

МИНОБРНАУКИ РОССИИ

**Федеральное государственное  
бюджетное учреждение науки  
«Санкт-Петербургский  
Федеральный исследовательский центр  
Российской академии наук»  
(СПб ФИЦ РАН)**

14-я линия В.О., д. 39, г. Санкт-Петербург, 199178  
Тел.: (812) 328-33-11, факс: (812) 328-44-50,  
e-mail: info@spcras.ru, web: http://www.spcras.ru  
ОКПО 04683303, ОГРН 1027800514411,  
ИНН/КПП 7801003920/780101001

Ученому секретарю  
диссертационного совета  
24.2.38.02 (Д 212.238.06)  
при СПбГЭТУ «ЛЭТИ»  
Л.Н.Подгорной

ул. Профессора Попова, 5  
197376, Санкт-Петербург

04.02.2022 № 60.01-01/103

На № \_\_\_\_\_ от \_\_\_\_\_

## ОТЗЫВ

на автореферат диссертации Степанова Бориса Георгиевича, выполненной на тему:  
«Сверхширокополосные, однонаправленные пьезопреобразователи с функциональным секционированием и амплитудно-фазовым возбуждением для гидросред», представленной на соискание ученой степени доктора технических наук по специальности 1.3.7 – «Акустика», технические науки

В диссертационной работе Степанова Б.Г. рассматриваются новые принципы функционального построения и возбуждения гидроакустических преобразователей, которые могут входить в состав антенн различных гидроакустических систем: для подводного наблюдения, поиска и классификации объектов, океанографических исследований, навигации, обеспечения морской геологии и подводных промыслов и многих других. Согласно сформулированным цели и задачам исследования, в диссертационной работе можно выделить два основных направления: разработка сверхширокополосных преобразователей с полосой пропускания порядка 2–3 октав и возможностью формирования коротких, перестраиваемых по частоте, или структурно сложных акустических сигналов, а также – однонаправленных безэкранных преобразователей с обеспечением полной компенсации (минимизации до заданного уровня) тыльного излучения в достаточно широкой полосе частот. При этом основным средством по достижению поставленной цели являются решения задач синтеза (задаются полевые характеристики и определяются параметры возбуждения) для предложенных автором вариантов построения и возбуждения гидроакустических

преобразователей. Оба указанных направления в построении гидроакустических преобразователей уже многие годы являются актуальными.

Как следует из автореферата, в диссертационной работе автор выносит на защиту восемь научных положений (научных результатов), существо которых определяется решенными задачами исследования. В диссертационной работе Степанова Б.Г. рассмотрены и решены следующие задачи.

На базе общего решения задачи о колебаниях армированного стяжкой преобразователя с амплитудно-фазовым возбуждением (ПАФВ) отдельных частей (секций) его пьезостержня рассмотрены вопросы построения широкополосных стержневых преобразователей. Для ПАФВ, пьезостержень которого электрически разделен на две части (секции), сформулирована и решена задача синтеза, основанная на задании равномерной амплитудно-частотной характеристики (АЧХ) и линейной фазо-частотной характеристики (ФЧХ) излучения, что позволяет получить полосу пропускания порядка 2 октав, которая может смещаться по оси частот в зависимости от соотношения длин частей (секций) пьезостержня и перекрыть полосу частот в 3 октавы. При возбуждении такого ПАФВ согласно решению задачи синтеза (реализуется с использованием цифро-аналогово преобразования) можно формировать короткие (1–1.5 периодов колебаний) перестраиваемые по частоте акустические импульсы и более сложные по структуре сигналы, вид которых не зависит от параметров накладок преобразователя. При использовании более простых задаваемых частотных зависимостей амплитуд и фаз возбуждающих электрических напряжений (задача анализа), реализуемых с помощью аналоговой аппаратуры, тоже может быть получено широкополосное излучение порядка 1.5 октав, но это сопряжено с проявлением резонанса единой армирующей стяжки, который ограничивает полосу пропускания ПАФВ. В работе предложен способ устранения резонансных свойств армирующей стяжки в рабочем диапазоне широкополосных ПАФВ путем установки дополнительных кольцевых перемычек требуемой жесткости. Экспериментальные исследования для разных макетов ПАФВ и антенн, составленных из них, подтверждают результаты выполненных расчетов как в части управления АЧХ излучения ПАФВ и получения широкой (до 2 октав) полосы пропускания, так и

возможности формирования перестраиваемых по частоте коротких акустических импульсов и более сложных по структуре акустических сигналов (на примере эхолокационных и коммуникационных сигналов дельфинов). В работе рассмотрена также возможность увеличения уровня излучения ПАФВ путем использования ряда противофазно включенных пьезостержней, каждый из которых дополнительно электрически разделен на две части, возбуждаемых согласно решению задачи синтеза для обеспечения работы в широкой полосе частот или компенсации тыльного излучения.

На базе двухсекционных стержневых ПАФВ рассмотрены два, предложенных автором, варианта построения безэкранных однонаправленных гидроакустических преобразователей. Первый вариант основан на условии торможения тыльного торца пьезостержня, позволяющий закреплять преобразователь за этот торец, а второй – на условии компенсации излучения от тыльной поверхности фронтальной накладкой и тыльного торца ПАФВ. Приводится решение соответствующих граничных задач, результаты расчетов и их анализ, а также данные экспериментальных исследований макетов антенн, составленных из ПАФВ с компенсацией тыльного излучения, подтверждающие результаты расчетов. На примере двухсекционного ПАФВ рассмотрена также возможность компенсации упругих смещений в заданном поперечном сечении его пьезостержня с целью установки там крепления.

Для работы в более высокочастотном диапазоне частот (сотни кГц и выше) рассмотрен вариант пластинчатого ПАФВ в виде двух пьезопластин, между которыми находится промежуточный пассивный слой, а их внешние поверхности нагружены на произвольные входные импедансы. Для этого ПАФВ решена задача синтеза по обеспечению равномерной АЧХ и линейной ФЧХ излучения и проведен анализ влияния его конструктивных параметров и характера нагруженности на частотные зависимости отношения амплитуд и разности фаз двух возбуждающих электрических напряжений. Показана возможность получения полосы пропускания порядка 2.5 октав, которая может смещаться по оси частот в зависимости от соотношения толщин пьезопластин и промежуточного пассивного слоя, а также возможность излучения

этим ПАФВ коротких, перестраиваемых по частоте акустических импульсов, форма которых не зависит от параметров промежуточного и внешних пассивных слоев.

Для стержневых и пластинчатых ПАФВ проанализированы результаты расчетов распределения упругих смещений и механических напряжений в пьезоактивных частях этих преобразователей для разных вариантов их построения и возбуждения. Получающиеся значения смещений и напряжений меньше, чем при синфазном возбуждении этих преобразователей. На примере стержневого ПАФВ, возбуждаемого согласно решению задачи синтеза, рассмотрен характер изменения импульсов в поперечных сечениях пьезоэлементов при возбуждении ПАФВ однопериодным импульсом.

Другим вариантом обеспечения сверхширокополосного излучения является предложенный автором преобразователь волноводного типа (ПВТ) в виде соосного набора  $N$  идентичных пьезоцилиндров, разделенных по торцам тонкими акустически гибкими кольцевыми прокладками и возбуждаемых электрическими напряжениями, обеспечивающими режим бегущей волны в заполненной жидкостью полости ПВТ. Такой способ возбуждения приводит к минимизации излучения в тыльном направлении. Рассмотрены три расчетные модели ПВТ, отличающиеся характером излучения: 1) в соосные волноводы (вариант близкий к работе ПВТ в составе антенне), 2) в полупространства (работа одиночного ПВТ), 3) в перестраиваемые по углу раскрытия конусные полупространства (модель обобщающая две предыдущие). Для каждой модели ПВТ решены граничные задачи и получены необходимые расчетные соотношения по определению звуковых давлений внутри и вне ПВТ, собственных и вносимых сопротивлений излучения пьезоцилиндров (для двух последних моделей с учетом отраженных от его апертур волн). Основной анализ проведен для случая возбуждения согласно решению задачи синтеза, основанного на условии постоянства амплитуд колебательной скорости пьезоцилиндров во всем рабочем диапазоне частот ПВТ, обеспечивающий полосу пропускания порядка 3 октав. Для первой модели ПВТ рассмотрены еще три варианта возбуждения его пьезоцилиндров (задачи анализа): с использованием линейно увеличивающихся с ростом номера пьезоцилиндра амплитуд возбуждающих электрических напряжений

и дополнительного использования одного общего или  $N$  корректирующих фильтров. Выполненные экспериментальные исследования макетов антенн, составленных их ПВТ, показали вполне удовлетворительное соответствие результатам расчетов для всех вариантов построения и возбуждения ПВТ. Наилучшим образом описывает в гармоническом и импульсном режимах работы ПВТ его обобщенная модель. Теоретически и экспериментально показана возможность формирования с помощью ПВТ перестраиваемых по частоте коротких акустических импульсов и более сложных по структуре акустических сигналов (на примере эхолокационных и коммуникационных импульсов дельфинов).

Для различных вариантов построения и возбуждения стержневых, пластинчатых и волноводных ПАФВ проведен анализ результатов расчета частотных зависимостей входной электрической проводимости, ее активной и реактивной компонент, а также – электроакустического коэффициента полезного действия (КПД), который для стержневых и пластинчатых ПАФВ составляет 70–90% и оказывается несколько меньше, чем при синфазном их возбуждении, а для ПВТ – в среднем составляет 40–60 %.

Другой принцип обеспечения однонаправленного излучения (приема) используется при построении безэкранных преобразователей с клиновидными накладками на базе стержневых и кольцевых (дисковых) пьезоэлементов. Тыльная поверхность этих преобразователей выполняется плоской и параллельной направлению колебаний пьезоактивного элемента, а его рабочая (фронтальная) поверхность является выпуклой, на которой имеется нормальная компонента колебательной скорости, приводящая к излучению (приему) звуковых волн. Результаты экспериментальных исследований с разными формами рабочей поверхности преобразователей показал, что уровень тыльного излучения не превышает 5–10% по звуковому давлению. Система из двух идентичных осесимметричных преобразователей на базе кольцевых (дисковых) пьезоэлементов, построенная так, что плоские основания преобразователей обращены друг к другу, позволяет в зависимости от характера включения пьезоэлементов формировать в

режимах излучения и приема ХН монопольного, дипольного типа и кардиоидного типа.

Таким образом, в диссертационной работе Степанова Б.Г. проведено достаточно полное, всестороннее исследование полевых и нагрузочных (акустических и электрических) характеристик, предложенных автором сверхширокополосных и однонаправленных безэкранных преобразователей, которое имеет научную и практическую значимость. Использование сверхширокополосных преобразователей (антенн) и сложно структурированных сигналов позволит повысить функциональность, скрытность, разрешающую способность и информативность гидроакустических систем особенно в условиях сложной помеховой обстановки, а отказ от дополнительных экранирующих элементов – существенно уменьшить массо-габаритные параметры антенн.

Достоверность выполненных в диссертации исследований обеспечивается корректной постановкой и решением задач, сопоставлением частных случаев полученных решений с известными результатами других авторов (например, синфазное возбуждение пьезостержней и пьезопластин), а также подтверждением основных результатов выполненных расчетов достаточно многочисленными данными экспериментов.

По содержанию автореферата можно сделать следующие замечания:

1. Для пластинчатых ПАФВ, в отличие от других типов преобразователей, не приведены результаты экспериментальных исследований.

2. Не ясно, каким образом учитывается влияние гибких прокладок в колебательной системе волноводного преобразователя и проявляются ли продольные резонансы.

3. Возбуждение ПАФВ и ПВТ осуществляется разными по амплитуде и фазе электрическими сигналами. Из текста автореферата неясно, учитывается ли влияние наводки этих сигналов друг на друга.

4. Было бы полезно указать (например, в заключении) направления дальнейших исследований и применений полученных результатов.

Указанные замечания не уменьшают ценности выполненных исследований. В целом, по итогам изучения автореферата и с учетом списка публикаций автора по теме диссертации, можно судить о достаточно большой проделанной им работе. Диссертационная работа Степанова Бориса Георгиевича представляет собой законченную научно-квалификационную работу, имеющую внутреннюю логику и единство, содержащую решения ряда научно-технических задач, имеющих важное значение для развития экономики и обороноспособности страны.

Содержание и уровень диссертации на тему «Сверхширокополосные, однонаправленные пьезопреобразователи с функциональным секционированием и амплитудно-фазовым возбуждением для гидросред» соответствует п. 9 «Положения о присуждении ученых степеней», утвержденного Постановлением Правительства Российской Федерации от 24.09.2013 года № 842 (в ред. Постановлений Правительства РФ от 21.04.2016 N 335, от 02.08.2016 N 748, от 29.05.2017 N 650, от 28.08.2017 N 1024), а ее автор, Степанов Борис Георгиевич, заслуживает присуждения учёной степени доктора технических наук по специальности 1.3.7 – «Акустика», технические науки.

Отзыв составил:

Ведущий научный сотрудник СПб ФИЦ РАН,  
доктор технических наук, профессор

« 4 » февраля 2022г.

 /Ивакин Ян Альбертович/

Подпись Ведущего научного сотрудника СПб ФИЦ РАН, доктора технических наук, профессора Ивакина Яна Альбертовича заверяю.

Ученый секретарь СПб ФИЦ РАН

кандидат технических наук

 2022г.



Зайцева А.А.