АКУСТИЧЕСКИЙ ЖУРНАЛ, 2010, том 56, № 5, с. 699–705

ФИЗИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ТЕХНИЧЕСКОЙ АКУСТИКИ

УДК 534.232

О ВОЗМОЖНОСТИ ПОСТРОЕНИЯ БЕЗЭКРАННЫХ ОДНОНАПРАВЛЕННЫХ СТЕРЖНЕВЫХ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ С ФАЗИРОВАННЫМ ВОЗБУЖДЕНИЕМ СЕКЦИЙ

© 2010 г. Б. Г. Степанов

Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет (ЛЭТИ)
197376 Санкт-Петербург, ул. Проф. Попова, 5; тел.: 8-(812)2343726.
E-mail: BGStepanov@mail.eltech.ru

Поступила в редакцию 30.09.2009 г.

Рассматриваются результаты расчетов, полученных при решении задач синтеза и анализа по компенсации тыльного излучения стержневыми преобразователями, содержащими две пьезосекции, возбуждение которых осуществляется различными по амплитуде и фазе электрическими напряжениями. Путем выбора последних показана возможность полной компенсации тыльного излучения во всей рабочей полосе частот преобразователя (задача синтеза), а также – на отдельных перестраиваемых частотах при минимизации тыльного излучения в определенных частотных областях. Анализируется влияние на частотные характеристики преобразователей некоторых способов их возбуждения и конструктивных параметров. Приводятся результаты экспериментальных исследований.

Ключевые слова: гидроакустический преобразователь, компенсация тыльного излучения, однонаправленность, полоса пропускания, полоса экранирования.

Вопросы, связанные с построением безэкранных однонаправленных (обладающих выраженной асимметрией излучения) гидроакустических преобразователей, остаются актуальными уже многие годы. Интерес к этой теме обусловлен прежде всего потребностью уменьшения массогабаритных параметров гидроакустических антенн и упрощения их конструкции, особенно для области сравнительно низких частот. Основными механизмами, используемыми при построении безэкранных однонаправленных преобразователей [1] и приводящими к минимизации уровня тыльного излучения (приема), являются: интерференционное гашение звуковых волн, формируемых в тыльном направлении отдельными участками поверхности преобразователя, контактирующими с водной средой [1–3]; трансформация основных колебаний преобразователя в тыльном направлении в типы волн, быстро затухающих в водной среде (сдвиговые, крутильные колебания, изгибные моды высших порядков и т.п.) [1, 6]; асимметрия распределения нормальной составляющей колебательной скорости на рабочей и тыльной поверхностях преобразователя, обеспечиваемая собственно его колебательной системой или выбором формы его внешней поверхности [1, 9]. С точки зрения построения колебательной системы преобразователя, асимметрия колебаний его поверхности во фронтальном и тыльном направлениях может быть достигнута путем: согласования фронтальной (излучающей) поверхности со средой [4]; увеличения инерционности тыльных накладок [5] или гибкости элементов, формирующих излучение преобразователя во фронтальном направлении [7, 8]; использования амплитудно-фазового распределения возбуждающего (например, электрического) поля [1, 10, 11].

Следует отметить, что далеко не все технические решения позволяют получить приемлемо низкий уровень тыльного излучения (например, на порядок меньше фронтального по звуковому давлению) в рабочей полосе частот преобразователя, не говоря уже о возможности полного устранения тыльного излучения или управления им в этой полосе частот. В этой связи определенный интерес представляет использование фазированного возбуждения стержневого преобразователя с позиций возможности управления его амплитудно-частотными характеристиками (АЧХ) не только во фронтальном [12], но и в тыльном направлении. В дальнейшем будем называть полосу частот, в которой уровень тыльного излучения преобразователя без дополнительных экранов, благодаря только своей конструкции или способу возбуждения, не превышает заданного значения, – полосой самоэкранирования.

В работе [12] на базе решения задач синтеза и анализа была показана возможность построения широкополосных стержневых преобразователей при возбуждении отдельных его пьезосекций электрическими напряжениями $U_i = U_{im}e^{j\varphi_i}$, где

U_{im} и φ_i – амплитуда и фаза, $i = 1; 2$. В частности, при решении задачи синтеза, колебательные скорости излучающих торцов стержневого преобразователя $\dot{\xi}_v(\psi)$ и $\dot{\xi}_w(\psi)$ определялись как: $\dot{\xi}_v(\psi) = K_v\dot{\xi}(0) = N_0F_v^*(\psi)$; $\dot{\xi}_w(\psi) = K_w\dot{\xi}(l) = N_0F_w^*(\psi)$, где $\dot{\xi}(0)$ и $\dot{\xi}(l)$ – колебательные скорости торцов пьезостержня; K_v и K_w – коэффициенты передачи по колебательной скорости через плоско-параллельные слои с входными импедансами Z_v и Z_w [13]; $F_v^*(\psi) = F_v(\psi)\exp[j\varphi_v(\psi)]$ и $F_w^*(\psi) = F_w(\psi)\exp[j\varphi_w(\psi)]$ – задаваемые комплексные функции, определяющие, в частности, АЧХ преобразователя при излучении им соответствующими торцами; N_0 – нормирующий множитель. Для определенности и последующей связи результатов расчетов с полученными ранее в работе [12] будем полагать, что величины с индексом v относятся к излучению во фронтальном, а с индексом w – в тыльном направлениях. При выполнении расчетов будем полагать, что рассматриваемые преобразователи работают в составе антенны, размеры апертуры которой много больше длины звуковых волн, излучаемых в заданном диапазоне частот. Тогда, без учета взаимодействия преобразователей по полю, анализ АЧХ звукового давления излучаемого во фронтальном и тыльном направлениях можно проводить по АЧХ соответствующих колебательных скоростей. Входные импедансы Z_v и Z_w определяют соответственно фронтальные и тыльные накладки стержневого преобразователя, имеющие волновые размеры $\psi_{qv} = a_{qv}\psi$ и $\psi_{qw} = a_{qw}\psi$, удельные импедансы z_{qv} и z_{qw} и площади поперечного сечения S_{qv} и S_{qw}. Нумерация по $q = 1; 2;\ldots$ ведется от внешних слоев (накладок). С позиции построения безэкранного однонаправленного преобразователя, функцию, определяющую излучение его тыльного торца, следует положить равной нулю. Тогда, в соответствии с принятыми обозначениями, положим $F_w^*(\psi) = 0$, откуда следует $\dot{\xi}(l) = 0$. С учетом этого и соответствующего выражения для колебательной скорости [12], можно получить условие компенсации тыльного излучения для двухсекционного преобразователя с фазированным возбуждением:

$$\frac{U_2^{(T)}}{U_1^{(T)}} = \frac{\left(1 - \cos p\psi + j\frac{Z_v}{zS}\sin p\psi\right)\sin\alpha\psi + \gamma_0\frac{z_0}{z}[\sin\psi - S(\psi)]}{\left[\cos\psi - \cos p\psi - j\frac{Z_v}{zS}(\sin\psi - \sin p\psi)\right]\sin\alpha\psi + \gamma_0\frac{z_0}{z}[\sin\psi\cos\alpha\psi - S(\psi)]},$$

где $S(\psi) = \sin(1-p)\psi + \sin p\psi\cos\alpha\psi$; $\psi = kl$; $k = \omega/c$; ω – круговая частота; l – длина пьезостержня; $\alpha = c/c_0$; c, z, S и c_0, z_0, S_0 – скорость звука, удельный импеданс, площадь поперечного сечения соответственно пьезостержня и армирующей его стяжки; $\gamma_0 = S_0/S$, $p = l_1/l$ – относительная длина первой пьезосекции, внешний торец которой нагружен на импеданс Z_v. Данное выражение определяет частотные зависимости отношения амплитуд $U_{21}^{(T)}(\psi) = U_{2m}/U_{1m}$ и разности фаз $\Delta\varphi_{21}^{(T)}(\psi) = \varphi_2 - \varphi_1$ возбуждающих электрических напряжений, необходимые для реализации условия $\dot{\xi}(l) = 0$ или $\dot{\xi}_w(\psi) = 0$. При компенсации тыльного излучения в заданном диапазоне частот характер нагруженности тыльного торца пьезостержня (импеданс Z_w) не имеет значения, поскольку этот торец неподвижен ($\dot{\xi}(l) = 0$). Однако характер нагруженности фронтального торца пьезостержня (импеданс Z_v) оказывает существенное влияние на частотные зависимости $U_{21}^{(T)}(\psi)$ и $\Delta\varphi_{21}^{(T)}(\psi)$.

На рис. 1 приведены результаты расчета нормированных АЧХ излучения колебательной скорости $\left|\dot{\xi}_v^{(N)}\right|$ при условии полной компенсации тыльного излучения для пьезостержня, содержащего две равные секции ($p = 0.5$) и имеющего различный характер нагруженности его фронтального торца, а также – необходимые для их реализации частотные зависимости $U_{21}^{(T)}(\psi)$ и $\Delta\varphi_{21}^{(T)}(\psi)$. Здесь $\gamma_v = S_{qv}/S$ и $\gamma_w = S_w/S$. Как и в работе [12], нормирование выполнено к величине излучения на резонансной частоте синфазно возбуждаемого пьезостержня ($U_{21}^{(T)}(\psi) = 1$ и $\Delta\varphi_{21}^{(T)}(\psi) = 0$) без пассивных элементов, одностороннее нагруженного на воду своим фронтальным торцом. С целью выравнивания максимумов АЧХ излучения, волновая толщина согласующих слоев здесь выбрана меньше четвертьволновой, т.е. $a_{qv} = 0.4$. Как видно, при полной компенсации тыльного излучения, АЧХ излучения во фронтальном направлении оказываются несколько смещенными в сторону высоких частот относительно частоты полуволнового резонанса пьезостержня ($\psi = \pi$). При этом, по сравнению со случаем синфазного возбуждения, полоса пропускания для различных случаев нагруженности практически не изменяется, а уровень излучения уменьшается в 1.2–

1.4 раза. На частоте, соответствующей $\psi = 2\pi$, независимо от значений входящих в условие компенсации параметров, отношение амплитуд $U_{21}^{(T)}(\psi) = 1$, а разность фаз $\Delta\varphi_{21}^{(T)}(\psi) = 0$, как и в случае синфазного возбуждения секций. Это объясняется тем, что такой преобразователь не излучает на четных гармониках как во фронтальном, так и в тыльном направлениях. В рассматриваемом диапазоне частот электрическое напряжение U_1, подаваемое на первую секцию, отстает по фазе от электрического напряжения U_2, подаваемого на вторую секцию. По мере увеличения степени согласования преобразователя со средой частотные зависимости отношения амплитуд $U_{21}^{(T)}(\psi)$ и разности фаз $\Delta\varphi_{21}^{(T)}(\psi)$, осциллируя, стремятся к зависимостям $U_{21}^{(T)}(\psi) = 1$ и $\Delta\varphi_{21}^{(T)}(\psi) = \psi/2 - \pi$, которые получаются в случае согласованной нагрузки во фронтальном направлении, т.е. при $Z_v = z$.

При изменении значения p характер частотной зависимости модуля и аргумента отношения U_2/U_1 в целом качественно сохраняется и в основном определяется видом входного импеданса Z_v. В количественном плане значение параметра p в основном сказывается на соответствующем изменении величины отношения амплитуд $U_{21}^{(T)}(\psi)$. Значения же разности фаз $\Delta\varphi_{21}^{(T)}(\psi)$ гораздо в меньшей степени зависят от p, особенно в области исходной АЧХ преобразователя, которая формируется при синфазном возбуждении его секций. В качестве примера на рис. 2 приведена зависимость модуля и аргумента отношения U_2/U_1 от значений параметра p на частоте компенсации тыльного излучения $\psi_k = \pi$, соответствующей полуволновому резонансу всего пьезостержня. Значения остальных параметров здесь приняты такими же, как для рис. 1, но толщины слоев соответствуют четвертьволновым ($a_{qv} = 0.5$). В этом случае наблюдается обратная пропорция значений $U_{21}^{(T)}(\psi)$ и симметрия значений $\Delta\varphi_{21}^{(T)}(\psi)$ относительно $p = 0.5$. Для других значений a_{qv} и ψ_k такое соответствие нарушается, однако общий характер рассматриваемых зависимостей от p, определяемый видом входного импеданса Z_v, остается прежним. Для достижения большей мощности излучения преобразователями с фазированным возбуждением секций, наиболее выгодными являются те значения p, для которых отношение амплитуд оказывается близким к единице, а разность фаз – минимальна. С этих позиций целесообразным оказывается использование согласующих слоев или моделирующих их структур.

Наличие у преобразователя закрепленной по торцам пьезостержня армирующей стяжки приводит к появлению в ограниченной области частот ее полуволнового резонанса ($\psi_0 = \alpha\psi = \pi$) достаточно резких перепадов (от минимальных до максимальных) в значениях модуля и аргумента отноше-

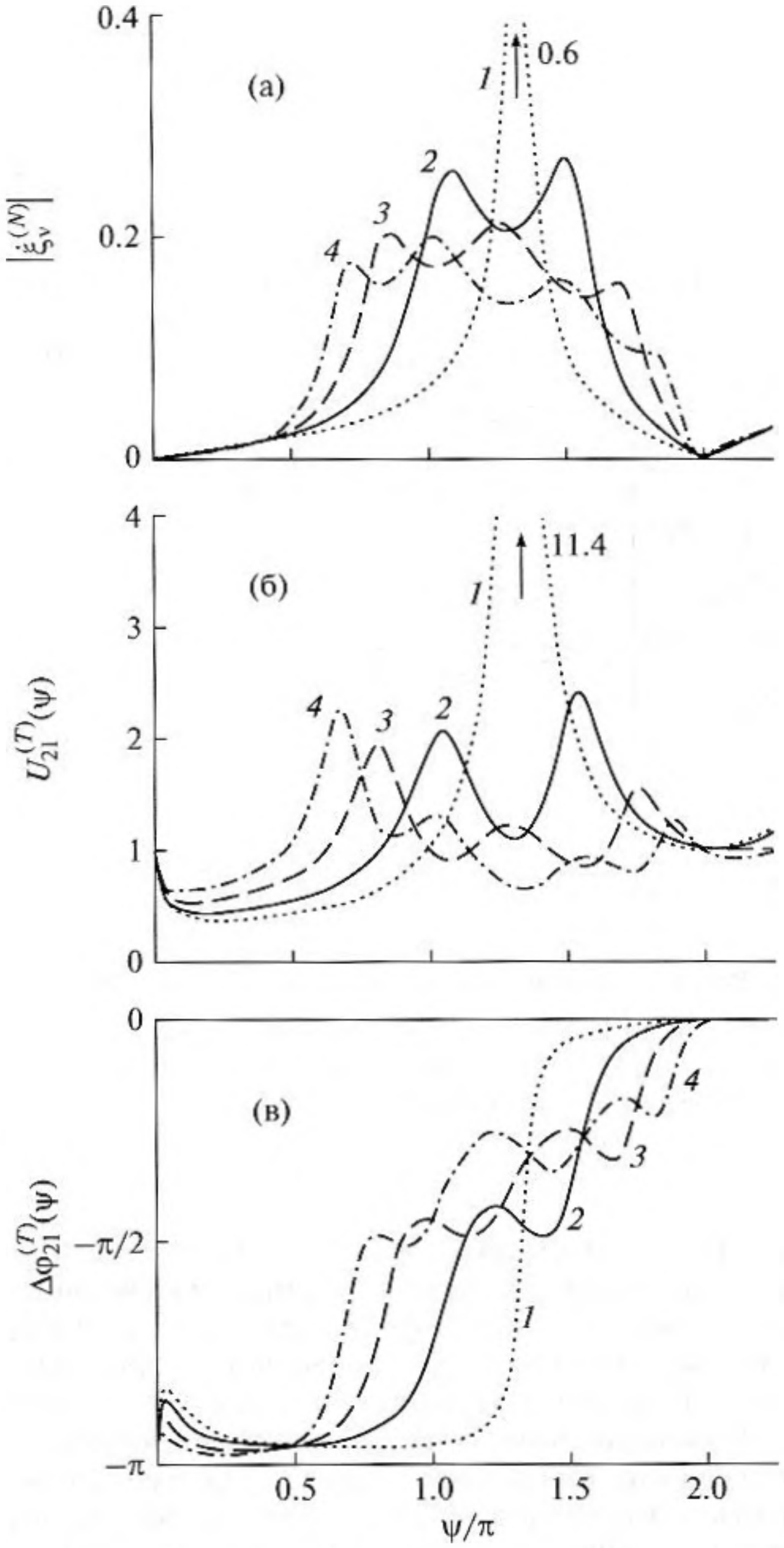

Рис. 1. Нормированные АЧХ излучения во фронтальном направлении (а) и реализующие их частотные зависимости (б) – $U_{21}^{(T)}(\psi)$ и (в) – $\Delta\varphi_{21}^{(T)}(\psi)$; $p = 0.5$; $\gamma_v = 1$.

1 – без слоев; *2* – один согласующий слой: $z_{1v} = 5.5\times10^6$ Па с/м; *3* – два согласующих слоя: z_{1v} и $z_{2v} = (3.5 \text{ и } 12.5)\times10^6$ Па с/м; *4* – три согласующих слоя: z_{1v}, z_{2v} и $z_{3v} = (3, 8 \text{ и } 22)\times10^6$ Па с/м.

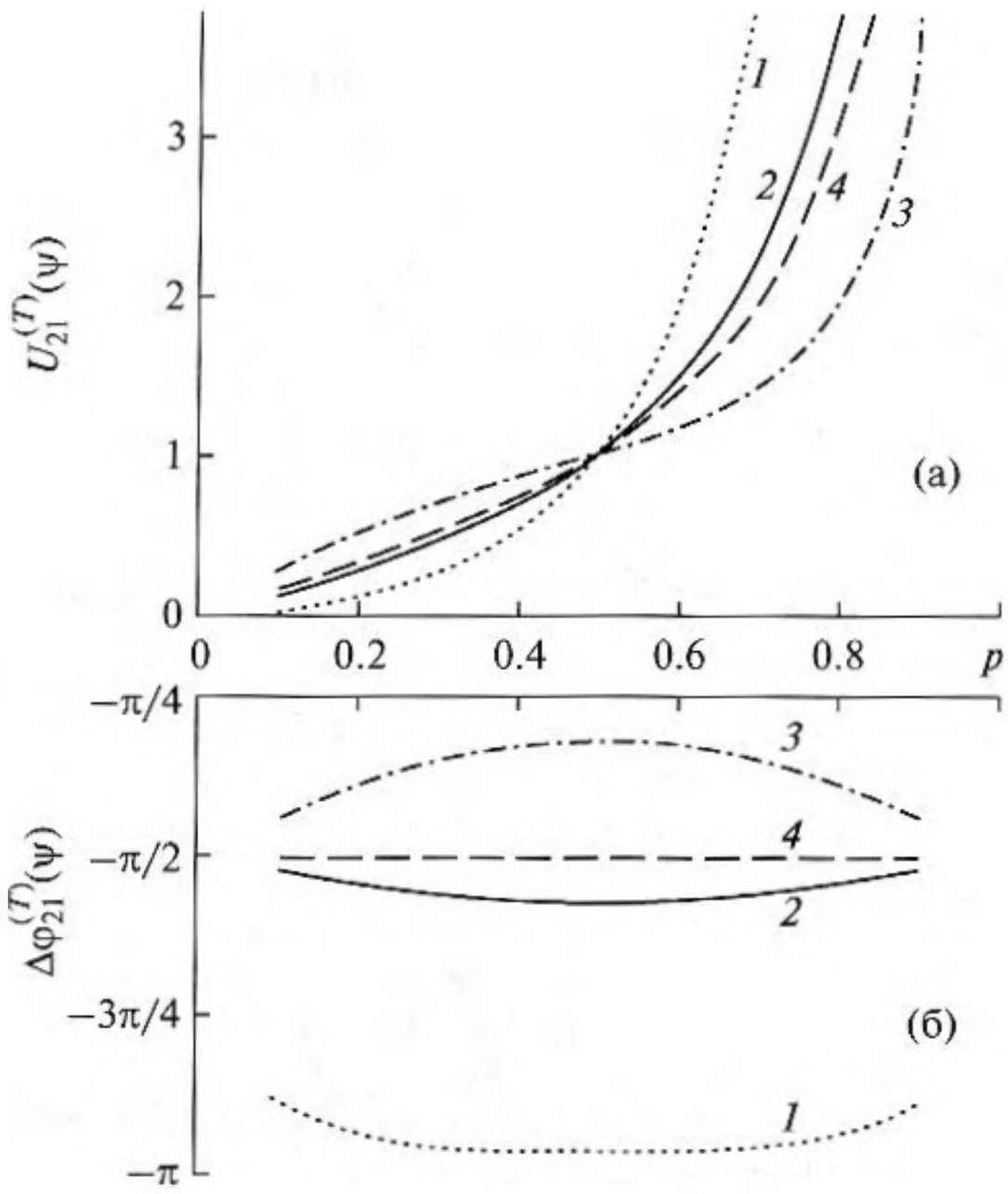

Рис. 2. Зависимость отношения амплитуд $U_{21}^{(T)}(\psi)$ и разности фаз $\Delta\varphi_{21}^{(T)}(\psi)$ от параметра p на частоте $\psi = \psi_к = \pi$; $\gamma_v = 1$. *1* – без слоев; *2* – один согласующий слой; *3* – три согласующих слоя; *4* – согласованная нагрузка $Z_v = z$.

ния U_2/U_1, что в свою очередь, в зависимости от значения параметра α, может привести к уменьшению ($\alpha > 0.7$) или некоторому увеличению ($\alpha < 0.6$) полосы пропускания при излучении во фронтальном направлении по сравнению с исходными АЧХ [12], получающимися при синфазном возбуждении секций. В [12] также указывалось на возможность устранения проявления резонансных свойств армирующей стяжки из рабочего диапазона частот преобразователя с фазированным возбуждением. Это, в частности, достигается введением дополнительных связей между пьезостержнем и армирующей стяжкой в ряде их поперечных сечений [14], увеличением собственной гибкости армирующей стяжки [15], индивидуальным армированием пьезосекций (пьезоблоков) – путь более приемлемый для низкочастотных преобразователей.

Наряду с рассмотренными результатами решения задачи синтеза определенный интерес представляют также некоторые варианты задачи анализа, когда частотные зависимости отношения амплитуд $U_{21}^{(T)}(\psi)$ и разности фаз $\Delta\varphi_{21}^{(T)}(\psi)$ задаются в виде аппроксимирующих функций, например, линейных: $U_{21}^{T}(\psi) = U_0 \pm k_U\psi$ и $\varphi_{21}^{(T)}(\psi) = \varphi_0 \pm k_\varphi\psi$, где U_0, k_U и φ_0, k_φ – амплитудные и фазовые задаваемые постоянные. Указанная аппроксимация частотных зависимостей просматривается по результатам решения задачи синтеза. Однако в этом случае полная компенсация тыльного излучения может обеспечиваться только на одной–двух фиксированных частотах и минимизироваться в той области частот, в которой аппроксимирующие функции $U_{21}^{(T)}(\psi)$ и $\Delta\varphi_{21}^{(T)}(\psi)$ наиболее приближены к их частотным зависимостям, определенным из условия компенсации тыльного излучения. При этом полоса самоэкранирования преобразователя, определяемая из условия $B_{wv}(\psi) = |\dot{\xi}_w(\psi)|/|\dot{\xi}_v(\psi)| \le 0.1$, оказывается меньше его полосы пропускания во фронтальном направлении и, в зависимости от вида аппроксимирующих функций, согласно результатам расчета, составляет в среднем для преобразователей с одним согласующим слоем 25–40%, а с двумя согласующими слоями – 35–55%. Если уровень ограничивающий полосу самоэкранирования увеличить до 0.15, то указанные для нее значения увеличиваются в 1.3–1.5 раза.

Во фронтальном направлении рассматриваемое фазированное возбуждение преобразователя обеспечивает достаточно эффективное излучение как в области частоты его полуволнового резонанса, так и на первой четной гармонике, позволяя при определенном выборе параметров преобразователя и аппроксимирующих функций возбуждения реализовать широкополосную АЧХ [12]. При этом, как показывают расчеты, целесообразно использовать уменьшенные в 1.2–1.4 раза значения параметров согласующих слоев по сравнению с их оптимальными значениями, получающимися при достижении максимальной полосы пропускания в случае синфазного возбуждения пьезосекций преобразователя. Результаты расчетов, приведенные на рис. 3, иллюстрируют возможности линейной аппроксимации фазированного возбуждения, при которой обеспечивается полная компенсация тыльного излучения на частоте $\psi_k = 1.3\pi$, его минимизация в полосе частот $\Delta f_э/f_{ср} = 43\%$, соответствующей полосе самоэкранирования по уровню $B_{wv}(\psi) \le 0.1$, а также – расширение полосы пропускания во фронтальном направлении в 2 раза (в данном примере до 1.5 октав) по сравнению со случаем синфазного возбуждения. Штриховыми линиями на рис. 3б и 3в показаны частотные зависимости $U_{21}^{(T)}(\psi)$ и $\Delta\varphi_{21}^{(T)}(\psi)$ получающиеся из условия компенсации тыльного излучения. Как видно, при выбранной аппроксимации частотных зависимостей $U_{21}^{(T)}(\psi)$ и $\Delta\varphi_{21}^{(T)}(\psi)$, кроме часто-

ты ψ_k, на которой тыльное излучение отсутствует, существует еще два его минимума в области частот $\psi \approx 1.65\pi$ и $\psi \approx 2.5\pi$. Для рассматриваемых линейных аппроксимирующих зависимостей возбуждения эффективная полоса самоэкранирования, как правило, смещена в область высоких частот относительно полуволнового резонанса пьезостержня. Причем наиболее широкая полоса самоэкранирования получается при расположении частоты компенсации и минимумов тыльного излучения выше частоты полуволнового резонанса пьезостержня.

При изменении частоты компенсации тыльного излучения ψ_k будет несколько видоизменяться и АЧХ излучения во фронтальном направлении, сохраняя при этом ту свою структуру, которая определяется выбором аппроксимирующих функций возбуждения и видом импеданса Z_v. Указанное обстоятельство иллюстрирует рис. 4, на котором приведены экспериментальные данные для антенны составленной из 4 × 4 двухсекционных стержневых преобразователей, фазированное возбуждение которых реализуется более простыми аппроксимирующими зависимостями $U_{21}^{(T)}(\psi) = U_0 = \text{const}$ и $\varphi_{21}^{(T)}(\psi) = -k_\varphi \psi$. Здесь в качестве нормирующей величины принято максимальное значение звукового давления $P_{\max}$ при излучении во фронтальном направлении и синфазном возбуждении преобразователей, P_Φ и P_T – звуковые давления во фронтальном и тыльном направлениях. В данном случае полоса самоэкранирования по уровню $B_{wv}(\psi) \le 0.1$ получается сравнительно небольшой $\Delta f_э / f_{ср} \approx 18$–$25\%$.

На рис. 5 для этой антенны и указанного способа возбуждения показана возможность перестройки частоты компенсации тыльного излучения. В таблице дано сопоставление экспериментальных и расчетных данных для отношения амплитуд $U_{mk} = U_{21}^{(T)}(\psi_k)$ и разности фаз $\Delta\varphi_k = \Delta\varphi_{21}^{(T)}(\psi_k)$, определенных на частоте компенсации тыльного излучения f_k; $\psi_k = 2\pi f_k c/l$. Здесь $f_p = 32.5$ кГц – резонансная частота пьезостержня; отношение f_k/f_p соответствует значениям ψ_k/π.

Следует отметить, что рассмотренные в данной работе и в [12] аппроксимирующие функции возбуждения дают подобные результаты в части формирования преобразователями широкополосных АЧХ излучения во фронтальном направлении независимо от нагруженности их тыльных торцов на воду или воздух.

В случае использования частичной аппроксимации, когда отношение амплитуд $U_{21}^{(T)}(\psi)$ задается линейной функцией, а разность фаз $\Delta\varphi_{21}^{(T)}(\psi)$

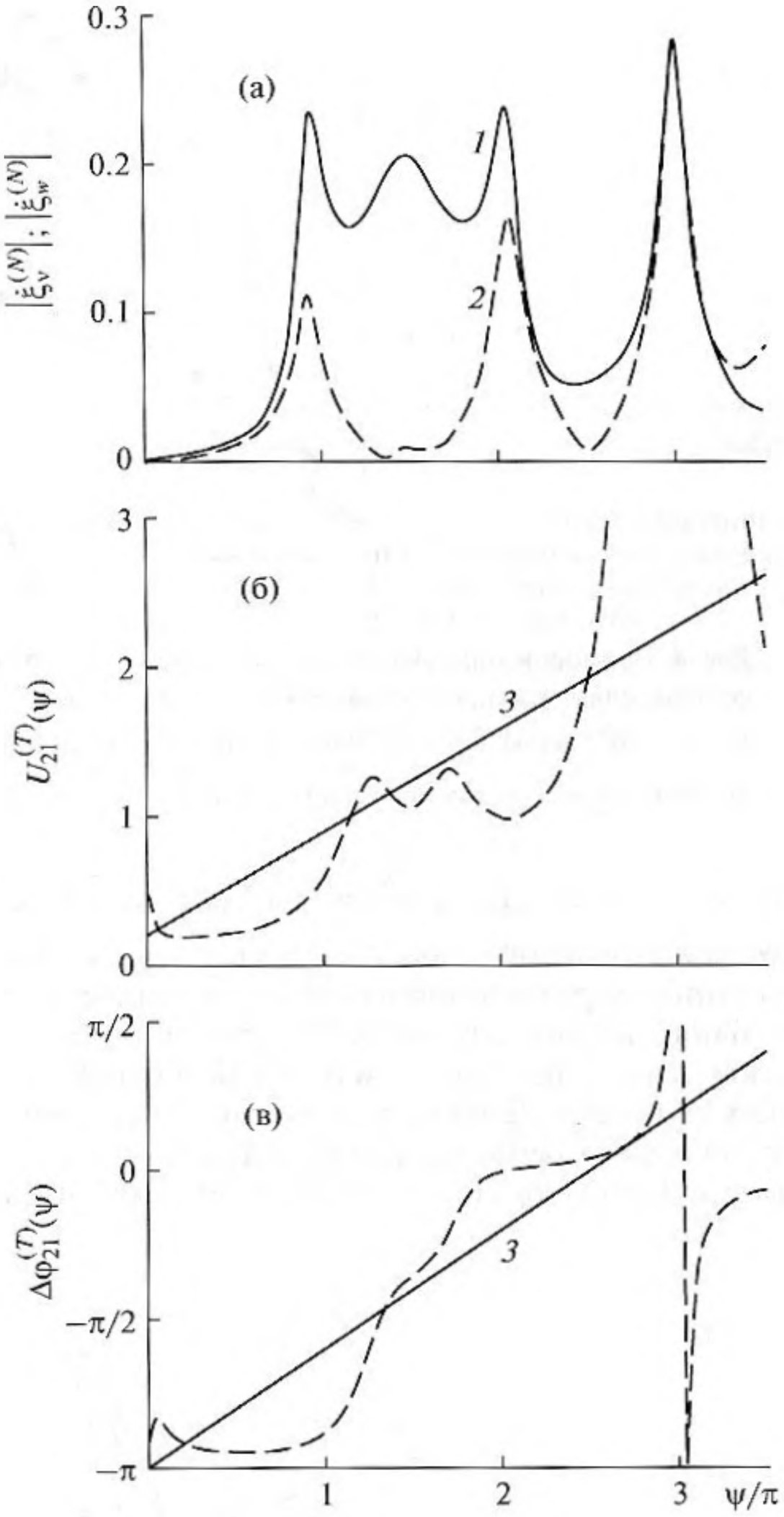

Рис. 3. Нормированные АЧХ (а) излучения во фронтальном (*1*) и тыльном (*2*) направлениях и реализующие их частотные зависимости (*3*): $U_{21}^{(T)}(\psi) = 0.2 + 0.7\psi$ – (б) и $\Delta\varphi_{21}^{(T)}(\psi) = -\pi + 1.26\psi$ – (в) для пьезостержня с одним согласующим слоем: $a_{1v} = 0.34$; $z_{1v} = 4.5\times10^6$ Па с/м. $\gamma_v = 1$; $p = 0.35$; $\psi_k = 1.3\pi$.

определяется из условия компенсации тыльного излучения, АЧХ излучения преобразователя во фронтальном направлении подобна той, которая получается при полной компенсации тыльного излучения. При этом происходит минимизация тыльного излучения таким образом, что полоса самоэкранирования преобразователя практически совпадает с его полосой пропускания. В слу-

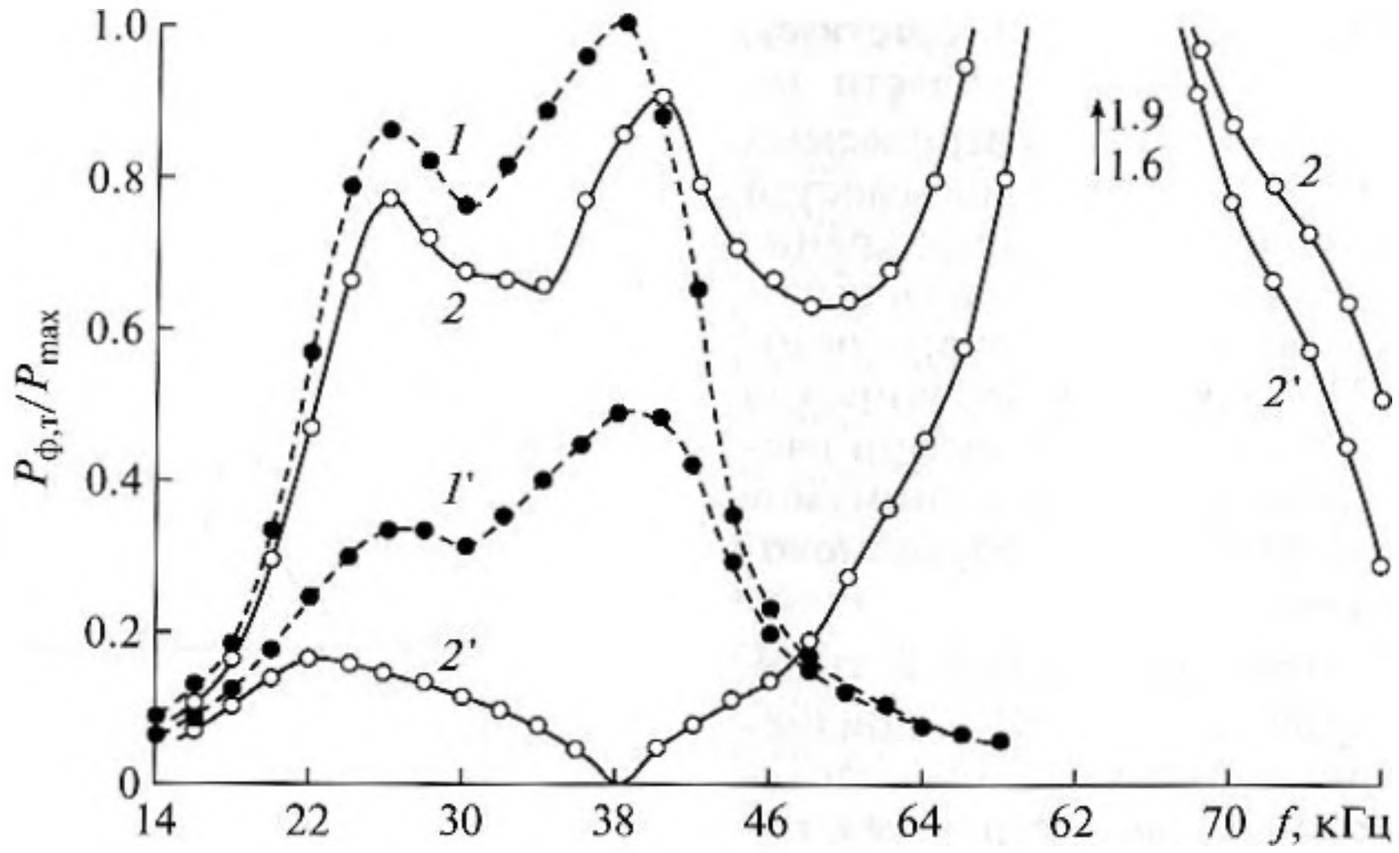

Рис. 4. Нормированные АЧХ звукового давления во фронтальном (*1* и *2*) тыльном (*1'* и *2'*) направлениях для антенны, составленной из преобразователей с параметрами: $\gamma_v = \gamma_w = 1.25$; $p = 0.5$; $a_{1v} = 0.55$; $a_{2v} = 0.05$; $a_{1w} = 0.15$; $z_{1v} = 5\times10^6$ Па с/м; $z_{2v} = z_{1w} = 40\times10^6$ Па с/м. *1*(*1'*) – синфазное возбуждение секций: $U_{21}^{(T)}(\psi) = 1$; $\Delta\varphi_{21}^{(T)}(\psi) = 0$. *2*(*2'*) – фазированное возбуждение секций: $U_{21}^{(T)}(\psi) = 1.1$; $\Delta\varphi_{21}^{(T)}(\psi) = -0.7\psi$.

чае же задания разности фаз $\Delta\varphi_{21}^{(T)}(\psi)$ линейной функцией, а отношения амплитуд $U_{21}^{(T)}(\psi)$ – в виде функции, определяемой из условия компенсации тыльного излучения, вид АЧХ излучения преобразователя во фронтальном и тыльном направлениях становится ближе к тем, которые получаются для рассмотренной выше линейной аппроксимации. Таким образом, с позиции минимизации уровня тыльного излучения более значимой оказывается частотная зависимость $\Delta\varphi_{21}^{(T)}(\psi)$.

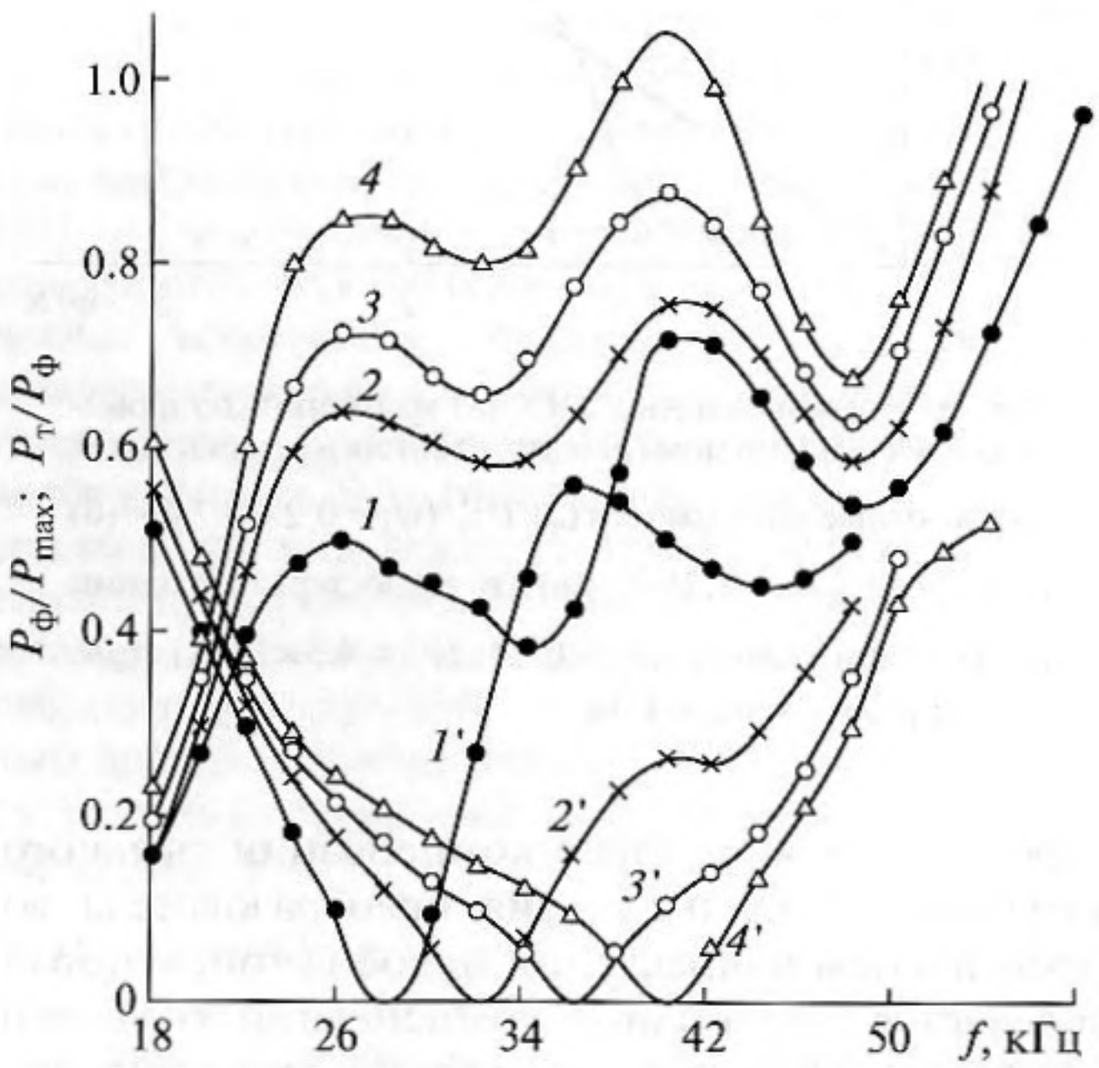

Рис. 5. АЧХ звукового давления во фронтальном направлении (*1*–*4*) и отношения $P_Т/P_Ф$ (*1'*–*4'*) при изменении частоты компенсации тыльного излучения f_k.

КРАТКИЕ ВЫВОДЫ

1. Показана возможность построения безэкранных однонаправленных стержневых преобразователей путем разделения пьезостержня на две части (секции) и возбуждения их различными по амплитуде и фазе электрическими напряжениями, обеспечивающими торможение тыльного торца пьезостержня. Для таких преобразователей, при выполнении условия компенсации тыльного излучения во всем рабочем диапазоне частот, АЧХ излучения во фронтальном направлении оказываются несколько смещенными в область высоких частот относительно полуволнового резонанса пьезостержня. Причем по сравнению со случаем синфазного возбуждения полоса пропускания для различных случаев нагружения существенно не изменяется, а уровень излучения по звуковому давлению уменьшается в 1.2–1.4 раза. Изменение параметра p, характеризующего относительную длину первой секции пьезостержня, в основном сказывается на соответствующем изменении отношения амплитуд возбуждающих напряжений.

2. Использование линейной аппроксимации частотных зависимостей $U_{21}^{(T)}(\psi)$ и $\Delta\varphi_{21}^{(T)}(\psi)$, определенных из условия компенсации тыльного излучения, позволяет обеспечить его компенсацию на ряде перестраиваемых частот и минимизацию в достаточно широкой полосе частот, но меньшей, чем у АЧХ формируемой во фронтальном

Таблица

f_k, кГц	$\frac{f_k}{f_p}$	Эксперимент		Расчет	
		U_{mk}	$\Delta\varphi_k$	U_{mk}	$\Delta\varphi_k$
28	0.86	1.05	–2.43	1.06	–2.56
32	0.98	1.0	–2.29	1.03	–2.19
36	1.11	1.05	–2.17	0.90	–2.21
38	1.17	1.10	–2.20	1.02	–2.33
40	1.23	1.30	–2.29	1.30	–2.42

направлении. Указанная полоса частот соответствует эффективной полосе самоэкранирования по заданному уровню и, как правило, смещена в область высоких частот относительно полуволнового резонанса пьезостержня. Приведенные экспериментальные данные находятся в соответствии с выполненными расчетами.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Гидроакустическая энциклопедия / Под ред. В.И. Тимошенко. Таганрог: ТГРУ, 1999. С. 75–77.
2. *Buttler J.L.* Directional transduser // Патент США № 3378814 от 16.04.68.
3. *Андебура В.А., Вовк И.В., Голованенко А.И. и др.* Электроакустический преобразователь // А.С. № 466627. Бюл. Изобр. № 13. 1975.
4. *Задиренко И.М., Кузьменко А.Г.* Об асимметрии излучения широкополосных стержневых преобразователей с согласующими переходными слоями // Акуст. журн. 1982. Т. 28. № 36. С. 781–784.
5. Справочник по гидроакустике / под ред. А.Е. Колесникова. Л.: Судостроение, 1988. С. 235–237.
6. *Вовк И.В., Гринченко В.Т.* Нетрадиционные методы управления частотой резонанса низкочастотных гидроакустических преобразователей // Техническая акустика. 1992. Т. 1. Вып. 2. С. 5–11.
7. *Бушер М.К.* Динамические особенности пьезокерамических преобразователей на основе колец неоднородной структуры // Акуст. журн. 1986. Т. 32. № 2. С. 145–151.
8. *Задириенко И.М.* Направленный цилиндрический излучатель // Изв. ЛЭТИ. Сб. науч. тр. Л.: ЛЭТИ, 1987. Вып. 385. С. 30–36.
9. *Дианов Д.Б., Степанов Б.Г.* Электроакустический преобразователь // А.С. № 1001504. Бюл. Изобр. № 8, 1983.
10. *Задиренко И.М., Кузьменко А.Г.* Синтез электрического возбуждения секционированного стержневого преобразователя с асимметрией излучения // Акуст. журн. 1983. Т. 29. № 6. С. 765–768.
11. *Степанов Б.Г.* Частотные характеристики стержневого преобразователя с фазированным возбуждением секций и асимметрией излучения // Деп. ВИНИТИ, № 663–85 Деп. 1985. 35 с.
12. *Степанов Б.Г.* О возможности построения широкополосных стержневых пьезопреобразователей с фазированным возбуждением секций // Акуст. журн. 2009. Т. 55. № 3. С. 407–414.
13. *Дианов Д.Б., Кузнецов В.М.* Влияние переходных слоев на частотные характеристики стержневых пьезопреобразователей // Изв. ЛЭТИ, Сб. науч. тр., Л.: ЛЭТИ, 1968. Вып. 63. С. 60–78.
14. *Брук А.М., Дианов Д.Б., Степанов Б.Г.* Стержневой электроакустический преобразователь // А.С. № 1308162. Бюл. Изобр. № 16. 1987.
15. *Михайлов Г.А., Мудрецов А.С., Шабров А.А.* Электроакустический преобразователь // А.С. № 1115245. Бюл. Изобр. № 35. 1984.