

О работе широкополосных преобразователей волноводного типа

Б. Г. Степанов

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

bgstepanov@etu.ru

Аннотация. Рассмотрен сравнительно простой и эффективный вариант возбуждения (задача анализа) преобразователя волноводного типа (ПВТ), обеспечивающего широкополосную (порядка двух октав) амплитудно-частотную и практически линейную фазочастотную характеристики излучения. ПВТ выполнен в виде соосного набора пьезоцилиндров с внутренней полостью заполненной жидкостью. Проведен анализ результатов расчетов, выполненных в среде MatLab, частотных характеристик звукового давления при излучении ПВТ во фронтальном и тыльном направлениях для разных значений параметров его построения и возбуждения. Определены характерные тенденции и влияние на частотные характеристики ПВТ этих параметров. При числе пьезоцилиндров более пяти тыльное излучение ПВТ уменьшается почти на порядок по сравнению с фронтальным, фазочастотная характеристика которого становится линейной. Показана возможность излучения в рабочей полосе частот ПВТ, перестраиваемых по частоте ультракоротких импульсов. Результаты расчетов и данные экспериментальных исследований макетов антенн, составленных из ПВТ, достаточно хорошо коррелируют друг с другом.

Ключевые слова: преобразователь волноводного типа, широкополосность, амплитудно-частотная и фазочастотная характеристики, короткие акустические сигналы

Для цитирования: Степанов Б. Г. О работе широкополосных преобразователей волноводного типа // Изв. СПбГЭТУ «ЛЭТИ». 2025. Т. 18, № 9. С. 5–14. doi: 10.32603/2071-8985-2025-18-9-5-14.

Original article

About the Operation of Broadband Waveguide Type Transducers

B. G. Stepanov

Saint Petersburg Electrotechnical University, Saint Petersburg, Russia

bgstepanov@etu.ru

Abstract. A relatively simple and effective method of excitation (the task of analysis) transducer of waveguide type (TWT) providing broadband (of the order of 2 octaves) amplitude-frequency and almost linear phase-frequency characteristics of radiation is considered. TWT is made in the form of a coaxial set of piezocylinders with an internal cavity filled with liquid. The analysis of the results of calculations performed in the MatLab environment of the frequency characteristics of sound pressure during TWT radiation in the frontal and rear directions for different values of its construction and excitation parameters is carried out. The characteristic trends and the influence of these parameters on the frequency characteristics of TWT are determined. When the number of piezocylinders is more than 5, the TWT rear radiation decreases by almost an order of magnitude compared to the front one, the phase frequency characteristic of which becomes linear. The possibility of emitting frequency-tunable ultrashort pulses in the TWT operating frequency band is shown. The results of calculations and data from experimental studies of antenna mock-up made up of TWT correlate quite well with each other.

Keywords: transducer of waveguide type, broadband, amplitude-frequency characteristics, phase-frequency characteristics, short acoustic signals

For citation: Stepanov B. G. About the operation of broadband waveguide type transducers // LETI Transactions on Electrical Engineering & Computer Science. 2025. Vol. 18, no. 9. P. 5–14. doi: 10.32603/2071-8985-2025-18-9-5-14.

Введение. Разработка широкополосных (с полосой пропускания более 1 октавы) излучающих систем остается актуальной уже многие годы. В частности, это связано с необходимостью совершенствования гидроакустических систем, повышения их информативности, помехозащищенности и разрешающей способности. С целью расширения полосы пропускания гидроакустических преобразователей часто используются: согласующие пассивные слои или подобные им по действию структуры, электрические корректирующие цепи, разные моды колебаний возбуждаемые в одном преобразователе, разночастотные преобразователи в составе антенны и т. д. [1]–[6]. При этом все чаще в качестве зондирующих сигналов применяются частотно-модулированные и хаотические сигналы, разные кодовые последовательности и ультракороткие импульсы [7]–[11]. Отметим, что для ряда практических задач достаточным параметром оказывается ширина полосы пропускания амплитудно-частотной характеристики (АЧХ) преобразователей, например для ЛЧМ-сигналов, использующих достаточно длинные радиоимпульсы [7]. Однако при излучении более сложных по структуре акустических сигналов, в том числе ультракоротких импульсов, подобных сигналам китообразных [11], [12], основным фактором их неискаженного формирования, кроме требования к широкополосности АЧХ, служит линейность фазочастотной характеристики (ФЧХ) преобразователей, которая не в полной мере обеспечивается указанными способами расширения полосы пропускания. Свойством линейности ФЧХ обладают преобразователи с амплитудно-фазовым возбуждением их частей согласно решению задачи синтеза [13]–[17], когда задаются равномерная АЧХ и линейная ФЧХ излучения, в соответствии с которыми и определяются условия возбуждения. В частности, к таким преобразователям относятся широкополосные преобразователи волноводного типа (ПВТ) [14]–[16].

Общие принципы построения и возбуждения. Основные формулы. Модель ПВТ (рис. 1) содержит соосный набор N идентичных пьезоци-

линдров l с внутренним радиусом a и высотой l , разделенных по торцам акустически гибкими кольцевыми прокладками 2 толщиной Δ (обычно выбирается $\Delta \ll l$) и возбуждаемых электрическими напряжениями: $U_i = U_{im}(\omega)e^{j\psi_i(\omega)}$; $d = l + \Delta$ [14]–[16]. Здесь $U_{im}(\omega)$ и $\psi_i(\omega)$ – амплитуды и фазы электрических напряжений, в общем случае представляющие собой функции частоты (ω); $i = 1, 2, \dots, N$. Внутренняя полость ПВТ заполнена жидкостью, контактирующей с внешней средой, например с водой. Излучение звуковых волн происходит через заполненные жидкостью отверстия крайних пьезоцилиндров 1 и N в двух направлениях: фронтальном и тыльном. Внешняя поверхность ПВТ – не излучающая, т. е. контактирует с газом, находящимся внутри корпуса ПВТ (на рис. 1 показана часть корпуса 3), или изолируется звукомягким экраном.

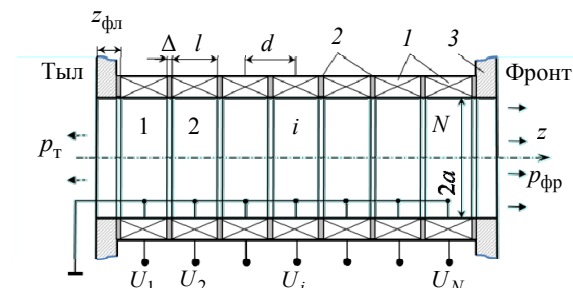


Рис. 1. Модель преобразователя волноводного типа:
1 – пьезоцилиндры; 2 – акустически гибкие прокладки;
3 – фланец корпуса антенны

Fig. 1. A model of a transducer of waveguide type:
1 – piezocylinders; 2 – acoustically flexible gaskets;
3 – antenna housing flange

Во фронтальном направлении (по оси z) пьезоцилиндры возбуждаются с последовательно нарастающей временной задержкой $\tau_i = d/c_0(i-1) = \tau(i-1)$, где $\tau = d/c_0$; c_0 – скорость звука в жидкости, заполняющей всю внутреннюю полость ПВТ (пьезоцилиндров) и внешней среды. В этом направлении благодаря синфазному сложению бегущих акустических волн, ввиду их локализации внутри полости ПВТ, происходит последовательное усиление акустического поля, действующего на каждый последующий пьезоцилиндр. Это приводит к увеличению нагружен-

ности пьезоцилиндров с ростом их номера и в итоге – к расширению рабочего диапазона частот всего ПБТ [14]. В тыльном направлении, ввиду расфазировки акустических волн, происходит ослабление акустического поля, что приводит к выраженной асимметрии излучения ПБТ.

Для обеспечения достаточной нагруженности выходных отверстий ПБТ на водную среду во всем рабочем диапазоне частот ПБТ располагаются в корпусе антенны в виде параллельного набора, подобно стержневым преобразователям. При этом выходные отверстия ПБТ образуют апертуру антенны и формируют требуемую характеристику направленности [15]. Следует отметить возможность инверсии в работе ПБТ (фронт и тыл могут поменяться местами) в зависимости от направления увеличения времени задержки τ_i : от первого к N -му пьезоцилиндру (см. рис. 1) или, наоборот, от N -го к первому.

Характер колебаний пьезоцилиндров ПБТ описывается системой из N уравнений [14], [15]:

$$\sum_{k=1}^N Z_{ik}^* v_k = N_{\text{тр}} U_i, \quad (1)$$

где v_k – колебательная скорость излучающей поверхности k -го пьезоцилиндра; $Z_{ii}^* = Z_{ii} + Z_{i \text{ Пр}}$ при $i = k$; $Z_{ik}^* = Z_{ik}$ при $i \neq k$; Z_{ii} и Z_{ik} – собственное и взаимные сопротивления излучения; $Z_{i \text{ Пр}}$ – механический импеданс i -го пьезоцилиндра; $N_{\text{тр}}$ – коэффициент электромеханической трансформации. Результаты решения системы (1) будут зависеть от того, что есть задаваемые величины: возбуждающие электрические напряжения U_i или колебательные скорости v_k , что подразумевает, соответственно, решение задачи анализа или синтеза. В последнем случае при условии представления $v_k = v_m e^{jk_0 d(k-1)} = v_m e^{j\omega \tau(k-1)}$, где $k_0 = \omega/c_0$ и $v_m = \text{const}$ в [14]–[16] была показана возможность обеспечения сверхширокополосного (порядка 3 октав) излучения и формирования коротких перестраиваемых по частоте импульсов. Для этого требовалась реализация определенных из (1) частотных зависимостей амплитуд $U_{im}(\omega)$ и фаз $\psi_i(\omega)$ электрических напряжений с использованием цифровых технологий.

Рассмотрим возможности технически более простого, но достаточно эффективного варианта возбуждения пьезоцилиндров ПБТ, который

обеспечивает широкополосную АЧХ и линейную ФЧХ излучения и основан на решении задачи анализа. В этом случае электрические напряжения зададим в виде

$$U_i(\omega) = U_{im} e^{j\omega \tau_i}, \quad (2)$$

где $U_{im} = U_{Nm} \left[q + \frac{1-q}{N-1} (i-1) \right]$; $q = U_{1m}/U_{Nm}$,

U_{1m} и U_{Nm} – амплитуды электрического напряжения, подаваемые на пьезоцилиндры с номерами 1 и N соответственно. Таким образом, амплитуды U_{im} не зависят от частоты и пропорционально увеличиваются с ростом номера i пьезоцилиндра, как и время задержки τ_i . Значение U_{Nm} определяет максимально допустимую амплитуду электрического напряжения для данного варианта возбуждения ПБТ.

В [14]–[16] было показано, что основным рабочим диапазоном ПБТ служит область частот, когда внутри ПБТ распространяется квазиплоские волны, а волновые размеры заполненных жидкостью (водой) пьезоцилиндров соответствуют значениям $k_0 a \approx 0.4 \dots 3.8$. В этом диапазоне частот расчетные модели ПБТ (излучение в соосные волноводы [14] и в конусные полупространства с углом раскрыва $\theta = \pm \pi/4$ [16]) дают близкие результаты. Поэтому, с учетом предполагаемой работы ПБТ в составе антенны и формирования ею более узкого угла раскрыва основного лепестка характеристики направленности, для анализа АЧХ и ФЧХ излучения ПБТ с рассматриваемым вариантом возбуждения и оценки влияния на эти характеристики параметров ПБТ воспользуемся более простой моделью ПБТ, излучающего в соосные волноводы. В этом случае выражения для импедансов, используемых в (1), подобно [14] можно записать в виде

$$\begin{aligned} Z_{ii} &= jz_0 S \left[\frac{J_0(x_0)}{J_1(x_0)} - \frac{4x_0}{l/a} \sum_{n=0}^{\infty} \frac{\sin(x_n l/2a) e^{jx_n l/2a}}{x_n^3} \right]; \\ Z_{ik} &= z_0 S \frac{4x_0}{l/a} \sum_{n=0}^{\infty} \frac{\sin^2(x_n l/2a) e^{jx_n |i-k|d/a}}{x_n^3}, \quad (3) \\ Z_{i \text{ Пр}} &= R_{i \text{ м.п}} - jz_0 S Q \left[n_{0k}^2 x_0^2 - 1 \right] / n_{0k} x_0, \end{aligned}$$

где $x_0 = k_0 a$; $x_n = \sqrt{x_0^2 - \beta_n^2}$ при $x_0 > \beta_n$ и $x_n = j\sqrt{\beta_n^2 - x_0^2}$ при $x_0 < \beta_n$, β_n – корни уравнения $J_1(\beta_n) = 0$; $J_0(\dots)$ и $J_1(\dots)$ – цилиндрические

функции Бесселя нулевого и первого порядков; $R_{i\text{ м.п}} \approx z_0 S r_{Si} (1 - \eta) / \eta$ – сопротивление механических потерь; r_{Si} – нормированная к $z_0 S$ активная компонента полного сопротивления излучения Z_{Si} ; z_0 – удельный импеданс жидкости, заполняющей ПБТ; $S = 2\pi a l$; Q и η – механическая добротность и механоакустический КПД пьезоцилиндра; $n_{0к} = c_0 / c_k$, c_k – скорость звука в материале пьезоцилиндра.

Полное сопротивление излучения Z_{Si} i -го пьезоцилиндра определяется с учетом его взаимодействия по полю с другими пьезоцилиндрами ПБТ и формул (3) следующим образом [14]:

$$Z_{Si} = Z_{i1} \frac{v_1}{v_i} + Z_{i2} \frac{v_2}{v_i} + \dots + Z_{ii} + \dots + Z_{iN} \frac{v_N}{v_i}.$$

Здесь комплексные амплитуды колебательных скоростей $v_1, v_2, \dots, v_N$ находятся из решения системы уравнений (1).

С учетом принципа суперпозиции, выражения для звуковых давлений, излучаемых ПБТ во фронтальном (фр) и тыльном (т) направлениях, подобно [14], могут быть записаны в виде

$$p_{\text{фр,т}} = -2z_0 x_0 \times \sum_{i=1}^N v_i \sum_{n=0}^{\infty} \frac{J_0(\beta_n r/a) \sin(x_n l/2a)}{J_0(\beta_n)(x_n)^2} e^{\pm jk_n z_{i\text{ фр,т}}/a}, \quad (4)$$

где $z_{i\text{ фр}} = d(N - i) + l/2 + z_{\text{фл}} + z$; $z_{i\text{ т}} = -[d(i - 1) + l/2 + z_{\text{фл}} + z]$. Знаки «+» или «-» у показателя экспоненты в (4) соответствуют индексам «фр» или «т» в обозначениях $p_{\text{фр,т}}$ (см. рис. 1) и $z_{i\text{ фр,т}}$; $z_{\text{фл}}$ – толщина фланца корпуса; z – координата, отсчитываемая от излучающих апертур ПБТ; v_i – определяются из (1).

Анализ результатов расчетов, данные экспериментов. Частотный диапазон ПБТ сверху ограничен условием возникновения нормальной волны первого порядка, т. е. значением $k_0 a = \beta_1 \approx 3.83$. Еще одним ограничением служит условие $k_0 d < \pi$, которое определяет требование отсутствия добавочного максимума при излучении в тыльном направлении. Исходя из этих ограничений, параметр, определяющий геометрию пьезоцилиндров при построении ПБТ, следует принять как $d/a \leq \pi/\beta_1 \approx 0.82$.

Величины $N_{\text{тр}}$, z_0 , S и $U_{\text{им}}$ не зависят от частоты. При выполнении расчетов, чтобы не было зависимости от конкретных габаритов пьезоцилиндров и материала их изготовления, коэффициент $B = N_{\text{тр}}/z_0 S$, получающийся в (1) с учетом (3) и по сути масштабирующий, будем полагать равным 1, а также $U_{\text{Nm}} = 1$. Результаты расчетов АЧХ излучения ПБТ представим в нормированном виде $p_{\text{норм фр,т}} = |p_{\text{фр,т}}|/z_0 B$, определяя ее на оси ПБТ ($r = 0$) в условной дальней зоне ($z/a \geq 10$), а ФЧХ излучения – как $\Phi_{\text{фр,т}} = \arg[p_{\text{фр,т}}]$, определяя ее для наглядности изображения в пределах главных значений аргумента $[-\pi, \pi]$ в плоскостях излучающих апертур ПБТ. Полосу пропускания будем оценивать в октавах [1], [15]: $\Delta f/f_{\text{ср}} = 3.32 \lg(f_{\text{в}}/f_{\text{н}})$, где $f_{\text{ср}}$, $f_{\text{в}}$ и $f_{\text{н}}$, – соответственно, средняя частота, верхняя и нижняя границы полосы пропускания, определяемой по уровню –3 дБ.

ФЧХ излучения для данного варианта возбуждения ПБТ, по сути, определяется способом формирования бегущей волны в заполненной жидкостью полости ПБТ и практически линейна. Поскольку рассматривается решение задачи анализа, то АЧХ излучения ПБТ оказывается зависящей от значений параметров его построения и возбуждения. Рассмотрим последовательно влияние этих параметров.

В частности, на рис. 2 показано влияние числа пьезоцилиндров N на АЧХ звукового давления во фронтальном (кривые 1–5) и тыльном (кривые 1'–5') направлениях, а также – на ФЧХ излучения во фронтальном направлении. Другими параметрами ПБТ, принятыми при расчете, которые близки к практически реализуемым значениям, были: $q = 0.3$; $l/a = 0.6$; $d/a = 0.66$; $Q = 3$; $n_{0к} = 0.5$; $\eta = 0.7$. Для данного варианта возбуждения ПБТ, с позиции широкополосности, параметр N – основной. Для одиночного пьезоцилиндра ($N = 1$) излучение во фронтальном и тыльном направлениях совпадают. С ростом числа пьезоцилиндров N уровень излучения, и особенно полоса пропускания ПБТ во фронтальном направлении, увеличиваются. В данном примере полоса пропускания для кривых 1–5 составляет соответственно: 0.45; 0.61; 0.89; 1.51 и 2.26 октавы.

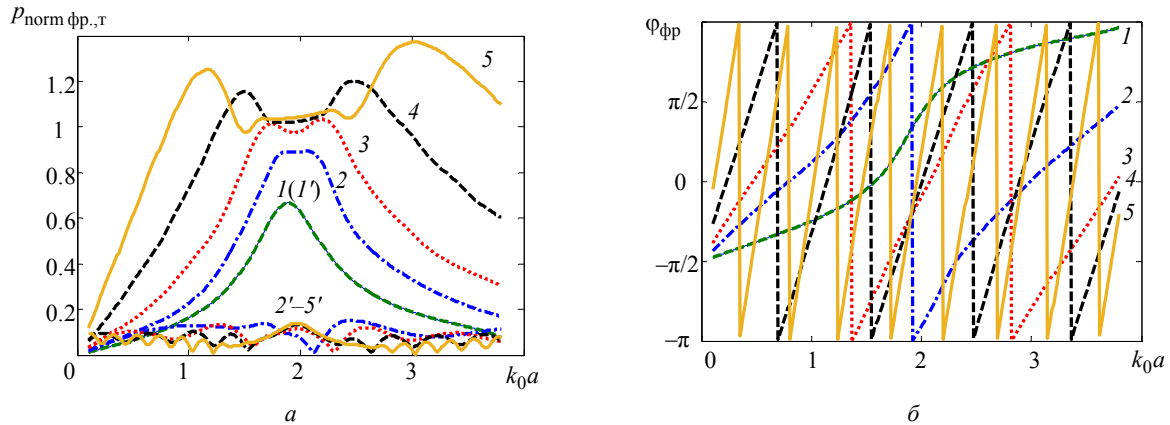


Рис. 2. Зависимость АЧХ (а) и ФЧХ (б) звукового давления ПВТ от числа пьезоцилиндров:

$1(1') - N = 1$; $2(2') - N = 3$; $3(3') - N = 5$; $4(4') - N = 10$; $5(5') - N = 20$

Рис. 2. Dependence of the AFR (a) and PFR (б) of the TWT sound pressure on the number of piezocylinders:

$1(1') - N = 1$; $2(2') - N = 3$; $3(3') - N = 5$; $4(4') - N = 10$; $5(5') - N = 20$

При $N \geq 5$ уровень излучения во фронтальном направлении начинает стабилизироваться, особенно в центральной области АЧХ, и формируется два выраженных ее максимума. Причем происходит преимущественно расширение полосы пропускания ПВТ и несколько увеличиваются максимумы АЧХ излучения во фронтальном направлении, но не пропорционально N . Что касается тыльного излучения, то оно существенно ниже фронтального в рабочей полосе частот ПВТ, причем это различие увеличивается с ростом N . Для заданного числа пьезоцилиндров N полоса пропускания получается меньше, чем в случае возбуждения согласно решению задачи синтеза [14]–[16], но при этом обеспечивается в 1.5...1.8 раз больший уровень излучения при условии равенства максимальных амплитуд возбуждающих электрических напряжений.

ФЧХ излучения для одиночного пьезоцилиндра (рис. 2, б, кривая 1) обладает линейностью в небольшой полосе частот в области радиального резонанса пьезоцилиндров ($k_0 a \approx 2$ для принятого значения $n_{0к} = 0.5$), и только начиная с $N \geq 5$ ФЧХ излучения ПВТ становится практически линейной во всей рабочей полосе частот.

Значение параметра q отражается на виде АЧХ излучения. При $q = 1$ амплитуды возбуждающих напряжений равны $U_{1м} = U_{2м} = \dots = U_{Nм}$ и, несмотря на сохранение режима распространения бегущей волны и сдвига по фазе $\psi_i(\omega) = \omega\tau(i-1)$, неравномерность АЧХ звукового давления при $N > 6$ может превышать уровень -3 дБ. Так, для ПВТ с числом пьезоцилиндров $N = 10$ неравномерность АЧХ звукового давления во фронтальном направлении превышает уровень -3 дБ при $q > 0.6$,

а для ПВТ с $N = 20$ – уже при $q \geq 0.4$. С позиции достижения как можно большей полосы пропускания ПВТ по заданному уровню -3 дБ целесообразно выбирать значения $q = 0.2 \dots 0.4$.

При решении задачи анализа комплексные амплитуды колебательной скорости v_i на внутренней поверхности пьезоцилиндров определяются из решения системы (1). На примере ПВТ, содержащего $N = 10$ пьезоцилиндров (другие параметры см. на рис. 2), на рис. 3 показаны частотные зависимости амплитуд v_{im} и фаз ϕ_{vi} их колебательных скоростей. Видно, что амплитуда $v_{1м}$ имеет выраженные резонансные свойства, что обусловлено сравнительно слабой нагруженностью первого пьезоцилиндра. По мере увеличения номера i пьезоцилиндра и его нагруженности в частотной зависимости v_{im} проявляются два максимума, расстояние по частоте между которыми постепенно увеличивается. Что касается зависимости фазы колебательной скорости ϕ_{vi} от частоты, то для первого пьезоцилиндра ее вид подобен фазочастотной характеристике одиночного цилиндра, но по мере увеличения номера i пьезоцилиндра вид ϕ_{vi} изменяется и все больше приближается к линейной зависимости, подобной ФЧХ излучения ПВТ.

На рис. 4 для рассматриваемого варианта возбуждения ПВТ ($N = 10$) показаны частотные зависимости нормированного модуля полного сопротивления излучения $|Z_{Si}|/z_0 S$ пьезоцилиндров для разных значений их номеров i . Аналогичные по виду зависимости получаются и для активной компо-

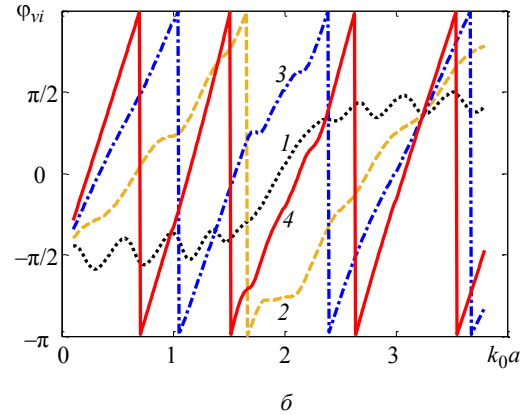
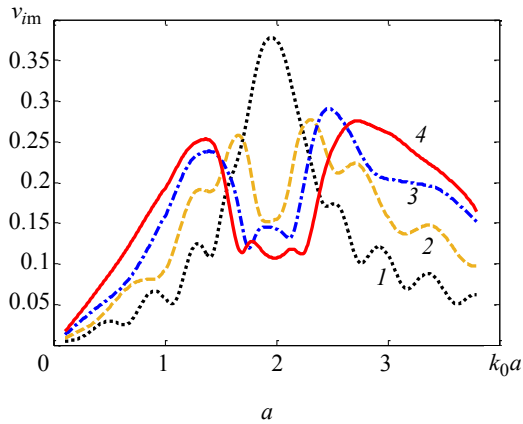


Рис. 3. Частотные зависимости амплитуд (а) и фаз (б) колебательных скоростей пьезоцилиндров ПВТ:

1 – $i=1$; 2 – $i=4$; 3 – $i=7$; 4 – $i=10$

Fig. 3. Frequency dependences of the amplitude (a) and phase (б) of the oscillatory velocity of TWT piezocylinders:

1 – $i=1$; 2 – $i=4$; 3 – $i=7$; 4 – $i=10$

ненты сопротивления излучения $r_{Si} = \text{Re}(Z_{Si})/z_0 S$. Видно, что с ростом номера i пьезоцилиндра увеличивается его нагруженность, что способствует расширению полосы пропускания всего ПВТ.

Отметим также некоторые общие тенденции, влияющие на АЧХ излучения ПВТ при изменении других его параметров. Так, при заданном числе N пьезоцилиндров ПВТ изменение величины l/a (d/a) влияет на АЧХ излучения подобно изменению N (см. рис. 2) при фиксированных значениях l/a (d/a), поскольку и в том и другом случае происходит изменение суммарной длины ПВТ. Так, например, при прочих равных условиях, АЧХ и ФЧХ излучения ПВТ почти совпадают для двух вариантов его построения: $N = 10$, $l/a = 0.6$, $d/a = 0.66$ и $N = 20$, $l/a = 0.3$, $d/a = 0.33$.

Механические потери при излучении пьезоцилиндров опосредованно учитываются заданием акустомеханического КПД η и механической добротности Q . Обычно для цилиндрических преобразователей $\eta \approx 0.6 \dots 0.8$. Значение добротности Q пьезоцилиндров во многом определяется отношением толщины их стенки δ к среднему радиусу пьезоцилиндра, практическое значение которого обычно $\delta/(a + \delta/2) \approx 0.1 \dots 0.2$. Для односторонне нагруженного на воду пьезоцилиндра значение $\delta/a = 0.15$ соответствует $Q \approx 3$. Уменьшение значений η и Q приводит к расширению полосы пропускания ПВТ, и наоборот.

Для рассматриваемого закона возбуждения ПВТ определенный интерес представляет влияние на его АЧХ излучения параметра $n_{0k} = c_0/c_k$. В качестве примера на рис. 5 показаны АЧХ нормированного звукового давления при излучении ПВТ ($N = 10$)

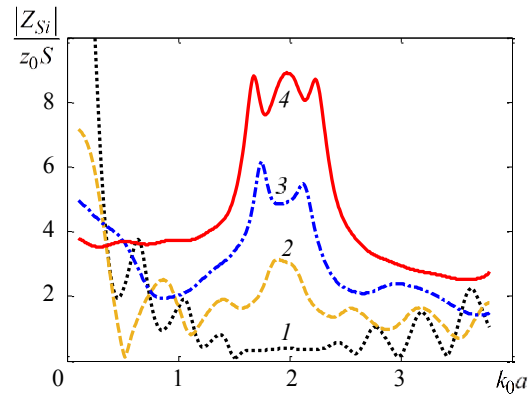


Рис. 4. Частотные зависимости модуля полного сопротивления излучения пьезоцилиндров ПВТ:

1 – $i=1$; 2 – $i=4$; 3 – $i=7$; 4 – $i=10$

Fig. 4. Frequency dependences of the radiation impedance modulus of TWT piezocylinders:

1 – $i=1$; 2 – $i=4$; 3 – $i=7$; 4 – $i=10$

во фронтальном (кривые 1–4) и тыльном (кривые 1'–4') направлениях для разных значений n_{0k} . Другие параметры ПВТ соответствуют рис. 2. Значения относительной полосы пропускания при излучении во фронтальном направлении здесь составили: 1 – 1.2 окт.; 2 – 1.58 окт.; 3 – 1.64 окт.; 4 – 1.66 окт. Уменьшение значения n_{0k} относительно ранее задаваемого значения $n_{0k} = 0.5$ приводит к смещению АЧХ излучения в сторону более высоких частот и сопровождается уменьшением полосы пропускания ПВТ. Увеличение значения n_{0k} относительно $n_{0k} = 0.5$ (сближение значений c_0 и c_k) приводит к смещению АЧХ излучения в сторону более низких частот, при этом несколько увеличивается полоса пропускания. При изменении параметра n_{0k} ФЧХ излучения сохраняет свойство линейности. Полученный результат может быть использован для дополнительного расширения полосы про-

пускания ПВТ при использовании пьезоцилиндров с разными эффективными скоростями звука. Причем варьировать значение $n_{0к}$ можно не только за счет выбора скоростей звука c_k и c_0 , но и с помощью самих пьезоцилиндров, используя, например, пассивные вставки для сегментированных пьезоцилиндров с тангенциальной поляризацией [18].

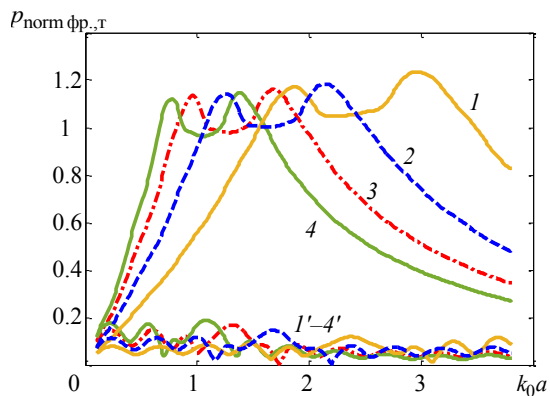


Рис. 5. Влияние значения параметра $n_{0к}$ на АЧХ звукового давления ПВТ:

1 – $n_{0к} = 0.4$; 2 – $n_{0к} = 0.6$; 3 – $n_{0к} = 0.8$; 4 – $n_{0к} = 1.0$

Fig. 5. The influence of the parameter value on the AFR of the TWT sound pressure:

1 – $n_{0к} = 0.4$; 2 – $n_{0к} = 0.6$; 3 – $n_{0к} = 0.8$; 4 – $n_{0к} = 1.0$

Еще одна возможность управления АЧХ излучения ПВТ связана с изменением фазового сдвига или времени задержки $\tau = d/c_0$ при возбуждении соседних пьезоцилиндров. Для удобства анализа представим это изменение в виде $\tau' = \tau(1 \pm \Delta\tau/\tau)$, где $\Delta\tau = |\tau' - \tau|$. Тогда на пьезоцилиндры ПВТ будет подаваться электрическое напряжение $U_i = U_{im} \exp[j\omega\tau'(i-1)]$. Согласно результатам расчетов, небольшое изменение $\tau' \approx (0.95...1.05)\tau$ заметно отражается на АЧХ излучения во фронтальном направлении и прак-

тически не сказывается на излучении в тыльном направлении. Так, уменьшение τ' относительно базового значения $\tau = d/c_0$ приводит к росту высокочастотного максимума АЧХ излучения во фронтальном направлении, а увеличение τ' – ее низкочастотного максимума. Это позволяет без амплитудной коррекции управлять и при необходимости выравнивать АЧХ излучения ПВТ. При изменении τ' свойство линейности ФЧХ излучения ПВТ во фронтальном направлении сохраняется, но наклон ее изменяется пропорционально τ' .

В качестве примера реализуемости закона возбуждения (2) на рис. 6 приведены экспериментально полученные АЧХ чувствительности в режиме излучения $\gamma_{изл}$, Па · м/В, а также общий вид макета антенны, составленной из 12 ПВТ, содержащих по $N = 10$ пьезоцилиндров состава ЦТС-19М с резонансной частотой и конструктивными параметрами: $f_p = 44$ кГц, $l/a = 0.54$, $d/a = 0.69$; $q = 0.3$. АЧХ показана для двух областей частот: основной, с формированием квазиплоских волн и полосой пропускания $\Delta f/f_{cp} \approx 1.85$ октавы, и для области частот ($f \approx 105...185$ кГц) с дополнительным формированием нормальной моды первого порядка. Полоса пропускания в основной области частот оказалась больше расчетной, что, вероятно, связано с более явным проявлением радиального резонанса пьезоцилиндров на АЧХ излучения. Измерения проводились в заглушенном гидроакустическом бассейне СПбГЭТУ «ЛЭТИ» с использованием автоматизированного контрольно-измерительного стенда и калиброванного гидрофона ТС4034-1 (фирма «Reson», рабочий диапазон частот 0.001...470 кГц).

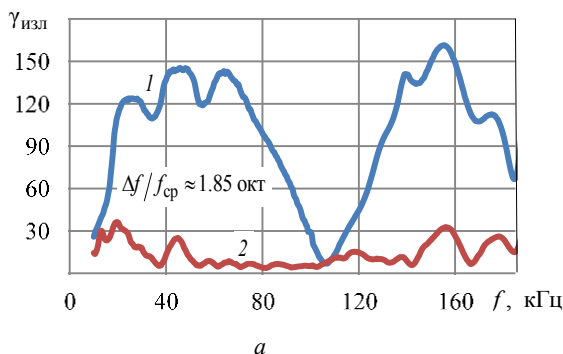


Рис. 6. АЧХ чувствительности в режиме излучения (а) макета антенны (б) при излучении во фронтальном (1) и тыльном (2) направлениях

Fig. 6. The AFR of sensitivity in radiation mode (a) of the antenna mock-up (b) when radiating in the frontal (1) and rear (2) directions

При одном и том же числе пьезоцилиндров N рассматриваемый вариант возбуждения ПВТ обеспечивает меньшую полосу пропускания по сравнению с возбуждением согласно решению задачи синтеза [15]. Однако, ввиду получения полосы пропускания порядка 2 октав и практически линейной ФЧХ излучения, данный вариант возбуждения позволяет формировать широкополосные акустические сигналы, в том числе и короткие импульсы, перестраиваемые по частоте. Необходимые временные расчетные сигналы излучения $s_{ак}(t)$ и возбуждения $u_i(t)$, подобно [15], [16], могут быть определены с использованием преобразования Фурье по формулам: $s_{ак}(t) = 2\text{Re} \int_0^{\omega_B} \Phi(\omega) p_{фр.,т}(\omega) e^{j\omega t} d\omega$ и $u_i(t) = 2\text{Re} \int_0^{\omega_B} \Phi(\omega) \times U_i(\omega) e^{j\omega t} d\omega$, где $\Phi(\omega)$ – спектральная характеристика импульса, который должен быть излучен ПВТ; ω_B – верхний предел интегрирования, определяющий полноту спектральных составляющих в спектральной характеристике $\Phi(\omega)$, например по уровню $|\Phi_{\min}(\omega)/\Phi_{\max}(\omega)| \leq 0.1$. Для рассматриваемого варианта возбуждения электрические импульсы $u_i(t)$ представляют собой те сигналы, которые требуется излучить, но сдвинутые друг относительно друга на время τ и увеличивающиеся по амплитуде с ростом номера i пьезоцилиндра согласно принятому закону изменения $U_{им}$.

В качестве примера на рис. 7 приведены расчетные $s_{ак}(t)$ и экспериментальные $s_{ак.экс}(t)$ акустические импульсы, излученные макетом антенны из 12 ПВТ ($N = 10$; $f_p = 44$ кГц) во фронтальном направлении при возбуждении пьезоцилиндров однопериодными импульсами $u_i(t)$ с разной частотой их формирования $f_{имп}$, развертка по времени 50 мкс/дел. Расчетные акустические импульсы нормированы к максимальному значению своего полупериода. Регистрация импульсов, излученных макетом антенны, выполнялась посредством записи на флэш-накопитель с помощью цифрового осциллографа «Tektronix». Результаты расчетов и экспериментов в целом коррелируют друг с другом. Появление дополнительного полупериода колебаний в форме излучаемого им-

пульса в определенной мере обусловлено расхождением волнового фронта [17]. Что касается импульсного сигнала, излученного в тыльном направлении, то он не соответствует по форме заданному или излученному во фронтальном направлении импульсам и как бы «рассыпается» на два небольших импульса с амплитудой существенно меньше амплитуды импульса, излученного во фронтальном направлении.

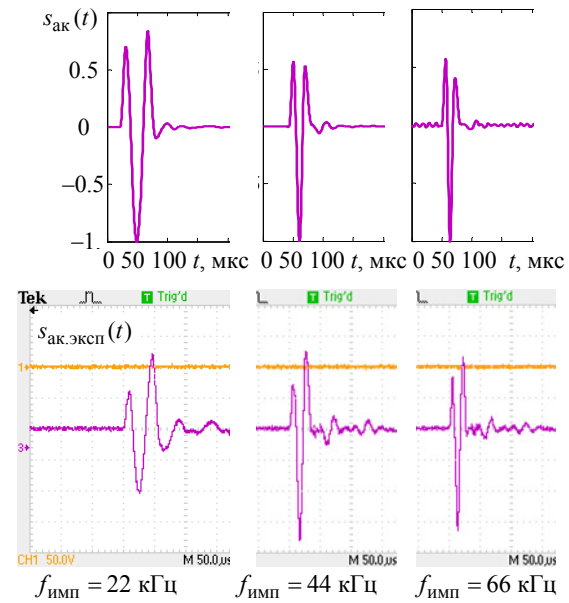


Рис. 7. Вид акустических импульсов, излученных макетом антенны

Fig. 7. The view of acoustic pulses emitted by the antenna mock-up

Заключение. Рассмотренный в данной статье вариант возбуждения ПВТ достаточно прост в реализации и позволяет в зависимости от числа пьезоцилиндров, например для $N = 10\text{--}20$, обеспечить полосу пропускания порядка 1.5...2.3 октавы с практически линейной ФЧХ излучения. Это позволяет излучать достаточно сложные акустические сигналы, в том числе перестраиваемые по частоте ультракороткие импульсы, что может быть использовано при формировании разных кодовых последовательностей. С ростом числа пьезоцилиндров ПВТ его полоса пропускания увеличивается, излучение во фронтальном направлении постепенно начинает стабилизироваться (при $N > 5$), а тыльное излучение по сравнению с фронтальным уменьшается почти на порядок. Полученные результаты экспериментальных исследований макетов антенн, составленных из ПВТ, достаточно хорошо согласуются с результатами выполненных расчетов.

Список литературы

1. Гидроакустическая энциклопедия / под ред. В. И. Тимошенко. Таганрог: Изд-во ТГРУ, 1999. С. 696–697 (787 с).
2. Алексеев Б. Н., Дианов Д. Б. О расширении полосы пропускания пьезокерамических преобразователей с помощью переходных слоев // Акуст. журн. 1974. Т. 20, № 5. С. 663–668.
3. Пат. 6722003 (USA) МПК H04R 17/00. Underwater broadband electroacoustic transducer / Dunn Sheng-Dong, Yeh Chi-Zen, Jih Jeng-Yow, publ.2003.
4. Пат. 8072843 (USA) B1 МПК H04R 17/00. Stepped multiply resonant wideband transducer apparatus / J. L. Butler, A. L. Butler, publ. 18.03.2009.
5. Sherman Ch. H., Butler J. L. Transducers and arrays for underwater Sound. New York: Springer Science + Business Media, LLC, 2007. 610 p. Chapters 2–4.
6. Design of a wideband tonpilz transducer comprising non-uniform piezoceramic stacks with equivalent circuits / S. Pyo, M. S. Afzal, Y. Lim, S. Lee, Y. Roh // Sensors 2021, 21, 2680. doi: 10.3390/s21082680.
7. Ultra wideband sounding signals in hydroacoustic systems / A. V. Sknarya, A. A. Razin, S. A. Toshchov, A. I. Demidov // RENSIT. 2018. Vol. 10, Iss. 2. P. 209–212. doi: 10.17725/rensit.2018.10.209.
8. Comparison of chirp and chaotic wideband signals for hydroacoustics / T. I. Karimov, D. N. Butusov, V. V. Gulvanskiy, D. V. Bogaevskiy // Progress In Electromagn. Research Symp. – Fall (PIERS – FALL), Singapore, 2017, 19–22 Nov. doi: 10.1109/PIERS-FALL.2017.8293562.
9. Кеббал К. Г. Численное моделирование скрывающих свойств гидроакустических сигналов связи с линейной разверткой несущей // Подводные исследования и робототехника. 2020. Т. 32, № 2. С. 4–12. doi: 10.37102/24094609.2020.32.2.001.
10. Covert underwater communication by camouflaging sea pilingsounds / S. Liu, M. Wang, T. Ma, G. Qiao, M. Bilal // Appl. Acoust. 2018. No. 142. P. 29–35. doi: 10.1016/j.apacoust.2018.06.00.
11. Иванов М. П., Родионов А. А., Стефанов В. Е. Возможности сверхширокополосных систем наблюдения на примере исследования природного сонара зубатых китов // Фундаментальная и прикладная гидрофизика. 2020. Т. 13, № 4. С. 100–120. doi: 10.7868/S2073667320040097.
12. Mishima Y., Miyamoto Y., Sasakura T. Development of the dolphin speaker // J. Marine Acoust. Soc. Jpn. Vol. 40, № 1. Jan. 2013. P. 27–36. doi: 10.1121/1.3654450.
13. 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. Vol. 19, № 2. С. 150–157.
14. Степанов Б. Г. Сверхширокополосный гидроакустический преобразователь волноводного типа. Задача синтеза // Изв. СПбГЭТУ «ЛЭТИ», 2013. № 3. С. 87–96.
15. Пестерев И. С., Степанов Б. Г. Исследование широкополосной гидроакустической системы, содержащей преобразователи волноводного типа // Изв. вузов России. Радиоэлектроника. 2018. № 5. С. 60–70. doi: 10.32603/1993-8985-2018-21-5-60-70.
16. 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.
17. Skuratov G. S., Stepanov B. G. Pulse and directional characteristics of wideband antennas consisting of rod transducers, excited according to the solution of the synthesis problem // Conf. of Young Researchers in Electr. and Electron. Engin. (ElCon) 29–31 Jan. 2024. IEEE, 2024. P. 910–914. doi: 10.1109/ElCon61730.2024.10468367.
18. Бушер М. К. Динамические особенности пьезокерамических преобразователей на основе колец неоднородной структуры // Акуст. журн. 1986. Т. 32, № 2. С. 145–151.

Информация об авторе

Степанов Борис Георгиевич – д-р техн. наук, профессор кафедры электроакустики и ультразвуковой техники СПбГЭТУ «ЛЭТИ».

E-mail: bgstepanov@etu.ru

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

References

1. Gidroakusticheskaja jenciklopedija / pod red. V. I. Timoshenko. Taganrog: Izd-vo TGRU, 1999. S. 696–697 (787 s).
2. Alekseev B. N., Dianov D. B. O rasshirenii polosy propuskaniya p'ezokeramicheskikh preobrazovatelej s pomoshh'ju perehodnyh sloev // Akust. zhurn. 1974. T. 20, № 5. S. 663–668. (In Russ.).
3. Pat. 6722003 (USA) MPK N04R 17/00. Underwater broadband electroacoustic transducer / Dunn Sheng-Dong, Yeh Chi-Zen, Jih Jeng-Yow, publ.2003.
4. Pat. 8072843 (USA) B1 MPK N04R 17/00. Stepped multiply resonant wideband transducer apparatus / J. L. Butler, A. L. Butler, publ. 18.03.2009.

5. Charles H. Sherman, John L. Butler. Transducers and Arrays for Underwater Sound. New York: Springer Science+Business Media, LLC, 2007. 610 p. Chapt. 2–4.
6. Design of a wideband tonpilz transducer comprising non-uniform piezoceramic stacks with equivalent circuits / S. Pyo, M. S. Afzal, Y. Lim, S. Lee, Y. Roh // *Sensors* 2021, 21, 2680. doi: 10.3390/s21082680.
7. Ultra wideband sounding signals in hydroacoustic systems / A. V. Sknarya, A. A. Razin, S. A. Toshchov, A. I. Demidov // *RENSIT*. 2018. Vol. 10, Iss. 2. P. 209–212. doi: 10.17725/rensit.2018.10.209.
8. Comparison of chirp and chaotic wideband signals for hydroacoustics / T. I. Karimov, D. N. Butusov, V. V. Gulvanskiy, D. V. Bogaevskiy // *Progress In Electromagn. Research Symp.* – Fall (PIERS – FALL), Singapore, 2017, 19–22 Nov. doi: 10.1109/PIERS-FALL.2017.8293562.
9. Kebkal K. G. Chislennoe modelirovanie skryvajushhih svojstv gidroakusticheskikh signalov svyazi s linejnoy razvertkoj nesushhej // *Podvodnye issledovaniya i robototekhnika*. 2020. T. 32, № 2. S. 4–12. doi: 10.37102/24094609.2020.32.2.001. (In Russ.).
10. Covert underwater communication by camouflaging sea pilingsounds / S. Liu, M. Wang, T. Ma, G. Qiao, M. Bilal // *Appl. Acoust.* 2018. No. 142. P. 29–35. doi: 10.1016/j.apacoust.2018.06.00.
11. Ivanov M. P., Rodionov A. A., Stefanov V. E. Vozmozhnosti sverhshirokopolosnyh sistem nabljudeniya na primere issledovaniya prirodnogo sonara zubatyyh kitov // *Fundamental'naya i prikladnaya gidrofizika*. 2020. T. 13, № 4. S. 100–120. doi: 10.7868/S2073667320040097. (In Russ.).
12. Mishima Y., Miyamoto Y., Sasakura T. Development of the dolphin speaker // *J. Marine Acoust. Soc. Jpn.* Vol. 40, № 1. Jan. 2013. P. 27–36. doi: 10.1121/1.3654450.
13. Goncharskiy A. V., Romanov S. Ju., Serezhnikov S. Ju. Obratnye zadachi formirovaniya zondirujushhih impuls'ov v ul'trazvukovoj tomografii: model'nye raschety i jeksperiment // *Vychislitel'nye metody i programmirovaniye*. 2018. Vol. 19, № 2. S. 150–157. (In Russ.).
14. Stepanov B. G. Sverhshirokopolosnyj gidroakusticheskij preobrazovatel' volnovodnogo tipa. Zadacha sinteza // *Izv. SPbGJeTU «LJeTI»*, 2013. № 3. C. 87–96. (In Russ.).
15. Pesterev I. S., Stepanov B. G. Issledovanie shirokopolosnoj gidroakusticheskoy sistemy, sodержashhej preobrazovately volnovodnogo tipa // *Izv. vuzov Rossii. Radioelektronika*. 2018. № 5. S. 60–70. doi: 10.32603/1993-8985-2018-21-5-60-70. (In Russ.).
16. Pesterev I. S., Sosnovskiy N. N., Stepanov B. G. Izluchenie preobrazovatelem volnovodnogo tipa v osnovnye s nim konusnye poluprostranstva // *Izv. vuzov Rossii. Radioelektronika*. 2020. T. 23, № 1. S. 70–82. doi: 10.32603/1993-8985-2020-23-1-70-82. (In Russ.).
17. Skuratov G. S., Stepanov B. G. Pulse and directional characteristics of wideband antennas consisting of rod transducers, excited according to the solution of the synthesis problem // *Conf. of Young Researchers in Electrical and Electronic Engin. (ElCon)* 29–31 Jan. 2024. IEEE, 2024. R. 910–914. doi: 10.1109/ElCon61730.2024.10468367.
18. Busher M. K. Dinamicheskie osobennosti p'ezokeramicheskikh preobrazovatelej na osnove kolec neodnorodnoj struktury // *Akust. zhurn.* 1986. T. 32, № 2. S. 145–151. (In Russ.).

Information about the author

Boris G. Stepanov – Dr Sci. (Eng.), Professor of the Department of Electroacoustics and Ultrasound Technology of Saint Petersburg Electrotechnical University.

E-mail: bgstepanov@etu.ru

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

Статья поступила в редакцию 08.07.2025; принята к публикации после рецензирования 24.08.2025; опубликована онлайн 28.11.2025.

Submitted 08.07.2025; accepted 24.08.2025; published online 28.11.2025.