

Приборы и системы измерения на основе акустических, оптических и радиоволн

УДК 534.232

Оригинальная статья

<https://doi.org/10.32603/1993-8985-2020-23-1-70-82>

Излучение преобразователем волноводного типа в соосные с ним конусные полупространства

И. С. Пестерев¹, Н. Н. Сосновский², Б. Г. Степанов^{2✉}

¹ АО «Концерн «ЦНИИ "Электроприбор"», Санкт-Петербург, Россия

² Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет "ЛЭТИ" им. В. И. Ульянова (Ленина), Санкт-Петербург, Россия

✉ BGStepanov@etu.ru

Аннотация

Введение. Современный этап развития гидроакустической техники характеризуется постоянным улучшением элементной базы и ростом вычислительных мощностей. На этом этапе при решении прикладных задач все чаще сталкиваются с ограничением ширины полосы пропускания электроакустических преобразователей и антенн. Большинство известных способов расширения полосы пропускания не обеспечивают линейность фазочастотной характеристики (ФЧХ) излучения в рабочей полосе частот, которая имеет первоочередное значение для эффективного формирования сравнительно коротких, перестраиваемых по частоте и сложных по структуре акустических сигналов. В связи с этим преимущественным является использование преобразователя волноводного типа (ПВТ), способ построения и электрического возбуждения которого обеспечивает близкую к линейной ФЧХ излучения.

Цель работы. Разработка обобщенной расчетной модели, которая включает в себя частные случаи излучения ПВТ в соосные с ним цилиндрические волноводы и в полупространства, а также учитывает влияние волн, отраженных от границ ПВТ, на его полевые характеристики.

Материалы и методы. ПВТ представлен соосным набором идентичных водозаполненных пьезоцилиндров с амплитудно-фазовым возбуждением, обеспечивающим режим широкополосного излучения по типу бегущей волны. Использование метода частичных областей позволяет решить задачу об излучении ПВТ через водозаполненные апертуры в граничащие с ними конусные полупространства с изменяемым углом раскрыва.

Результаты. Приведены и проанализированы результаты расчетов частотных характеристик звукового давления при излучении ПВТ, возбуждаемых в соответствии с решением задачи синтеза, во фронтальном и тыльном направлениях для разных углов раскрыва конусов. С использованием предложенной расчетной модели ПВТ показана возможность получения полосы пропускания порядка трех октав. Оценивается влияние толщины пассивных фланцев, которые используются для компоновки ПВТ в антеннах. Рассматривается возможность излучения в рабочей полосе частот ПВТ перестраиваемых по частоте ультракоротких однопериодных импульсов для разных углов раскрыва конусов. Дается сопоставительная оценка результатов расчета с другими частными решениями: излучение ПВТ в соосные водозаполненные волноводы, а также – в полупространства.

Заключение. Сделан вывод о целесообразности использования обобщенной расчетной модели для более точного описания акустических полей реальных макетов антенн, составленных из ПВТ.

Ключевые слова: широкополосный преобразователь волноводного типа, синтез частотных характеристик, короткие акустические сигналы

Для цитирования: Пестерев И. С., Сосновский Н. Н., Степанов Б. Г. Излучение преобразователем волноводного типа в соосные с ним конусные полупространства // Изв. вузов России. Радиоэлектроника. 2020. Т. 23, № 1. С. 70–82. doi: 10.32603/1993-8985-2020-23-1-70-82

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Статья поступила в редакцию 26.06.2019; принята к публикации после рецензирования 11.12.2019; опубликована онлайн 28.02.2020

Radiation by Transducer of Waveguide Type into Conical Half-Spaces Coaxial with It

Ivan S. Pesterev¹, Nikolai N. Sosnovsky², Boris G. Stepanov^{2✉}

¹ Concern CSRI Elektropribor, JSC, St Petersburg, Russia

²Saint Petersburg Electrotechnical University, St Petersburg, Russia

✉ BGStepanov@etu.ru

Abstract

Introduction. The present stage of development of hydroacoustic equipment is characterized by a constant improvement of an element base and by an increase in computing power. However, in solving of applied problems one is increasingly faced with a restriction on the realized bandwidth of electroacoustic transducers and antennas. The most of well-known methods of bandwidth expansion do not provide a linear character of the phase-frequency characteristic (PFC) of radiation in the working frequency band, which is of primary importance for the effective formation of relatively short, frequency-tunable, and complex acoustic signals. From this position, the use of a transducer of waveguide type (TWT) is preferential. Its construction and electrical excitation method provides a close to linear phase response of radiation.

Aim. The development of a generalized computational model. It has to include particular cases of TWT radiation into cylindrical waveguides coaxial with it and into half-spaces, and also to take into account the influence of waves reflected from the boundaries of the TWT on its field characteristics.

Materials and methods. The TWT was presented by a coaxial set of identical water filled piezocylinders with amplitude-phase excitation, provided a mode of broadband radiation in the form of traveling waves. The usage of the method of partial regions allowed one to obtain a solution of the problem of TWT radiation through water filled apertures into the conical adjacent half-spaces, variable in angle.

Results. Frequency characteristics of TWT sound pressure results calculated in accordance with the solution of the synthesis problem in the frontal and rear directions for different angles of cone opening were presented and analyzed. Using the proposed computational model of TWT, the possibility of obtaining a bandwidth of the order of 3 octaves was demonstrated. An influence of the thickness of the passive flanges, which are used to link the TWT in the antennas was estimated. The possibility of radiation in the working frequency band of TWT of ultrashort ultra-short single-period pulses for different angles of cone opening was considered. A comparative assessment of the result of calculation with other particular solutions (the radiation by TWT in coaxial water-filled waveguides and also – in half-spaces) was presented

Conclusion. An expedient to use a generalized computational model for a more accurate description of the acoustic fields of real antenna models made up of TWT was concluded.

Keywords: wideband transducer of waveguide type, synthesis of frequency characteristics, short acoustic signals

For citation: Pesterev I. S., Sosnovsky N. N., Stepanov B. G. Radiation by Transducer of Waveguide Type into Conical Half-Spaces Coaxial with It. Journal of the Russian Universities. Radioelectronics. 2020, vol. 23, no. 1, pp. 70–82. doi: 10.32603/1993-8985-2020-23-1-70-82

Conflict of interest. Authors declare no conflict of interest.

Submitted 26.06.2019; accepted 11.12.2019; published online 28.02.2020

Введение. Расширению полосы пропускания электроакустических преобразователей и связанному с ним получению коротких акустических сигналов посвящены многочисленные работы отечественных и зарубежных авторов, отраженные в оригинальных статьях, обзорах и монографиях [1–14]. Известны традиционные пути реше-

ния такого рода задач: использование акустически согласующих структур, электрических корректирующих цепей, разночастотных преобразователей, связанных мод колебаний и др. [1], [4–9]. Однако, обеспечивая достаточно большую полосу пропускания, эти решения далеко не всегда позволяют получить линейную фазочастотную ха-

рактическую (ФЧХ) излучения, необходимую для неискаженной передачи коротких и сложных сигналов. Следует также отметить, что основные методы получения коротких акустических импульсов [10], в том числе и нетрадиционные [11–14], не позволяют изменять частоту их формирования. В связи с этим определенный интерес представляют рассмотренные в [3] подходы, основанные на решении задачи синтеза, обеспечивающие получение равномерной амплитудно-частотной характеристики (АЧХ) и линейной ФЧХ излучения в полосе частот около двух октав и формирование коротких, перестраиваемых по частоте, акустических импульсов.

Одним из вариантов построения широкополосных преобразователей являются преобразователи волноводного типа (ПВТ) [15–17], обеспечивающие полосу пропускания до 3...3.5 октав [16], [17]. Благодаря своему построению и способу возбуждения образующих ПВТ пьезоцилиндров эти преобразователи обладают не только сравнительно равномерной АЧХ, но и линейной ФЧХ излучения в указанной полосе частот. Такой характер ФЧХ излучения в первую очередь определяет возможность неискаженного формирования широкополосных акустических сигналов, что не может быть реализовано при использовании традиционных способов расширения полосы пропускания.

В [16–18] рассмотрены принципы построения сверхширокополосных ПВТ, а также их расчетные и экспериментальные частотные и импульсные характеристики. Для расчетных моделей ПВТ применялись 2 частных варианта решения задачи об излучении: в водозаполненные волноводы, расположенные соосно с ПВТ [16], и в полупространства [18]. В настоящей статье рассматривается разработанная авторами обобщенная расчетная модель ПВТ, позволяющая объединить оба реше-

ния и учесть влияние волн, отраженных от границ ПВТ, на его полевые характеристики.

Расчетная модель ПВТ, излучающего в конусные полупространства. Решение задачи об излучении методом частичных областей. Структура ПВТ и характерные размеры его расчетной модели схематически показаны на рис. 1. Собственно ПВТ представляет собой набор N соосно расположенных пьезоцилиндров (на рис. 1 показана их внутренняя поверхность) с внутренним радиусом a и высотой l , разделенных по торцам тонкими гибкими прокладками. Расстояние между центрами двух соседних пьезоцилиндров равно d . Между крайними пьезоцилиндрами (с номерами 1 и N) и внешней средой расположены жесткие пассивные цилиндрические вставки с внутренним радиусом a и высотой $z_{\text{фл}}$, которые имитируют наличие у реальных макетов антенн, составленных из ПВТ [17], фронтального и тыльного металлических фланцев корпусов. Внутренняя полость ПВТ заполняется жидкостью (водой), контактирующей с внешней средой, а внешняя его поверхность считается свободной. Пьезоцилиндры возбуждаются различными по амплитуде и фазе электрическими напряжениями $U_i = U_{\text{им}} e^{j\varphi_i}$ ($U_{\text{им}}$, φ_i – амплитуда и фаза возбуждающего напряжения соответственно; $i = \overline{1, N}$), которые обеспечивают нужное амплитудно-фазовое распределение радиальной компоненты колебательной скорости на внутренней поверхности пьезоцилиндров $v_{ir} = v_{\text{им}} e^{-j(\omega t - \psi_i)}$ ($v_{\text{им}}$, ψ_i – амплитуда и фаза радиальной компоненты колебательной скорости соответственно).

ПВТ излучает звуковые волны через внешние апертуры фланцев в соосные фронтальную и

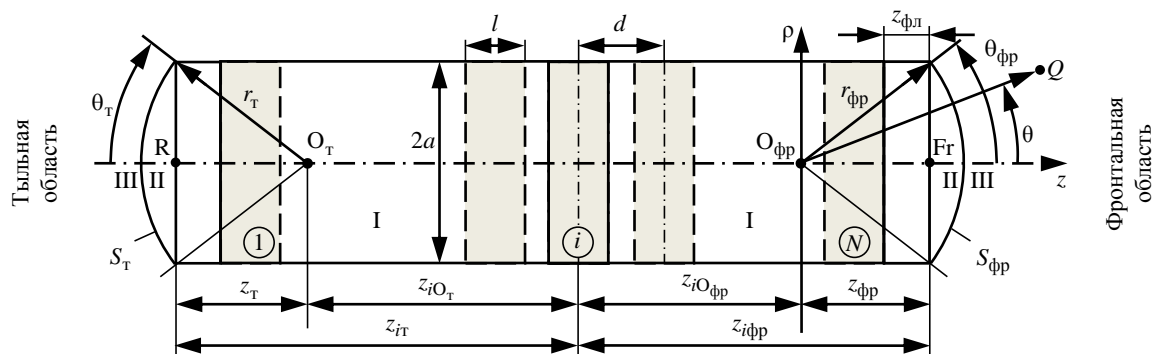


Рис. 1. Расчетная модель ПВТ, излучающего в соосные конусообразные области

Fig. 1. Design model of the TWT radiating in coaxial cone-shaped areas

тыльную водозаполненные бесконечные конусные области, расположенные соответственно справа и слева от ПВТ. Углы раскрытия этих областей равны $2\theta_{\text{фр}}$ и $2\theta_{\text{т}}$. В том случае, когда $\theta_{\text{фр}} = \theta_{\text{т}} = \pi/2$, вершины конусов (точки $O_{\text{фр}}$ и $O_{\text{т}}$) перемещаются к плоскостям апертур ПВТ и излучение происходит с их поверхности в полупространство [14]. При этом $z_{\text{фр}} = z_{\text{т}} = 0$; $r_{\text{фр}} = r_{\text{т}} = a$, а поверхности $S_{\text{фр}}$ и $S_{\text{т}}$ становятся полусферами. Значения $\theta_{\text{фр}} = \theta_{\text{т}} = 0$ соответствуют излучению в соосные волноводы [16], при этом поверхности $S_{\text{фр}}$ и $S_{\text{т}}$ совпадают с плоскостями апертур ПВТ. Подобно [16] и [18] предполагается, что на конических поверхностях значение нормальной к ним компоненты колебательной скорости равно нулю.

Для определения полевых характеристик ПВТ используется метод частичных областей [19], [20]. В соответствии с геометрией обобщенной расчетной модели ПВТ вся область существования звукового поля делится на 3 частичные области. Во фронтальном направлении область I – это цилиндрическая область от правого торца i -го пьезоцилиндра до правого торца ПВТ; область II представляет собой сегмент шара радиусом $r_{\text{фр}}$, ограниченный плоскостью правого торца ПВТ; область III – внутренний объем конуса с углом раскрытия $2\theta_{\text{фр}}$, за исключением шарового сектора радиусом $r_{\text{фр}}$. Аналогичным образом определяются частичные области в тыльном направлении, слева от i -го пьезоцилиндра. В каждой частичной области звуковое поле определяется в виде суммы известных частных решений уравнения Гельмгольца с неопределенными коэффициентами, а затем эти области "сшиваются" с учетом выполнения условий сопряжения звуковых давлений и колебательных скоростей на их границах.

Рассмотрим вначале звуковое поле, формируемое одним пьезоцилиндром в указанных областях во фронтальном направлении ПВТ. В зоне сопряжения цилиндрической и конусообразной областей используются цилиндрическая (ρ, φ, z) и сферическая (r, θ, φ) системы координат с общим центром в точке $O_{\text{фр}}$. Ввиду осевой симметрии ПВТ зависимость от угла φ в решении рассматриваемой задачи будет отсутствовать. В принятой цилиндрической системе координат звуковое поле i -го пьезоцилиндра в области I можно представить в виде

суммы падающей волны [16] и подобной ей отраженной (с неопределенными коэффициентами B_n):

$$p_i^I = K_i \left[\sum_{n=0}^{\infty} A_n e^{jk_n z_{i\text{фр}}} J_0 \left(\beta_n \frac{\rho}{a} \right) e^{jk_n (z - z_{\text{фр}})} + \sum_{n=0}^{\infty} B_n e^{jk_n z_{i\text{фр}}} J_0 \left(\beta_n \frac{\rho}{a} \right) e^{-jk_n (z - z_{\text{фр}})} \right], \quad (1)$$

где $K_i = -2v_{\text{им}} e^{j\psi_i} z_0 k_0 a$; $A_n = \frac{\sin(k_n l/2)}{J_0(\beta_n)(k_n a)^2}$;

$k_n = \sqrt{k_0^2 - (\beta_n/a)^2}$; $J_0(\cdot)$, $J_1(\cdot)$ – цилиндрические функции Бесселя нулевого и первого порядков соответственно; причем $z_0 = \rho_0 c_0$; $k_0 = \omega/c_0$ – волновое число; β_n – корни уравнения $J_1(\beta_n) = 0$; $n = 0, 1, 2, \dots$ (ρ_0 и c_0 – плотность жидкости, заполняющей ПВТ, и скорость звука в ней соответственно).

Звуковое давление в области III определяется в сферических координатах [19]:

$$p_i^{\text{III}} = K_i \sum_{q=0}^{\infty} E_q P_q \left(\cos \frac{\pi\theta}{\theta_{\text{фр}}} \right) h_q^{(1)}(k_0 r), \quad (2)$$

где $P_q(\cdot)$ – полиномы Лежандра; $h_q^{(1)}(\cdot)$ – сферические функции Ханкеля первого рода. Полиномы Лежандра для конусной области III фронтального направления ($0 \leq \theta \leq \theta_{\text{фр}}$) записаны с учетом их отображения на полную сферу ($0 \leq \theta \leq \pi$). В этом случае они также будут обладать свойством ортогональности*.

Звуковое поле в частичной области II образовано суммой двух волн: прошедшей из области I и подобной волне в области III, для которой в качестве радиальной компоненты выбрана сферическая функция Бесселя $j_q(k_0 r)$, непрерывная на промежутке $0 \leq r < \infty$:

$$p_i^{\text{II}} = K_i \left[\sum_{n=0}^{\infty} C_n e^{jk_n z_{i\text{фр}}} J_0 \left(\beta_n \frac{\rho}{a} \right) e^{jk_n (z - z_{\text{фр}})} + \sum_{q=0}^{\infty} D_q P_q \left(\cos \frac{\pi\theta}{\theta_{\text{фр}}} \right) j_q(k_0 r) \right]. \quad (3)$$

* Абрамовиц М., Стиган И. Справочник по специальным функциям с формулами, графикой и таблицами. М.: Физматгиз. 1979. 839 с.

Следует отметить, что в решении для области II может быть использована сферическая функция Ханкеля $h_q^{(1)}(k_0 r)$, но только для $\theta_{\text{фр}}, \theta_{\text{т}} < \pi/2$, когда исключается ее особенность при $r = 0$.

На границе областей I–II ($z = z_{\text{фр}}$) выражение (3) удобно представить в цилиндрической системе координат, заменив сферические координаты θ и r на

$$\theta_{\text{ц}} = \arccos \left(\sqrt{\frac{z_{\text{фр}}^2}{z_{\text{фр}}^2 + \rho^2}} \right) \text{ и } r_{\text{ц}} = \sqrt{z_{\text{фр}}^2 + \rho^2}.$$

На границе областей II–III ($r = r_{\text{фр}}$) выражение (3) следует представить в сферических координатах, заменив ρ и z на $\rho_{\text{сф}} = r_{\text{фр}} \sin \theta$ и $z_{\text{сф}} = r_{\text{фр}} \cos \theta$.

Неизвестные коэффициенты в выражениях (1)–(3) определяются с использованием системы уравнений, объединяющей условия сопряжения звуковых давлений и колебательных скоростей на границах частичных областей I–II и II–III:

$$\left. \begin{aligned} p_i^{\text{I}} &= p_i^{\text{II}}; \\ \frac{\partial p_i^{\text{I}}}{\partial z} &= \frac{\partial p_i^{\text{II}}}{\partial z} \end{aligned} \right\} \text{ при } z = z_{\text{фр}}; 0 \leq \rho \leq a;$$

$$\left. \begin{aligned} p_i^{\text{II}} &= p_i^{\text{III}}; \\ \frac{\partial p_i^{\text{II}}}{\partial r} &= \frac{\partial p_i^{\text{III}}}{\partial r} \end{aligned} \right\} \text{ при } r = r_{\text{фр}}; 0 \leq \theta \leq \theta_{\text{фр}}. \quad (4)$$

Подстановка выражений (1)–(3) в граничные условия (4) и последующая алгебраизация полученных уравнений с использованием интегральных соотношений для функций Бесселя и полиномов Лежандра* приводит к бесконечной системе линейных алгебраических уравнений:

$$\begin{cases} B_q - C_q - \sum_{n=0}^{\infty} I_{qn}^{(1)} D_n = -A_q; \\ B_q + C_q + \sum_{n=0}^{\infty} I_{qn}^{(2)} D_n = A_q; \\ \sum_{n=0}^{\infty} I_{qn}^{(3)} C_n + j_q(k_0 r_{\text{фр}}) D_q - h_q^{(1)}(k_0 r_{\text{фр}}) E_q = 0; \\ \sum_{n=0}^{\infty} I_{qn}^{(4)} C_n + j'_q(k_0 r_{\text{фр}}) D_q - h_q^{(1)}(k_0 r_{\text{фр}}) E_q = 0, \end{cases}$$

где

$$I_{qn}^{(1)} = \frac{2e^{-jk_q z_{\text{фр}}}}{[J_0(\beta_q)]^2} \int_0^1 P_n \left(\cos \frac{\pi \theta_{\text{ц}}}{\theta_{\text{фр}}} \right) j_n(k_0 r_{\text{ц}}) J_0(\beta_q x) x dx;$$

$$I_{qn}^{(2)} = \frac{-2je^{-jk_q z_{\text{фр}}}}{(k_q a)[J_0(\beta_q)]^2} \times$$

$$\times \int_0^1 \left\{ P'_n \left(\cos \frac{\pi \theta_{\text{ц}}}{\theta_{\text{фр}}} \right) \sin \left(\frac{\pi \theta_{\text{ц}}}{\theta_{\text{фр}}} \right) \frac{\pi}{\theta_{\text{фр}}} \times \right.$$

$$\times \frac{x}{(z_{\text{фр}}/a)^2 + x^2} j_n(k_0 r_{\text{ц}}) +$$

$$\left. + P_n \left(\cos \frac{\pi \theta_{\text{ц}}}{\theta_{\text{фр}}} \right) j'_n(k_0 r_{\text{ц}}) \times \right.$$

$$\left. \times \frac{k_0 z_{\text{фр}}}{\sqrt{(z_{\text{фр}}/a)^2 + x^2}} \right\} J_0(\beta_m x) x dx;$$

$$I_{qn}^{(3)} = \frac{2q+1}{2} e^{jk_n z_{\text{фр}}} \times$$

$$\times \int_0^{\theta_{\text{фр}}} J_0 \left(\beta_n \frac{r_{\text{фр}}}{a} \sin \frac{\theta_{\text{фр}} \vartheta}{\pi} \right) e^{jk_n \left(r_{\text{фр}} \cos \frac{\theta_{\text{фр}} \vartheta}{\pi} - z_{\text{фр}} \right)} \times$$

$$\times P_q(\cos \vartheta) \sin \vartheta d\vartheta;$$

$$I_{qn}^{(4)} = \frac{2q+1}{2} e^{jk_n z_{\text{фр}}} \times$$

$$\times \int_0^{\theta_{\text{фр}}} \left\{ -J_1 \left(\beta_n \frac{r_{\text{фр}}}{a} \sin \frac{\theta_{\text{фр}} \vartheta}{\pi} \right) \left(\frac{\beta_n}{k_0 a} \sin \frac{\theta_{\text{фр}} \vartheta}{\pi} \right) + \right.$$

$$\left. + J_0 \left(\beta_n \frac{r_{\text{фр}}}{a} \sin \frac{\theta_{\text{фр}} \vartheta}{\pi} \right) \frac{j k_n \cos \frac{\theta_{\text{фр}} \vartheta}{\pi}}{k_0} \right\} \times$$

$$\times e^{jk_n \left(r_{\text{фр}} \cos \frac{\theta_{\text{фр}} \vartheta}{\pi} - z_{\text{фр}} \right)} P_q(\cos \vartheta) \sin \vartheta d\vartheta,$$

где $x = \rho/a$; $\vartheta = \pi\theta/\theta_{\text{фр}}$.

Аналогичная система уравнений может быть получена и для тыльного направления ПВТ переносом начала используемых сферической и цилиндрической систем координат из точки $O_{\text{фр}}$ в точку $O_{\text{т}}$. Это сопровождается заменой индекса "фр" на "т", а также изменением знака у фазовых показателей экспонент: $e^{-jk_q z_{\text{фр}}} \rightarrow e^{jk_q z_{\text{т}}}$; $e^{jk_n z_{\text{фр}}} \rightarrow e^{-jk_n z_{\text{т}}}$ и $e^{-jk_n z_{\text{фр}}} \rightarrow e^{jk_n z_{\text{т}}}$ в выражениях для интегралов $I_{qn}^{(1)} \dots I_{qn}^{(4)}$. Полученные системы уравнений решаются методом редукции. Полные звуковые давления в частичных областях определяются согласно принципу суперпозиции суммированием парциальных давлений, создаваемых i -ми пьезоцилиндрами во фронтальном и тыльном направлениях ПВТ:

$$P_{\text{фр}}^{\text{I}} = \sum_{i=1}^N p_{i\text{фр}}^{\text{I}}; \quad P_{\text{фр}}^{\text{II}} = \sum_{i=1}^N p_{i\text{фр}}^{\text{II}}; \quad P_{\text{фр}}^{\text{III}} = \sum_{i=1}^N p_{i\text{фр}}^{\text{III}};$$

$$P_{\text{т}}^{\text{I}} = \sum_{i=1}^N p_{i\text{т}}^{\text{I}}; \quad P_{\text{т}}^{\text{II}} = \sum_{i=1}^N p_{i\text{т}}^{\text{II}}; \quad P_{\text{т}}^{\text{III}} = \sum_{i=1}^N p_{i\text{т}}^{\text{III}}.$$

Расчеты выполнялись в пакете программ MATLAB на основе принятой обобщенной модели ПВТ при возбуждении пьезоцилиндров в соответствии с решением задачи синтеза [16], когда во всем рабочем диапазоне частот ПВТ амплитуды колебательной скорости пьезоцилиндров задаются равными и частотно-независимыми ($v_{\text{им}}(\omega) = v_{\text{м}} = \text{const}$), а фазы определяются в соответствии с режимом формирования бегущей волны: $\psi_i = k_0 d(i-1) = \omega \tau(i-1)$, где $\tau = d/c_0$. Для приведенных далее результатов расчета задавались следующие значения параметров ПВТ: $N = 10$; $l/a = 0.6$; $d/a = 0.66$. Следует отметить, что для принятой расчетной модели ПВТ имеется

ограничение на минимальное значение углов раскрытия $\theta_{\text{фр}} = \theta_{\text{т}} = 0$, поскольку в этом случае частичные области III принимают вид строго цилиндрических волноводов, а вершины правого и левого конусов $O_{\text{фр}}$ и $O_{\text{т}}$ смещаются к бесконечности ($z_{iO_{\text{фр}}} \rightarrow -\infty$; $z_{iO_{\text{т}}} \rightarrow \infty$). В связи с этим в рамках настоящей работы для излучения в волновод принято значение $\theta_{\text{фр}} = \theta_{\text{т}} = 0.1^\circ$. Решение задачи получено и для меньших значений углов раскрытия (вплоть до тысячных долей градуса), но оно не имеет заметных отличий от решения для указанных значений.

Оценка выполнения условий сопряжения звуковых полей. При определении значения невязки звуковых давлений на границах частичных областей обобщенной расчетной модели ПВТ необходимо учитывать влияние на результаты расчетов высоты $z_{\text{фл}}$ фронтального и тыльного фланцев. На рис. 2 приведены нормированные АЧХ звукового давления во фронтальном направ-

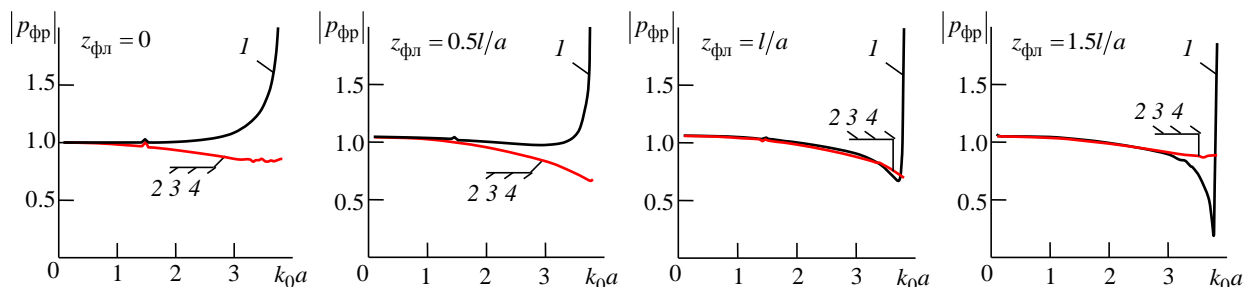


Рис. 2. АЧХ звуковых давлений во фронтальном направлении на оси ПВТ (при излучении в волновод).
Кривая 1 – излучение в области I на границе с областью II; кривая 2 – излучение в области II на границе с областью I; кривая 3 – излучение в области II на границе с областью III; кривая 4 – излучение в области III на границе с областью II

Fig. 2. The frequency response of sound pressures in the frontal direction on the axis of the TWT (with radiation into the waveguide).

Line 1 – radiation in zone I at the boundary with zone II; line 2 – radiation in zone II at the boundary with zone I; line 3 – radiation in zone II at the boundary with zone III; line 4 – radiation in zone III at the boundary with zone II

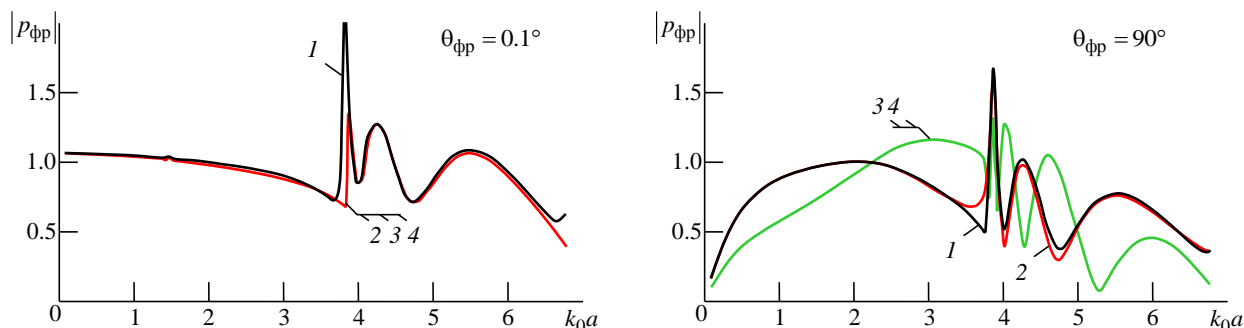


Рис. 3. АЧХ звуковых давлений во фронтальном направлении при излучении в волновод ($\theta_{\text{фр}} = 0.1^\circ$) и в полупространство ($\theta_{\text{фр}} = 90^\circ$). Описание кривых совпадает с рис. 2

Fig. 3. The frequency response of sound pressures in the frontal direction when emitted to a waveguide ($\theta_{\text{фр}} = 0.1^\circ$) and to half-space ($\theta_{\text{фр}} = 90^\circ$). The description of the lines coincides with Fig. 2

лении $|p_{\text{фр}}|$ на оси ПВТ ($\theta = 0$) для частного случая излучения в волновод ($\theta_{\text{фр}} = 0.1^\circ$) и разной высоты фланцев, относительные значения которой $z_{\text{фл}}/a$ указаны на соответствующих графиках. Здесь и на рис. 3 нормировка АЧХ звукового давления осуществлена на его значение в частичной области I для волнового размера $k_0a = 2$, соответствующего частоте радиального резонанса пьезоцилиндров ПВТ. Кривые 1 и 2 соответствуют звуковым давлениям, определенным в частичных областях I и II на границе их сопряжения (в точке Fg, см. рис. 1), а кривые 3 и 4 – в областях II и III на поверхности $S_{\text{фр}}$, в данном случае практически совпадающей с плоскостью выходного отверстия фланца. Графики построены для диапазона частот (волновых размеров k_0a), соответствующего области формирования нормальной волны нулевого порядка в цилиндрическом волноводе и ограниченного значением $\beta_1 \approx 3.83$, являющимся корнем уравнения $J_1(\beta_n) = 0$, и соответствует области формирования нормальной волны нулевого порядка в цилиндрическом волноводе.

Характер поведения АЧХ звуковых давлений во всех трех частичных областях подобен друг другу ввиду фактического слияния границ областей I–II и II–III при $\theta_{\text{фр}} \approx 0$, причем кривые 2–4 практически полностью совпадают. Резкие выбросы звукового давления в области I (кривые 1) вблизи $k_0a \approx 3.83$ формально обусловлены наличием в знаменателе коэффициента A_n в формуле (1) разности $(k_0a)^2 - \beta_n^2$, которая обращается в ноль при $k_0a = \beta_n$, т. е. на критических частотах и, в частности, при $k_0a = \beta_1$. Физически в области критических частот $k_0a = \beta_n$ должны быть минимумы звукового давления ввиду возникновения на этих частотах стоячих волн в радиальном направлении, препятствующих излучению ПВТ вдоль его оси [16–18].

Влияние высоты фланцев расчетной модели ПВТ проявляется заметнее всего на АЧХ звукового давления в частичной области I по мере приближения волнового размера k_0a к значению $\beta_1 \approx 3.83$. По результатам оценки невязки звуковых давлений на границе областей I/II в диапа-

зоне значений углов раскрытия $0 < \theta_{\text{фр}}, \theta_{\text{т}} \leq 90^\circ$, а также с учетом в расчетной модели геометрии реальных макетов антенн, составленных из ПВТ [13], при выполнении дальнейших расчетов высота фланцев ПВТ принималась равной $z_{\text{фл}}/a = 0.95l/a$. Для указанного значения получены представленные на рис. 3 АЧХ нормированных звуковых давлений во фронтальном направлении $|p_{\text{фр}}|$ на оси ПВТ ($\theta = 0$) для двух крайних случаев излучения в волновод ($\theta_{\text{фр}} = 0.1^\circ$) и в полупространство ($\theta_{\text{фр}} = 90^\circ$) в расширенном диапазоне частот (до области зарождения нормальной волны второго порядка).

Из рис. 3 следует, что при излучении в волновод для графиков АЧХ звуковых давлений во всех трех областях наблюдается практически полное их совпадение. В случае излучения в полупространство характер частотной зависимости звукового поля при прохождении полусферической области II заметно изменяется (см. кривые 3 и 4), что обусловлено расхождением волнового фронта.

Интерес представляет оценка выполнения условий сопряжения не только на оси ПВТ, но и вдоль границ частичных областей. На рис. 4 показаны радиальные (а) и угловые (б) распределения нормированных звуковых давлений во фронтальном направлении на границах областей I–II и II–III при излучении в волновод и в полупространство для волнового размера $k_0a = 2.0$. Кривые 1 соответствуют звуковым давлениям в частичных областях, расположенных слева от соответствующих границ, а кривые 2 – справа. Приведенные распределения нормированы на значение звукового давления на оси ПВТ, создаваемого слева от соответствующей границы. Как видно, звуковые давления на границах областей практически полностью совпадают, что также подтверждает выполнение условий сопряжения.

Расчетные АЧХ излучения ПВТ. Оценка работоспособности обобщенной расчетной модели ПВТ, излучающего в соосные конусные полупространства, выполнена посредством сопоставления результатов расчетов по этой модели с результатами, полученными ранее в [16] и [18] для частных моделей излучения в соосно расположенные цилиндрические волноводы и в полупространства. На рис. 5 показаны АЧХ нормированных звуковых давлений ПВТ в области III во фрон-

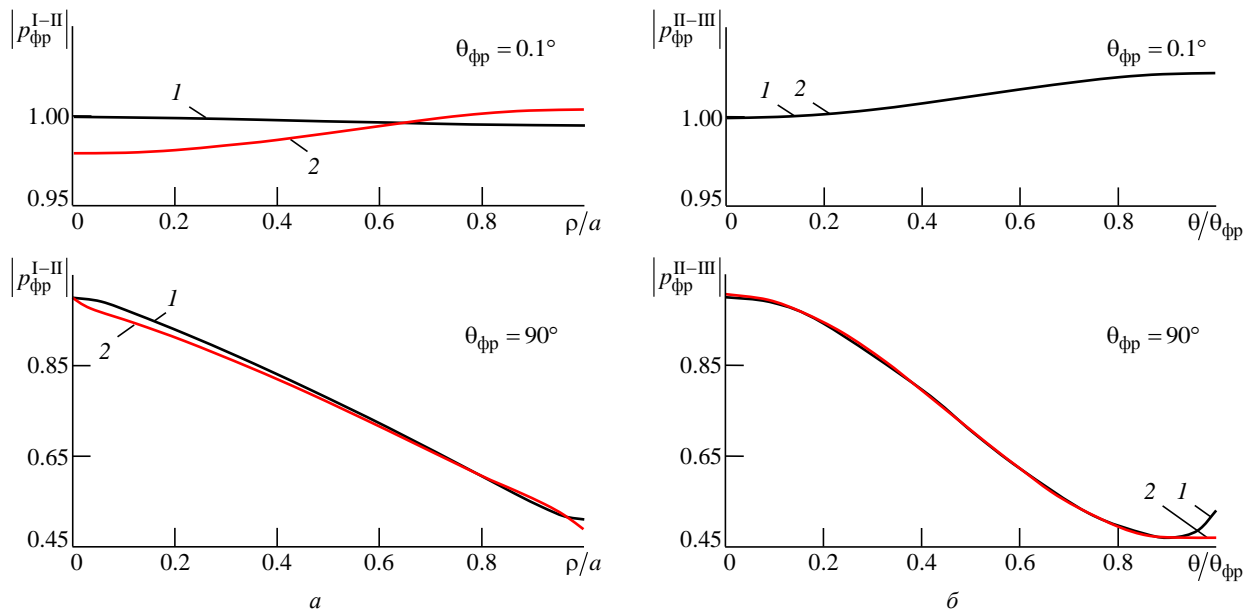


Рис. 4. Радиальные (а) и угловые (б) зависимости звуковых давлений на границах областей I–II $|p_{\text{фр}}^{I-II}|$ и II/III $|p_{\text{фр}}^{II-III}|$ при излучении в волновод ($\theta_{\text{фр}} = 0.1^\circ$) и в полупространство ($\theta_{\text{фр}} = 90^\circ$).

Кривые 1 – давление слева от границы; кривые 2 – давление справа от границы

Fig. 4. Radial (a) and angular (b) dependences of the sound pressures at the boundaries of regions I–II $|p_{\text{фр}}^{I-II}|$ and II/III $|p_{\text{фр}}^{II-III}|$ during radiation to the waveguide ($\theta_{\text{фр}} = 0.1^\circ$) and into the half-space ($\theta_{\text{фр}} = 90^\circ$).

Lines 1 – the pressure to the left of the border; lines 2 – the pressure to the right of the border

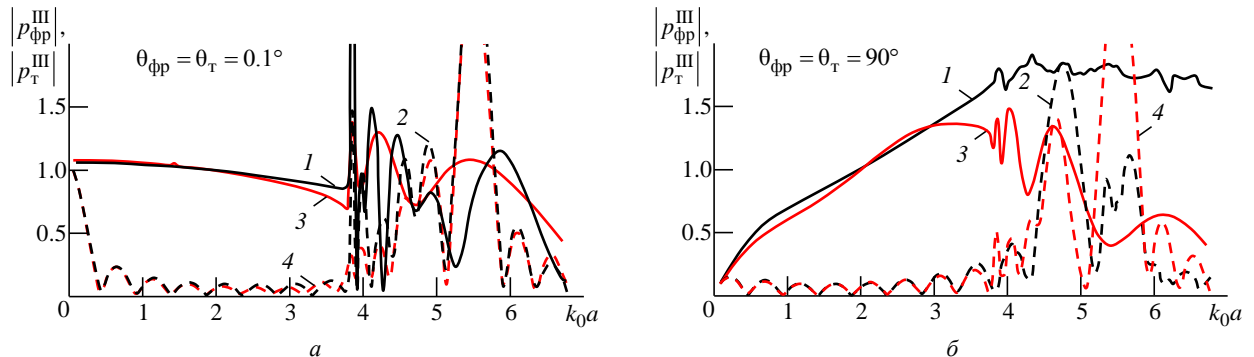


Рис. 5. АЧХ звуковых давлений ПВТ при излучении в волновод (а) и в полупространство (б) во фронтальном (кривые 1, 3) и тыльном (кривые 2, 4) направлениях, полученные частными расчетными моделями (кривые 1, 2) и обобщенной моделью (кривые 3, 4)

Fig. 5. The frequency response of sound pressures of the TWT into the waveguide (a) and half-space (b) in the frontal (curves 1, 3) and rear (curves 2, 4) directions obtained by private calculation models (curves 1, 2) and the generalized model (curves 3, 4)

тальном направлении $|p_{\text{фр}}^{III}|$ (кривые 1 и 3) и в тыльном направлении $|p_{\text{т}}^{III}|$ (кривые 2 и 4), полученные с использованием частных расчетных моделей (кривые 1 и 2), а также обобщенной модели (кривые 3 и 4) при $\theta_{\text{фр}}, \theta_{\text{т}} = 0.1^\circ$ и 90° . Для удобства сопоставления на рис. 4–7 звуковое давление нормировано на его значение при $k_0 a = 2$. Расчет выполнен для случая дальнего поля (на расстоянии

$z/a = 10l/a$ от излучающих апертур ПВТ) при расположении точки наблюдения на оси преобразователя. Результаты, полученные с использованием разных расчетных моделей, в целом демонстрируют вполне удовлетворительное соответствие, особенно в основном рабочем диапазоне частот ПВТ, т. е. в области формирования квазиплоской волны или нормальной волны нулевого порядка ($k_0 a < \beta_1 \approx 3.83$). Для всех расчетных моделей ПВТ

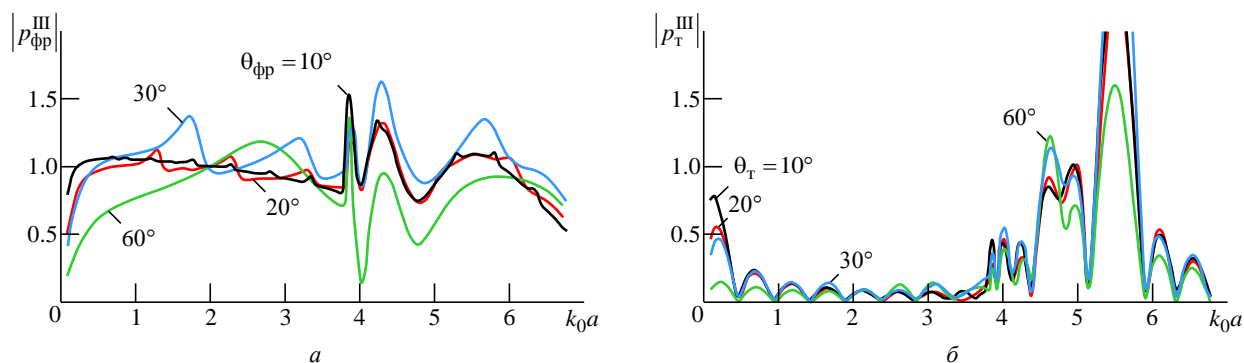


Рис. 6. АЧХ нормированных звуковых давлений ПВТ во фронтальном (а) и тыльном (б) направлениях

Fig. 6. Frequency response of the normalized sound pressures of the TWT in the frontal (a) and rear (b) directions

формируется практически линейная ФЧХ излучения во фронтальном направлении.

Рассмотрим характер звуковых полей, формируемых ПВТ при задании промежуточных значений угла раскрытия конусообразных областей излучения $0 < \theta_{\text{фр}}, \theta_{\text{т}} < 90^\circ$. На рис. 6 приведены АЧХ нормированных звуковых давлений ПВТ во фронтальном направлении (а) $|p_{\text{фр}}^{\text{III}}|$ и в тыльном направлении (б) $|p_{\text{т}}^{\text{III}}|$ для нескольких значений углов раскрытия в указанном диапазоне. Представленные на рис. 6 результаты расчета вместе с графиками на рис. 5 (для двух крайних значений углов раскрытия конусообразных областей обобщенной расчетной модели ПВТ) демонстрируют достаточно плавное изменение характера АЧХ звуковых давлений при перестроении области излучения от одного частного случая (излучение в волновод) к другому (излучение в полупространство). При излучении во фронтальном направлении на рис. 6 наблюдаются флуктуации амплитуды, уровень и период следования которых увеличиваются с ростом угла раскрытия $\theta_{\text{фр}}$. Период следования

флуктуаций по достижении значений $\theta_{\text{фр}} \approx 50...60^\circ$ становится сопоставимым с шириной диапазона частот, в котором формируется квазиплоская волна ($0 < k_0 a < 3.83$), и АЧХ звуковых давлений заметно сглаживаются.

Ранее отмечалась возможность использования сферических функций Ханкеля $h_q^{(1)}(k_0 r)$ вместо сферических функций Бесселя $j_q(k_0 r)$ при описании радиальной компоненты волны в частичной области II для малых углов раскрытия конусообразных областей расчетной модели ПВТ. На рис. 7 для тех же значений углов раскрытия $\theta_{\text{фр}}, \theta_{\text{т}}$, которые были приняты для рис. 6, приведены АЧХ нормированных звуковых давлений $|p_{\text{фр}}^{\text{III}}|$, $|p_{\text{т}}^{\text{III}}|$ при такой замене. Исключение составляют кривые, для которых принято $\theta_{\text{фр}} = 40^\circ$, $\theta_{\text{т}} = 40^\circ$, поскольку при углах раскрытия конусообразных областей $\theta_{\text{фр}}, \theta_{\text{т}} \geq 45^\circ$ заметно увеличивается невязка звуковых давлений на границе ча-

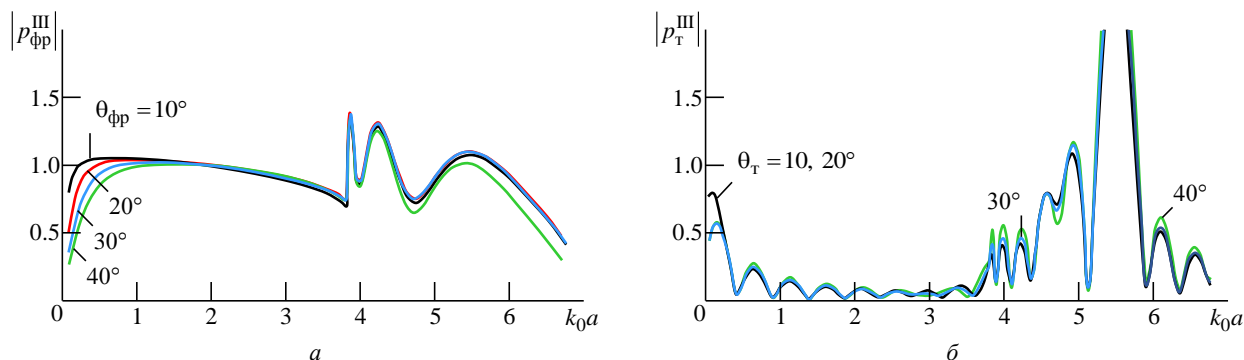


Рис. 7. АЧХ нормированных звуковых давлений ПВТ во фронтальном (а) и тыльном (б) направлениях при использовании в области II сферических функций Ханкеля

Fig. 7. Frequency response of the normalized sound pressures of the TWT in the frontal (a) and rear (b) directions when using Hankel's spherical functions in region II

стичных областей I–II. Как видно, при использовании сферических функций Ханкеля наблюдается существенное сглаживание хода АЧХ излучения во фронтальном направлении. Если же излучение происходит в волновод, то АЧХ излучения ПВТ практически полностью совпадают с теми, которые получены с использованием сферических функций Бесселя (рис. 5, а, кривые 3 и 4).

В целом, независимо от выбора сферической функции в области II вид АЧХ звуковых давлений, характерный для излучения в соосные цилиндрические волноводы, сохраняется вплоть до углов раскрытия $\theta_{\text{фр}}, \theta_{\text{Т}} = 5 \dots 7^\circ$. При дальнейшем расширении конусных областей III уровень излучения в интервале $0.5 > k_0 a > 0$ снижается по мере все большего расхождения волнового фронта и понижения нагруженности излучающих апертур ПВТ. Это хорошо согласуется с результатами экспериментальных исследований АЧХ излучения ПВТ [17].

Излучение коротких акустических сигналов.

Результаты расчетов звуковых давлений, формируемых ПВТ при его возбуждении в соответствии с решением задачи синтеза, демонстрируют наличие эффективного излучения в более чем трехоктавной полосе частот. Указанное обстоятельство в совокупности с линейным характером ФЧХ излучения обуславливают возможность формирования в рабочем диапазоне частот ПВТ акустических им-

пульсов заданной формы. Акустические сигналы $s_{\text{ак}}(t)$, формируемые ПВТ во фронтальном и тыльном направлениях, получим с использованием преобразования Фурье и частотных характеристик звукового давления $p_{\text{фр}}^{\text{III}}(\omega), p_{\text{Т}}^{\text{III}}(\omega)$:

$$s_{\text{ак.фр}}(t) = 2 \operatorname{Re} \int_0^{\omega_{\text{В}}} \Phi(\omega) p_{\text{фр}}^{\text{III}}(\omega) e^{j\omega t} d\omega;$$

$$s_{\text{ак.Т}}(t) = 2 \operatorname{Re} \int_0^{\omega_{\text{В}}} \Phi(\omega) p_{\text{Т}}^{\text{III}}(\omega) e^{j\omega t} d\omega,$$

где $\omega_{\text{В}}$ – верхний предел интегрирования, определяющий полноту спектра сигнала $\Phi(\omega)$, например по заданному уровню $\Phi_{\text{min}}(\omega)/\Phi_{\text{max}}(\omega) \leq 0.1$.

Интерес представляет оценка влияния изменения углов раскрытия $\theta_{\text{фр}}, \theta_{\text{Т}}$ конусообразных областей излучения ПВТ на вид его акустических импульсов. На рис. 8 показаны сигналы $s_{\text{ак.фр}}(t)$, сформированные во фронтальном направлении ПВТ при его возбуждении однопериодным импульсом в соответствии с решением задачи синтеза, с перестройкой несущей частоты в двухоктавном диапазоне ($k_0 a = 0.5, 1.0, 2.0$) для углов раскрытия $\theta_{\text{фр}} = 0.1, 30, 60$ и 90° . Временная

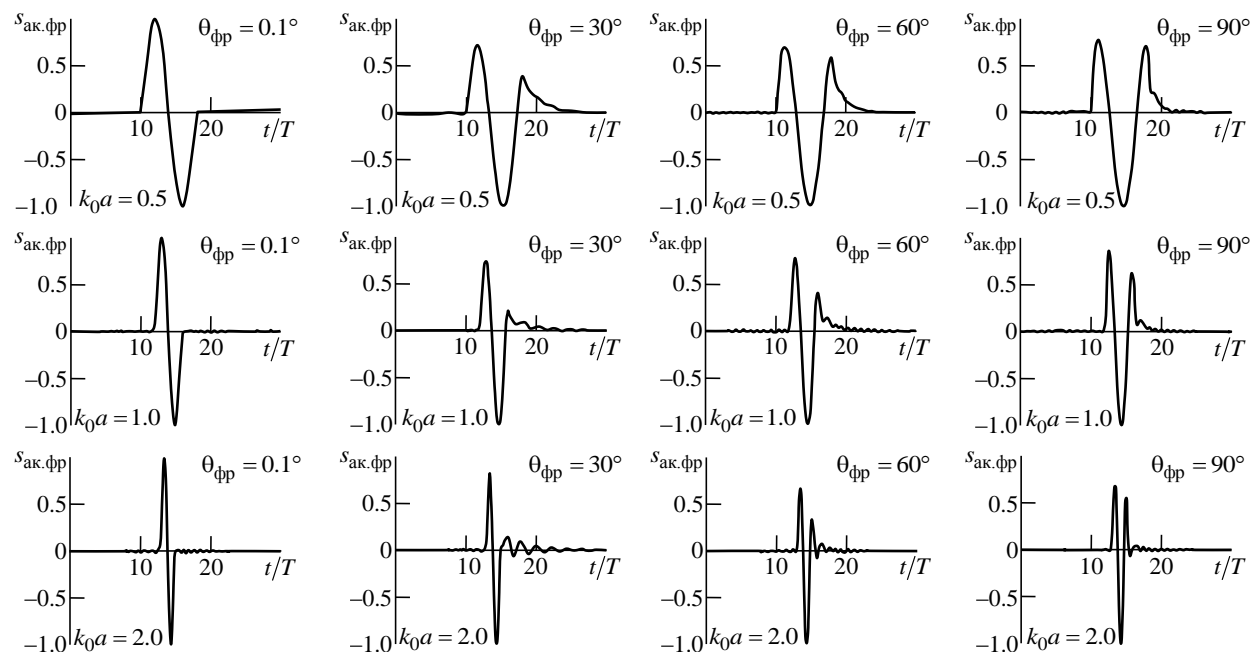


Рис. 8. Короткие акустические импульсы, формируемые ПВТ во фронтальном направлении на различных частотах, для различных углов раскрытия конических полупространств

Fig. 8. Short acoustic pulses generated by the TWT in the frontal direction at different frequencies, for different aperture angles of conical half-spaces

шкала абсцисс нормирована на длительность одного полупериода колебаний T на частоте, близкой к радиальному резонансу пьезоцилиндра ПВТ ($k_0a = 2.0$). Для всех приведенных сигналов область концентрации их амплитудного спектра (шириной около 1.8 октавы по уровню -3 дБ) располагается в основном рабочем диапазоне частот ПВТ ($k_0a \leq 3.83$). Можно наблюдать, что обобщенная расчетная модель ПВТ позволяет перестраивать излучаемые акустические сигналы по частоте практически без искажений формы только при углах раскрытия $\theta_{\text{фр}}, \theta_{\text{т}} = 0.1^\circ$, т. е., по сути, при излучении в цилиндрические волноводы. В остальных случаях с ростом углов раскрытия наблюдается изменение длительности отдельных полупериодов импульса друг относительно друга, а также появление дополнительного полупериода колебаний, что во многом обусловлено увеличением степени расхождения волнового фронта.

Интересно отметить еще один аспект формирования акустических сигналов с использованием рассматриваемого способа возбуждения ПВТ. Когда несущая частота однопериодного импульса, превысив частоту радиального резонанса пьезоцилиндра, приближается к верхней границе основного рабочего диапазона частот ПВТ ($k_0a = \beta_1 \approx 3.83$), основная область (лепесток) спектра этого импульса начинает выходить за верхнюю границу рабочего диапазона. При этом во временном представлении сигнала наблюдается постепенное увеличение его длительности относительно заданной. Другими словами, при

приближении несущей частоты заданного импульса к верхней границе рабочего диапазона частот ПВТ сформированный им акустический сигнал постепенно перестает изменять свою длительность.

Заключение. Решение задачи об излучении ПВТ в соосные с ним конусные полупространства, полученное с использованием метода частичных областей, демонстрирует высокую степень неразрывности звукового поля в зоне сопряжения цилиндрической и конусной областей расчетной модели. Сопоставление АЧХ звуковых давлений, полученных с использованием обобщенной модели ПВТ для двух крайних значений углов раскрытия ($\theta_{\text{фр}}, \theta_{\text{т}} = 0.1$ и 90°), и частных моделей излучения в соосные цилиндрические волноводы и полупространства показало их удовлетворительное соответствие. Перестроение конусных областей излучения в диапазоне углов раскрытия $0 < \theta_{\text{фр}}, \theta_{\text{т}} < 90^\circ$ сопровождается достаточно плавным изменением АЧХ излучения ПВТ и формируемых им короткоимпульсных сигналов, что обусловлено постепенным увеличением степени расхождения волнового фронта. Характер результатов расчета, полученных для промежуточных значений $\theta_{\text{фр}}, \theta_{\text{т}}$, хорошо согласуется с результатами экспериментальных исследований [17]. Таким образом, рассматриваемая расчетная модель может быть использована для более детального описания звуковых полей, формируемых реальными макетами гидроакустических систем на основе ПВТ, что расширяет возможности их дальнейшего проектирования.

Список литературы

1. Степанов Б. Г. Широкополосность преобразователей // Гидроакустическая энциклопедия / под общ. ред. В. И. Тимошенко. Таганрог: Изд-во ТГРУ, 1999. С. 696–697.
2. Sherman C. H., Butler J. L. Transducers and Arrays for Underwater Sound. New York: Springer Science+Business Media, LLC, 2007. 629 p.
3. Степанов Б. Г. Пьезоэлектрические преобразователи стержневого и пластинчатого типов с амплитудно-фазовым возбуждением. Задачи синтеза и анализа. СПб.: Изд-во СПбГЭТУ "ЛЭТИ", 2019. 220 с.
4. Development Of A Wideband Underwater Transmitting Transducer with over 150 Khz Bandwidth and High Transmitting Levels using 1-3 Piezocomposite Materials / K. Nicolaidis, L. Nortman, M. Y. Shatalov, J. Tapson // Proc. of the Intern. Congress on Ultrasonics, Vienna, Austria, Apr. 9–13 2007. Paper ID 1345, Session R31: Underwater Ultrasonics.
5. Chhith S., Roh Y. Wideband Multimode Tonpizl Transducer with a Cavity Inside a Head Mass // IEEE In-

- tern. Ultrasonics Symp. Rome, Italy, 20–23 Sept. 2009. P. 2734–2737. doi: 10.1109/ULTSYM.2009.5441915
6. On the Bandwidth of Piston Type Sonar Transducers / I. V. Gerasimova, R. P. Pavlov, V. I. Pozern, O. B. Stupak // Sonar Transducers and Numerical Modeling in Underwater Acoustics: Proc. of the Institute of Acoustic. London, England, UK. Vol. 27, № 1, 2005. P. 63–70.
7. Pat. US 6,617,765 B1 Int.Cl.7 H01L 41/08. Underwater Broadband Acoustic Transducer / Y. Lagler, V. Suppa, G. Raux, G. Labrano. Publ. 09/09/2003.
8. Pat. US 8,072,843 B1 Int.Cl. H04R 17/00 (2006.01). Stepped Multiply Resonant Wideband Transducer Apparatus / J. L. Butler, A. L. Butler. Publ. 06/12/2011.
9. Pat. US 6,722,003 B2 Int.Cl.7 H04R 17/00; H04L 41/06. Underwater Wide-Band Electroacoustic Transducer and Packaging Method / S.-D. Dunn, C.-Z. Yeh, J.-Y. Jih. Publ. 20/24/2004.
10. Коновалов С. И., Кузьменко А. Г. Особенности импульсных режимов работы электроакустических

пьезоэлектрических преобразователей. СПб.: Политехника, 2014. 294 с.

11. Найда С. А. Возбуждение коротких ультразвуковых импульсов недемпфированным пьезоэлектрическим преобразователем // Электроника и связь. 2012. № 2. С. 35–40.

12. Желяскова Т. Н., Коржик А. В., Найда С. А. Методы возбуждения коротких акустических импульсов в пьезоэлектрическом преобразователе с согласующими слоями // Техническая диагностика и неразрушающий контроль. 2012. № 2. С. 24–29.

13. Decreasing Pulse Duration at Receiver Output under Emitter Excitation with Complex Waveforms / B. Ch. Ee, R. S. Kononov, S. I. Kononov, A. G. Kuz'menko, I. Y. Oshurkov, B. M. Tsaplev // Russian J. of nondestructive testing. 2018. Vol. 54, № 1. P. 31–36. doi: 10.1134/S1061830918010035

14. Гончарский А. В., Романов С. Ю., Сережников С. Ю. Обратные задачи формирования зондирующих импульсов в ультразвуковой томографии: модельные расчеты и эксперимент // Вычислительные методы и программирование. 2018. Т. 19, вып. 2. С. 150–157. URL: <http://mi.mathnet.ru/rus/vmp/v19/i2/p150> (дата обращения 07.01.2020)

15. Мальцев Ю. В., Прокопчик С. Е. Гидроакустические волноводные антенны и перспективы их применения в технических средствах исследования океана // Подводные исследования и робототехника. 2010. Т. 10, № 2. С. 51–71. URL: <https://readera.ru/14339844> (дата обращения 07.01.2020)

16. Степанов Б. Г. Сверхширокополосный гидроакустический преобразователь волноводного типа. Задача синтеза // Изв. СПб ГЭТУ "ЛЭТИ". 2013. № 3. С. 87–96.

17. Пестерев И. С., Степанов Б. Г. Исследование широкополосной гидроакустической системы, содержащей преобразователи волноводного типа // Изв. вузов России. Радиоэлектроника. 2018. Т. 21, № 5. С. 60–70. doi: 10.32603/1993-8985-2018-21-5-60-70

18. Степанов Б. Г. Излучение одиночным преобразователем волноводного типа в полубесконечные пространства // Прикладные технологии гидроакустики и гидрофизики: тр. XII Всерос. конф., Санкт-Петербург, 27–29 мая 2014 г. / АО «Концерн "Океанприбор"». СПб., 2014. С. 360–364.

19. Гринченко В. Т., Вовк И. В., Мацыпура В. Т. Основы акустики. Київ: Наук. думка, 2007. 640 с.

20. Гринченко В. Т., Вовк И. В., Мацыпура В. Т. Волновые задачи акустики. Киев: Интерсервис, 2013. 572 с.

Информация об авторах

Пестерев Иван Сергеевич – Инженер 2-й кат. АО «Концерн «ЦНИИ "Электроприбор"», преподаватель-исследователь (2019) по специальности "Акустика". Автор 9 научных публикаций. Сфера научных интересов – разработка и исследование электроакустических преобразователей, а также систем формирования электрических сигналов возбуждения.

Адрес: АО «Концерн «ЦНИИ "Электроприбор"», ул. Малая Посадская, д. 30, Санкт-Петербург, 197046, Россия

E-mail: ivanpesterev@mail.ru

<https://orcid.org/0000-0002-4263-5114>

Сосновский Николай Николаевич – кандидат технических наук (1975), старший научный сотрудник (1984), доцент кафедры алгоритмической математики Санкт-Петербургского государственного электротехнического университета "ЛЭТИ" им. В. И. Ульянова (Ленина). Автор 40 научных публикаций. Сфера научных интересов – теория вероятностей и математическая статистика, решение прикладных задач с использованием современных средств компьютерной алгебры (Wolfram Mathematica).

Адрес: Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет "ЛЭТИ" им. В. И. Ульянова (Ленина), ул. Профессора Попова, д. 5, Санкт-Петербург, 197376, Россия

E-mail: sosnovskiy-78@yandex.ru

<https://orcid.org/0000-0002-3595-7617>

Степанов Борис Георгиевич – кандидат технических наук (1987), старший научный сотрудник (1992), доцент (1996) кафедры электроакустики и ультразвуковой техники Санкт-Петербургского государственного электротехнического университета "ЛЭТИ" им. В. И. Ульянова (Ленина). Автор более 110 научных публикаций. Сфера научных интересов – разработка и исследование различных электроакустических преобразователей и систем с заданными направленными и частотными свойствами.

Адрес: Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет "ЛЭТИ" им. В. И. Ульянова (Ленина), ул. Профессора Попова, д. 5, Санкт-Петербург, 197376, Россия

E-mail: BGStepanov@etu.ru

<https://orcid.org/0000-0002-0365-7345>

References

1. Broadband Transducers. In Hydroacoustic Encyclopedia. Ed. by V.I. Timoshenko. Taganrog, TGRU, 1999, pp. 696–697. (In Russ.)

2. Sherman C. H., Butler J. L. Transducers and Arrays for Underwater Sound. New York, Springer Science+Business Media, LLC, 2007, 629 p.

3. Stepanov B. G. *P'ezoelektricheskie preobrazovateli sterzhnogo i plastinchatogo tipov s amplitudno-fazovym возбуждением* [Piezoelectric Transducers of Rod and Plate Types with Amplitude-phase Excitation. Synthesis and Analysis Problems]. Saint Petersburg, SPbETU "LETI", 2019, p. 220. (In Russ.)

4. Nicolaides K., Nortman L., Shatalov M., Tapson J. Development of a Wideband Underwater Transmitting Transducer with Over 150 kHz Bandwidth and High Transmitting Levels Using 1-3 Piezocomposite Materials. Proc. of the Intern. Congress on Ultrasonics. Vienna, Austria, 2007, Paper ID 1345, Session R31: Underwater Ultrasonics.
5. Chhith S., Roh Y. Wideband Multimode Tonpizl Transducer with a Cavity Inside a Head Mass. IEEE Intern. Ultrasonics Symp. Rome, Italy, 20–23 Sept. 2009, pp. 2734–2737. doi: 10.1109/ULTSYM.2009.5441915
6. Gerasimova I. V., Pavlov R. P., Pozern V. I., Stupak O. B. On the Bandwidth of Piston Type Sonar Transducers. Sonar Transducers and Numerical Modeling in Underwater Acoustics: Proc. of the Institute of Acoustic. London, England, UK, vol. 27, no. 1, 2005, pp. 63–70.
7. Lagler Y., Suppa V., Raux G., Labrano G. Underwater Broadband Acoustic Transducer. Pat. US 6,617,765 B1. Int.Cl.7 H01L 41/08. Publ. 09/09/2003.
8. Dunn S.-D., Yeh C.-Z., Jih J.-Y. Underwater Wide-Band Electroacoustic Transducer and Packaging Method. Pat. US 6,722,003 B2 Int.Cl.7 H04R 17/00; H04L 41/06. Publ. 20/24/2004.
9. Dunn S.-D., Yeh C.-Z., Jih J.-Y. Underwater Wide-Band Electroacoustic Transducer and Packaging Method. Pat. US 6,722,003 B2 Int.Cl.7 H04R 17/00; H04L 41/06. Publ. 20/24/2004.
10. Konovalov S. I., Kuzmenko A. G. *Osobennosti impul'snykh rezhimov raboty elektro-akusticheskikh p'ezoelektricheskikh preobrazovatelei* [Features of Pulsed Operation Modes of Electroacoustic Piezoelectric Transducers]. Saint Petersburg, *Polytechnica*, 2014, p. 294. (In Russ.)
11. Naida S. A. Excitation of Short Ultrasonic Pulses by an Undamped Piezoelectric Transducer. Electronics and Communications. 2012, vol. 2, pp. 35–40. (In Russ.)
12. Zhelyaskova T. N., Korzhik A. V., Naida S. A. Methods for Exciting Short Acoustic Pulses in a Piezoelectric Transducer with Matching Layers. Technical Diagnostics and Nondestructive Testing. 2012, vol. 2, pp. 24–29. (In Russ.)
13. Ee B. Ch., Konovalov R. S., Konovalov S. I., Kuz'menko A. G., Oshurkov I. Y., Tsaplev B. M. Decreasing Pulse Duration at Receiver Output under Emitter Excitation with Complex Waveforms. Russian J. of non-destructive testing. 2018, vol. 54, no. 1, pp. 31–36. doi: 10.1134/S1061830918010035
14. Goncharsky A. V., Romanov S. Yu., Seryozhnikov S. Yu. Inverse Problems of Sounding Pulse Formation in Ultrasound Tomography: Mathematical Modeling and Experiments. *Vychisl. Metody Programm.* 2018, vol. 19, no. 2, pp. 150–157. Available at: <http://mi.mathnet.ru/rus/vmp/v19/i2/p150> (accessed 07.01.2020) (In Russ.)
15. Maltsev U. V., Prokopchik S. E. Hydroacoustic Waveguide Antennas and Prospects for Their Use in the Technical Means of Ocean Research. Underwater Investigations and Robotics. 2010, vol. 2 (10), pp. 51–71. (In Russ.)
16. Stepanov B. G. The Superwideband Hydroacoustic Transducer of Waveguide Type. A Synthesis Problem. *Izvestia SPbETU "LETI"*. 2013, vol. 3, pp. 87–96. (In Russ.)
17. Pesterev I. S., Stepanov B. G. Research of Wide-band Hydro Acoustic System, Containing Transducers of Waveguide Type. Journal of the Russian Universities. Radioelectronics. 2018, no. 5, pp. 60–70. doi: 10.32603/1993-8985-2018-21-5-60-70 (In Russ.)
18. Stepanov B. G. Radiation by Single Transducer of Waveguide Type in Semi-infinite Spaces. Proc. of XII All-Russ. Conf. "Advanced Technologies of Hydroacoustics and Hydrophysics". Saint Petersburg, Russia, 2014, pp. 360–364. (In Russ.)
19. Grinchenko V. T., Vovk I. V., Matsypura V. T. *Osnovy akustiki* [Basics of Acoustics]. Kiev, *Naukova Dumka*, 2007, p. 640. (In Ukr.)
20. Grinchenko V. T., Vovk I. V., Matsypura V. T. *Volnovye zadachi akustiki* [Wave Acoustics Tasks]. Kiev, *Interprint DP*, 2013, p. 572 (In Ukr.)

Information about the authors

Ivan S. Pesterev, Engineer 2 cat. of State Research Center of the Russian Federation «Concern CSRI "Elektropribor"», teacher-researcher (2019) specialty "Acoustics". The author of 9 scientific publications. Area of expertise: research and development of electro-acoustic transducers and electric excitation signals forming systems.

Address: Concern CSRI "Elektropribor", JSC, 30, Malaya Posadskaya str., St Petersburg 197046, Russia

E-mail: ivanpesterev@mail.ru

<https://orcid.org/0000-0002-4263-5114>

Nikolai N. Sosnovsky, Cand. Sci. (Eng.) (1975), Senior Researcher (1980), Associate Professor of the Department of Higher Mathematics 2 of Saint Petersburg Electrotechnical University. The author of 40 scientific publications. Area of expertise: probability theory and mathematical statistics, solution of applied problems using modern means of computer algebra (Wolfram Mathematica).

Address: Saint Petersburg Electrotechnical University, 5 Professor Popov Str., St Petersburg 197376, Russia

E-mail: sosnovskiy-78@yandex.ru

<https://orcid.org/0000-0002-3595-7617>

Boris G. Stepanov, Cand. Sci. (Eng.) (1987), Senior Researcher (1992), Associate Professor (1996) of the Department of Electroacoustics and Ultrasonic Technics of Saint Petersburg Electrotechnical University. The author of more than 110 scientific publications. Area of expertise: research and development of various electro-acoustic transducers and systems with predetermined directionality, and frequency properties.

Address: Saint Petersburg Electrotechnical University, 5 Professor Popov Str., St Petersburg 197376, Russia

E-mail: BGStepanov@etu.ru

<https://orcid.org/0000-0002-0365-7345>