

Способы улучшения конструкции ультразвукового преобразователя для проведения неразрушающего контроля в жидких средах

А. С. Манаков✉, А. В. Теплякова, А. Бунаков, К. С. Паврос

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

✉ smashealchemist@gmail.com

Аннотация. Рассмотрены варианты изменения конструкции ультразвукового датчика, предназначенного для проведения неразрушающего контроля при погружении в жидкую среду, приводящие к улучшению его основных акустических характеристик. Представлены теоретические и экспериментальные исследования влияния параметров используемой акустической задержки на амплитуды регистрируемых сигналов от границ раздела сред в условиях конкретной рассматриваемой задачи. Приведены предложения по улучшению конструкции устройства для обеспечения наилучших условий при проведении неразрушающего контроля.

Ключевые слова: волноводное распространение звука, жидкая среда, прямые пьезоэлектрические преобразователи, неразрушающий контроль

Для цитирования: Способы улучшения конструкции ультразвукового преобразователя для проведения неразрушающего контроля в жидких средах / А. С. Манаков, А. В. Теплякова, А. Бунаков, К. С. Паврос // Изв. СПбГЭТУ «ЛЭТИ». 2025. Т. 18, № 8. С. 28–35. doi: 10.32603/2071-8985-2025-18-8-28-35.

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Original article

Suggestions for the Improvement in the Design of Ultrasonic Transducer for Non-Destructive Testing in Liquid Mediums

A. S. Manakov✉, A. V. Teplyakova, A. Bunakov, K. S. Pavros

Saint Petersburg Electrotechnical University, Saint Petersburg, Russia

✉ smashealchemist@gmail.com

Abstract. The variants of changing the design of an ultrasonic sensor intended for immersive non-destructive testing in a liquid medium, leading to the improvement of its basic acoustic characteristics, are considered. Theoretical and experimental studies of the influence of the parameters of the utilized acoustic delay body on the amplitudes of the recorded signals from the interface between the medium in the conditions of the specific problem under consideration are presented. Suggestions are made for improving the design of the device in order to obtain the best conditions for non-destructive testing.

Keywords: waveguide sound propagation, liquid medium, straight beam piezoelectric transducers, non-destructive testing

For citation: Suggestions for the Improvement in the Design of Ultrasonic Transducer for Non-Destructive Testing in Liquid Mediums / A. S. Manakov, A. V. Teplyakova, A. Bunakov, K. S. Pavros // LETI Transactions on Electrical Engineering & Computer Science. 2025. Vol. 18, no. 8. P. 28–35. doi: 10.32603/2071-8985-2025-18-8-28-35.

Conflict of interest. The authors declare no conflicts of interest.

Введение. В настоящее время выделяется девять видов неразрушающего контроля по физическим принципам, лежащим в их основе. Однако характеристики объектов контроля и окружающих их сред зачастую не позволяют использовать отдельные методы и целые виды неразрушающего контроля, либо для конкретного случая контроля может существовать предпочтительный по объективным причинам вид. Рассматривая задачу неразрушающего контроля, в которой исследуется объект, доступ к поверхности которого полностью ограничен, с одной стороны, а с другой стороны, этот объект окружен жидкой средой, предпочтительным видом становится ультразвуковой контроль. В случае дальнейшего уточнения задачи, например когда указанная жидкая среда агрессивна либо объект контроля имеет многослойную структуру, ультразвуковые методы могут и вовсе быть единственными рациональными с практической точки зрения.

Конструкция ультразвукового преобразователя определяется условиями и характеристиками объекта контроля, при которых он используется. В данной публикации рассматриваются задачи неразрушающего контроля, для которых достаточно использования объемных звуковых волн, распространяющихся перпендикулярно границам раздела слоев объекта контроля и дополнительных слоев на его поверхности – для этого целесообразно использовать прямой пьезоэлектрический преобразователь, причем пьезоэлемент в его составе можно выбрать таким, чтобы он работал в режиме излучения звуковых волн одного вида, например продольных.

Основной вопрос при конструировании пьезоэлектрического преобразователя, погружаемого в жидкую среду, – это выбор иммерсионного или контактного способа ввода ультразвуковых колебаний в объект контроля. В данном случае преимуществом контактного способа служит упрощение позиционирования преобразователя для надежного получения информативных эхо-сигналов, поскольку в таком варианте в качестве точки опоры используется сам объект контроля. Помимо этого контактный способ менее чувствителен к неблагоприятным акустическим параметрам жидкой среды.

При проектировании пьезоэлектрического преобразователя по вышеописанным принципам основное различие сводится к характеристикам элемента конструкции, выполняющего роль передачи звука от пьезоэлектрического элемента во

внешнюю среду либо к поверхности объекта контроля, а также защищающего его от воздействия внешней среды – это может быть либо протектор с малой толщиной, которая также может выбираться из условия обеспечения свойств акустического просветляющего слоя для данного протектора, либо акустическую линию задержки или волновод с увеличенными размерами. По сравнению с волноводами тонкие протекторы позволяют снизить влияние затухания и рассеяния энергии звуковой волны в материале данного конструктивного элемента, а также в меньшей степени способствуют возникновению помех из-за отражения звуковых волн, отклонившихся от основного направления, но в рамках рассматриваемой частной задачи неразрушающего контроля такие протекторы могут обладать недостаточной механической прочностью. Прямые волноводы позволяют повысить общую механическую прочность конструкции пьезоэлектрического датчика и устойчивость при использовании в агрессивных средах, при этом минимизировав их недостатки с точки зрения акустических свойств. Существуют публикации [1]–[3], показывающие, что геометрическая форма волноводов значительно влияет на процесс распространения звуковых колебаний в них и, как следствие, на амплитуды регистрируемых сигналов.

Цель данной статьи состоит в изучении связи между изменениями формы волновода и параметрами эхо-сигналов, используемых для проведения неразрушающего контроля объектов, доступ к поверхности которых может быть осуществлен только через жидкую среду, контактирующую с ним. Впоследствии полученные закономерности позволят выбрать наилучшие геометрические параметры волновода для практического осуществления неразрушающего контроля.

При проведении описанного исследования была использована программная среда для моделирования физических процессов COMSOL Multiphysics 6.2. Структурно модель включает в себя излучающий элемент, работающий в совмещенном режиме для излучения продольных звуковых волн и регистрации всех отраженных сигналов; цилиндрический волновод, окруженный жидкой средой со слабо отражающими внешними границами, имитирующими ее большой объем; а также объект контроля, контактирующий с противоположным излучающему элементу концом волновода, причем объект контроля обладает конечной толщиной, но также условно-безграничен в

направлении длины и ширины. Допущением в модели служит отсутствие шероховатости поверхностей моделируемых тел.

Принципы изменения формы волновода.

Исходя из положений геометрической акустики, работ, затрагивающих вопрос использования волноводов в похожих задачах неразрушающего контроля [4]–[6], а также из наблюдений, приведенных в упомянутых ранее исследованиях, наиболее сильно влияют на амплитуду эхо-сигналов изменениями формы волновода использование наклонных поверхностей, изменяющих траекторию распространения отраженных неинформативных волн таким образом, чтобы они испытывали максимально возможное затухание в материале волновода перед их регистрацией пьезоэлементом; а также усиление рассеивающих свойств этих отражающих поверхностей нанесением на них искусственных неровностей – в данном случае такими неровностями служат бороздки с треугольным поперечным сечением, которые легко выполнить на реальных образцах с применением распространенных на практике способов металлообработки. Исходя из перечисленных положений, форма модели волновода, используемая для проводимого исследования, соответствует рис. 1.

На рисунке приняты следующие обозначения: h – глубина бороздки; T – ширина бороздки; S – диаметр излучающего элемента; L – длина волновода; D – максимальный диаметр волновода; d – диаметр контактной поверхности волновода; α – угол наклона образующей усеченного конуса; 1 – отражающая наклонная поверхность; 2 – рассеивающая боковая поверхность. В качестве начальных условий, неизменных в процессе всего моделирования, принято следующее: диаметр излучающего элемента S равен 20 мм, рабочая частота излучателя равна 2.5 МГц, в качестве материала волновода используется сталь марки Ст3, объекта контроля – чугун, окружающей среды – вода. Под полезным сигналом в данном исследовании понимаются звуковые волны, распространяющиеся параллельно оси симметрии волновода – сигнал от противоположного излучателю конца волновода и от дальней границы стенки объекта контроля, а под помехами понимаются волны, отражающиеся от боковых и наклонных поверхностей волновода под произвольными углами.

Исследование влияния формы волновода на амплитуды эхо-сигналов принципиально разделено на два этапа. На первом этапе рассматривался

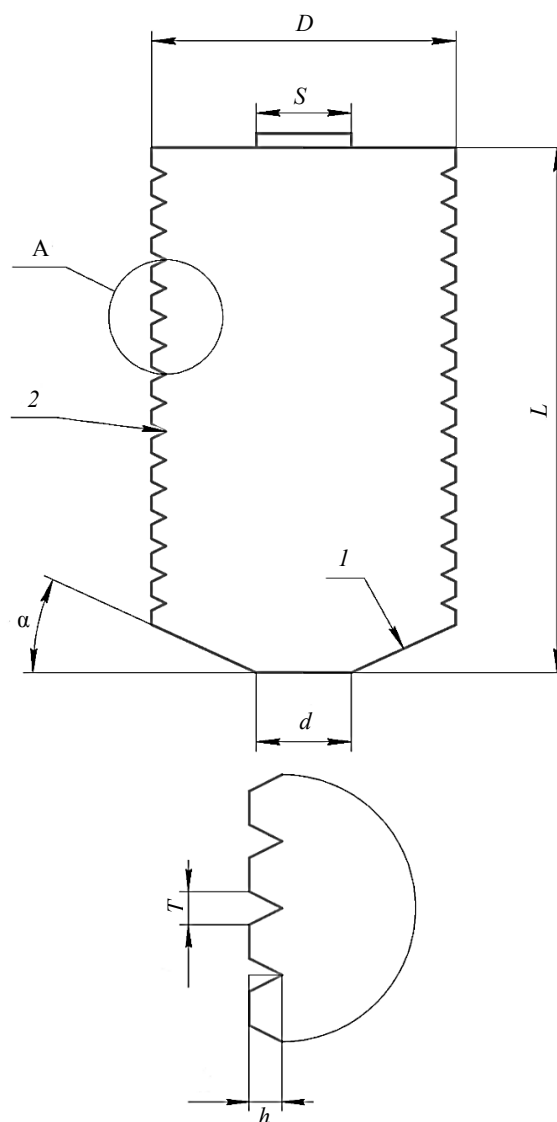


Рис. 1. Геометрические параметры волновода
Fig. 1. Geometry of waveguide

волновод постоянной длины 110 мм, к которому применялись геометрические модификации. После проведения всех видов моделирования на данном этапе были определены оптимальные геометрические параметры волновода для заданной длины. Поскольку на практике оптимальная длина волновода определяется толщиной объекта контроля, то в рамках второго этапа исследования было проведено моделирование волновода с неизменными параметрами усеченного конуса и бороздок при переменной длине волновода.

Определение оптимальных геометрических параметров волновода постоянной длины. Первый изменяемый геометрический параметр волновода – его диаметр. На нормированном графике, представленном на рис. 2, приведен график отношения амплитуды эхо-сигнала к наибольшей амплитуде помехи с временем прихода,

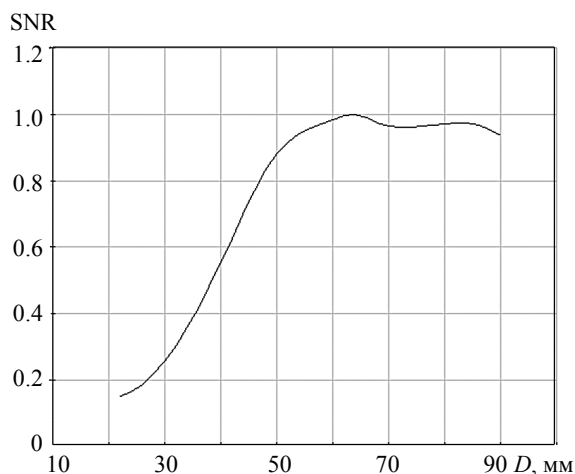
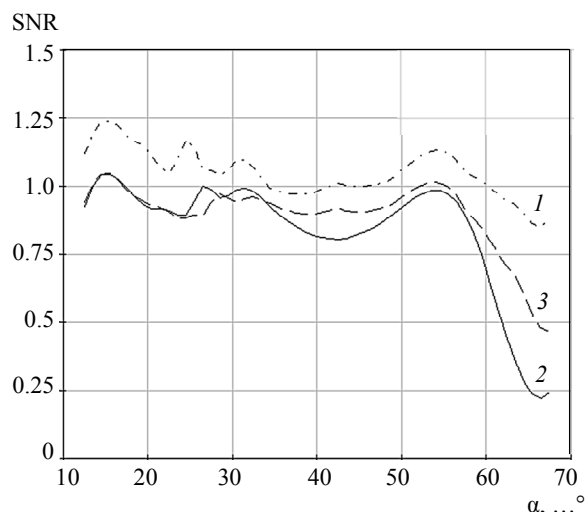


Рис. 2. Влияние диаметра волновода на отношение сигнал/шум
Fig. 2. Signal-to-noise ratio for different waveguide diameters

обуславливающим ее негативное влияние на возможность практической регистрации полезного сигнала. Здесь и далее для расчета отношения сигнал/шум (signal-to-noise ratio, SNR) берется сигнал с наименьшей амплитудой из двух регистрируемых донных сигналов.

Как показано на рис. 2, зависимость рассматриваемого отношения амплитуд сигналов от максимального диаметра волновода при его постоянной длине и заданных входных параметрах имеет максимум 64 мм, а при увеличении или уменьшении диаметра волновода отношение сигнал/шум уменьшается. С точки зрения практики неразрушающего контроля, волновод меньшего диаметра обладает меньшей массой, соответственно упрощая позиционирование пьезоэлектрического преобразователя, и полученная зависимость говорит о том, что увеличение диаметра волновода не предоставляет преимущества в акустических параметрах устройства, но существует предел уменьшения диаметра, при пересечении которого начинает проявляться ухудшение этих акустических параметров преобразователя.

Следующим изменением геометрической формы волновода было принято использование формы усеченного конуса на одном из его концов. Изменение угла наклона образующей конуса α осуществлялось поэтапным увеличением его высоты при неизменных диаметрах оснований конуса – исследование проводилось для значений диаметра контактной поверхности $d = 15, 20$ и 25 мм и диаметра волновода 64 мм, также являющегося диаметром второго основания усеченного конуса. На рис. 3 приведен нормированный график полученных значений отношения амплитуд сигналов.



d , мм: 1 – 15; 2 – 20; 3 – 25

Рис. 3. Влияние формы усеченного конуса на отношение сигнал/шум
Fig. 3. Signal-to-noise ratio for waveguides with different truncated cone measurements

Рассматривая график, представленный на рис. 3, можно сделать вывод, что характер изменения отношения сигнал/шум от угла наклона образующей конуса также значительно зависит от диаметров оснований этого усеченного конуса, что не позволяет обнаружить универсальную зависимость для дальнейшего конструирования устройства – так, при диаметре контактной поверхности $d = 20$ мм максимумы характерны для углов наклона образующей $26, 30$ и 17° , при $d = 25$ мм – 29 и $18^\circ 6'$, а при $d = 15$ мм – 24 и 13° . Полученные результаты показывают также, что отдельные побочные максимумы исследуемой зависимости могут обеспечивать уменьшение отношения сигнал/шум в пределах 2% от величины, соответствующей основному максимуму, – с практической точки зрения это предоставляет возможность изменения угла наклона конуса на субоптимальный в случае, если это обеспечит преимущество при проведении неразрушающего контроля в целом. Помимо этого, при проведении исследования было обнаружено, что с уменьшением диаметра контактной поверхности волновода отношение сигнал/шум возрастает относительно волновода с увеличенным диаметром контактной поверхности – с точки зрения конкретной решаемой задачи сужение наконечника волновода позволяет провести измерения на участках, недоступных при использовании волновода с увеличенным диаметром контактной поверхности, т. е. в данном случае происходит совмещение благо-

приятных эффектов от изменения геометрической формы пьезоэлектрического преобразователя.

В рамках следующего шага были смоделированы волноводы с оптимальным углом наклона образующей конуса и диаметром $d = 15$ мм, а также с нанесением бороздок на боковую поверхность волновода, при этом расстояние между бороздками равнялось ширине бороздок T . Исследование проводилось для ширины бороздок $T = 1$ мм, после чего полученные результаты были сравнены с результатами при значениях $T = 2$ и 3 мм, – на рис. 4 представлен соответствующий нормированный график.

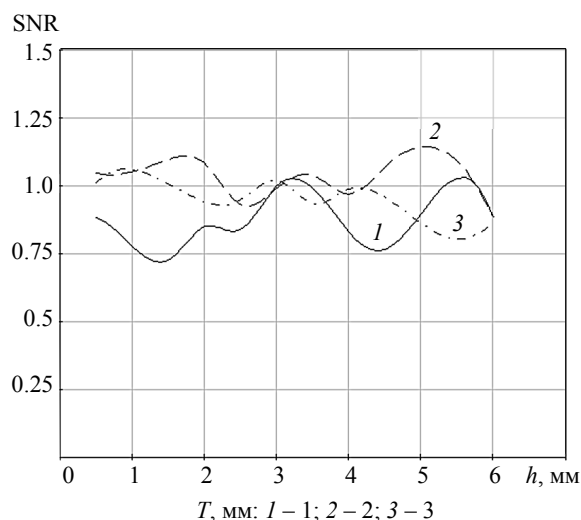


Рис. 4. Влияние геометрических параметров бороздок на отношение сигнал/шум
Fig. 4. Signal-to-noise ratio for waveguides with different striation profiles

Результаты моделирования, представленные на рис. 4, свидетельствуют о том, что при нанесении бороздок с треугольным профилем на боковую поверхность волновода существует предельное значение глубины этих бороздок, превышение которого не предоставляет преимущества с точки зрения увеличения отношения сигнал/шум, в то время как с практической точки зрения значительная глубина бороздок приводит к уменьшению механической прочности волновода. При выборе расстояния между бороздками также не имеет практического смысла значительно увеличивать или уменьшать это расстояние – для рассмотренного случая при расстоянии между бороздками $T = 1$ мм, увеличение глубины бороздок $h > 5$ мм с шагом 1 мм практически не изменяет отношение амплитуд сигналов. В данном случае рассматривались только бороздки треугольного профиля, что обусловлено выбранным способом

механической обработки металлических заготовок при изготовлении конструктивных элементов пьезоэлектрического преобразователя.

Связь между длиной волновода и оптимальными геометрическими параметрами. По результатам первого этапа теоретического исследования с использованием компьютерного моделирования акустических процессов стало возможным определение оптимальных параметров изменений геометрической конфигурации волновода для конкретной длины $L = 110$ мм. В рамках второго этапа исследования моделирование проводилось при переменной длине волновода L и постоянными геометрическими параметрами, значения которых были выбраны, исходя из максимального отношения сигнал/шум, полученного в предыдущем этапе. Целью данного моделирования служит установление факта совпадения или несовпадения оптимальных параметров усеченного конуса и бороздок на боковой поверхности волновода.

В первую очередь были смоделированы волноводы цилиндрической формы без дополнительных модификаций формы с различной длиной L этих волноводов, причем данные значения длин выбраны, исходя как из практических соображений, так и из полученных при вышеуказанных расчетах оптимальных значений диаметра волновода. На рис. 5 приведен нормированный график зависимости отношения сигнал/шум для волноводов, имеющих диаметр $D = 48, 64$ и 80 мм.

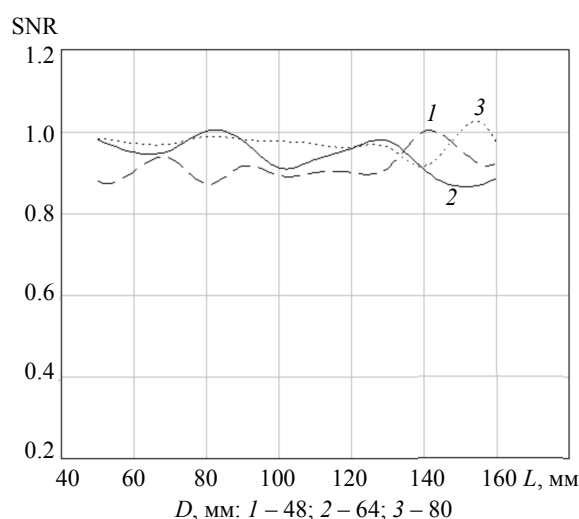


Рис. 5. Влияние длины цилиндрического волновода на отношение сигнал/шум
Fig. 5. Signal-to-noise ratio for cylindrical waveguides with different lengths

Приведенные на рис. 5 графики зависимостей показывают, что при сохранении диаметра волновода и изменении его длины, падение отношения сигнал/шум может составлять до 15 % от максимального, что уже представляет заметное ухудшение акустических параметров преобразователя. Несмотря на то, что в отдельных случаях данное ухудшение может достигать меньших значений при небольших изменениях длины, целесообразно подбирать оптимальный параметр для конкретной требуемой длины волновода.

Следующим шагом стало моделирование волноводов с параметрами $d = 15$ мм и $\alpha = 24^\circ$. На рис. 6 приведен нормированный график полученной зависимости отношения сигнал/шум от длины волновода.

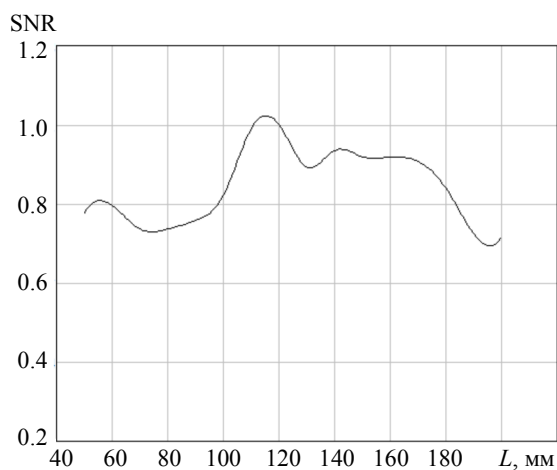


Рис. 6. Влияние длины усеченного волновода на отношение сигнал/шум

Fig. 6. Signal-to-noise ratio for tapered waveguides with different lengths

Ввиду более заметной зависимости соотношения рассматриваемых амплитуд сигналов от формы волновода по сравнению со случаем, когда изменялись только внешний диаметр и длина, в рамках проводимого исследования был проведен поиск оптимального угла наклона образующей усеченного конуса для волновода с длиной 80 мм для сравнения с результатами моделирования, полученными на предыдущем этапе. На рис. 7 приведен нормированный график полученной зависимости отношения сигнал/шум от формы наконечника волновода.

В заключительном шаге второго этапа исследования были смоделированы волноводы переменной длины с оптимальными геометрическими параметрами: $d = 15$ мм, $\alpha = 24^\circ$, $T = 2$ мм, и $h = 5$ мм. На рис. 8 приведена полученная зависимость отношения сигнал/шум.

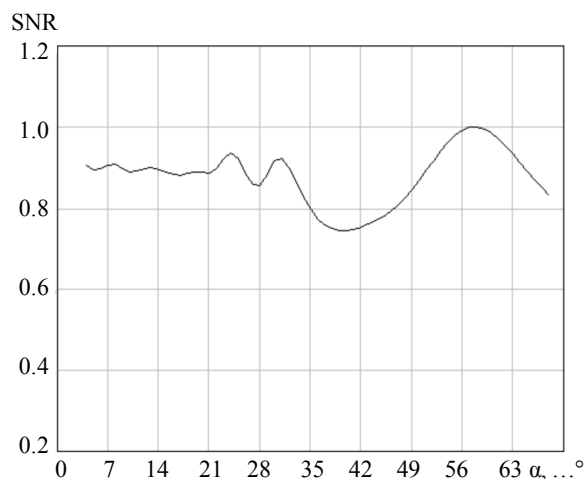


Рис. 7. Влияние формы усеченного конуса на отношение сигнал/шум в волноводе длиной 80 мм
Fig. 7. Signal-to-noise ratio for waveguides with different truncated cone measurements, $L = 80$ mm

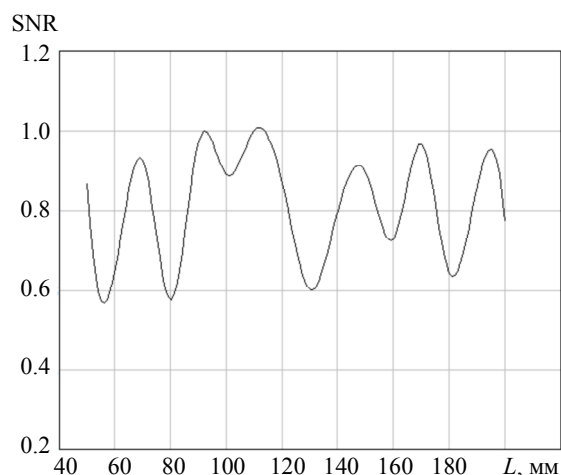


Рис. 8. Влияние длины модифицированного волновода на отношение сигнал/шум

Fig. 8. Signal-to-noise ratio for modified waveguides with different lengths

Как дальнейшее изменение длины при неизменном угле наклона образующей конуса на конце волновода, так и нанесение бороздок на боковую поверхность приводят к еще большему разбросу значений отношения сигнал/шум, как показано на рис. 6 и 8. Из этого можно сделать вывод, что геометрические параметры изменений формы волновода, оптимальные для одного значения его длины, неоптимальны для другого значения длины, что еще больше подчеркивает необходимость определения данных параметров для каждого конкретного случая. Например, как показано на рис. 7, значение оптимального угла α для волновода с длиной $L = 80$ мм и диаметром контактной поверхности $d = 15$ мм составляет 57° , а для волновода с длиной 110 мм и тем же диаметром – 24° .

Заключение. Проведенное исследование служит решением части общей задачи конструирования пьезоэлектрического преобразователя для неразрушающего контроля, проводимого при погружении устройства в жидкую среду, связанной с подбором оптимальных параметров модификаций геометрической формы волновода, служащего частью данной конструкции. Под оптимальными параметрами понимаются такие величины, характеризующие форму усеченного конуса на одном из концов волновода и бороздок с треугольным профилем на боковой поверхности волновода, при которых достигается максимальное отношение амплитуды регистрируемых по-

лезных сигналов, в данном случае – эхо-сигналов от дна волновода и от границ объекта контроля, и амплитуды сигнала-помехи, образующегося при отражениях звуковых волн от боковых поверхностей волновода, т. е. максимального отношения сигнал/шум. Было показано, что при конструировании волноводов с различной длиной существует необходимость определения данных оптимальных параметров отдельно для каждого случая, поскольку полученные значения, предоставляющие максимальное отношение сигнал/шум в одном волноводе, в общем случае обеспечивают меньшее значение этого отношения при изменении длины волновода.

Список литературы

1. Пудов Г. Н. Ультразвуковой искатель с акустической задержкой // Дефектоскопия. 1972. № 3. С. 80–85.
2. Райхман А. З., Перевалов С. П., Любимов А. М. Исследование акустического тракта изделий цилиндрической формы // Дефектоскопия. 1987. № 11. С. 45–53.
3. Wave propagation in an acoustic waveguide for ultrasonic phased arrays / M. Rutsch, A. Jäger, A. Unger, Th. Kaendl, M. Kupnik // 2019 IEEE Intern. Ultrasonics Symp. (IUS). Glasgow, UK: IEEE, 2019. P. 796–799. doi: 10.1109/ULTSYM.2019.8926307.

4. Cox T. J., D'Antonio P. Acoustic Absorbers and Diffusers: Theory, Design and Application. 1st ed. London: CRC Press, 2002. 432 p. doi: 10.1201/9781482288254.
5. Одинцов М. В. Волноводное распространение ультразвука // Молодой ученый. 2011. Т. 1, № 4 (27). С. 46–49.
6. Крауткремер Й., Крауткремер Г. Ультразвуковой контроль материалов. Справочник / пер. с нем. Е. К. Бухмана и Л. С. Зенковой. М.: Металлургия, 1991. 752 с.

Информация об авторах

Манаков Анатолий Сергеевич – аспирант кафедры электроакустики и ультразвуковой техники СПбГЭТУ «ЛЭТИ».
E-mail: smashealchemist@gmail.com

Теплякова Александра Викторовна – канд. техн. наук, доцент кафедры электроакустики и ультразвуковой техники СПбГЭТУ «ЛЭТИ».
E-mail: smaest@mail.ru

Бунаков Антон – магистрант гр. 9582, инженер кафедры систем электроакустики и ультразвуковой техники СПбГЭТУ «ЛЭТИ».
E-mail: anton_bunakov@mail.ru

Паврос Кирилл Сергеевич – канд. техн. наук, доцент кафедры электроакустики и ультразвуковой техники СПбГЭТУ «ЛЭТИ».
E-mail: qnet@inbox.ru

Вклад авторов:

Манаков А. С. – моделирование и обработка результатов.
Теплякова А. В. – общее руководство, заключение.
Бунаков А. – введение, обзор литературы.
Паврос К. С. – методология исследования.

References

1. Pudov G. N. Ul'trazvukovoj iskatel' s akusticheskoy zaderzhkoj // Defektoskopija. 1972. № 3. S. 80–85. (In Russ.).

2. Rajhman A. Z., Perevalov S. P., Ljubimov A. M. Isledovanie akusticheskogo trakta izdelij cilindricheskoy formy // Defektoskopija. 1987. № 11. S. 45–53. (In Russ.).

3. Wave propagation in an acoustic waveguide for ultrasonic phased arrays / M. Rutsch, A. Jäger, A. Unger, Th. Kaendl, M. Kupnik // 2019 IEEE Intern. Ultrasonics Symp. (IUS). Glasgow, UK: IEEE, 2019. P. 796–799. doi: 10.1109/ULTSYM.2019.8926307.

4. Cox T. J., D'Antonio P. Acoustic absorbers and dif-fusers: Theory, design and application. 1st ed. London: CRC Press, 2002. 432 p. doi: 10.1201/9781482288254.

5. Odincov M. V. Volnovodnoe rasprostranenie ul'tra-zvuka // Molodoj uchenyj. 2011. T. 1, № 4(27). S. 46–49. (In Russ.).

6. Krautkremer J., Krautkremer G. Ul'trazvukovoj kontrol' materialov. Spravochnik / per. s nem. E. K. Buh-mana i L. S. Zenkovej. M.: Metallurgija, 1991. 752 s. (In Russ.).

Information about the authors

Anatolii S. Manakov – postgraduate student, Department of Electroacoustics and Ultrasound Technology, Saint Petersburg Electrotechnical University.

E-mail: smashealchemist@gmail.com

Aleksandra V. Teplyakova – Cand. Sci. (Eng.), Associate Professor, Department of Electroacoustics and Ultrasound Technology, Saint Petersburg Electrotechnical University.

E-mail: smaest@mail.ru

Anton Bunakov – master's student of gr. 9582, engineer, Department of Electroacoustics and Ultrasound Technology, Saint Petersburg Electrotechnical University.

E-mail: anton_bunakov@mail.ru

Kirill S. Pavros – Cand. Sci. (Eng.), Associate Professor, Department of Electroacoustics and Ultrasound Technology, Saint Petersburg Electrotechnical University.

E-mail: qnet@inbox.ru

Author contribution statement:

Manakov A. S. – modeling and data processing.

Teplyakova A. V. – general management and conclusions.

Bunakov A. – introduction, literature review.

Pavros K. S. – research methodology.

Статья поступила в редакцию 20.05.2025; принята к публикации после рецензирования 05.07.2025; опубликована онлайн 30.10.2025.

Submitted 20.05.2025; accepted 05.07.2025; published online 30.10.2025.