

УДК: 534.222

OECD: 1.03.AA

DOI: 10.56408/2412-8627.2026.37.49.006

Расширение рабочей полосы стержневого составного преобразователя

Альсаид Х. К.^{1*}, Пивнев П.П.²¹Аспирант, ²К.т.н., доцент, заведующий кафедрой^{1,2}Кафедра Электрогидроакустической и медицинской техники, Институт нанотехнологий, электроники и приборостроения Южный федеральный университет, г. Таганрог, РФ

Аннотация

Разработка широкополосного преобразователя Tonpilz, работающего на низких частотах, представляет собой серьезную проблему. Цель данного исследования – создание мощного преобразователя Tonpilz, с улучшенными широкополосными характеристиками путем оптимизации излучающей накладки. Дальнейшая оптимизация обеспечивает максимальную полосу пропускания без ущерба для передающей характеристики напряжения. Изменение структуры излучающей накладки и его влияние на эффективность преобразователя были исследованы с помощью конечно-элементного анализа и экспериментального анализа. Излучающая накладка модернизировалась путем сверления отверстий по образующей цилиндра, что привело к максимальной полосе пропускания 28,07% при 16 отверстиях и флуктуации передающего отклика преобразователя TVR удалось снизить с 9,61 дБ до 6,39 дБ относительно 1 мПа/В. Кроме того, изготовленная модель также показала хорошее соответствие между конечно-элементным моделированием и изготовленным прототипом. Таким образом, экспериментальная проверка путем разработки прототипа преобразователя подтверждает эффективность предложенных улучшений конструкции.

Ключевые слова: пьезокерамика, конечно-элементное моделирование, гидролокация, Преобразователь типа Tonpilz, широкополосность

Expansion of the operating band of a transducer-type Tonpilz

Alsaeed H. K.^{1*}, Pivnev P.P.²¹Postgraduate student, ²Ph.D., Associate Professor, Head of the Department^{1,2}Department of Electrohydroacoustic and Medical Engineering, Institute of Nanotechnology, Electronics, and Instrumentation, Southern Federal University, Taganrog, Russian Federation

Abstract

Creating a broadband Tonpilz transducer that operates efficiently at low frequencies presents a significant challenge. The objective of this study is to develop a high-power Tonpilz transducer with enhanced broadband performance by optimizing the radiating plate. Further refinement is conducted to achieve the widest possible bandwidth without compromising voltage transfer performance. The study examined how variations in the radiating plate structure affect the overall transducer performance using finite element analysis (FEA) and

*E-mail: haider.physics@bk.ru (Альсаид. Х. К.)

experimental methods. By drilling holes in the radiating plate, an optimal bandwidth of 28.07% was achieved with 16 holes, while the tactile vibration response (TVR) of the transducer was reduced from 9.61 dB to 6.39 dB re 1 $\mu\text{Pa/V}$. Furthermore, the generated model exhibited resonance, demonstrating strong agreement between the FEA modeling and the physical prototype. Thus, experimental verification during the transducer prototype development validates the proposed design improvements.

Keywords: piezoceramics, finite element modeling, sonar, Tonpilz transducer, broadband

Введение

Подводный преобразователь является незаменимым электроакустическим устройством, используемым в подводной связи, исследовании океана, сборе научных данных со станций на дне океана, акустической визуализации в морской нефтяной промышленности. С развитием технологии обработки акустических сигналов для получения большего количества информации от цели требуются широкополосные преобразователи. Преобразователь Tonpilz хорошо подходит для генерации мощных акустических волн по своей конструкции [1], [2]. Проектирование низкочастотного, легкого и широкополосного преобразователя является вызовом для инженеров [3], [4].

Задача исследования состояла в том, чтобы реализовать миниатюрные и эффективные низкочастотные преобразователи с широкой полосой пропускания. Чем шире полоса пропускания, тем лучше он подходит для таких приложений, как подводная связь на большом расстоянии и акустическая визуализация высокого разрешения [5]. В работе [6] рассматриваются безэкранные однонаправленные преобразователи, состоящие из пьезоэлектрического стержня и двух идентичных клиновидных концевых элементов. По сравнению с традиционными стержневыми преобразователями эти устройства имеют меньшие габариты в направлении излучения звуковой волны, однако наличие заполненных воздухом полостей влияет на эффективность излучения, резонансную частоту и характеристики направленности. Для достижения широкой полосы пропускания в излучающую накладку преобразователя был добавлен симметричный изгибный резонанс, также называемый «хлопающим» резонансом. Этот изгибный резонанс используется за счет крепления преобразователя к выступу. Каждый преобразователь характеризуется высокой мощностью, высокой электроакустической эффективностью, широкой полосой пропускания (низкой добротностью) и высокой электромеханической связью [7]. Одним из широко применяемых методов расширения полосы пропускания пьезоэлектрических преобразователей является обеспечение акустического согласующего слоя на излучающей накладке [8]. Однако предел полосы пропускания такого преобразователя с акустическим согласующим слоем составляет от 30 до 40% максимум, и поэтому необходимо расширить полосу пропускания, увеличив количество согласующих слоев до двух или трех. Вместе с тем это приводит к таким проблемам, как большие размеры преобразователя и снижение надежности связанного слоя. В работе [9] используются дополнительные резонансные моды, добавлением более двух излучающих накладок к преобразователю. Среди исследований по расширению полосы частот подходящим методом при сохранении простой структуры преобразователя является объединение продольного режима и других режимов вибрации преобразователя [10]. Влияние продольная геометрия и технология соединения пьезоэлектрических элементов полуволнового типа на частотные характеристики широкополосных многополуволновых преобразователей с пассивными согласующими слоями проанализировали в [11].

1 Принцип построения и структура преобразователя

Используя COMSOL Multiphysics, мы провели моделирование стержневого преобразователя в режиме приема и излучения. Модель имеет максимальное приближение к конструкции преобразователя [12]. На рисунке 1 показан схематический вид структуры преобразователя. Так же, как и в обычных пьезоэлектрических преобразователях Tonpilz, основная структура нового преобразователя состоит из нескольких кольцевых пьезоэлектрических керамических элементов ЦТС-3, к которым приклеены излучающая накладка, изготовленная из сплава АМГ-6 и тыльная накладка изготовленная из стали Ст3, с болтом для армирования, выполненного из стали марки Ст3.

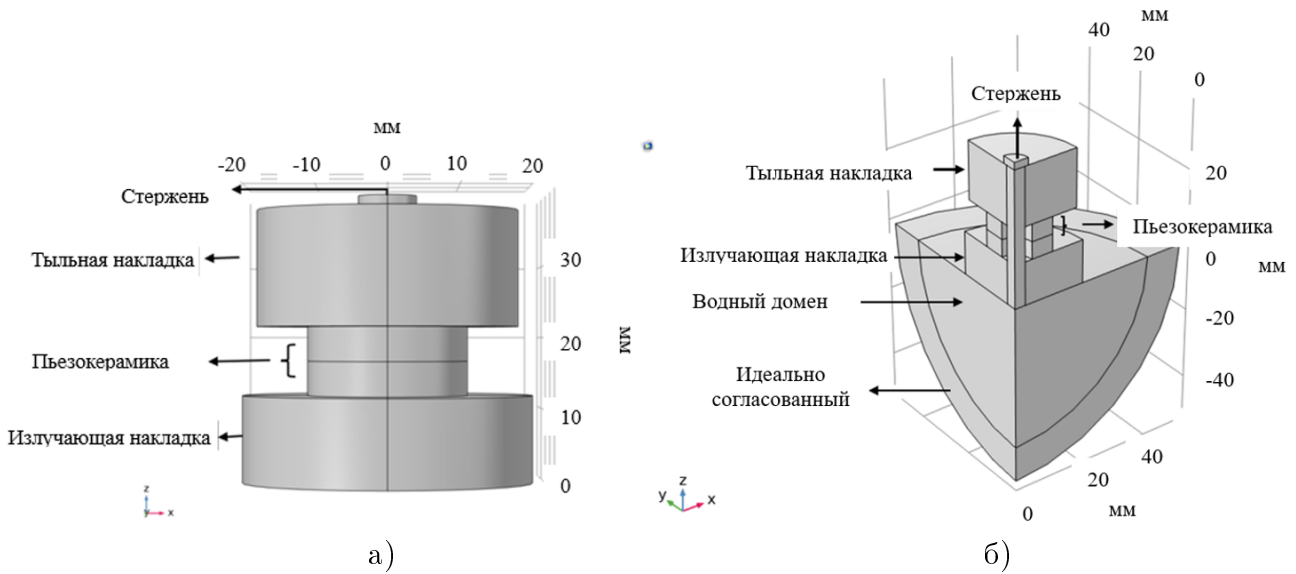


Рисунок 1 – Составной стержневой преобразователь ("грибовидный" преобразователь) и симметрическое сечение геометрии модели

По формуле (1) определяется резонансные частоты (относительно узла колебательной скорости) колебательной системы при задании коэффициента асимметрии A через волновые размеры левой и правой половин колебательной системы:

$$tg \frac{2\pi l_2''}{\lambda_2} = \frac{1}{\frac{\rho_3 c_3 s_3}{\rho_2 c_2 s_2} tg \frac{2\pi l_3}{\lambda_3}}; \quad tg \frac{2\pi l_2'}{\lambda_2} = \frac{1}{\frac{\rho_1 c_1 s_1}{\rho_2 c_2 s_2} tg \frac{2\pi l_1}{\lambda_1}}, \quad (1)$$

где ρ_1, ρ_2, ρ_3 – плотность материала; c_1, c_2, c_3 – скорость звука в материале; s_1, s_2, s_3 – площади поперечного сечения; l_1, l_2, l_3 – толщина; $\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3$ – длина волны в материале (для излучающей накладки, для активной части (пьезоэлектрического элемента) и для тыльной накладки соответственно).

Как известно, коэффициент электромеханической трансформации колебательной системы на низшей форме колебаний находится по формуле (2):

$$n = \frac{1}{2} n_a \frac{\sqrt{1 + \left(\frac{\rho_1 c_1 s_1}{\rho_2 c_2 s_2} \right)^2 tg^2 \frac{2\pi l_1}{\lambda_1}} + \sqrt{1 + \left(\frac{\rho_3 c_3 s_3}{\rho_2 c_2 s_2} \right)^2 tg^2 \frac{2\pi l_3}{\lambda_3}}}{\sqrt{\left[1 + \left(\frac{\rho_3 c_3 s_3}{\rho_2 c_2 s_2} \right)^2 tg^2 \frac{2\pi l_3}{\lambda_3} \right] \left(1 + tg^2 \frac{2\pi l_1}{\lambda_1} \right)}}, \quad (2)$$

где n_a – коэффициент электромеханической трансформации пьезоэлектрического элемента (обычно используется пьезомодуль d_{33} на низких и средних частотах), равный;

$n_a = 2d_{33}E(S/\delta)$; δ – расстояние между электродами; S – площадь рабочей поверхности пьезоэлемента.

Пьезокерамический состав ЦТБС-3 является сегнетожестким материалом. Данный состав широко применяется в электроакустических преобразователях в режимах излучения и приема, работающих в интервале температур от -50 до $+80^\circ\text{C}$. Параметры сегнетожесткого пьезокерамического материала ЦТБС-3 мало изменяются под действием механических и электрического напряжений. В таблице 1 представлены основные свойства материала ЦТБС-3 [13].

Таблица 1 – Физико-механические, электрические и электромеханические свойства ЦТБС-3

Параметр	Значение
Объемная масса ρ (плотность), $\times 10^3$ кг/м ³	не менее 7,25 $\pm$ 0,25
Модуль Юнга поперечный E_{31} , $\times 10^{-11}$ Па	0,9
Модуль Юнга поперечный E_{33} , $\times 10^{-11}$ Па	0,7
Коэффициент Пуассона ν	0,3
Температура Кюри T_k , $^\circ\text{C}$	180 $^\circ$
Механическая добротность Q_m	не менее 350
Скорость звука при поперечных колебаниях, C_{31} , $\times 10^3$ м/с	3,5
Скорость звука при поперечных колебаниях, C_{33} , $\times 10^3$ м/с	3,2
Коэффициент линейного теплового расширения $\alpha T \times 10^{-6}$, 1/ $^\circ\text{C}$	2,2-4,5
Коэффициент теплопроводности λ , Вт/м $\cdot$ $^\circ\text{C}$	1,9
Диэлектрическая проницаемость $\varepsilon_{33}^\sigma/\varepsilon_0$ в слабых электрических полях при 20 $^\circ\text{C}$	2400 $\pm$ 400
Тангенс угла диэлектрических потерь $\text{tg}\delta$ в слабых полях	не более 0,015
Тангенс угла диэлектрических потерь $\text{tg}\delta$ в сильных полях (частота 50 Гц, напряжение 300 В/мм)	0,035
Удельное объемное электрическое сопротивление при температуре 100 $\pm$ 5 $^\circ\text{C}$, $\times 10^8$ Ом $\cdot$ м	не менее 1
Электрическая прочность E_n , кВ/мм	не менее 3
Коэффициенты поперечной электромеханической связи k_{31}	0,30
Коэффициенты радиальной электромеханической связи k_r	0,45
Коэффициенты электромеханической связи продольные k_{33}	0,65
Поперечные пьезоэлектрические модули при 20 $^\circ\text{C}$ $d_{31} \times 10^{-12}$ Кл/Н	160 $\pm$ 40
Поперечные пьезоэлектрические модули при 20 $^\circ\text{C}$ $d_{33} \times 10^{-12}$ Кл/Н	400 $\pm$ 50

Отличие этого преобразователя от классических заключается в том, что он имеет несколько отверстий в его излучающей накладке. Были проведены следующие операции для расширения диапазона частот. В излучающей накладке были просверлены отверстия: рисунок 2а – четыре отверстия; рисунок 2б – восемь отверстий; рисунок 2в – шестнадцать отверстий. После каждой операции было проведено измерение активной составляющей полного сопротивления, а затем отверстия были заполнены эпоксидной смолой ЭД-20,

смешанной с порошком вольфрама для увеличения конечной массы. При этом измерения производились дважды как до полимеризации смолы, так и после.

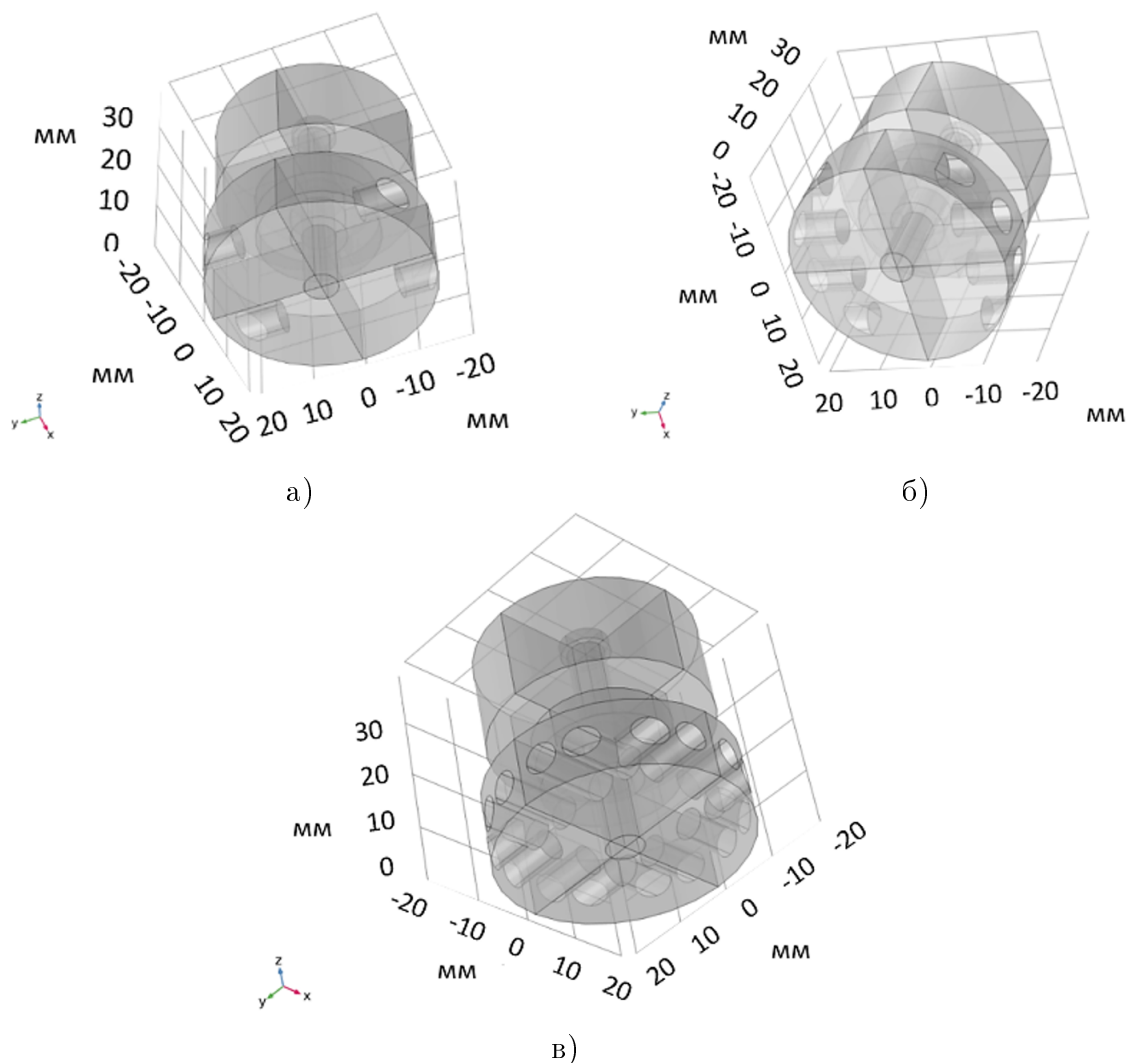


Рисунок 2 – Модель преобразователя с излучающей накладкой с отверстиями; а) четыре отверстия, б) восемь отверстий, в) шестнадцать отверстий

2 Основные результаты анализа моделирования предлагаемого преобразователя

Моделирование преобразователя выполнялось с помощью метода конечных элементов. Размеры и параметры материала модели показаны выше. Преобразователь погружен в воду. Плотность и скорость звука в воде для расчета задавались 1000 кг/м^3 и 1500 м/с соответственно. В дополнение к общим модулям и настройкам, которые необходимы для моделирования преобразователя в воде, модули схемы добавляются в трехмерную модель конечных элементов преобразователя для моделирования TVR преобразователя. Затем моделируются графики TVR в зависимости от частоты для преобразователя в воде.

На рисунке 3 показан график TVR в зависимости от частоты для пьезоэлектрического преобразователя без отверстий. Значение TVR на резонансной частоте 26 кГц составляет около 138,24 дБ, $\text{TVR}_{\min}$ в диапазоне 46 кГц составляет 128,63 дБ, а флуктуация TVR составляет 9,61 дБ.

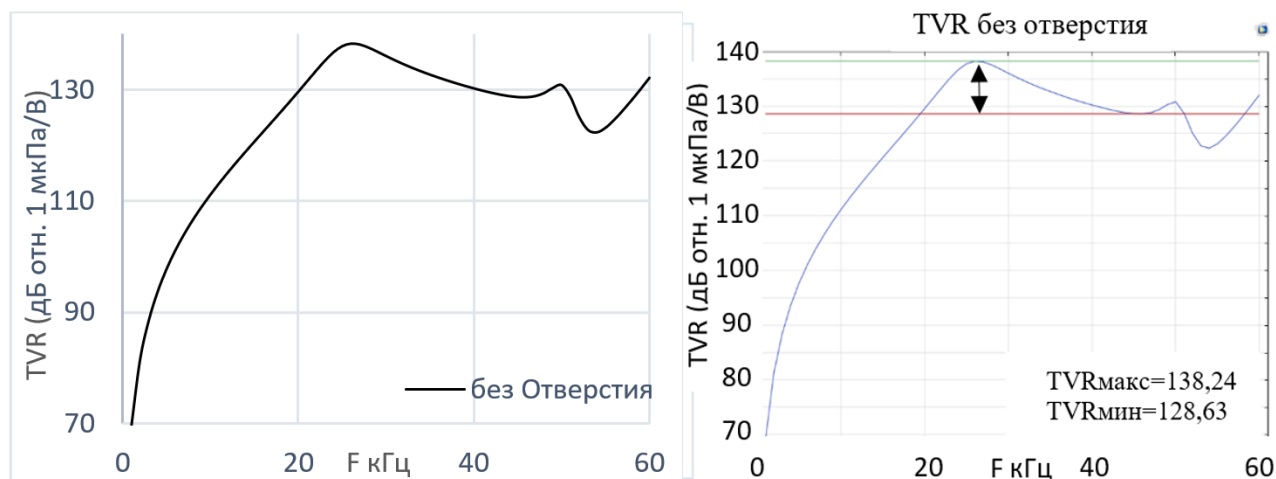


Рисунок 3 – Реакция на передаваемое напряжение (TVR) для пьезоэлектрического преобразователя без отверстия

График TVR в зависимости от частоты для пьезоэлектрического преобразователя с четырьмя отверстиями показан на рисунке 4. Значение TVR на резонансной частоте 27 кГц составляет около 138,09 дБ, $TVR_{\min}$ в диапазоне 45 кГц составляет 129,76 дБ, а флуктуация TVR составляет 8,33 дБ.

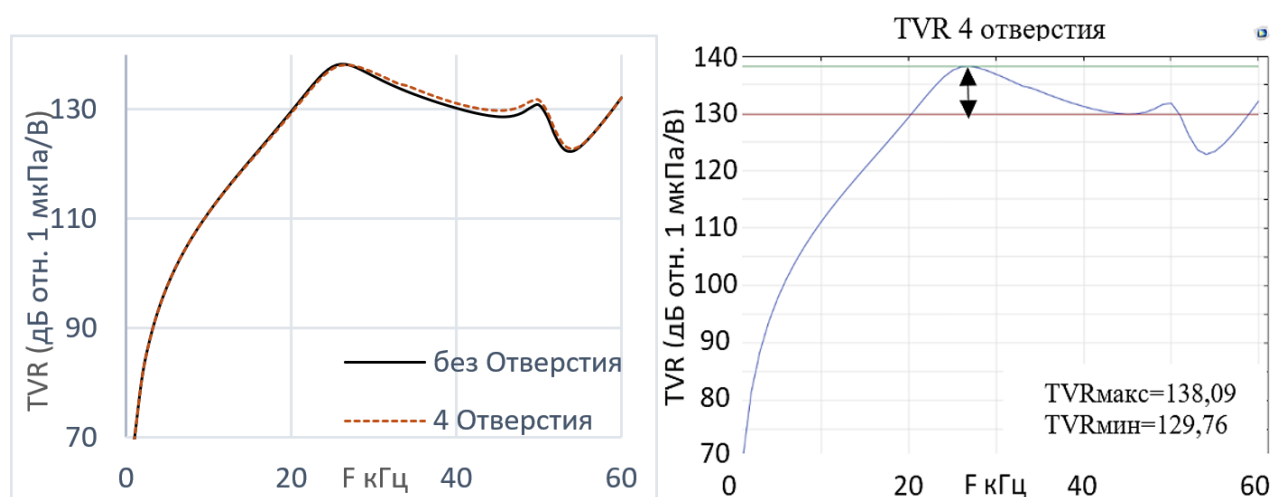


Рисунок 4 – Реакция на передаваемое напряжение (TVR) для пьезоэлектрического преобразователя с четырьмя отверстиями

Рисунок 5 показывает график TVR в зависимости от частоты для преобразователя с восемью отверстиями. Значение TVR на резонансной частоте 27 кГц составляет около 137,96 дБ, $TVR_{\min}$ в диапазоне 45 кГц составляет 130,26 дБ, а флуктуация TVR составляет 7,7 дБ.

На рисунке 6 показан график TVR для пьезоэлектрического преобразователя с шестнадцатью отверстиями. Значение TVR составляет около 137,4 дБ на резонансной частоте 27 кГц, $TVR_{\min}$ в диапазоне 43 кГц составляет 130,95 дБ, а флуктуация TVR составляет 6,45 дБ.

При шестнадцати отверстиях с заполнением ЭД-20 значение TVR на резонансной частоте 28 кГц составляет около 137,53 дБ, $TVR_{\min}$ составляет 131,26 дБ в диапазоне 42 кГц, а флуктуация TVR составляет 6,39 дБ. На рисунке 7 показан график TVR для пьезоэлектрического преобразователя.

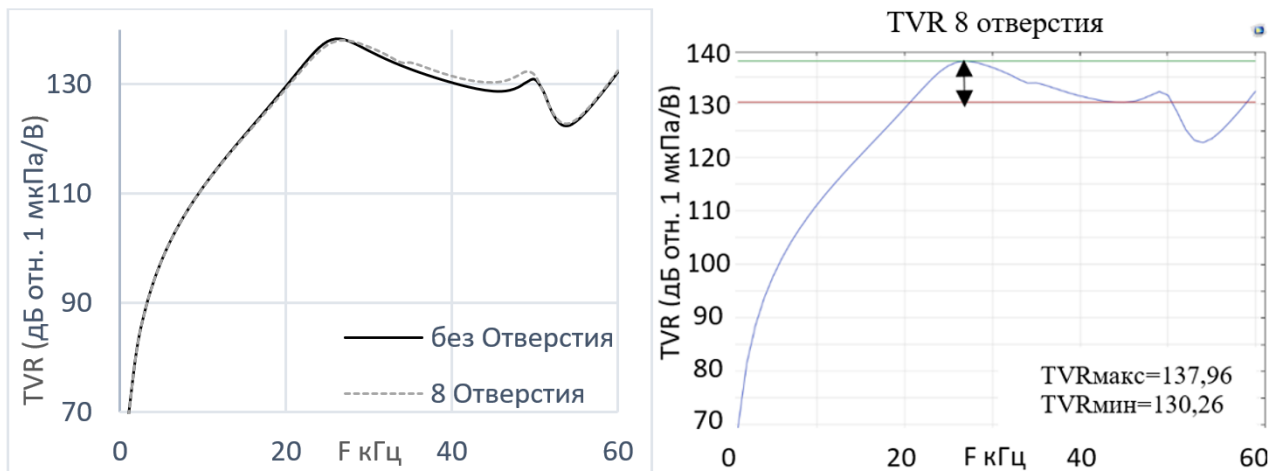


Рисунок 5 – Реакция на передаваемое напряжение (TVR) для пьезоэлектрического преобразователя с восемью отверстиями

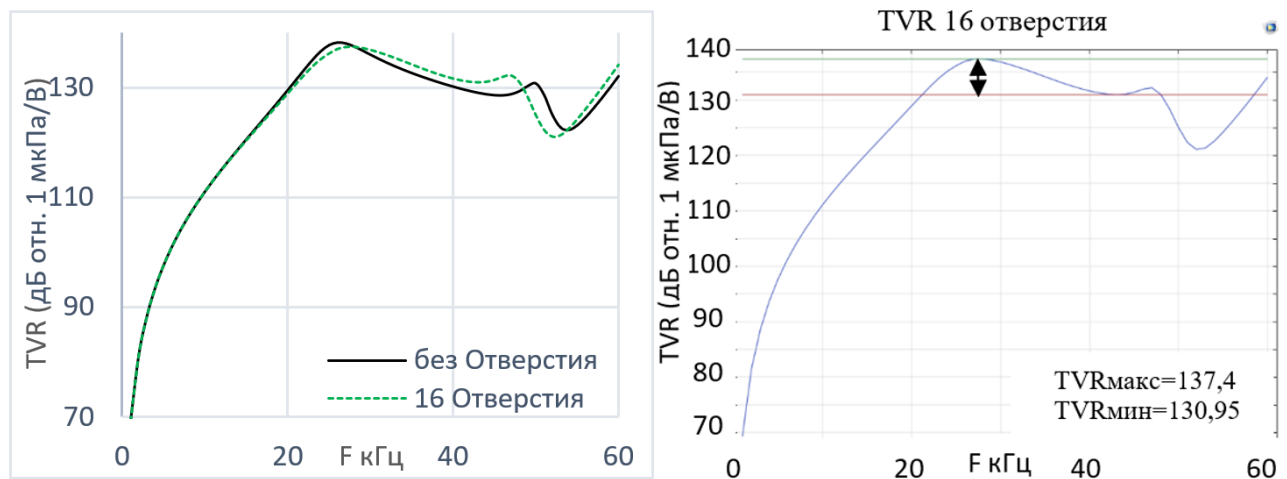


Рисунок 6 – Реакция на передаваемое напряжение (TVR) для пьезоэлектрического преобразователя с шестнадцатью отверстиями



Рисунок 7 – Реакция на передаваемое напряжение (TVR) для пьезоэлектрического преобразователя с шестнадцатью отверстиями с заполнением ЭД-20

Результаты моделирования показывают, что флуктуация передающего отклика преобразователя может быть уменьшена с 9,61 дБ до 6,39 дБ, что находится в пределах рабочего диапазона полосы пропускания, как показано на рисунке 8. Метод, представленный в этой статье, будет иметь значение для проектирования широкополосного преобразователя.

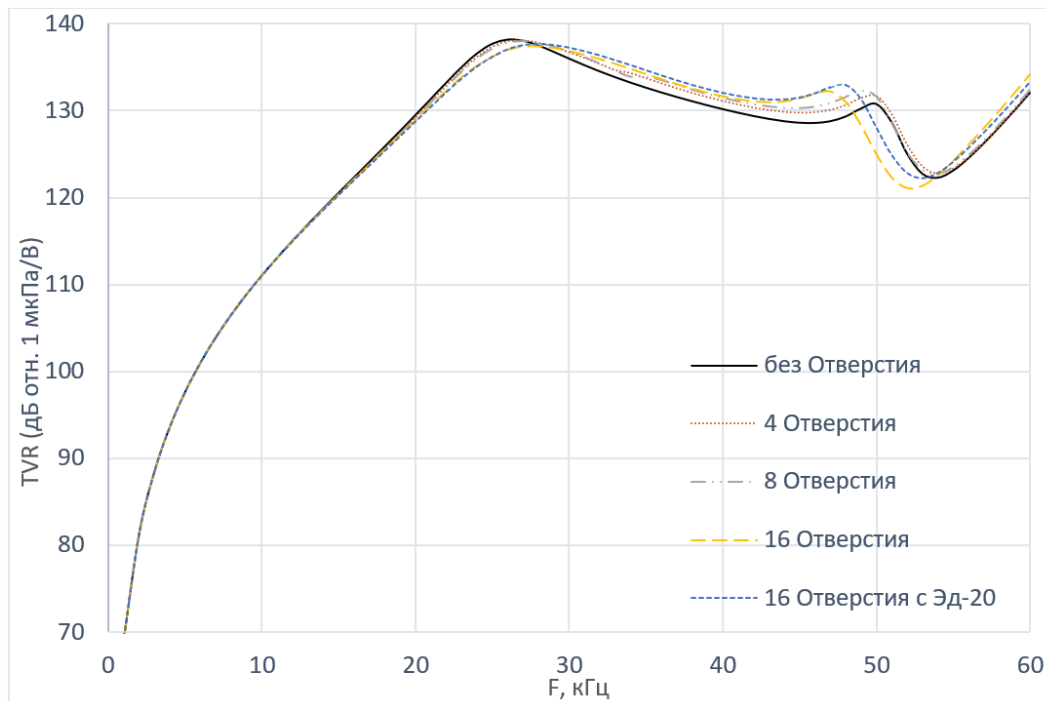


Рисунок 8 – Реакция на передаваемое напряжение (TVR) в зависимости от частоты для преобразователя в воде

3 Анализ результатов макетирования преобразователя

На основании моделирования было приведено макетирование [14]. Изготовлен преобразователь Toprilz с излучающей накладкой с отверстиями по образующей цилиндра (рисунок 9). Выполнены измерения активной составляющей полного сопротивления (R_w) на оборудовании Уникальной научной установки «Имитационно-натурный гидроакустический комплекс» (УНУ ИНГАК) Института нанотехнологий, электроники и приборостроения Южного федерального университета.

Параметры, измеренные после проведения каждой операции приведены ниже.

Из графика, представленного на рисунке 10, видно, что значение активной составляющей полного сопротивления (R_w) макета преобразователя составляет от 8603,3 до 16491 Ом. При этом полоса пропускания преобразователя от 20,05 до 25,0 кГц и равна $\Delta F = 4,95$ кГц, что составляет 21,52% от центральной частоты 23,0 кГц.

На рисунке 11 показано, что R_w макета преобразователя от 8576 до 17498 Ом. При этом частотный диапазон макета от 21,3 до 28,3 кГц, т.е. полоса пропускания $\Delta F = 7$ кГц, что составляет 28,68% от центральной частоты 24,4 кГц.

Из графика (рисунок 12) видно, что R_w макета преобразователя от 9767,09 до 20046,98 Ом. Полоса пропускания преобразователя от 22,3 до 29,6 кГц и равна $\Delta F = 7,3$ кГц, что составляет 28,07% от центральной частоты (26,0 кГц).

На рисунке 13 показано, что R_w преобразователя находится в пределах от 8275,91 до 16436,95 Ом. Полоса пропускания преобразователя охватывает диапазон от 22,6 до

28,3 кГц и равна $\Delta F = 5,7$ кГц, что составляет 22,62% от центральной частоты (25,2 кГц).

Из графика, представленного на рисунке 14 видно, что значение R_w преобразователя находится в пределах от 8360,38 до 16186,9 Ом. Полоса пропускания преобразователя лежит в диапазоне от 25,3 до 28,7 кГц и равна $\Delta F = 5,9$ кГц, что составляет 25,9% от центральной частоты (25,3 кГц).

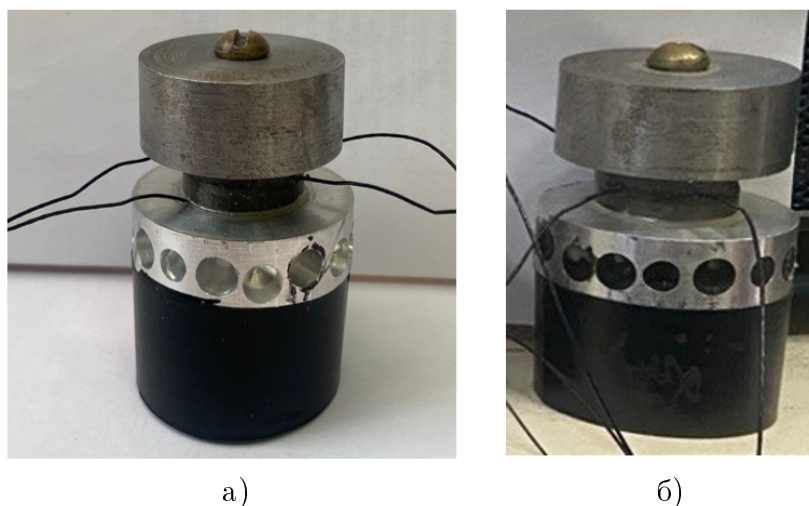


Рисунок 9 – Макет составного стержневого преобразователя; а) излучающая накладка с отверстиями без заполнения, б) излучающая накладка с отверстиями с заполнением ЭД-20

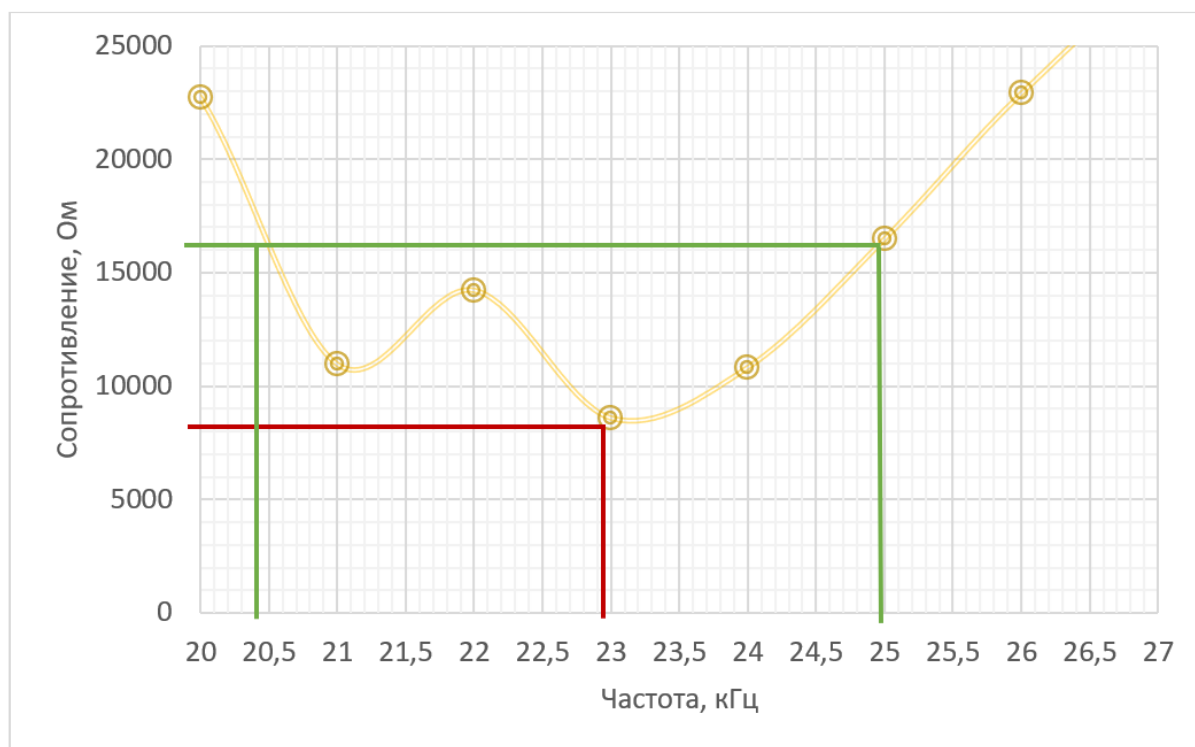


Рисунок 10 – Частотная зависимость R_w макета с четырьмя отверстиями в излучающей накладке

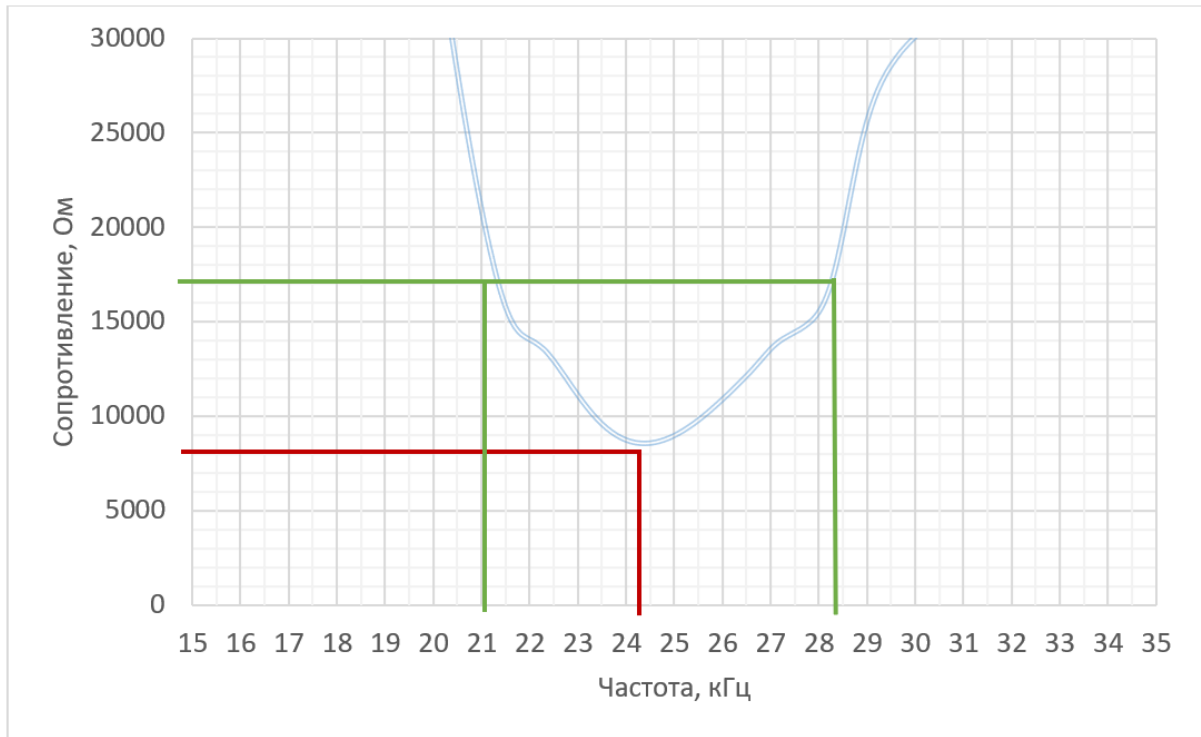


Рисунок 11 – Частотная зависимость R_w макета преобразователя с восьмью отверстиями в излучающей накладке

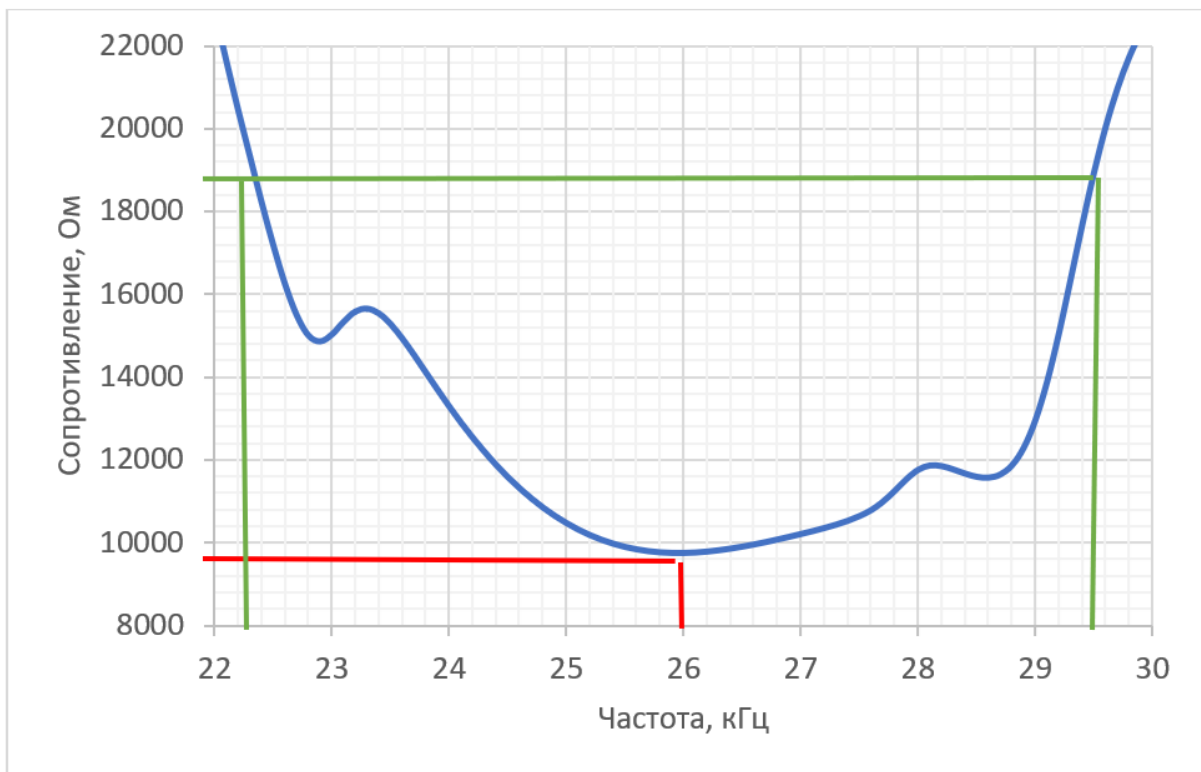


Рисунок 12 – Частотная зависимость R_w макета с шестнадцатью отверстиями в излучающей накладке

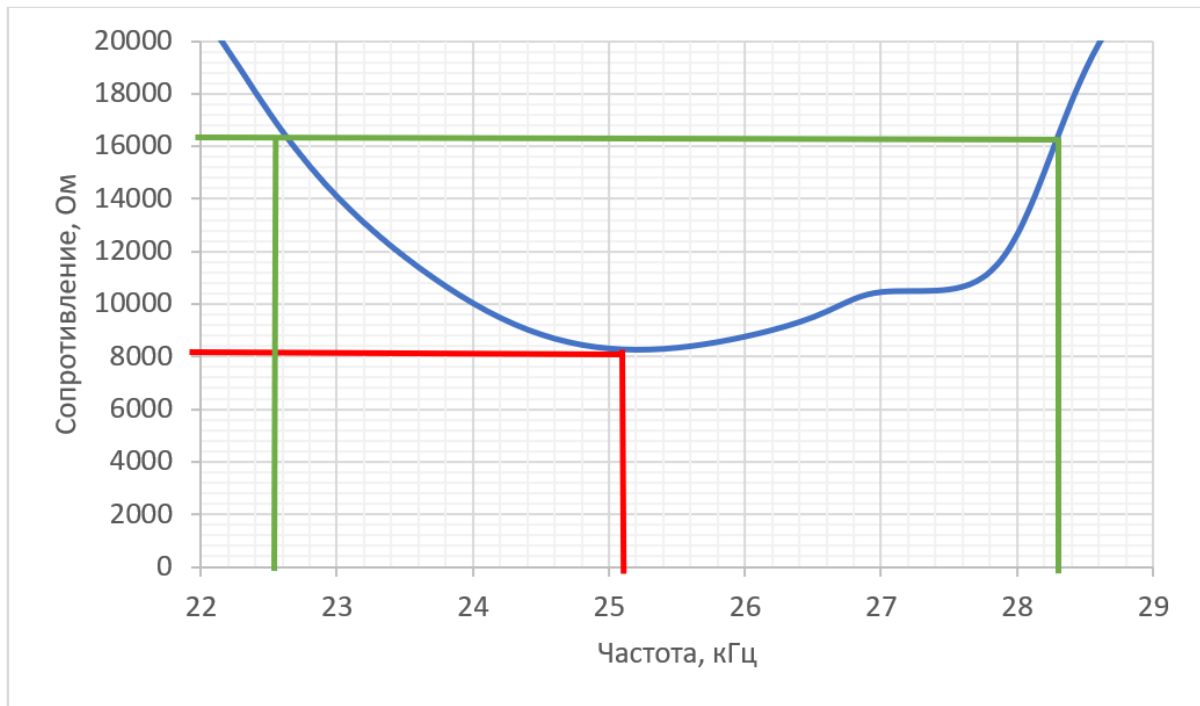


Рисунок 13 – Частотная зависимость R_w макета с шестнадцатью отверстиями в излучающей накладке залитыми эпоксидной смолой ЭД-20 (до полимеризации)

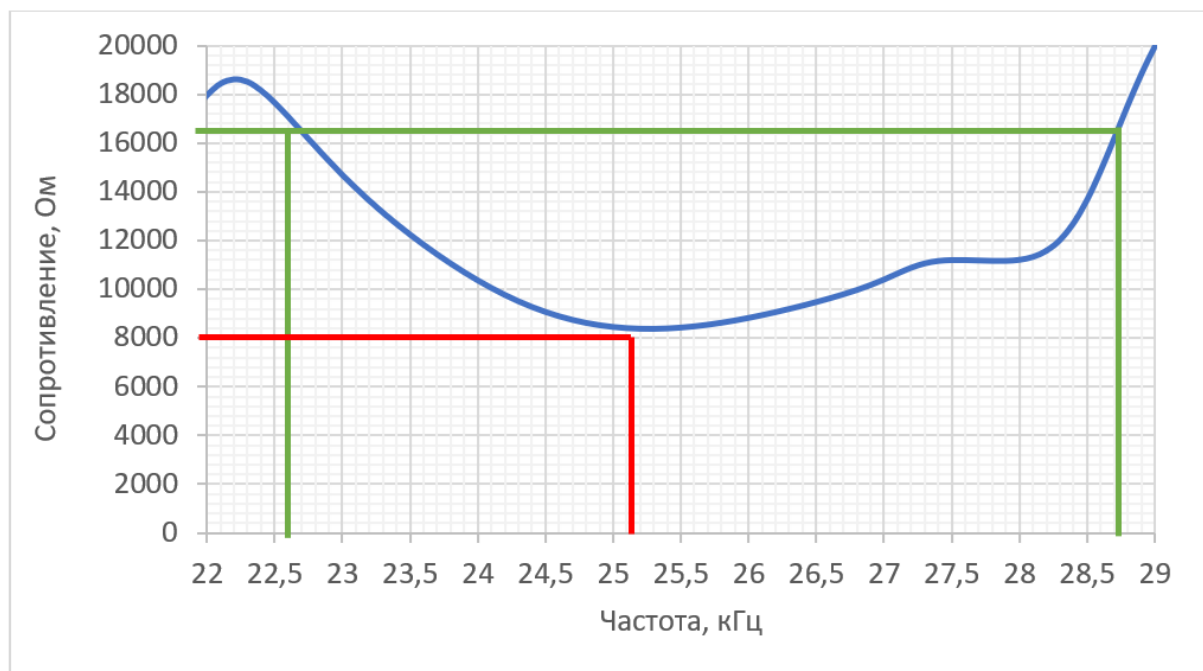


Рисунок 14 – Частотная зависимость R_w макета с шестнадцатью отверстиями в излучающей накладке залитыми эпоксидной смолой ЭД-20 (после полимеризации).

Соберем все экспериментальные данные (рисунки 10–14) в таблицу 2.

Таблица 2 – Экспериментальные данные

Конфигурация макета	$R_{w\min}$, Ом	$R_{w\max}$, Ом	Среднее R_w , Ом	ΔF , кГц	f , кГц	Отн. полоса, %
Четыре отв. (пусто)	8603,3	16491	12547,15	4,95	23,0	21,52
Восемь отв. (пусто)	8576	17498	13037,00	7,00	24,4	28,68
Шестнадцать отв. (пусто)	9767,09	20046,98	14907,04	7,30	26,0	28,07
Шестнадцать отв. +ЭД-20 (до полимеризации)	8275,91	16436,95	12356,43	5,70	25,2	22,62
Шестнадцать отв. +ЭД-20 (после полимеризации)	8360,38	16186,9	12273,64	5,90	25,3	25,90

Из представленных на графиках (рисунки 10–14) и в таблице 2 результатов можно сделать следующие выводы:

1. Максимальная полоса пропускания достигается при шестнадцати отверстиях без заполнения ($\Delta F = 7,3$ кГц, 28,07%), что на 47,5% шире, чем у базовой модели с четырьмя отверстиями.

2. Заполнение отверстий ЭД-20 снижает полосу, но стабилизирует параметры (меньше разброс R_w , более предсказуемый резонанс).

3. Статистическая устойчивость: коэффициент вариации $R_w \sim 8\%$ – приемлем для преобразователей подобного класса.

4. Оптимальная конфигурация – шестнадцать отверстий с частичным или селективным заполнением – позволяет балансировать между широкой полосой и механической прочностью.

Заключение

При модификации конструкции (сверление отверстий в излучающей накладке):

- с увеличением количества отверстий происходит снижение резонансной частоты и расширение полосы пропускания: от $\Delta f = 4,95$ кГц (21,52%) при четырех отверстиях до $\Delta f = 7,3$ кГц (28,07%) при шестнадцати отверстиях;

- при этом R_w также возрастает, что говорит о повышении диссипативных потерь, связанных с изменением массы и структуры излучающей поверхности.

При заполнении отверстий эпоксидной смолой ЭД-20:

- после заливки смолы без полимеризации наблюдается небольшое сужение полосы и снижение R_w ;

- после полимеризации смолы полоса частот слегка расширяется, а R_w остаётся высоким, что может быть связано с изменением упругих свойств материала.

Таким образом, внесённые изменения в конструкцию преобразователя (увеличение массы подвижной части за счёт заполнения отверстий смолой с порошком вольфрама) позволили достичь расширения рабочего диапазона частот, что является положительным эффектом для широкополосных акустических устройств. Однако это сопровождается увеличением активного сопротивления, что может негативно влиять на эффективность преобразования энергии. Для дальнейшей оптимизации устройства необходимо провести дополнительные исследования по минимизации диссипативных потерь при сохранении расширенного частотного диапазона.

В целом, полученные результаты демонстрируют работоспособность предложенной методики моделирования и экспериментальной проверки параметров акустического преобразователя, а также открывают возможность дальнейших исследований

по улучшению его характеристик.

Список использованных источников

1. Альсайд Х. К. Обзор методов модуляции и применяемых сигналов в гидроакустической связи // Изв. СПбГЭТУ «ЛЭТИ». 2026. Т. 19, № 4. С. 24-40. doi: 10.32603/2071-8985-2026-19-4-24-40.
2. Патент № 119552 U1 Российская Федерация, МПК H04R 1/44, H04R 17/00. ШИРОКОПОЛОСНЫЙ СТЕРЖНЕВОЙ ГИДРОАКУСТИЧЕСКИЙ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЬ : № 201201318/28 : заявл. 13.01.2012; опубл. 20.08.2012 / Степанов Б.Г.; заявитель и патентообладатель Открытое акционерное общество "Концерн "Океанприбор" (RU), Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования "Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет "ЛЭТИ" им. В.И. Ульянова (Ленина)" (RU). – 13 с. : ил. – Текст : непосредственный.
3. Sun H., Lan Y., Lu W. Design of a Modular Low-Frequency Broadband Transducer for Underwater Acoustic Communication // Journal of Physics: Conference Series. – IOP Publishing, 2026. – Vol. 3265. – No. 1. – P. 012015.
4. Dong, H., Li, Y., Li, X., Sang, Y., Chen, Y. A lightweight and small moving coil underwater acoustic transducer based on the optimal design of magnetic circuit // Sensors and Actuators A: Physical. – 2026. – Vol. 397. – P. 117241.
5. Kim J., Kim J., Juwon K. Advances in Langevin piezoelectric transducer designs for broadband ultrasonic transmitter applications // Actuators. – MDPI AG, 2025. – Vol. 14. – No. 7. – P. 355.
6. Степанов Б.Г. Однонаправленные стержневые преобразователи с накладками клиновидной формы. // Известия СПбГЭТУ ЛЭТИ. 2021. № 8. С. 5-14.
7. Hawkins D. W., Gough P. T. Multiresonance design of a Tonpilz transducer using the finite element method // IEEE transactions on ultrasonics, ferroelectrics, and frequency control. – 2002. – Vol. 43. – No. 5. – P. 782-790.
8. Tang, D., Rao, S., Ding, C., Qin, C. Ultrasonic dry-coupling detection with gradient acoustic impedance match layer // Applied Acoustics. – 2025. – Vol. 228. – P. 110355.
9. Butler S. C. Triply resonant broadband transducers, Oceans MTS /IEEE. – 2002. – Vol. 4. – P. 29-31.
10. Butler J. L., Cipolla J. R., Brown W. D. Radiating head flexure and its effect on transducer performance // The Journal of the Acoustical Society of America. – 1981. – Vol. 70. – No. 2. – P. 500-503.
11. Степанов Б.Г. Широкополосные многополуволновые преобразователи //Известия СПбГЭТУ «ЛЭТИ». - 2011. - № 8. - С. 63-71.
12. Muhsen H. K., Pivnev P. P. Hydroacoustic Complex for Studying the Condition of Underwater Engineering Communications of the Cable Network // Int. Ural Conf. on Electrical Power Eng. (UralCon). Magnitogorsk, 2024. P. 1–6. doi: 10.1109/UralCon49858.2024.10224563.
13. Богородский В.В., Зубарев Л.А., Корепин Е.А., Якушев В.И. Подводные электроакустические преобразователи. Расчет и проектирование Ленинград: Судостроение, 1983. – 248 с.
14. Альсайд Х. К., Пивнев П. П., Калюта В. И. Моделирование стержневого пьезокерамического преобразователя для оптимизации его геометрических параметров //

ИЗВ. СПбГЭТУ «ЛЭТИ». 2025. Т. 18, № 10. С. 38-44. doi: 10.32603/2071-8985-2025-18-10-38-44.

References

1. Alsaeed H. K. Review of Modulation Methods and Signals Used in Hydroacoustic Communication // *LETI Transactions on Electrical Engineering & Computer Science*. 2026. Vol. 19, no. 4. P. 24–40. doi: 10.32603/2071-8985-2026-19-4-24-40.
2. Patent No. 119552 U1 Russian Federation, IPC H04R 1/44, H04R 17/00. BROADBAND ROD HYDROACOUSTIC TRANSDUCER: No. 201201318/28 : application 13.01.2012; publ. 20.08.2012 / Stepanov B.G.; applicant and patent holder Open Joint Stock Company ‘Concern ‘Okeanpribor’ (RU), Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Professional Education ‘St. Petersburg State Electrotechnical University ‘LETI’ named after. IN AND. Ulyanov (Lenina)’ (RU). – 13 p. : Ill. – Text: direct.
3. Sun H., Lan Y., Lu W. Design of a Modular Low-Frequency Broadband Transducer for Underwater Acoustic Communication // *Journal of Physics: Conference Series*. – IOP Publishing, 2026. – Vol. 3265. – No. 1. – P. 012015.
4. Dong, H., Li, Y., Li, X., Sang, Y., Chen, Y. A lightweight and small moving coil underwater acoustic transducer based on the optimal design of magnetic circuit // *Sensors and Actuators A: Physical*. – 2026. – Vol. 397. – P. 117241.
5. Kim J., Kim J., Juwon K. Advances in Langevin piezoelectric transducer designs for broadband ultrasonic transmitter applications // *Actuators*. – MDPI AG, 2025. – Vol. 14. – No. 7. – P. 355.
6. Stepanov B.G. Unidirectional rod transducers with wedge-shaped attachments. // *Proceedings of SPbETU "LETI"*. 2021. No. 8. P. 5–14.
7. Hawkins D. W., Gough P. T. Multiresonance design of a Tonpilz transducer using the finite element method // *IEEE transactions on ultrasonics, ferroelectrics, and frequency control*. – 2002. – Vol. 43. – No. 5. – P. 782-790.
8. Tang, D., Rao, S., Ding, C., Qin, C. Ultrasonic dry-coupling detection with gradient acoustic impedance match layer // *Applied Acoustics*. – 2025. – Vol. 228. – P. 110355.
9. Butler S. C. Triply resonant broadband transducers, *Oceans MTS / IEEE*. – 2002. – Vol. 4. – P. 29-31.
10. Butler J. L., Cipolla J. R., Brown W. D. Radiating head flexure and its effect on transducer performance // *The Journal of the Acoustical Society of America*. – 1981. – Vol. 70. – No. 2. – P. 500-503.
11. Stepanov B.G. Broadband multi-half-wave transducers // *Proceedings of SPbETU "LETI"*. – 2011. – No. 8. – P. 63–71.
12. Muhsen H. K., Pivnev P. P. Hydroacoustic Complex for Studying the Condition of Underwater Engineering Communications of the Cable Network // *Int. Ural Conf. on Electrical Power Eng. (UralCon)*. Magnitogorsk, 2024. P. 1–6. doi: 10.1109/UralCon49858.2024.10224563.
13. Bogorodskiy V. V., Zubarev L. A., Korepin E. A., & Yakushev V. I. (1983). Underwater electroacoustic transducers. (Calculation and Design). Handbook. Sudostroenie, 248.
14. Alsaeed H. K., Pivnev P. P., Kalyuta V. I. Modeling of a Rod Piezoelectric Transducer to Optimize Its Geometric Parameters // *LETI Transactions on Electrical Engineering & Computer Science*. 2025. Vol. 18, No. 10. P. 38–44. doi: 10.32603/2071-8985-2025-18-10-38-44.