

К ВОПРОСУ О РАЦИОНАЛЬНОМ ВЫБОРЕ ФОРМЫ ДЕМПФЕРА УЛЬТРАЗВУКОВОГО ПЬЕЗОПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ

© 2024 г. М.С. Вечёра^{1,*}, С.И. Коновалов^{2,**}, Р.С. Коновалов^{2,3,***},
I. B. Ch.^{4,****}, В.М. Цаплев^{2,*****}

¹ООО «Константа УЗК», Россия 198097 Санкт-Петербург, Огородный пер., 21

²Санкт-Петербургский государственный электротехнический
университет «ЛЭТИ» им. В. И. Ульянова (Ленина),

Россия 197022 Санкт-Петербург, ул. Профессора Попова, 5

³Петербургский государственный университет путей сообщения Императора Александра I,
Россия 190031 Санкт-Петербург, Московский пр-т, 9

⁴School of Mechanical Engineering, Changwon National University

51140 Changwon, Changwon National University Road 20, Republic of Korea

E-mail: *vms@constanta.ru; **sikonov@etu.ru; ***rskonov@etu.ru;

****ee.boris@changwon.ac.kr; *****valery@convergences-fr.ru

Поступила в редакцию 15.02.2024; после доработки 22.03.2024

Принята к публикации 05.04.2024

Представлены результаты исследования влияния геометрической формы демпфера на эффективность его работы и эффективность работы системы излучения—приема «в целом». Рассмотрена одна из возможных форм демпфера, когда он выполняется в виде усеченного конуса, образующая которого имеет угол наклона по отношению к плоскости пьезопластины. Предложен критерий оценки эффективности работы демпфера. В работе приведены результаты расчетно-теоретического (методом конечных элементов) и экспериментального исследований влияния угла наклона образующей демпфера на сигнал, отраженный от его тыльной части. Определен угол наклона образующей, при котором достигается минимум паразитных сигналов. Осуществлено исследование системы излучения—приема при нагрузке на водную среду. Отмечено удовлетворительное совпадение результатов теоретических и экспериментальных исследований.

Ключевые слова: акустический неразрушающий контроль, моделирование, пьезоэлектрический преобразователь, пьезопластина, демпфер.

ABOUT THE RATIONAL CHOICE OF THE DAMPER SHAPE FOR AN ULTRASONIC PIEZOELECTRIC TRANSDUCER

© 2024 M.S. Vechera^{1,*}, S.I. Kononov^{2,**}, R.S. Kononov^{2,3,***},
I.B. Ch.^{4,****}, V.M. Tsaplev^{2,*****}

¹LLC «Constanta US», Russia 198097 Saint Petersburg, Ogorodny Lane 21

²Saint Petersburg Electrotechnical University «LETI»,

Russia 197022 Saint Petersburg, Prof. Popova, 5

³Emperor Alexander I St. Petersburg State Transport University,

Russia 190031 Saint Petersburg, Moskovsky pr., 9

⁴School of Mechanical Engineering, Changwon National University, 51140 Changwon, Changwon National
University Road 20, Republic of Korea

E-mail: *vms@constanta.ru; **sikonov@etu.ru; ***rskonov@etu.ru; ****ee.boris@changwon.ac.kr;

*****valery@convergences-fr.ru

The results of the study on the influence of the geometric shape of the damper on its effectiveness and the overall efficiency of the radiation-reception system are presented. One of the possible forms of the damper is considered, where it is shaped like a truncated cone, and its generatrix has an inclination angle relative to the plane of the piezoplate. A criterion for evaluating the efficiency of the damper's operation is proposed. The study includes the results of computational-theoretical (using the finite element method) and experimental research on the influence of the incline angle of the damper's generatrix on the signal reflected from its rear part. The inclination angle of the generatrix, at which the minimum of parasitic signals is achieved, is determined. The radiation-reception system is investigated under water loading, and a satisfactory agreement between the theoretical and experimental results is noted.

Key words: acoustic non-destructive testing, modeling, piezoelectric transducer, piezoplate, damper.

DOI: 10.31857/S0130308224040017

ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время акустический неразрушающий контроль используется практически во всех отраслях промышленности. Это объясняется целым рядом достоинств, присущих данному методу контроля (возможность применения по отношению к широкому классу материалов, безопасность для персонала, возможность осуществления контроля при одностороннем доступе к изделию, относительные простота и дешевизна и т.д.). При всем разнообразии методов и средств акустического контроля материалов, изделий и полуфабрикатов, их объединяет наличие конструктивных элементов, предназначенных для излучения и приема звуковых волн. Эти элементы (преобразователи) могут строиться на различных физических принципах. В данное время наибольшее распространение получили пьезоэлектрические преобразователи (ПЭП). Они представляют собой сложную многослойную конструкцию, в состав которой, помимо пьезоактивного элемента (например, пьезокерамической или пьезокварцевой пластины), входят защитный слой (протектор), клеевые и контактные слои и т.п. При этом необходимо отметить, что с тыльной стороны пьезокерамический элемент обычно имеет демпфер. Он является одним из важнейших конструктивных элементов ПЭП и предназначается для расширения полосы пропускания пьезопреобразователя и снижения длительности переходных процессов в нем. Механическое демпфирование позволяет подавлять инерционные свойства ПЭП [1—13]. Необходимо отметить, что демпфер эффективно работает лишь в том случае, когда вносимые им в колебательную систему потери имеют чисто активный характер. Это достигается, когда исключается влияние сигналов, отражающихся от его тыльной стороны. Вследствие этого материал демпфера должен иметь большой коэффициент затухания ультразвуковых волн. Кроме того, он должен еще иметь и высокий удельный акустический импеданс. Довольно часто на тыльной стороне демпфера делаются бороздки, углубления, выпуклости и т.д., благодаря чему волны, попадающие на них, рассеиваются и проходят значительное расстояние в толще демпфера. Это приводит к значительному их затуханию.

Авторами настоящей работы проведен анализ литературных данных, касающихся исследований, направленных на совершенствование демпферов ПЭП. Следует отметить, что большинство публикаций связано с предложениями по созданию новых технологий их изготовления. Так, можно отметить, что в наши дни наиболее часто применяются ПЭП с демпферами, изготовленными на основе использования порошковых наполнителей, когда в связующую массу вводятся порошки тяжелых металлов, например, вольфрама [9, 10]. Параметры материалов, применяемые в этих разработках, представлены в указанных публикациях. Применение составных наполнителей (например, введение помимо порошкового наполнителя еще и резиновой крошки) влечет за собой повышение эффективности работы демпфера [10]. Довольно часто [9, 10] тыльная сторона демпфера может выполняться сферической формы (при этом центр сферы смещен относительно оси демпфера). Это способствует устранению влияния отраженных волн. В [10] представлены также данные, касающиеся демпферов профилированного типа, имеющих различную форму торцевой поверхности, а также демпферы сложной формы. Примером демпфера указанного типа является конструкция, сочетающая рупорную часть и шар с выборкой в верхней его части. Недостатком демпферов такого типа является их способность эффективно работать лишь с пластинами конкретных геометрических размеров. Их изменение влечет за собой необходимость осуществления нового подбора формы конуса и размеров других элементов демпфера.

Стоит упомянуть также работы [14, 15], направленные на описание технологии изготовления демпферов ПЭП. Так, в [14] предложено делать это путем помещения пьезопластины в литьевую форму с последующей заливкой ее расплавом демпфирующего материала с наполнителем, дальнейшим охлаждением и отверждением всей массы. При этом достаточно трудно достичь удельного акустического импеданса, который был бы близок к его значению у пьезокерамики. Данный факт находит объяснение в том, что увеличение удельного акустического импеданса демпфера требует увеличения процентного содержания наполнителя. При этом увеличивается вязкость и неоднородность всей массы. Такое изменение свойств материала может вести к снижению повторяемости характеристик ПЭП. Способ изготовления ПЭП, близкий к описанному, предложен в [15]. Здесь на тыльную сторону пластины насыпается слой наполнителя и заливается связующим составом с дальнейшим охлаждением.

Упомянутые недостатки отсутствуют при изготовлении демпфера способом, изложенным в [16]. Здесь демпфер представляет собой двуслойную композицию. Нижний слой является собой тонкий слой эпоксидной смолы с порошком вольфрама, а верхний — композицию полиуретана с тем же порошком. При изготовлении верхнего слоя применяется центрифугирование, что позволяет добиться плавного изменения удельного акустического импеданса по высоте демпфера. При

этом его максимальное значение наблюдается в области, близкой к пьезокерамике. К недостаткам данной конструкции, вероятно, стоит отнести наличие верхнего слоя, поскольку это ведет к увеличению габаритов демпфера.

Способ изготовления демпфера на основе применения легкоплавких металлов (сплавы Вуда или Розе) описан в [17]. Эти материалы имеют удельный акустический импеданс, близкий к его значению у пьезокерамики. Эти сплавы наносят на тыльную сторону пластины и осуществляют нагрев до температуры их плавления. На поверхности пластины формируется сплошной слой материала. Далее нагрев прекращается и на расплав осуществляется воздействие давлением. В результате формируется демпфер с неоднородной структурой, обладающий высоким затуханием. Недостаток описанной конструкции связан с трудностями получения ПЭП с идентичными характеристиками.

Для изготовления демпферов ПЭП с высокой повторяемостью параметров может использоваться не только центрифугирование [16], но и вибровоздействие [18]. С этой целью корпус ПЭП с демпфирующим материалом помещается на вибростенд, что способствует уплотнению массы. Результатом этого является сосредоточение тяжелых частиц вольфрама вблизи пьезопластины.

Анализ научно-технической литературы за значительный временной период позволяет авторам данной статьи сделать вывод о том, что основные усилия авторов существующих публикаций были направлены на совершенствование технологии изготовления демпферов. При этом исследованиям влияния формы демпфера на улучшение его свойств внимания уделено существенно меньше. Задача данной статьи состоит в стремлении ее авторов в какой-то мере восполнить этот пробел. С этой целью в работе рассмотрен демпфер, имеющий форму усеченного конуса. Совершенно очевидно, что угол наклона образующей конуса будет влиять на свойства демпфера и, в конечном счете, на свойства ПЭП. Описанию результатов теоретических и экспериментальных исследований, направленных на определение геометрических параметров такого демпфера, позволяющих ему работать с максимальной эффективностью, посвящена настоящая работа.

1. ИССЛЕДОВАНИЕ РАСПРОСТРАНЕНИЯ УЛЬТРАЗВУКОВЫХ ВОЛН В МАТЕРИАЛЕ ДЕМПФЕРА

Постановку задачи исследования распространения ультразвуковых волн в толще демпфера можно сформулировать следующим образом. На рис. 1 представлена пьезоэлектрическая пластина, тыльная сторона которой контактирует с демпфером. Здесь d — толщина пьезопластины, равная 0,8 и 1,6 мм для частот 2,5 и 1,25 МГц соответственно. Образующая конуса имеет угол наклона α по отношению к плоскости пластины. Форма демпфера в виде усеченного конуса выбирается, исходя из априорного предположения о том, что это способствует увеличению пути прохождения волны в материале демпфера вследствие многочисленных отражений ее в материале демпфера. Совершенно очевидно, что эффективность работы демпфера будет зависеть от величины угла α . Задача состоит в определении оптимального значения α . Под оптимальным углом будем понимать угол, при котором волны, поступающие на пластину l в результате отражений от стенок демпфера, будут минимальными.

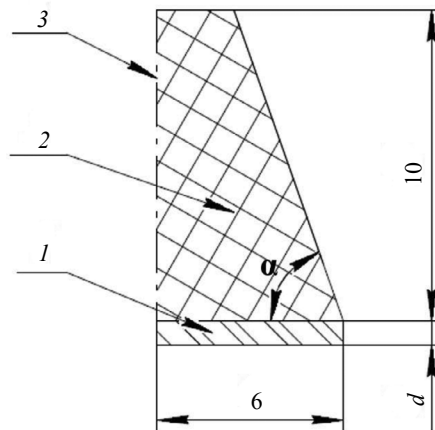


Рис. 1. Схема, поясняющая постановку задачи, где 1 — круглая пьезопластина; 2 — демпфер; 3 — ось симметрии.

Решение поставленной задачи осуществлялось в два этапа — теоретически, путем проведения численного эксперимента в программе COMSOL, и натурным моделированием с последующим сравнением результатов, полученных на каждом из этапов.

При проведении теоретических и экспериментальных исследований в качестве материала пьезопластины была выбрана керамика ЦТС-19. Ее параметры приведены в [19]. Материал демпфера представляет собой смесь модифицированной эпоксидной смолы КДА с отвердителем ЭТАЛ-45М и наполнителем. В качестве наполнителя использован мелкодисперсный порошок вольфрама ПВ-1 со средним размером частиц 0,8—1,7 мкм, изготовленный по ТУ 14-22-143-2000 (1:1 по массе, причем массовая доля смолы указана с учетом отвердителя).

Таблица 1

Параметры демпфера

Скорость продольной волны c_p , м/с	Скорость поперечной волны c_p , м/с	Плотность ρ , кг/м ³	Затухание продольных волн δ_p , дБ/мм	Затухание поперечных волн δ_p , дБ/мм
2083±36	950±25	2218±45	На частоте 1,25 МГц 0,7±0,05	На частоте 1,25 МГц 1,0±0,06
			На частоте 2,5 МГц 0,75±0,03	На частоте 2,5 МГц 2,5±0,08

Параметры демпфера, знание которых необходимо для проведения расчета, определялись экспериментально. Для этого применен прецизионный измеритель скорости распространения и затухания продольных и поперечных волн производства МГНИВП «Акустика», использующий пьезопреобразователи на основе активного элемента из ниобата лития, с резонансными частотами 1,25 и 2,5 МГц. Система излучения—приема осесимметрична, а сама установка включает генератор импульсов и осциллограф. Измерение затухания проведено на основе определения соотношения амплитуд максимумов импульсных сигналов с двух сторон от плоскопараллельных образцов демпфера, а скорость продольных и поперечных волн — путем измерения времени прохождения импульсного сигнала через образцы.

Результатом этого эксперимента стало получение параметров демпфера, приведенных в табл. 1.

В процессе проведения теоретических и экспериментальных исследований пластина возбуждалась сигналом в виде однопериодного меандра с амплитудой $U_{\text{вх}} = 200$ В с длительностью, равной $\tau = 1/f_0$, где f_0 — резонансная частота пьезопластины.

ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ

На рис. 1 показана исходная геометрическая схема, принятая для теоретического решения поставленной задачи методом конечных элементов в программе COMSOL Multiphysics 6.1. Конкретные геометрические размеры пластины и высота демпфера приведены на рисунке. Необходимо отметить, что геометрия рассматриваемой задачи осесимметрична. Вследствие этого показана лишь половина модели. Усеченный конус с углом $\alpha = 90^\circ$ вырождается в цилиндр.

Для моделирования работы пьезопреобразователя использовались модули Solid Mechanics, Electrostatic и мультифизический модуль Piezoelectric effect для описания распространения упругих волн в пьезопластине. Для описания электрической цепи, подключенной к пьезоэлементу, использован модуль Electrical circuit. Размер сетки выбирался из критерия Куранта—Фридрихса—Леви [20], который устанавливает зависимость между пространственным Δx и временным шагами Δt и скоростями распространения продольных c_l или поперечных c_t волн:

$$KFL = \frac{\Delta t}{\Delta x} c_{l,t}. \quad (1)$$

В данной модели пространственный шаг равен одной двенадцатой длины волны на центральной частоте, коэффициент $KFL = 0,1$, а в качестве скорости волны выбрана скорость поперечной волны, так как на одной и той же частоте длина поперечной волны меньше, чем у продольной. Сетка состоит из 7800 элементов (меняется в зависимости от угла) и 74396 степеней свободы, а временной шаг из выражения (1) составляет 7 мкс. Угол α при расчете варьировался от 60 до 90° с шагом 2°.

Для оценки эффективности работы демпфера можно предложить критерий, заключающийся в следующем: если возбудить пластину электрическим сигналом заданной амплитуды и длительности, то в толщу демпфера будут излучены ультразвуковые волны. Отражение данных волн может быть зарегистрировано этой же пластиной, что приведет к возникновению электрического сигнала на электродах пьезоэлемента. Соотношение амплитуд двух указанных сигналов для различных значений угла α позволит определить интересующую нас зависимость.

В результате численного моделирования получена зависимость, представленная на рис. 2. Она показывает отношение амплитуд электрических напряжений $(U_{\text{ВЫХ}} / U_{\text{ВХ}})_\alpha$ на пьезоэлементе для отраженного от тыльной стороны демпфера сигнала $U_{\text{ВЫХ}}$ к поданному на пьезоэлемент $U_{\text{ВХ}}$, в зависимости от угла наклона боковой стенки демпфера α (образующей усеченного конуса), и нормирована к единице путем деления на $(U_{\text{ВЫХ}} / U_{\text{ВХ}})_{\alpha=90^\circ}$ при $\alpha = 90^\circ$. По оси абсцисс отложены значения угла наклона образующей (в градусах), по оси ординат — коэффициент

$$A = \frac{(U_{\text{ВЫХ}} / U_{\text{ВХ}})_\alpha}{(U_{\text{ВЫХ}} / U_{\text{ВХ}})_{\alpha=90^\circ}}.$$

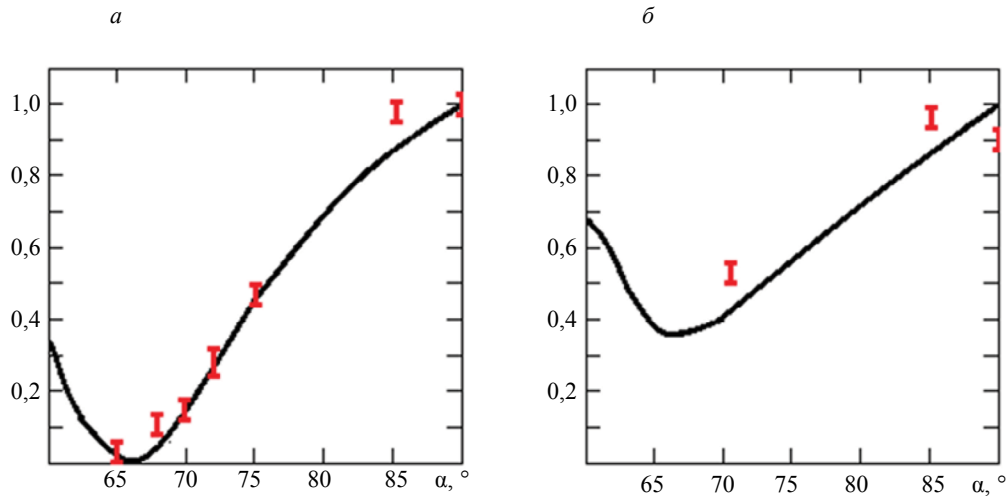


Рис. 2. Изменение коэффициента A в зависимости от угла наклона α для частоты возбуждения 2,5 МГц (а) и для частоты возбуждения 1,25 МГц (б).

Данные, представленные на рисунке, свидетельствуют о том, что наилучшего результата можно добиться при $\alpha = 64-66^\circ$ на частоте 2,5 МГц. Действительно, при этом значении угла α коэффициент A достигает величины 0,0001. Для сравнения можно привести данные из этого же рис. 2а: при $\alpha = 60^\circ$ и $\alpha = 70^\circ$ значения A составляют 0,33 и 0,14 соответственно. В случае возбуждения пьезоэлемента на частоте 1,25 МГц (рис. 2б) оптимальным значением является $\alpha = 66^\circ$, при котором $A = 0,36$.

Анализ данных, приведенных на рис. 2, позволяет утверждать, что при $\alpha = 64-66^\circ$ можно получить наилучший результат с точки зрения достижения минимума амплитуд отраженных волн.

Для более детального изучения процессов, происходящих в демпфере, представляет интерес рассмотреть выходное электрическое напряжение на электродах пьезоэлемента в зависимости от времени. Для этого в программе COMSOL Multiphysics 6.1 применен интерфейс Electrical Circuit для моделирования электрических токов и напряжений. С электрода пьезоэлемента, используя функцию Terminal, фиксируется выходное электрическое напряжение. На рис. 3 представлены временные зависимости формы электрического напряжения $U_{\text{ВЫХ}}$ на выходе пьезопластины при нескольких значениях угла наклона образующей α .

Если рассматривать динамику изменения амплитуд сигналов, снимаемых с электродов пьезопластины, в зависимости от угла α на частоте 2,5 МГц (рис. 3е—ж), то можно сделать вывод о существовании некоторого значения угла α , при котором демпфер работает наиболее эффективно. Изменение α от 60 до 66° приводит к тому, что сигналы 1 и 2 при достижении $\alpha = 64-66^\circ$ практически исчезают. Уровень переотраженных волн также снижается до величины, близкой к нулю. Дальнейший рост α в диапазоне от 66 до 90° влечет за собой повышение амплитуд сигналов, воз-

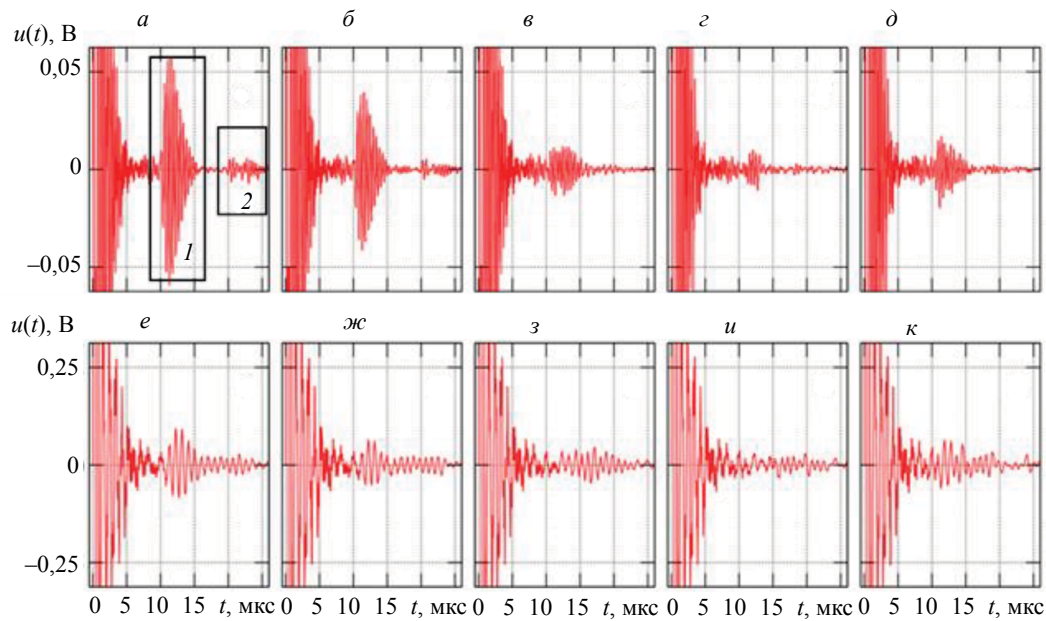


Рис. 3. Выходное напряжение на пьезоэлементе на частоте возбуждения 1,25 МГц при углах наклона α , равных: a — 60° ; b — 62° ; b — 64° ; z — 66° ; d — 68° и на частоте 2,5 МГц при углах наклона α , равных: e — 60° ; $ж$ — 62° ; $з$ — 64° ; $и$ — 66° ; $к$ — 68° . 1 — сигнал, отраженный от тыльной части демпфера; 2 — сигнал, вызванный переотражением внутри демпфера.

никающих вследствие многократных переотражений внутри демпфера. На частоте 1,25 МГц (рис. 3а—д) наблюдаются сходные процессы. При этом амплитуды сигналов выше, чем в случае возбуждения на частоте 2,5 МГц, хотя и уровень помех выше, что может свидетельствовать о более слабом затухании переотраженных и трансформированных в демпфере волн.

Увеличение амплитуды сигнала, вызванного переотражением внутри демпфера, при углах $\alpha < 64$ — 66° можно объяснить тем, что ультразвуковые волны испытывают отражения в сторону активного элемента не только от тыльной части демпфера, но и от его боковых стенок. Действительно, анализ фронтов сигналов в демпфере показал, что при углах $\alpha < 64$ — 66° сигнал не испытывает многократных переотражений от образующей демпфера.

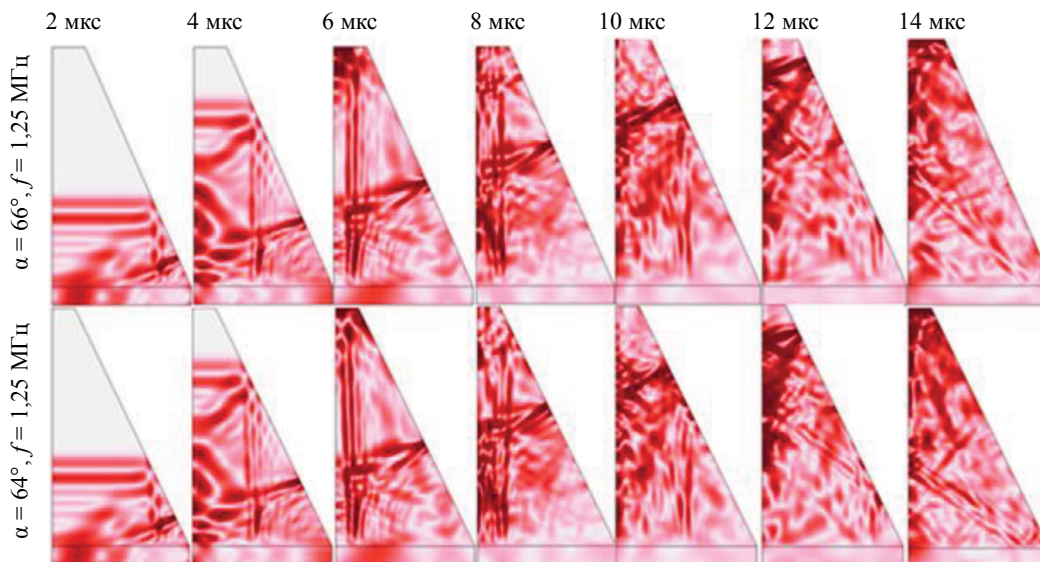


Рис. 4. Изменение фронта сигнала в зависимости от времени для частоты 1,25 МГц при углах $\alpha = 64^\circ$ и $\alpha = 66^\circ$.

В качестве примера на рис. 4 показано изменение фронта сигнала в зависимости от времени для частоты 1,25 МГц при углах $\alpha = 64^\circ$ и $\alpha = 66^\circ$. Более темным цветом показаны зоны большего звукового давления. С интервалом в 2 мкс показана динамика изменения звукового давления в демпфере. Можно видеть, что в момент времени, соответствующий 2 мкс от момента начала излучения сигнала пьезопластиной, фронт достигает приблизительно середины высоты демпфера, а при 6 мкс — его тыльной стороны. Далее начинаются многократные переотражения в толще демпфера (см. изображения, соответствующие времени 6—14 мкс). Видно, что область максимального звукового давления сосредоточена не вблизи поверхности пьезопластины, а вблизи тыльной поверхности демпфера, в отличие от случаев, при которых $\alpha < 64\text{—}66^\circ$ или $\alpha > 64\text{—}66^\circ$. Данный факт является иллюстрацией того, что максимальная эффективность конусного демпфера достигается при наклоне образующей конуса $\alpha = 64\text{—}66^\circ$.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ

Для экспериментальной проверки расчетных результатов были использованы пьезоэлементы из материала ЦТС-19 с номинальными частотами 2,5 и 1,25 МГц диаметром 12 мм. С целью минимизации погрешностей, связанных с отличием параметров каждого отдельного пьезоэлемента в партии, все пьезоэлементы, используемые для изготовления опытных образцов, были отобраны в группы по значениям резонансной частоты и емкости. Девияция резонансных частот в эксперименте была не более ± 10 кГц от средней в группе, а емкости — не более 30 % от средней.

Изготовление опытных образцов производилось с использованием оснастки по технологии 3D-печати из водорастворимого пластика PVA. Оснастка представляла собой литьевую форму в виде усеченного конуса с отверстием сверху для заливки демпфирующей массы. Основанием формы являлась окружность с радиусом, равным радиусу используемых пьезопластин. К преимуществам подобной технологии изготовления можно отнести дешевизну, скорость изготовления форм, отсутствие технологических затрат на изготовление форм, возможность печати в автоматическом режиме и отсутствие необходимости в осуществлении постоянного контроля производственного процесса. Кроме того, при помощи 3D-принтера можно изготовить форму любого размера и конфигурации.

Демпфирующий состав после дегазации разливался в формы. По истечении 48 ч формы с полимеризованным демпфером помещались в воду для растворения оснастки.

По описанной технологии было изготовлено 30 образцов с применением пьезопластин с частотой 2,5 МГц и 9 образцов — с частотой 1,25 МГц.

На основе использования пластин с рабочей частотой 2,5 МГц были изготовлены образцы с наклоном образующей конуса $90, 85, 75, 72, 70, 68, 66^\circ$. Образец с каждым отдельным углом наклона стенки изготавливался в трех экземплярах. Это делалось для предотвращения случайных ошибок при изготовлении.

На основе использования пьезопластин с рабочей частотой 1,25 МГц были изготовлены образцы с наклоном образующей конуса $90, 85, 70^\circ$. Образцы также были изготовлены в трех экземплярах.

Изготовленные пьезопреобразователи, аналогично тому как это делалось при проведении теоретических исследований, возбуждались сигналом в виде однопериодного меандра на частоте резонанса пьезопластин с амплитудой 200 В с применением дефектоскопа общего назначения UCD-50. С цифрового выхода дефектоскопа фиксировались осциллограммы сигналов от задней свободной стенки демпфера при помощи программного обеспечения (ПО) UdOscill. Изменение отношения максимальной амплитуды сигнала, отраженного от тыльной стенки демпфера, к амплитуде зондирующего сигнала, в зависимости от угла наклона образующей конуса, приведено на рис. 2 (см. красные метки). Из данных, представленных на рисунке, можно видеть, что наилучшее совпадение расчетных и экспериментальных данных наблюдается для случая, когда резонансная частота составляет 2,5 МГц. Видно (см. рис. 2а), что точки, соответствующие экспериментальным данным, расходятся с расчетными не более, чем на 8 %. Для случая использования пьезопластин с резонансной частотой 1,25 МГц подобное расхождение составляет до 15 %.

II. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ РАСПРОСТРАНЕНИЯ УЛЬТРАЗВУКОВЫХ ВОЛН В ДЕМПФЕРЕ СИСТЕМЫ ИЗЛУЧЕНИЯ—ПРИЕМА

Практический интерес настоящего исследования заключается в оценке влияния формы конусного демпфера на излучаемый преобразователем сигнал. Исследование таких параметров, как длительность зондирующего импульса и отношение сигнал/помеха, даст четкое представление об

эффективности демпфирования и позволит определить оптимальный угол наклона боковых стенок демпфера с точки зрения получения наилучших результатов в системе излучения—приема ультразвуковых сигналов.

Перед началом исследования необходимо сформулировать требования к среде распространения ультразвуковых волн, а также к габаритам установки. Оптимальной для исследований является жидкая среда, поскольку нагрузка на твердое тело приведет к искажениям ввиду необходимости использования переходных слоев (например, протектора). Жидкость, в которой будут распространяться ультразвуковые волны, должна обладать минимальным значением электропроводности для снижения вероятности короткого замыкания электродов пьезопластины. Кроме того, среда должна обладать низким значением коэффициента затухания ультразвуковых волн. Также желательно, чтобы жидкость имела низкую летучесть и активно не испарялась во время длительных экспериментов. Оптимальным вариантом является дистиллированная вода, которая и была выбрана для дальнейших исследований, поскольку она удовлетворяет всем вышеперечисленным требованиям.

Принято считать, что монотонность излучения достигается при дистанции до отражателя не менее двух-трех ближних зон [21—23]. Это связано с тем, что помимо ближней и дальней зон выделяют еще переходную зону, в которой характер излучения отличается от монотонного. Указанные соображения определяют высоту установки. Помимо этого, боковые стенки не должны оказывать влияния на результаты измерений. Также целесообразно на дне емкости расположить отражатель, который имел бы сильно отличающийся от воды удельный акустический импеданс, чтобы достигалась максимальная амплитуда отраженного сигнала. С этой целью использована стальная пластина с удельным акустическим импедансом в 30 раз большим, чем у воды.

По результатам расчетов было определено, что высота установки должна быть не менее 180 мм. Ширина емкости была принята приблизительно равной ее высоте. Размеры пластины, расположенной на дне резервуара, составили 55×55 мм.

Для создания резервуара для дистиллированной воды на тонкий лист органического стекла был приклеен отрезок полипропиленовой трубы с внутренним диаметром 195 мм и высотой 210 мм. На дно получившейся емкости была помещена пластина толщиной 9,5 мм из стали марки 20.

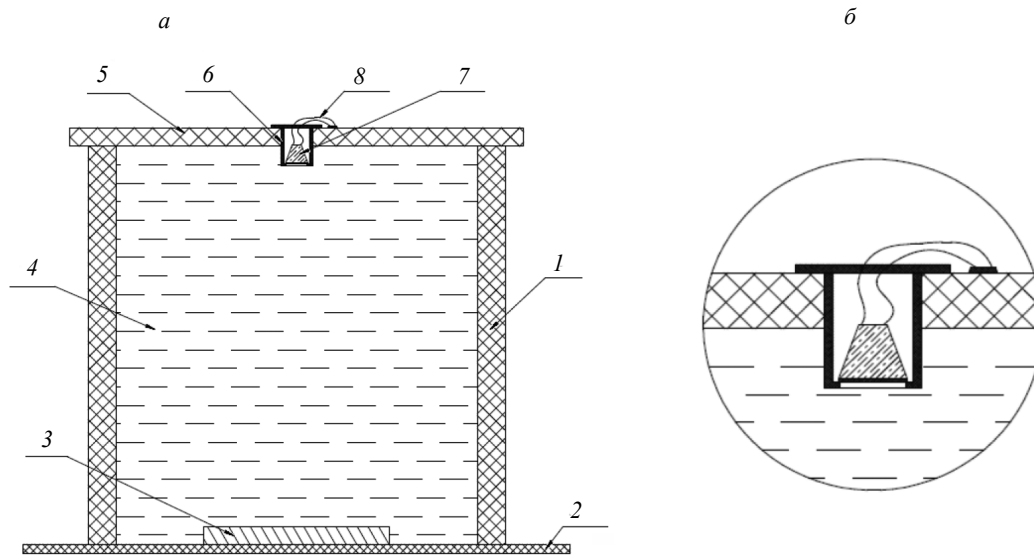


Рис. 5. Эскиз установки: *a* — общий вид, где 1 — отрезок полиэтиленовой трубы, 2 — основание из органического стекла, 3 — металлическая пластина, 4 — дистиллированная вода, 5 — пластина для крепления оснастки, 6 — оснастка для удержания образцов демпферов, 7 — образец демпфера, 8 — проводники; *б* — увеличенный вид оснастки.

Для установки образцов демпферов было изготовлено специальное приспособление. В центре длинной пластины было изготовлено отверстие. В получившееся отверстие помещена напечатанная на 3D-принтере оснастка для удержания и позиционирования образцов. Пластина с оснасткой устанавливалась на верхний край резервуара так, чтобы нижняя часть оснастки была погружена в воду. На верхней части пластины была закреплена контактная площадка, к которой припаивались выводы от образцов и разъем для подключения кабеля. Эскиз установки приведен на рис. 5.

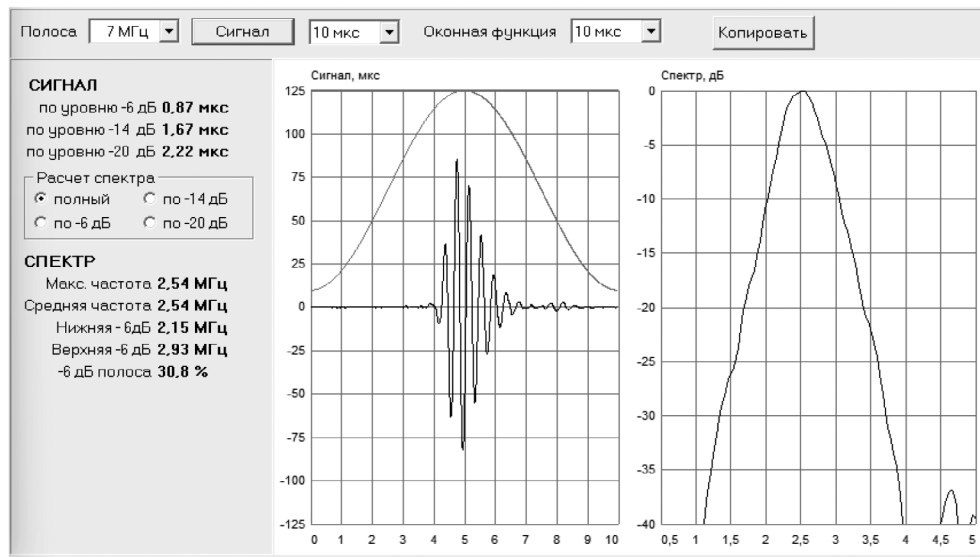
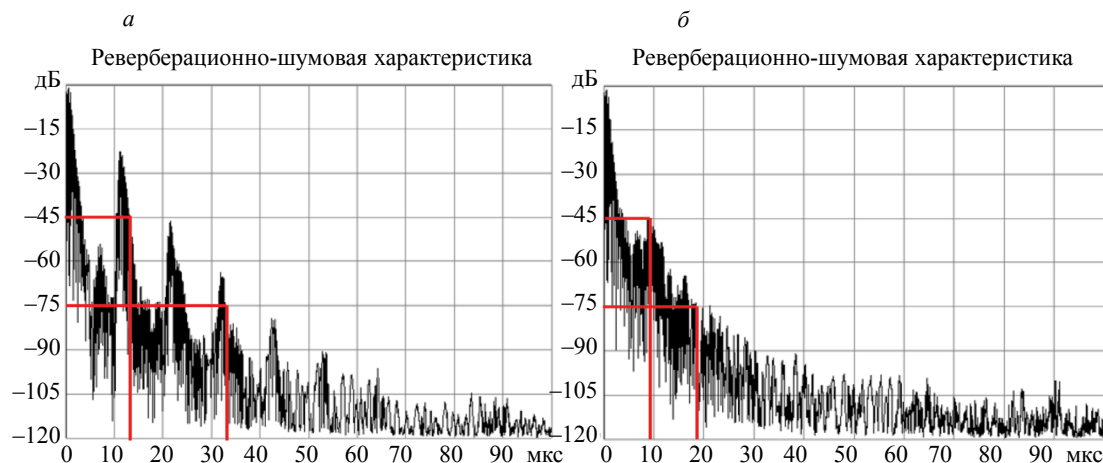


Рис.6. Типичный вид окна программы UdProbe.

Для исследований использовались два ультразвуковых дефектоскопа общего назначения UCD-50. Для удобства один из дефектоскопов был настроен для исследования отраженного от металлической пластины эхосигнала, а другой — для исследования сигналов от тыльной стороны демпфера и реверберационно-шумовой характеристики (РШХ).

Осциллограммы сигналов фиксировались при помощи специального ПО UdOscill, спектральные характеристики сигналов и РШХ измерялись при помощи программы UdProbe. Вид программы UdProbe с полученными спектральными характеристиками представлен на рис. 6.

Измерение длительности зондирующего импульса осуществлялось по РШХ. Длительность определялась по последнему сигналу, пересекающему заданный уровень. В качестве опорных уровней были выбраны значения ослабления сигналов до -45 и -75 дБ. Для сравнения на рис. 7 приведены РШХ для образцов демпферов с частотой 2,5 МГц с углом наклона стенок 90 и 65°. По ним видно, что длительности на уровнях -45 и -75 дБ для образца с наклоном стенок 90° равны $T_{-45}^{90^\circ} = 13$ мкс и $T_{-75}^{90^\circ} = 33$ мкс соответственно. Аналогично для образца с наклоном стенок 65° длительности составляют $T_{-45}^{65^\circ} = 8$ мкс и $T_{-75}^{65^\circ} = 16$ мкс. Таким образом, при изменении угла наклона образующей конуса демпфера на 25° длительность зондирующего импульса на двух

Рис. 7. РШХ образцов демпферов: частота 2,5 МГц, $\alpha = 90^\circ$ (а); частота 2,5 МГц, $\alpha = 65^\circ$ (б).

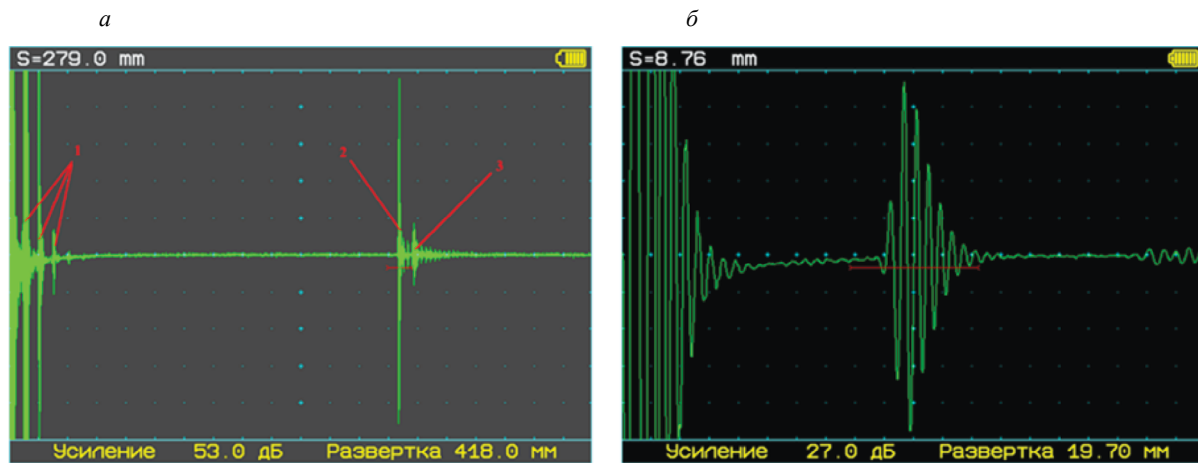


Рис. 8. Типовые осциллограммы исследуемых сигналов для образцов $\alpha = 90^\circ$: а — общая осциллограмма, где 1 — многократные переотражения в демпфере, 2 — эхосигнал от верхней части стальной пластины, 3 — донный сигнал в стальной пластине; б — осциллограмма сигнала от тыльной части демпфера.

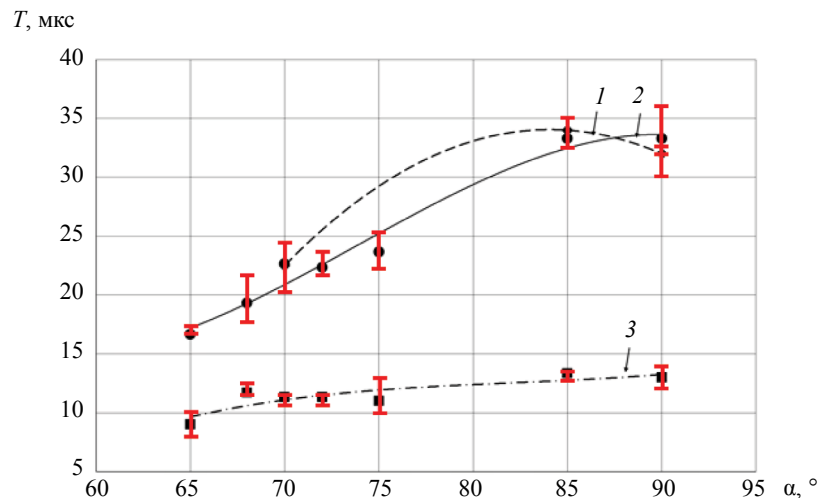


Рис. 9. Зависимость длительности зондирующего импульса от α : 1 — кривая для случая излучения на частоте 1,25 МГц и измерения по уровню -45 дБ; 2 — 2,5 МГц и -75 дБ; 3 — 2,5 МГц и -45 дБ.

уровнях уменьшилась практически в 2 раза. Зависимость длительности зондирующего сигнала от угла α приведена на рис. 9.

Важным параметром при эксплуатации пьезоэлектрических преобразователей является отношение сигнал/помеха. Под сигналом в настоящей работе подразумевается сигнал, отраженный от верхней части металлической пластины и вернувшийся на пьезоэлемент. Под помехой подразумевается сигнал максимальной амплитуды, отраженный от тыльной части демпфера.

На рис. 8 показаны типичные осциллограммы сигналов от стальной пластины и от тыльной части демпфера.

Графики зависимостей длительности зондирующего импульса T и отношения сигнал/помеха от угла α представлены на рис. 9, 10. Линии, соединяющие экспериментальные точки на графике, получены аппроксимацией полиномом третьей степени.

Анализ данных, представленных на графиках, показал, что уменьшение угла α оказывает заметное влияние на излучаемые сигналы. Длительность зондирующего импульса, которая на практике определяет величину мертвой зоны, снизилась практически в два раза на уровнях -45 и -75 дБ при использовании пьезопластин с резонансной частотой 2,5 МГц. При использовании

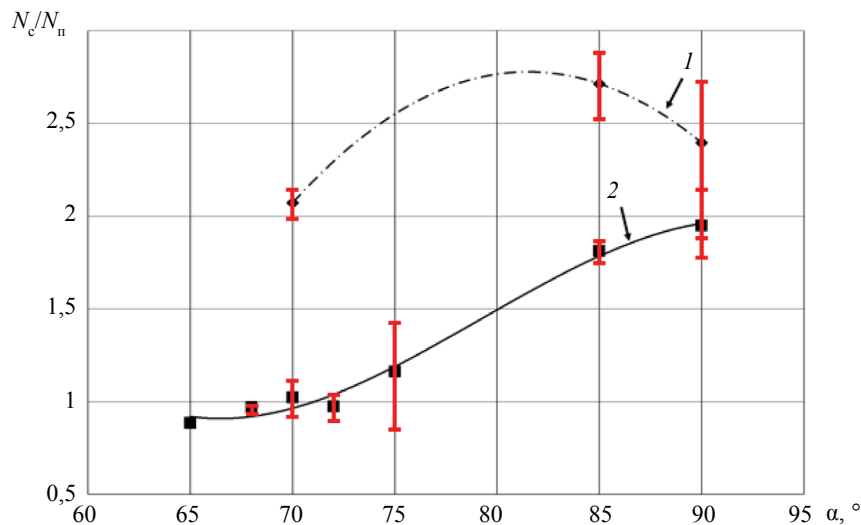


Рис. 10. Зависимость отношения сигнал/помеха от α : 1 — 1,25 МГц; 2 — 2,5 МГц.

пьезопластин с резонансной частотой 1,25 МГц длительность на уровне -45 дБ уменьшилась приблизительно в 1,5 раза. Отношение сигнал/помеха для образцов с резонансной частотой 2,5 МГц изменилось с 1,9 до 0,8.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В настоящей статье проведены расчетное и экспериментальное исследования влияния геометрической формы демпфера на эффективность его работы. При проведении ряда исследований были достигнуты следующие результаты:

1. Предложен критерий оценки эффективности работы демпфера в виде отношения амплитуд сигналов, отраженных от свободного торца демпфера и зондирующего импульса.
2. Разработана и экспериментально подтверждена расчетная модель ПЭП с конусным демпфером. Полученная модель позволяет определять геометрические параметры демпфера в зависимости от его материала, от частоты и размера пьезоэлемента, а также в зависимости от электрических параметров системы.
3. Разработана и опробована технология изготовления демпфера с применением водорастворимой оснастки.
4. Исследовано влияние наклона образующей конусного демпфера на сигнал, отражающийся от его тыльной части.
5. Исследовано влияние формы демпфера на излучаемый в среду сигнал. Максимальная эффективность конусного демпфера достигается при наклоне образующей конуса $\alpha = 64\text{--}66^\circ$.

Стоит отметить, что эффективность конусного демпфера с наполнителем в виде вольфрамового порошка, смешанного со смолой КДА в соотношении 1:1 оказалась выше по сравнению с демпфером цилиндрической формы. В частности, снижается длительность зондирующего импульса и амплитуда паразитных сигналов из демпфера, что приводит к уменьшению мертвой зоны и увеличению отношения сигнал/помеха соответственно. Этот факт имеет первостепенное значение при применении демпферов подобной формы при серийном производстве ПЭП, поскольку данные параметры могут оказывать прямое влияние на результаты неразрушающего контроля.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Sachse Wolfgang, Hsu Nelson N.* Ultrasonic Transducers for Materials Testing and Their Characterization // *Physical Acoustics* / Ed. by Warren P. Mason and R. N. Thurston. 1979. V. 14. P. 277—406.
2. *Milan D. Radmanovich, Dragan D. Mancic.* Designing and modeling of the power ultrasonic transducers. University of Nis: Faculty of Electronics, 2004. 198 p.
3. *Sherman C. H., Butler J. L.* Transducers and Arrays for Underwater Sound. Ch. 2—4. New York: Springer Science+Business Media, LLC, 2007. 610 p.

4. *Papadakis Emmanuel P., Oakley Clyde G., Selfridge Alan R., Maxfield Bruce.* Fabrication and characterization of transducers / In *Physical Acoustics*. R. N. Thurston, Allan D. Pierce, Emmanuel P. Papadakis, Eds. N.-Y., USA: Academic Press, 1999. V. 24. P. 43—134.
5. *Prokic M.* Piezoelectric transducers modeling and characterization. Switzerland: MPI, 2004. 266 p.
6. *Yoshimitsu Kikuchi* Ultrasonic transducers. Tokyo: Corona Pub. Co., 1969. 407 p.
7. *Uchino K.* Advanced Piezoelectric Materials. Science and Technology, 2nd ed. Woodhead Publishing, 2017. 830 p.
8. *Nakamura K.* Ultrasonic Transducers. Materials and Design for Sensors, Actuators and Medical Applications. Woodhead Publishing, 2012. 722 p.
9. Ультразвуковые преобразователи для неразрушающего контроля / Под общ. ред. И. Н. Ермолова. М.: Машиностроение, 1986. 280 с.
10. *Домаркас В.И., Кажис Р.-И.Ю.* Контрольно-измерительные пьезоэлектрические преобразователи. Вильнюс: Минтис, 1974. 256 с.
11. *Гитис М.Б.* Преобразователи для импульсной ультразвуковой дефектоскопии. Основные теоретические положения // Дефектоскопия. 1981. № 2. С. 65—84.
12. *Королев М. В., Карпельсон А. Е.* Широкополосные ультразвуковые пьезопреобразователи. М.: Машиностроение, 1982. 157 с.
13. *Коновалов С.И., Кузьменко А.Г.* Особенности импульсных режимов работы электроакустических пьезоэлектрических преобразователей. СПб.: Политехника, 2014. 294 с.
14. *Trzaskos Casmir R.* Ultrasonic transducer and process to obtain high acoustic attenuation in the backing / US4382201A. 27.04.1981.
15. *Марьин Н.С.* Способ изготовления демпфера для ультразвукового преобразователя / Патент на изобретение № 94025902. Опубликовано 10.05.1996.
16. *Каширин В.А., Коновалов С.И., Степанов Б.Г.* Ультразвуковой преобразователь / Патент РФ на изобретение № 2150109. Опубл. 27.05.2000.
17. *Кургачева И.Г., Кулемин М., Шкарлет О.М., Куклев А.В., Сухоруков Д.В.* Способ изготовления демпфера ультразвукового преобразователя / Авторское свидетельство СССР №888029. Опубл. 07.03.1987.
18. *Алферов Ю.Е., Дронов А.Н., Сагателян Г.Р.* Пьезоэлектрический преобразователь ультразвукового диагностического зонда / Патент РФ № 2253191. Опубл. 27.05.2005.
19. Пьезокерамические преобразователи / Справ. В.В. Ганопольский, Б.А. Касаткин, Ф.Ф. Легуша и др. Под ред. С.И. Пугачева. Л.: Судостроение, 1984. 256 с.
20. *Courant R., Friedrichs K., Lewy H.* Über die partiellen Differenzengleichungen der mathematischen Physik // *Mathematische Annalen*. 1928. V. 100. P. 32—74.
21. *Ермолов И.Н.* Теория и практика ультразвукового контроля. М.: Машиностроение, 1981. 240 с.
22. *Кретов Е.Ф.* Ультразвуковая дефектоскопия в энергомашиностроении / Изд. 4-е, перераб. Е.Ф. Кретов. СПб.: СВЕН, 2014. 312 с.
23. *Гурвич А.К., Кузьмина Л.И.* Справочные диаграммы направленности искателей ультразвуковых дефектоскопов. Киев: Техніка, 1980. 103 с.

REFERENCES

1. *Sachse Wolfgang, Hsu Nelson N.* Ultrasonic Transducers for Materials Testing and Their Characterization // *Physical Acoustics*. 1979. V. 14. P. 277—406. Available at: www.sciencedirect.com/science/article/pii/B9780124779143500098
2. *Radmanovich Milan D., Mancic Dragan D.* Designing and modeling of the power ultrasonic transducers. University of Nis: Faculty of Electronics, Serbia, 2004. 198 p.
3. *Sherman C.H., Butler J.L.* Transducers and Arrays for Underwater Sound. Ch. 2—4. New York: Springer Science+Business Media, LLC, 2007. 610 p.
4. *Papadakis Emmanuel P., Oakley Clyde G., Selfridge Alan R., Maxfield Bruce.* Fabrication and characterization of transducers // *Physical Acoustics*. 1999. V. 24. P. 43—134. Available at: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0893388X99800244>
5. *Prokic M.* Piezoelectric transducers modeling and characterization. Switzerland: MPI. 2004. 266 p.
6. *Yoshimitsu Kikuchi.* Ultrasonic transducers. Tokyo: Corona Pub. Co. 1969. 407 p.
7. *Uchino K.* Advanced Piezoelectric Materials. Science and Technology, 2nd ed. Woodhead Publishing, 2017. 830 p.
8. *Nakamura K.* Ultrasonic Transducers. Materials and Design for Sensors, Actuators and Medical Applications. Woodhead Publishing, 2012. 722 p.
9. *Ermolov I.N.* (Ed.). Ultrasonic Piezoelectric Transducers for Nondestructive Testing. Moscow: Mashinostroenie. Russia, 1986. 280 p. (In Russ.)
10. *Domarkas V.I., Kazhis R.-I.Y.* Verification and Measurement Piezoelectric Transducers. Vilnius: Mintis. Lithuania, 1974. 256 p. (In Russ.)

11. *Gitis M.B.* Transducers for pulsed ultrasonic flaw detection—Fundamental theoretical aspects // Defektoskopia. 1981. № 2. P. 65—84 (in Russ.). Available at: https://www.researchgate.net/publication/253702177_Transducers_for_pulsed_ultrasonic_flaw_detection_-_Fundamental_theoretical_aspects_Review
12. *Korolev M.V., Karpel'son A.E.* Wideband Ultrasonic Piezoelectric Transducers. Moscow: Mashinostroenie. Russia, 1982. 157 p. (In Russ.)
13. *Konovalov S.I., Kuz'menko A.G.* Peculiarities of Pulsed Operating Modes of Electroacoustic Piezoelectric Transducers. St. Petersburg: Politekhnik. Russia? 2014. 294 p. (in Russ.).
14. *Trzaskos Casmir R.* Ultrasonic transducer and process to obtain high acoustic attenuation in the backing / US4382201A. 27.04.1981
15. *Maryin N.S.* The Method of Manufacturing a Damper for an Ultrasound Transducer / RU94025902. 10.05.1996. (In Russ.)
16. *Kashirin V.A., Konovalov S.I., Stepanov B.G.* Ultrasonic Transducer / RU2150109, 27.05.2000. (In Russ.)
17. *Kurgacheva I.G., Kulemin E.A., Shkarlet O.M., Kuklev A.V., Sukhorukov D.V.* The Method of Manufacturing the Damper of the Ultrasound Transducer / USSR 888029. 07.03.1987. (in Russ.).
18. *Alferov YE., Dronov A.N., Sagetelan G.R.* Piezoelectric Transducer of an Ultrasound Diagnostic Probe / RU2253191. 27.05.2005. (In Russ.)
19. *Pugachev S.I.* (Ed.). Piezoceramic Transducers: Handbook of Methods of Measuring and Calculating the Parameters. Leningrad: Sudostroenie, Russia. 1984. 256 p. (In Russ.)
20. *Courant R., Friedrichs K., Lewy H.* Über die partiellen Differenzengleichungen der mathematischen // Physik. Math. An. 1928. V. 100. P. 32—74. Available at: <https://link.springer.com/article/10.1007/BF01448839>
21. *Ermolov I.N.* Theory and practice of ultrasound control. Moscow: Mashinostroenie. Russia, 1981. 240 p. (In Russ.)
22. *Kretov E.F.* Ultrasonic flaw detection in power engineering. Ed. 4th, revised. SVEN: St. Petersburg, Russia, 2014. 312 p. (In Russ.)
23. *Gurvich A.K., Kuz'mina L.I.* Reference radiation patterns of ultrasonic flaw detector transducers. Kiev: Technika, 1980. 103 p. (In Russ.)