \cos \psi + \gamma_{CT} \frac{z_{CT}}{z_{\Pi}} \sin \psi \cos \alpha_{CT} \psi \right) - j2\gamma_{CT} \frac{z_{CT}}{z_{\Pi}} (1 - \cos \alpha_{CT} \psi \cos \psi) - j \left( 1 + \gamma_{CT}^2 \frac{z_{CT}^2}{z_{\Pi}^2} + \frac{Z_H^2}{z_{\Pi}^2 S_{\Pi}^2} \right) \sin \alpha_{CT} \psi \sin \psi;$$

$$N = \frac{d_{33}U_m}{z_{\Pi} s_{33}^E d}; \quad \psi = kl_{\Pi}; \quad k = \omega/c_{\Pi}; \quad \omega = 2\pi f; \quad f - \text{ча-}$$

стота;  $\alpha_{CT} = c_{\Pi}/c_{CT}$ ;  $\gamma_{CT} = S_{CT}/S_{\Pi}$ ;  $S_{\Pi}$ ,  $S_{CT}$ ,  $z_{\Pi}$ ,  $z_{CT}$  и  $c_{\Pi}$ ,  $c_{CT}$  – площади поперечного сечения, удельные импедансы и скорости звука пьезостержня и армирующей стяжки;  $d_{33}$  – пьезомодуль;  $s_{33}^E$  – упругая податливость;  $U_m$  – амплитуда электрического напряжения;  $d$  – межэлектродное расстояние.

Полагая  $\Delta(\psi) = 0$ , можно найти резонансные частоты преобразователя. При этом важно определить входной импеданс  $Z_H$ . Используемые пассивные клиновидные накладки понижают резонансную частоту пьезостержня и в первом приближении можно положить:  $Z_H \approx -j\omega M_H$ , где  $M_H$  – масса клиновидной накладки. В частности, в предположении отсутствия армирующей стяжки или малости ее влияния, полагая  $\gamma_{CT} = 0$ , можно получить оценочные формулы:

$$\operatorname{tg} \psi = \frac{2M_H}{m_{\Pi}} \psi \left[ \left( \frac{M_H}{m_{\Pi}} \right)^2 \psi^2 - 1 \right]^{-1}; \quad (2)$$

$$f_p \approx f_{p,\Pi} \frac{m_{\Pi}}{\pi M_H} \sqrt{\frac{m_{\Pi} + 2M_H}{m_{\Pi}}}, \quad (3)$$

где  $f_p$  и  $f_{p,\Pi} = c_{\Pi}/(2l_{\Pi})$  – резонансные частоты преобразователя и его пьезостержня;  $m_{\Pi}$  – масса пьезостержня. Условие  $\Delta(\psi) = 0$  и (2) дают завышенное значение резонансной частоты  $f_p$  относительно данных эксперимента с погрешностью порядка 10%; формула (3) проще, но дает погрешность оценки 10–15%. Более точную оценку, с погрешностью до 5%, дает формула, полученная с использованием метода эквивалентных схем:

$$f_p \approx \frac{2}{\pi} f_{p,\Pi} \sqrt{\frac{m_{\Pi}}{m_{\Pi} + 2M_H}}. \quad (4)$$

Решение граничной задачи в одномерном приближении с учетом формы клиновидных накладок при использовании для описания их колебаний уравнения Вебстера приводит к достаточно громоздким выражениям, однако точность оценки резонансной частоты остается на уровне соотношений (1) и (2), (3) и поэтому здесь не приводится.

С целью проверки работоспособности предлагаемых преобразователей и для выявления рекомендаций по их конструированию был изготовлен ряд макетов преобразователей с различной конфигурацией излучающей поверхности клиновидных накладок. Выполнялись варианты профиля излучающей поверхности, схематически показанные на рис. 2:  $a$  – дуга окружности,  $b$  – косинусоидальная форма типа  $H(x) = H \cos^2(\pi x/L)$ ,  $c$  – ломаная линия с углами наклона  $\alpha = 45^\circ$  и  $\alpha_1 = 18^\circ$ ;  $d$  – наклонная прямая  $\alpha = 45^\circ$ . Здесь: 1 – пьезостержень; 2 – клиновидные накладки; 3 – резиновые герметизирующие прокладки; 4 – экран. Для каждого варианта формы исследовались три конструктивно подобных преобразователя, клиновидные накладки которых выполнялись из сплава АМГ, латуни и стали соответственно. При измерении полевых характеристик преобразователи размещались в отверстии плоского экрана 4, который устранял дифракцию звуковых волн и состоял из двух листов из сплава АМГ с вклеенным между ними листом резины. Для оценки эффективности излучения преобразователей с клиновидными накладками дополнительно были изготовлены макеты преобразователей симметричной конструкции с обычными накладками поршневого типа, выполненными из стали в двух вариантах ( $d$  и  $e$ ). Вариант  $d$  предусматривал примерное равенство коэффициентов трансформации по площади поперечного сечения  $\gamma_M = S_H(l_{\Pi}/2)/S_{\Pi}$  для сравниваемых преобразователей. В этом случае преобразователи с поршневыми накладками располагались таким образом, чтобы их осевые линии находились на расстоянии  $l_{\Pi}$  (рис. 2,  $d$ ) и  $\gamma_M \approx 3...3.3$ . Вариант  $e$  обеспечивал равенство площадей основания исследуемых преобразователей ( $L \times b$ ) и суммарной площади излучения двух поршневых накладок (рис. 2,  $e$ ). При этом коэффициент трансформации для преобразователей с поршневыми накладками составил  $\gamma_M = 5$ .

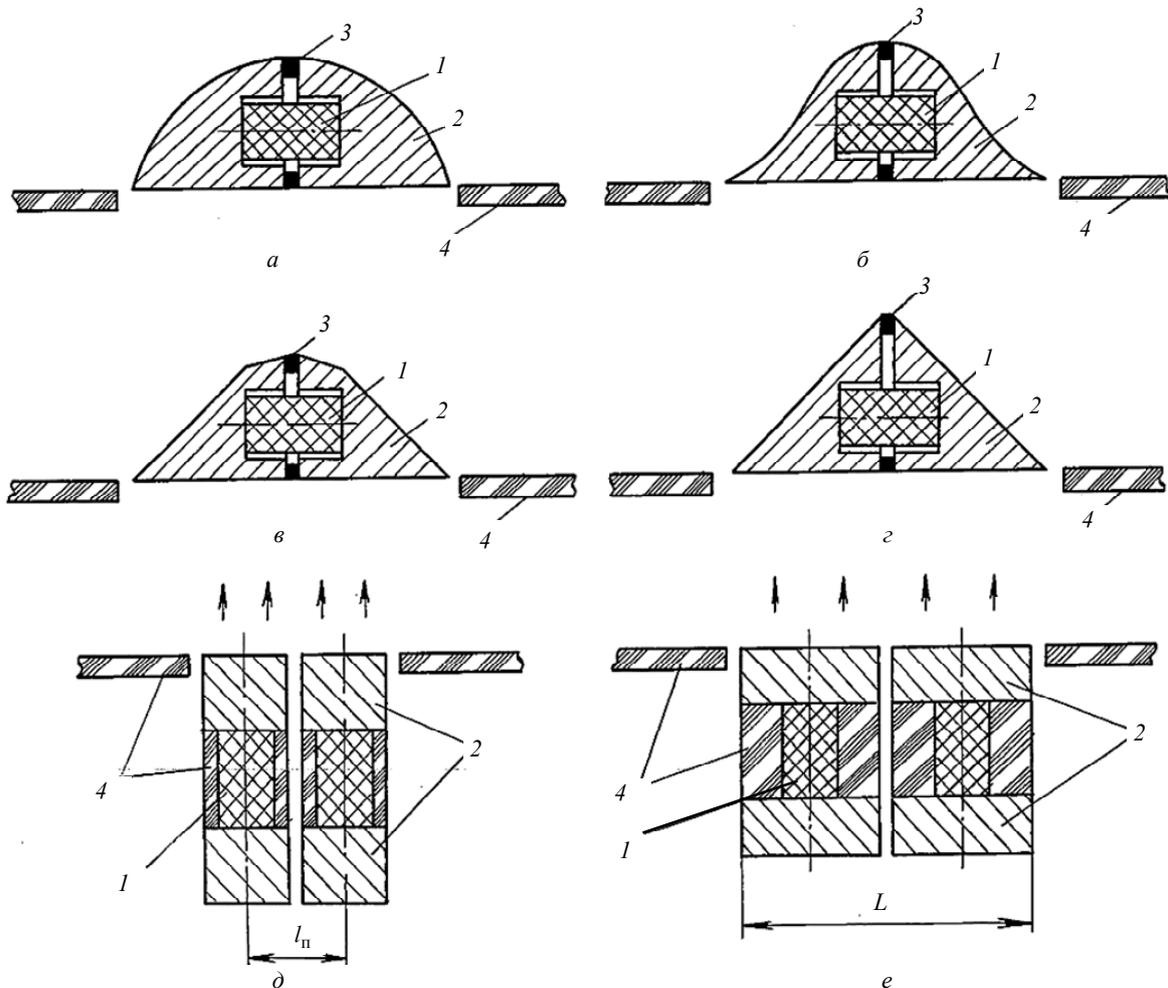


Рис. 2

Для всех макетов сравниваемых преобразователей  $b = 45$  мм; пьезостержни выполнялись из 4 шайб из пьезокерамики ЦТБС-3  $\text{Ø}25 \times 13$  мм с электрически параллельным соединением и имели резонансную частоту  $f_{p,п} = 31 \pm 0.2$  кГц. Сравнительные данные показанных на рис. 2 макетов преобразователей, а также основные результаты измерений и расчетов для них приведены в таблице, в которой использованы обозначения следующих величин:  $p_{фр}$  и  $p_{т}$ ,  $\lambda_0$  – звуковые давления во фронтальном и тыльном направлениях, длина волны в воде (на резонансной частоте). Измерения проводились в импульсном режиме в заглушенном бассейне СПбГЭТУ «ЛЭТИ». Уровень излучения преобразователей во фронтальном направлении нормирован к значению звукового давления  $p_{п1}$ , создаваемого на резонансной частоте двумя двусторонне нагруженными преобразователями (вариант  $d$ ) с поршневыми накладками и  $\gamma_M = 3.2$  (поршень 1). Из рисунка видно, что для безэкранных преобразователей со стальными

клиновидными накладками этот уровень существенно не отличается от принятого за эталон. Для всех макетов безэкранных преобразователей с клиновидными накладками уровень тыльного излучения не превосходил 5–10 % по давлению. Относительная полоса пропускания  $\Delta f/f$  и ширина основного лепестка характеристики направленности (ХН)  $\Delta\theta_{-3дБ}$  определялись по уровню –3 дБ.

Электроакустический КПД  $\eta_{эа}$  исследуемых преобразователей определялся с использованием ваттметрового метода [17] с помощью ваттметра М2-1 и достигал для одиночных преобразователей с клиновидными накладками из сплава АМГ 84–86 %, а из стали – 68–72 %. Значение коэффициента эффективности электромеханической связи, определяемого по [18]:  $k_{эф} = \sqrt{(f_a^2 - f_p^2) / f_a^2}$ , где  $f_p$  и  $f_a$  – резонансная и антирезонансная частоты преобразователя, в среднем составило для макетов с накладками из сплава АМГ  $\approx 0.42$ , а из стали –  $\approx 0.46$ .

Экспериментально исследовалась также возможность работы преобразователей с клиновидными накладками в составе гидроакустических антенн. С этой целью выполнялись варианты однотипных преобразователей с накладками из стали и сплава АМГ. На рис. 3 схематически показана одна из конструкций таких преобразователей, используемых для построения антенн. Здесь обозначены: 1 – пьезостержень; 2 – клиновидные накладки; 3 – армирующее соединение; 4 – эпоксидный компаунд; 5 – крепежное устройство; 6 – герметизирующая резиновая прокладка; 7 – кабель; 8 – линии усечения, используемого в дальнейшем для оценки его влияния на ХН. Параметры этих преобразователей:  $L = 121$  мм;  $H = 59$  мм;  $b = 46$  мм;  $\gamma_m = 3.8$ ;  $l_{п}/L = 0.44$ ;  $\alpha = 45^\circ$ . Пьезостержни преобразователей собирались из 4 шайб состава ЦТБС-3 размером  $\varnothing 25 \times \varnothing 10 \times 13$  мм и имели электрически параллельное соединение. Для преобразователей с клиновидными накладками из стали среднее значение резонансной частоты со-

ставляло  $f_p = 6.95 \pm 0.6$  кГц. Оценка по (4) дает  $f_p = 7.1$  кГц, а по (1) с учетом армирующей стяжки и в предположении  $Z_H \approx -j\omega M_H$  составляет  $f_p = 7.56$  кГц. На резонансной частоте значение  $L/\lambda_0 \approx 0.56$ . Среднее значение коэффициента эффективности электромеханической связи для этих макетов преобразователей было  $k_{эф} = 0.44$ , а электроакустического КПД –  $\eta_{эа} = 60\%$ .

На рис. 4 показаны варианты компоновки преобразователей с клиновидными накладками в антенны с двумя характерными направлениями в соответствии с принятой системой координат. Здесь обозначены: 1 – преобразователи; 2 – экран. Заполняемый водой зазор между преобразователями при установке в антенне  $\delta = 3$  мм. Поскольку количество преобразователей было ограничено, то соответствующие варианты их компоновки располагались в экране, устранявшем дифракци-

Характеристика накладок		Резонансная частота преобразователя $f_p$ , кГц			Излучение		Полоса пропускания $\frac{\Delta f}{f}$ , %	Острота ХН $\Delta\theta_{-3дБ}$	Параметры преобразователя			
Профиль клина	Материал	Эксперимент	Расчет по (4)	Расчет по (2), (3)	Фронт $\frac{P_{фр}}{P_{п1}}$	Тыл $\frac{P_T}{P_{фр}}$			$l_{п}/L$	$H/L$	$\gamma_m$	$L/\lambda_0$
Дуга окружности	АМГ	11.95	11.43	13.10	0.94	0.10	15.0	45°	0.44	0.36	3.3	0.94
	Сталь	8.11	7.84	8.84	1.07	0.08	7.5	60°				0.64
Косинус. форма	АМГ	10.77	11.64	11.74	0.62	0.04	17.9	52°	0.39	0.34	3.3	0.95
	Сталь	7.87	7.91	8.42	0.88	0.08	8.9	67°				0.69
Ломаная линия	АМГ	12.02	12.00	13.16	0.79	0.10	15.8	54°	0.43	0.35	3.0	0.97
	Сталь	8.50	8.22	9.10	1.12	0.05	9.7	65°				0.69
Наклонная прямая	АМГ	10.90	11.33	11.78	0.74	0.08	16.8	62°	0.43	0.49	3.0	0.93
	Сталь	8.06	7.56	8.54	0.95	0.07	11.4	75°				0.65
Поршень 1	АМГ	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–
	Сталь	8.38	8.33	8.80	1.0	1.0	8.0	72°	–	–	3.2	–
Поршень 2	АМГ	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–
	Сталь	7.87	8.06	8.43	0.96	0.96	10.0	70°	–	–	5.0	–

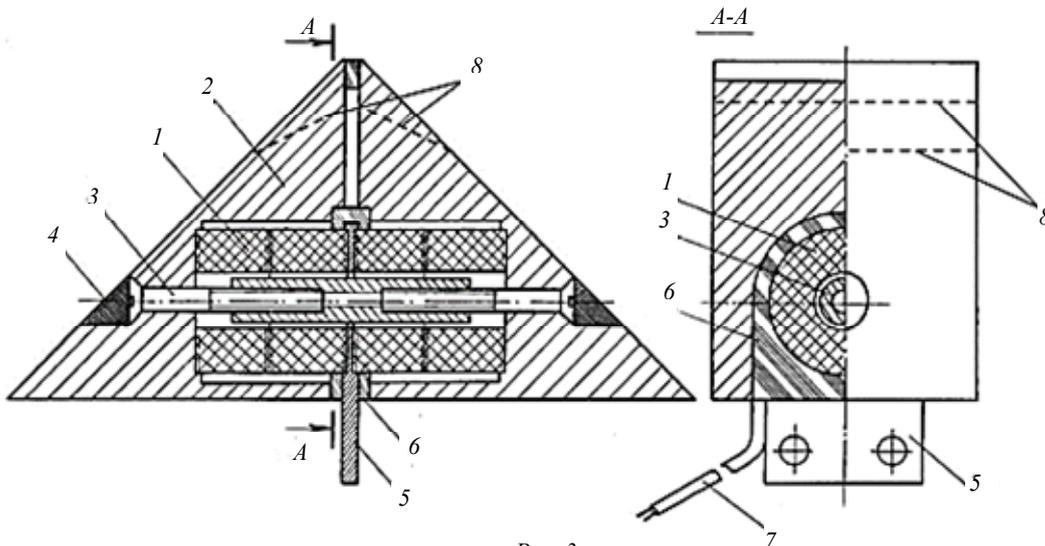


Рис. 3

онные явления. Для варианта компоновки преобразователей (рис. 4, а) на рис. 5, а приведены нормированные АЧХ звукового давления при излучении во фронтальном ( $p_{фр}$ , кривая 1) и тыльном ( $p_{т}$ , кривая 2) направлениях, а на рис. 5, б – ХН, измеренные на резонансной частоте в двух взаимно-перпендикулярных плоскостях  $Y0Z$  и  $X0Z$ . В данном случае ширина полосы пропускания по уровню  $-3$  дБ составляет  $\Delta f/f \approx 20\%$ ; ширина основного лепестка ХН в плоскости  $Y0Z$  составляет  $\Delta\theta_{-3дБ}^{(5)} \approx 52^\circ$  (кривые 1 и 1'), а в плоскости  $X0Z$  –  $\Delta\theta_{-3дБ}^{(1)} \approx 70^\circ$  (кривые 2 и 2'). Индекс  $n$  наверху обозначения  $\Delta\theta_{-3дБ}^{(n)}$  показывает количество преобразователей в выбранном направлении (плоскости); 1 и 2 – ХН во фронтальном направлении; 1' и 2' – ХН в тыльном направлении. Для сравнения на рис. 5, б приведена ХН (кривая 3), которая соответствует результатам расчета для линейной антенны, составленной из непрерывных линейных излучателей и определенной по формуле:

$$R(\theta) = \frac{\sin\left[\frac{\pi d_1}{\lambda_0} \sin\theta\right] \sin\left[\frac{n\pi d_2}{\lambda_0} \sin\theta\right]}{\frac{\pi d_1}{\lambda_0} \sin\theta \quad n \sin\left[\frac{\pi d_2}{\lambda_0} \sin\theta\right]},$$

где для указанной компоновки преобразователей  $d_1 = b$ ;  $d_2 = b + \delta$ ;  $n = 5$ .

На рис. 6 приведены ХН, которые получаются при измерении в плоскости  $X0Z$  для другого варианта компоновки, приведенного на рис. 4, б. В данном случае нагруженность такой линейной антенны немного уменьшается ( $b < \lambda_0/2$ ) и ширина полосы пропускания составляет  $\Delta f/f \approx 14.5\%$ . При этом ширина основного лепестка ХН в плоскости  $X0Z$  для одного центрального, трех и пяти преобразователей соответственно составляет:  $\Delta\theta_{-3дБ}^{(1)} \approx 96^\circ$  (кривые 1 и 1'),  $\Delta\theta_{-3дБ}^{(3)} \approx 36^\circ$  (кривые 2 и 2') и  $\Delta\theta_{-3дБ}^{(5)} \approx 25^\circ$  (кривые 3 и 3'). При таком расположении преобразователей с клино-

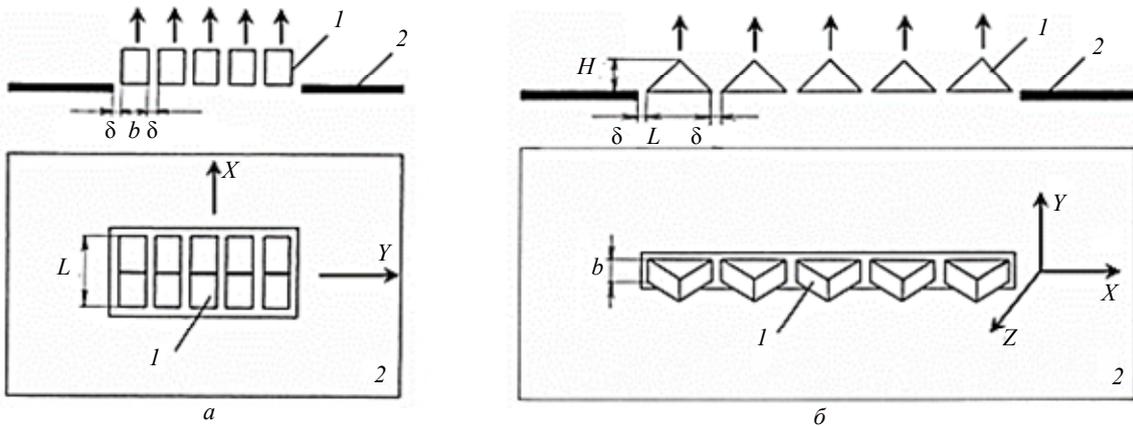


Рис. 4

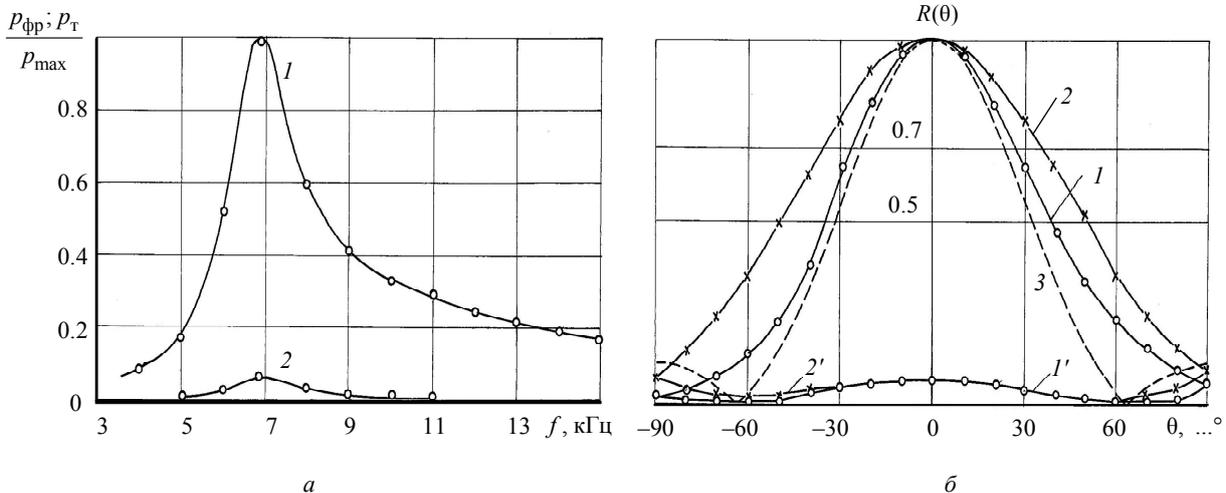


Рис. 5

видными накладками наличие соседних вдоль оси  $X$  преобразователей приводит к некоторому увеличению ширины основного лепестка ХН (подобно антенне, составленной из цилиндрических преобразователей). Для оценки на рис. 6, б кривая 4 соответствует расчету по указанной ранее формуле, когда  $d_1 = L$ ;  $d_2 = L + \delta$ ;  $n = 5$ . Следует также отметить, что, несмотря на принятое приближение  $Z_H \approx -j\omega M_H$ , экспериментально определенное с помощью малого вибродатчика распределение нормальной компоненты колебательной скорости  $v_n$  вдоль наклонной поверхности клиновидных накладок показало наличие на них распределения  $v_n$ , отличного от равномерного, с минимумом в области минимального расстояния от пьезостержня до указанной наклонной поверхности. При приближении к острым углам клиновидных накладок наблюдается увеличение  $v_n$ , которое зависит от степени фактического приближения  $Z_H \approx -j\omega M_H$ . Чем «тяжелее» накладки,

тем ближе характер распределения  $v_n$  к равномерному. Для обоих вариантов компоновки уровень излучения в тыльном направлении не превышает 6–8 % по звуковому давлению.

На рис. 7, а и б показана возможность сканирования ХН для антенн из 5 преобразователей с клиновидными накладками соответственно при компоновке согласно рис. 4, а (плоскость  $YOZ$ ) и при компоновке согласно рис. 4, б (плоскость  $XOZ$ ). Измерения проводились на резонансной частоте. Время задержки определялось по формуле  $\tau_k = d_2 \sin \theta_k / c_0$ , где  $\theta_k$  – угол компенсации ХН;  $c_0$  – скорость звука в воде;  $d_2$  определяется в соответствии с типом компоновки преобразователей в антенне. Номера кривых соответствуют: 1 –  $\theta_k = 0^\circ$ ; 2 –  $\theta_k = 10^\circ$ ; 3 –  $\theta_k = 20^\circ$ ; 4 –  $\theta_k = 30^\circ$ ; 5 –  $\theta_k = 40^\circ$ ; 6 –  $\theta_k = 50^\circ$ .

В первом варианте компоновки (см. рис. 4, а), поскольку  $b \leq 0.5L \leq 0.5\lambda_0$ , возможно использование углов компенсации ХН вплоть до

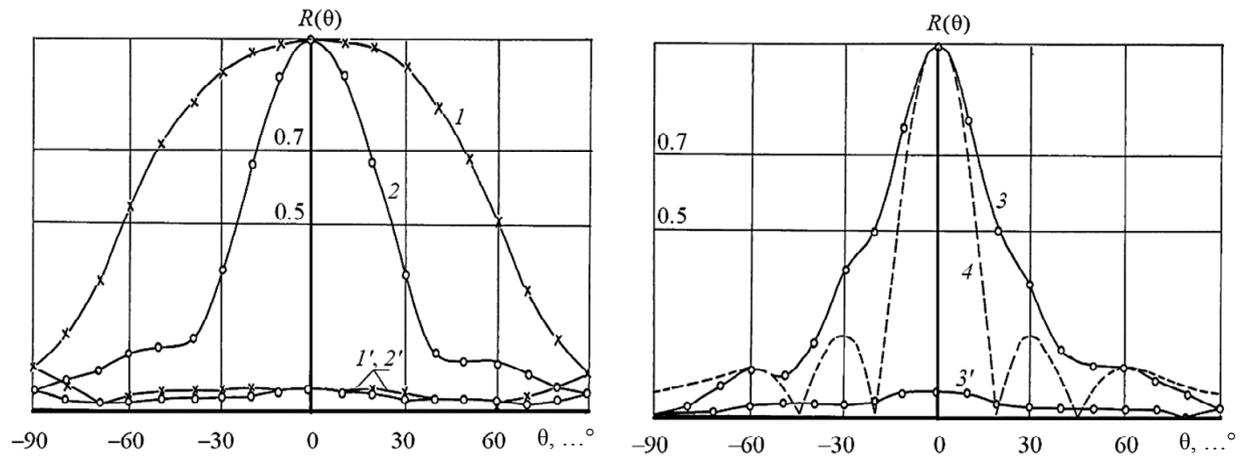


Рис. 6

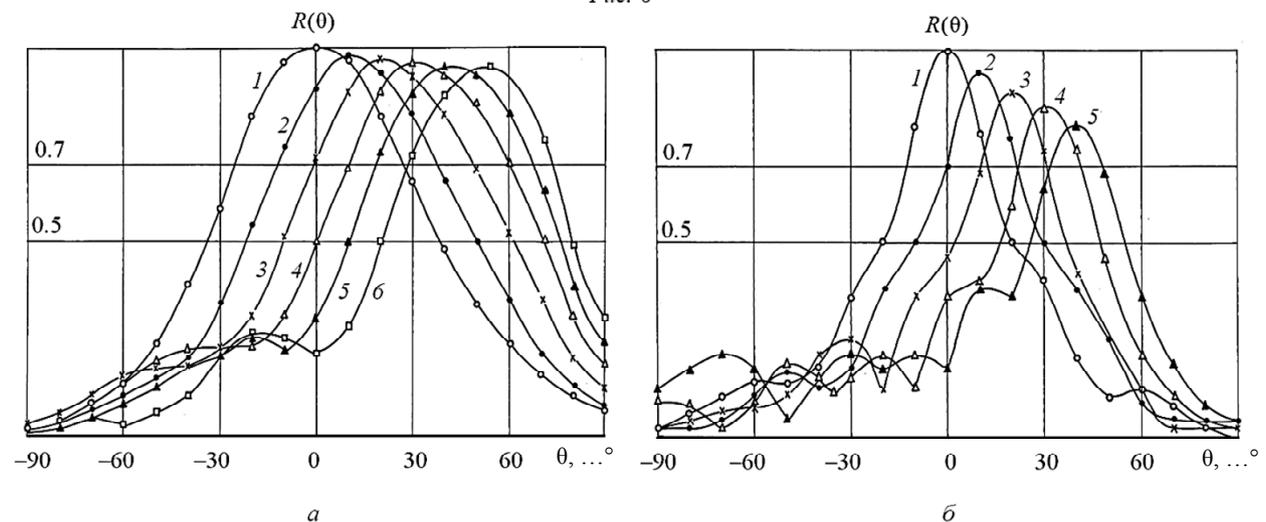


Рис. 7

$\theta_k \approx \pm 90^\circ$ . Во втором варианте (см. рис. 4, б), ввиду особенности построения преобразователей ( $0.5\lambda_0 \leq L \leq \lambda_0$ ; сложная форма излучающей поверхности и распределение по ней  $v_n$ ), получение удовлетворительной ХН при ее сканировании ограничено меньшими значениями углов компенсации  $\theta_k \approx \pm 40...50^\circ$ . При сканировании ХН уровень тыльного излучения по звуковому давлению для обоих вариантов компоновки преобразователей не превосходил значений 6–8 %.

Достаточно высокий уровень бокового поля в области первых побочных лепестков (см. рис. 6 для  $n = 5$ , область  $\theta = \pm 20...40^\circ$ ) может быть уменьшен усечением вершин клиновидных накладок преобразователя в направлении оси  $z$  на  $(0.15...0.2)H$  при  $H = 0.5L$  или выполнением формы образующей излучающей поверхности в виде ломаной линии с  $\alpha > \alpha_1$  (см., например, рис. 2, в). При этом формируется более четкий основной лепесток ХН и первые побочные лепестки. В качестве примера на рис. 8, а и б приведены нормированные АЧХ звукового давления и ХН, измеренные на резонансной частоте, для двух макетов антенн, составленных из 4 преобразователей с компоновкой согласно рис. 4, б. Для первого макета клиновидные накладки преобразователей выполнялись из латуни, их параметры:  $H/L = 0.36$ ;  $b/L = 0.43$ ;  $\gamma_M = 2.8$ ;  $l_{II}/L = 0.44$ ;  $L/\lambda_0 = 0.58$ ; полоса пропускания  $\Delta f/f = 23\%$  (АЧХ, кривые 1 и 1'). Для второго макета клиновидные накладки преобразователей выполнялись из сплава АМГ, их параметры:  $H/L = 0.4$ ;  $b/L = 0.38$ ;  $\gamma_M = 3.8$ ;  $l_{II}/L = 0.44$ ;  $L/\lambda_0 = 0.85$ ; полоса пропускания  $\Delta f/f = 40\%$  (АЧХ, кривые

2 и 2'). Конструкция преобразователей второго макета была подобна конструкции, показанной на рис. 3, но с усеченными вершинами клиновидных накладок (см. поз. 8), при этом значения углов наклона для макетов были  $\alpha = 45^\circ$  и  $\alpha_1 = 18^\circ$ . Для экспериментальных ХН использованы те же обозначения и нумерация кривых, что и для АЧХ. На рис. 8, б кривые 3 (накладки из латуни) и 4 (накладки из сплава АМГ) соответствуют оценочному расчету по ранее указанной формуле для линейной антенны.

Следует отметить, что прием усечения вершин клиновидных накладок способствует улучшению АЧХ преобразователей с относительно легкими накладками (например, из сплава АМГ), для которых наличие развитой вершины может привести к проявлению изгибных колебаний преобразователя и увеличению уровня тыльного излучения (см. рис. 8, а, кривая 2', область частот  $(1.2...1.4)f_p$ ). Это обстоятельство может ограничить возможности рассматриваемых безэкранных преобразователей как однонаправленных. С целью устранения возможных изгибных колебаний преобразователей следует проектировать расположение пьезостержня таким образом, чтобы центры тяжести клиновидных накладок совмещались с его осью. Это можно осуществить, выбрав профиль излучающей поверхности клиновидных накладок, а также изготавливая их части с вкладышами из материала с другим удельным весом или с помощью перфорации. Указанные меры позволят получить более равномерное распределение  $v_n$  по излучающей поверхности клиновидных накладок.

**Режим приема.** Рассмотренные конструкции безэкранных преобразователей с клиновидными накладками обратимы и в режиме приема обладают ярко выраженными однонаправленными

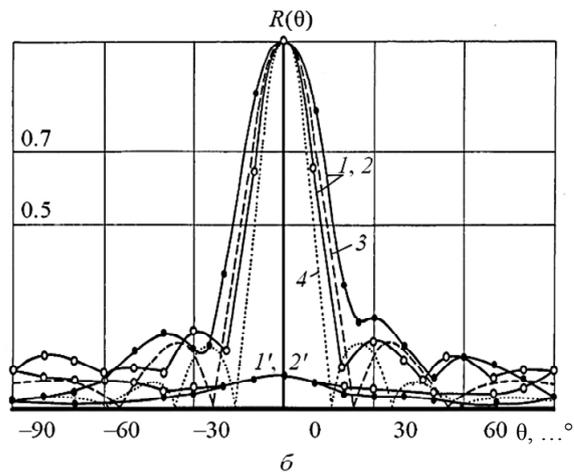
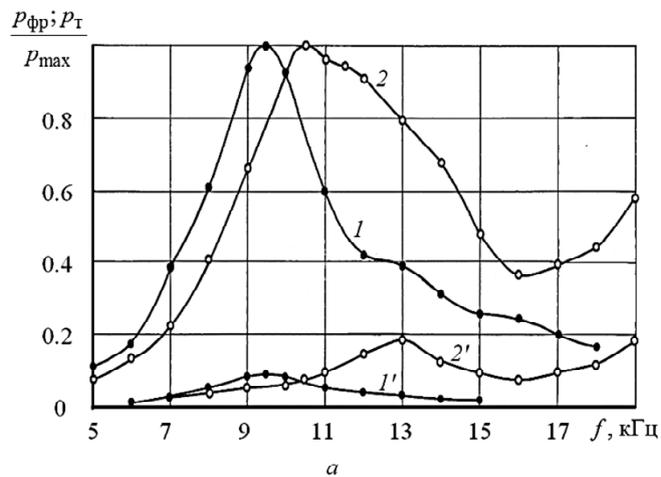


Рис. 8

свойствами в достаточно широкой полосе частот относительно частоты антирезонанса  $f_a$ . Так, согласно полученным экспериментальным данным, при падении квазиплоской звуковой волны на тыльную и фронтальную поверхности преобразователя с клиновидными накладками отношение соответствующих значений чувствительностей холостого хода  $v_{т.х.х}$  и  $v_{фр.х.х}$  не превышает 10 %. Причем выраженная асимметрия приема звуковых волн сохраняется для частот  $f \geq (0.5...0.6)f_a$ . В области более низких частот способность преобразователей с клиновидными накладками к однонаправленному приему звуковых волн утрачивается с уменьшением частоты. Это объясняется тем, что при  $f \ll f_a$  звуковая волна, падающая на тыльную (плоскую) поверхность преобразователя с клиновидными накладками, проходит через них и действует на фронтальную (выпуклую) поверхность преобразователя и пьезоактивный элемент.

Указанное положение подтверждается результатами измерений, проведенных в измерительной трубе ФГУП ЦНИИ «Морфизприбор» в диапазоне частот 1...8 кГц со специально сделанными для этой цели макетами преобразователей с клиновидными накладками ( $\alpha = 45^\circ$ ) таким образом, чтобы их тыльная плоская поверхность полностью перекрывала отверстие измерительной трубы и располагалась перпендикулярно ее оси. Макеты преобразователей выполнялись с клиновидными накладками из латуни ( $f_p \approx 4.5$  кГц) и сплава АМГ ( $f_p \approx 6.2$  кГц). В указанной водозаполненной трубе определялись чувствительности холостого хода  $v_{фр.х.х}$ ,  $v_{т.х.х}$  и коэффициент прохождения. В последнем случае результат измерения практически не зависел от ориентации в трубе фронтальной или тыльной поверхности преобразователя по отношению к падающей звуковой волне. Также было установлено, что в области частот  $f < (0.2...0.3)f_a$  разница в значениях  $v_{фр.х.х}$  и  $v_{т.х.х}$  определяется коэффициентом прохождения эквивалентной пластины, выполненной из того же материала, что и клиновидные накладки. Толщина этой пластины  $h_{э.п}$  определялась из

условия равенства объемов преобразователя и пластины, площади которых определяются поперечным сечением трубы. В частности, для преобразователей с пьезоактивным элементом в виде стержня  $h_{э.п} \approx 0.5H$ , а в виде кольца (диска) –  $h_{э.п} \approx 0.33H$ . Полученные результаты измерений удовлетворительно соответствуют такой оценке коэффициента прохождения, определяемого формулой [19]

$$T = \left[ \cos^2(k_{э.п}h_{э.п}) + 0.25 \times \right. \\ \left. \times (z_0/z_{э.п} - z_{э.п}/z_0)^2 \sin^2(k_{э.п}h_{э.п}) \right]^{-1},$$

где  $T$  – энергетический коэффициент прохождения;  $k_{э.п} = \omega/c_{э.п}$ ;  $c_{э.п}$  и  $z_{э.п}$  – скорость звука и удельный импеданс эквивалентной пластины. При  $f > 0.4f_a$  начинают проявляться свойства колебательной системы преобразователя и экспериментальные значения коэффициента прохождения становятся меньше расчетных, а при  $f > 0.6f_a$  все более выраженными становятся однонаправленные свойства преобразователей с клиновидными накладками.

Результаты выполненных исследований показывают возможность построения эффективных безэкранных однонаправленных преобразователей на базе пьезостержней, расположенных внутри двух идентичных обращенных основаниями друг к другу клиновидных накладок. Преобразователи имеют сокращенные почти в два раза размеры в направлении излучения (приема) звуковых волн по сравнению с традиционными стержневыми преобразователями и удобны для компоновки в антенных решетках. Несмотря на наличие воздухозаполненных полостей, стержневые преобразователи с клиновидными накладками обладают большой глубоководностью, поскольку достаточно жесткие накладки образуют их корпус. Определены некоторые рекомендации по выбору профиля клиновидных накладок и расположения в них пьезостержня. Дальнейшие исследования и проектирование таких преобразователей целесообразно выполнять с использованием пакетов ANSYS или COMSOL.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Глазанов В. Е. Экранирование гидроакустических антенн. СПб.: Судостроение, 1986.

2. Глазанов В. Е., Михайлов А. В. Экранирование гидроакустических преобразователей. СПб.: Элмор, 2004.

3. Глазанов В. Е. Акустические экраны для подводных преобразователей и антенн: теория и расчет. СПб.: Изд-во СПбГЭТУ «ЛЭТИ», 2013.
4. Гидроакустическая энциклопедия / под ред. В. И. Тимошенко. Таганрог: Изд-во ТГРУ, 1999.
5. А. с. 1001504 СССР, МКИ H04R 17/00. Электроакустический преобразователь / Д. Б. Дианов, Б. Г. Степанов. Опубл. 28.02.1983. Бюл. № 8.
6. Задириенко И. М., Кузьменко А. Г. Об асимметрии излучения широкополосных стержневых преобразователей с согласующими переходными слоями // Акуст. журн. 1982. Т. 28, № 36. С. 781–784.
7. Подводные электроакустические преобразователи / под ред. В. В. Богородского. Л.: Судостроение, 1983.
8. Степанов Б. Г. О возможности построения безэкранных однонаправленных стержневых преобразователей с фазированным возбуждением секций // Акуст. журн. 2010. Т. 56, № 5. С. 699–705.
9. Степанов Б. Г. Безэкранные однонаправленные гидроакустические преобразователи с электрически управляемой интерференцией излучения в тыльном направлении // Акуст. журн. 2012. Т. 58, № 2. С. 267–274.
10. Пат. USA 3378814 МПК H04R 17/00. Directional transducer / J. L. Buttler. Опубл. 16.04.1968.
11. Пат. СА 1002650 МПК B06B 1/0607. Underwater electroacoustic transducer / G. W. McMahon, J. E. Sleter. Опубл. 28.12.1976.
12. А. с. 466627 СССР, МКИ H04R 13/00. Электроакустический преобразователь / В. А. Андебуря, И. В. Вовк, А. И. Голованенко и др. Опубл. 05.04.1975. Бюл. № 13.
13. Вовк И. В., Гринченко В. Т. Об одном методе построения механической колебательной системы стержневого электроакустического преобразователя // Акуст. журн. 1991. Т. 37, № 6. С. 1106–1115.
14. Вовк И. В., Гринченко В. Т. Нетрадиционные методы управления частотой резонанса низкочастотных гидроакустических преобразователей // Техн. акустика. 1992. Т. 1, вып. 2. С. 5–11.
15. Белов Б. П. Защита стержневых преобразователей от вибрации опоры // Техническая акустика, 1992. Т. 1, вып. 2. С. 27–31.
16. Степанов Б. Г. Анализ и синтез частотных характеристик двухсекционных стержневых преобразователей с фазированным возбуждением // Тр. VIII междунар. конф. ГА-2006 «Прикладные технологии гидроакустики и гидрофизики», 2006, СПб., 2006. С. 195–199.
17. Колесников А. Е. Акустические измерения. Л.: Судостроение. 1983.
18. Физическая акустика // Методы и приборы ультразвуковых исследований / под ред. У. Мэзона. Т. 1, ч. А. М.: Мир. 1966.
19. Орлов Л. В., Шабров А. А. Расчет и проектирование антенн гидроакустических рыбопоисковых станций. М.: Пищевая промышленность. 1974.

B. G. Stepanov  
Saint Petersburg Electrotechnical University

## UNIDIRECTIONAL ROD TRANSDUCERS WITH WEDGE-SHAPED HEADS

*The principle of construction is considered and the results of experimental researches of screenless unidirectional transducers, built on the basis of a piezo-rod and two identical wedge-shaped heads, fixed on its torsos are presented. The transducers have almost twice the dimensions reduced in the direction of radiation (reception) of sound waves compared to traditional rod transducers and are convenient for arrangement in antenna arrays. Rod transducers with wedge-shaped heads are effective both in the radiation and reception modes. A comparison is made between transducers having different shapes of the radiating (receiving) surface in terms of configuration. The possibility of scanning the directivity characteristics for antennas made up of transducers with wedge-shaped heads in two mutually perpendicular planes is shown.*

**Rod transducer, wedge-shaped heads, unidirectionality of radiation and reception**