

## К ВОПРОСУ ОБ ИНТЕРПРЕТАЦИИ ЭХОГРАММ ПРИ КОНТАКТНОМ СПОСОБЕ АКУСТИЧЕСКОГО КОНТАКТА

© 2022 г. А.В. Мартыненко<sup>1,\*</sup>

<sup>1</sup>АО «НИИ НПО «ЛУЧ», Россия 142103 Подольск, ул. Железнодорожная, 24

\*E-mail: atilla123@ya.ru

Поступила в редакцию 24.09.2021; после доработки 30.12.2021

Принята к публикации 10.01.2022

Эхограмма ультразвукового импульсного дефектоскопа, при контактном способе акустического контакта, рассмотрена как свертка при приеме преобразователем с протектором, согласованным с контактной средой, акустического импульса, излученного им же через контактную среду в нагрузку, отраженного от нее и от этого преобразователя. Предлагается методика расчета эхограмм для изделий, преобразователей, контактных слоев из любых материалов, с любой величиной контактного слоя при условии известных акустических сопротивлений используемых материалов. Предложен метод компенсации мешающих отражений для преобразователя, согласованного с контактной средой.

*Ключевые слова:* УЗ преобразователь, свертка, реконструкция, интерференция, чувствительность, разрешение, протектор, контактный способ.

DOI: 10.31857/S0130308222010031

Известны иммерсионный и контактный способы обеспечения контакта пьезоэлектрического преобразователя с объектом контроля при ультразвуковом контроле. В обоих способах ввод ультразвуковых колебаний в контролируемое изделие осуществляется через слой вещества — акустическую контактную среду. В качестве материала слоя вещества чаще всего используют воду, и в этом случае его величина для контактного способа на частоте 3,9 МГц может составлять 0,19 мм или менее [1]. Исходя из идентичности контактной среды, а также при прочих равных условиях, чувствительность обоих способов также должна быть близка. В подтверждение этого в работе [2] показана возможность «получить в иммерсионном варианте чувствительность, большую, чем в контактном, даже при контроле хорошо обработанных изделий». С другой стороны, в работах [3, 4] авторы считают, что «иммерсионный способ обеспечивает высокую стабильность акустического контакта, однако его чувствительность в 10-100 раз ниже, чем при контактном контроле».

Такое положение приводит зачастую к необоснованному выбору способов и, как следствие, к недоиспользованию их возможностей.

Из литературы известно, что анализ процесса интерференции ультразвуковых волн в слое контактной среды, который чаще называют как слой контактной жидкости, основывается на простой модели акустического тракта, в которой этот слой находится между двумя материалами с большим акустическим сопротивлением. Такими материалами могут быть: металлическое изделие и протектор преобразователя из минералокерамики, металлическое изделие и призма преобразователя, металлическое изделие и пьезоэлемент преобразователя [2, 4—6]. В работе [5] автор объясняет, что «при прохождении импульса через слой контактной жидкости образуются импульсы... его многократных отражений от границ слоя..., все эти импульсы интерферируют, то есть складываются с учетом разности фаз, образуя один импульс, амплитуда полуволн которого зависит от толщины слоя» и «наблюдаются следующие эффекты: осцилляция амплитуд полуволн результирующего импульса в зависимости от фазы, то есть от толщины слоя контактной жидкости и сдвиг результирующего импульса». Также автор отмечает, что «причина осцилляций — гашение полуволн при их сложении в противофазе и усиление их при сложении в фазе; чем больше произведение коэффициентов отражения волн от границ слоя контактной жидкости и количество импульсов участвующих в интерференции, тем больше размах осцилляций».

Известно использование для контактного способа преобразователя с протектором из минералокерамики или совсем без протектора. Однако в [7] отмечается, что «при использовании преобразователя с твердым протектором или совсем без протектора, наблюдаются большие осцилляции чувствительности и ухудшение лучевой разрешающей способности».

Известны работы [3, 8, 9] по «выяснению возможности создания конструкции прямого преобразователя, который можно было бы применять как для иммерсионного, так и для обычного способов контроля». Однако результаты экспериментальных исследований [8] для прямого преобразователя, состоящего из пьезопластины с демпфером и протектора из минералокерами-

ки, для иммерсионного способа показали, что длительность импульса составляет более 12 полупериодов, а «амплитуда импульса более чем на 20 дБ ниже, чем для просто демпфированной пьезопластины», что на 35 дБ хуже, чем для преобразователя с протектором и согласованного с иммерсионной средой [10]. Такая же длительность для преобразователя с четвертьволновым протектором получена в [9], где авторы утверждают, «что применение протекторного слоя в четверть длины волны зачастую бывает необоснованным», а «расчетно-теоретическое исследование, осуществленное в широком диапазоне значений удельных акустических импедансов материалов протекторного слоя, позволило установить, что преобразователь с протектором указанной волновой толщины позволяет получать короткие акустические импульсы лишь для случаев относительно небольших волновых толщин внешнего контактного слоя». Дополнительно [11] «в работе показано, что слой контактной жидкости с характеристическим импедансом, соизмеримым с импедансом протектора, также может влиять на положение и амплитуду максимумов частотной характеристики, то есть на форму импульса излучаемого сигнала». И даже в [12] «слой контактной жидкости (толщиной, малой по сравнению с длиной волны в нем) может привести к появлению высокочастотных локальных максимумов, обусловленных колебаниями четвертьволновой протектор—слой, и осцилляциям огибающих импульсов. Согласование протектора по импедансу, согласно формуле (13) (среднегеометрическому между импедансами соседних сред — прим. автора), не приводит к существенному улучшению характеристик эхоимпульсов».

Интересны вопросы: из работы [2], где автор отмечает, что «нестабильность акустического контакта (изменение чувствительности) при контактном способе контроля тем больше, чем меньше шероховатость поверхности контролируемого изделия, и может достигать 20 дБ»; из работы [3] — «явления существенного уменьшения частоты максимума спектра эхосигнала при нагружении прямого преобразователя на иммерсионную среду по сравнению с нагружением на сталь».

Стоит отметить и то, что как показывает практика [13], «основанием для применения является довольно высокая стабильность контакта преобразователя с изделием, обеспечивающая удобство контроля», а «изготовление преобразователей с такими протекторами (на основе эпоксидной смолы с наполнителями) привлекает своей достаточной простотой и использованием доступных материалов».

Можно предположить, что преобразователи из представленных работ не согласованы с контактной средой, на что указывает «спектр экспериментального импульса донного сигнала, полученного при нагрузке преобразователя с протектором из минералокерамики на иммерсионный слой (вода)», подобные спектры приведены в [7, 8, 12—14] и который присущ спектрам преобразователей с толщиной протектора большей, чем четверть длины волны (из-за чего спектр «линейчатый»). Другой пример из работ [9, 11], в которых приведен «импульс продольной волны, излучаемый преобразователем с протектором..., демпфером с наполнителем и слоем контактной жидкости» с характерными биениями, обусловленными неполным согласованием протектора с преобразователем и со слоем контактной жидкости. Поэтому, из-за несогласованности преобразователя с контактной средой, возможно и выводы, сделанные авторами представленных работ (см. выше), соответствуют выбранной конструкции преобразователя.

Отметим некоторые недостатки в вышеупомянутых работах:

представлен анализ процессов интерференции эхоимпульсов в квазигармоническом режиме для простой модели, в которой слой контактной жидкости находится между двумя материалами с большим акустическим сопротивлением;

в некоторых случаях [4, 8] модель не учитывает влияния клеевого соединения с малым акустическим сопротивлением, разделяющее протектор с пьезоэлементом преобразователя;

формы представленных в статьях эхоимпульсов и их математическое представление в работах, например [5] и [15], отличаются;

необходимо учитывать то, что интерференция происходит с излученным преобразователем акустическим импульсом, форма которого существенно отличается от формы эхограммы (эхоимпульса), используемой для анализа в вышеназванных работах;

рассматриваемые выше преобразователи не согласованы оптимально с материалом слоя контактной жидкости;

не рассмотрена модель, не предложен расчет процесса интерференции «коротких» излученных ультразвуковых импульсов в трех слоях: контактной среды, протектора и пьезоэлемента преобразователя, оптимально согласованного с контактной средой, и на основании расчета не предложена форма эхограммы, наблюдаемая на экране дефектоскопа в виде эхоимпульса.

Автором данной статьи решен вопрос создания конструкции иммерсионного пьезоэлектрического преобразователя, оптимально согласованного со слоем вещества, или коротко — оптимального преобразователя [10, 15—18]. Рассмотрен режим излучения и приема. Решена прямая задача, приведена математическая модель эхограммы, форма которой наблюдается на экране ультразвукового импульсного дефектоскопа. Предложено решение обратной задачи. Показано, что преобразователь с протектором можно оптимально согласовать со слоем вещества, при этом длительность эхоимпульса минимальна и составляет три длины волны (3 периода колебаний в эхоимпульсе) при значительной чувствительности 22,5 дБ, что меняет мнение о чувствительности иммерсионного способа относительно контактного способа контроля [3, 4]. Из проведенных автором экспериментов видно, что преобразователи с протектором из минералокерамики при сравнении с предложенным автором согласованным преобразователем проигрывают в чувствительности, стабильности акустического контакта. Необходим сильный прижим контактного преобразователя к изделию, заметна зависимость показаний от прижима. С другой стороны, предложенный преобразователь, прижатый через контактный слой к изделию, и далее без посторонней помощи держит данный контакт, обеспечивая стабильность эхограммы (чувствительность и разрешение) даже при перемещении по изделию без прижима. Чувствительность согласованного преобразователя (импульсный коэффициент преобразования), измеренная по [19] как для контактного преобразователя, составила (–40) дБ, в то время как для контактного преобразователя 5-К6 А-001 — (–47) дБ при сильном прижатии. Для любого преобразователя расчетные потери на прохождение поверхности ввода стальной акустической нагрузки составляют (–17,5) дБ, то есть чувствительность согласованного преобразователя предсказуема и складывается из вышеназванной чувствительности в –22,5 дБ и потерь на прохождение поверхности ввода (–17,5) дБ. Однако применимость такого согласованного преобразователя для контактного способа контроля была бы интересна и востребована, судя по публикациям.

Также в настоящей работе сделана попытка проанализировать процесс интерференции ультразвуковых «коротких» импульсов, излучаемых преобразователем, оптимально согласованным со средой, для простой или однослойной модели контактного способа, в которой слой находится между двумя материалами с большим акустическим сопротивлением; для более сложной, многослойной модели, в которой контактный слой находится между материалом с большим акустическим сопротивлением и последовательными слоями материалов протектора, пьезоэлемента, демпфера преобразователя, оптимально согласованного с контактной средой. Это позволит прояснить вопрос формирования эхограммы контактного способа, искажений, привносимых в эхограмму интерференцией в слое контактной жидкости, их влияние на характеристики способа контроля и можно ли скомпенсировать искажения при сохранении чувствительности и разрешения? Эти вопросы, по мнению автора, недостаточно изучены.

Для целей данной статьи необходимо разделить понятие импульс, который трактуется как «электрический или ультразвуковой сигнал малой длительности» [1], на два понятия: эхограмма как запись электрического напряжения эхосигнала в функции времени, развиваемое пьезоэлектрическим преобразователем (то есть на выходе преобразователя), нагруженным акустически на нагрузку, а электрически — на дефектоскоп и акустический импульс как ультразвуковой (акустический) сигнал малой длительности. Понятие эхоимпульс используется как наблюдаемое на экране дефектоскопа электрическое напряжение эхосигнала в функции времени, развиваемое пьезоэлектрическим преобразователем, нагруженным акустически на нагрузку, а электрически — на дефектоскоп. Также будет использоваться понятие акустический эхоимпульс как отражение акустического импульса от границы раздела сред.

## МЕТОДИКА РАСЧЕТА

В данной работе предлагается методика расчета эхограмм (решение прямой задачи) для изделий, преобразователей, контактных слоев из любых материалов, с любой величиной контактного слоя при условии знания акустических сопротивлений используемых материалов. Область применения: дефектоскопия, медицина, гидролокация.

Методика состоит из двух частей.

Первая часть посвящена расчету во временной области формы излученного импульса и получению эхограммы для любого преобразователя с любым протектором или без него в иммерсионном варианте, то есть через слой жидкости, толщиной больше пространственной длительности акустического импульса. Эта часть методики позволяет для согласованного преобразователя определить форму эхограммы (эхоимпульса) от поверхности ввода как свертки импульсной характеристикой согласованного преобразователя с излученным акустическим импульсом, отраженным от поверхности ввода.

Вторая часть посвящена расчетам эхограмм контактного способа для однослойной и многослойной моделей для любого преобразователя. Расчеты эхограмм, экспериментальные эхограммы приводятся для согласованного преобразователя.

Расчеты имеют особенности.

Определение формы эхограммы для моделей контактного способа основано на расчете интерференции на рабочей поверхности преобразователя как суммы многократных отражений излученного акустического импульса от границ слоев преобразователя с учетом их амплитуд и фаз. Форма эхограммы определяется как свертка импульсной характеристики преобразователя с результатом интерференции.

Другая особенность заключается в том, что для того, чтобы сравнивать экспериментальные и теоретические данные, выбран экспериментальный донный эхоимпульс. Как показали эксперименты, проведенные автором, донный эхоимпульс идентичен по форме эхоимпульсу от поверхности ввода изделия, не считая начальной фазы и небольшого, в несколько процентов, изменения в соотношении амплитуд. Дополнительно, эхоимпульс от поверхности ввода при малом контактном слое сильно искажается зондирующим импульсом и экспериментально проверить правильность расчетов не удастся.

Расчет и экспериментальное оборудование позволяют менять величину контактного слоя, вводить временную задержку между многократными отражениями и их эхограммами соответственно, что позволяет проверять форму акустических эхоимпульсов, их наложения, форму эхограмм.

В приведенном расчете используются следующие акустические сопротивления согласованного преобразователя: пьезоэлемента — 27, протектора и демпфера — 5, иммерсионная среда (вода) — 1,5, металлический отражатель (изделие) — 45. В данной статье далее по тексту (для лучшего восприятия) единица измерения акустического сопротивления (МПа·с/м) приводиться не будет. Пьезоэлемент выполнен из керамики ЦТС-19, его диаметр составляет 15 мм, толщина — 0,5 мм. Электрическое согласование (добавление внешних электрических элементов) во всех экспериментах не использовалось. Эхоимпульс с выводов преобразователя поступал на вход дефектоскопа USD-60 производства фирмы «Кропус», в котором он преобразовывался в цифровой код, который затем поступал в среду программы «Mathcad», где и осуществлялись необходимые преобразования.

### РАСЧЕТ ИЗЛУЧЕННОГО ИМПУЛЬСА И ЕГО ЭХОГРАММЫ

В [16] приведена методика расчета импульсной характеристики или излученного ультразвукового импульса иммерсионного ультразвукового преобразователя с протектором. Излученный акустический импульс, полученный в соответствии с нижеприведенным расчетом, идентичен импульсу на рис. 8а из работы [16] и приведен на рис. 1, кривая 1.

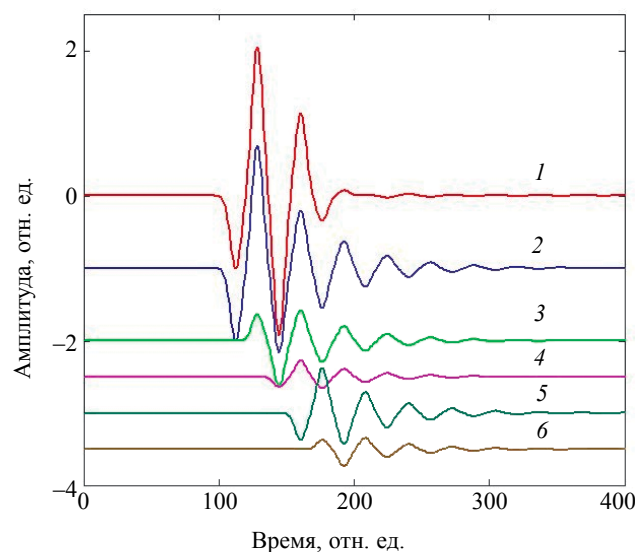


Рис. 1. Формирование излученного импульса (кривая 1) преобразователя с протектором как суммы импульсов: кривая 2 — излученного пьезоэлементом; кривые 3 и 4 — первое и второе отражение в протекторе; кривые 5 и 6 — первое и второе отражение от демпфера.

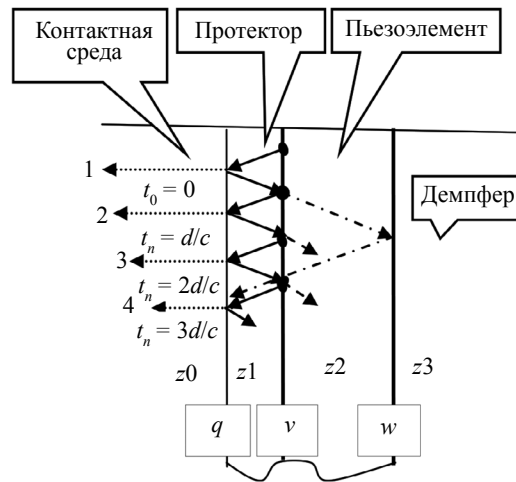


Рис. 2. Схема формирования излученного акустического импульса согласованным преобразователем.

Расчет в работе [16] основан на суммировании амплитуд полуволновых импульсов, возникших на границах пьезоэлемента, с учетом времени пробега, фазы и потерь на отражения от границ слоев преобразователя. Однако для данной работы, в которой расчеты будут выполняться в среде «Маткад», удобнее воспользоваться наработками из работы [15], в которой используется не один полуволновый импульс, а получена реддудовская серия целиком, излучаемая демпфированным пьезоэлементом без протектора (см. рис. 9 из [15] и она же приведена на рис. 1, кривая 2). Эта серия, излученная из пьезоэлемента, пройдя протектор, частично излучается в контактную среду (см. цифру 1 со временем  $t_0 = 0$  на рис. 2), давая первый импульс, который обозначим как  $R(t)$ , в состав интерференционной суммы импульсов, представляющей излученный импульс, частично отражается от границы протектор—контактная среда —  $q = (z_1 - z_0)/(z_1 + z_0)$ . На рис. 2 —  $z_0, z_1, z_2, z_3$  — акустические сопротивления воды как контактной или иммерсионной жидкости, протектора, пьезоэлемента, демпфера соответственно. Это отражение добавляется к вышеозначенной сумме каждый раз через время двойного прохода через протектор с учетом корректировки амплитуды на коэффициент  $q^n \cdot v^n$ , где  $v = (z_2 - z_1)/(z_1 + z_2)$  — коэффициент отражения от границы протектор—пьезоэлемент,  $n$  — номер отражения. Время двойного прохода через четвертьволновой протектор составит  $t_1 = d/c = \lambda/2c$ , где  $d, c, \lambda$  — толщина, скорость звука и длина волны в пьезоэлементе соответственно.

Множественность времени двойного прохода можно обозначить как  $t_n = n \cdot \lambda/2c = n \cdot T$ . Тогда второй акустический импульс, второе слагаемое в интерференционную сумму, обозначенное цифрой 2 на рис. 2, через время  $t_1 = \lambda/2c$  будет иметь вид  $q \cdot v \cdot R(t)$ , третье слагаемое, обозначенное цифрой 3 на рис. 2, через время  $t_2 = \lambda/c$  будет иметь вид  $q^2 \cdot v^2 \cdot R(t)$ . Четвертое слагаемое, обозначенное цифрой 4 на рис. 2, через время  $t_3 = 3 \cdot \lambda/2c$  будет иметь вид  $q^3 \cdot v^3 \cdot R(t)$  и так далее. На рис. 1 под номерами 3 и 4, а на рис. 2 под номерами 2, 3, 4 приведены импульсы для отражений  $n = 1, 2, 3$ . Дополнительно, часть амплитуды импульса  $q \cdot R(t)$ , прошедшая в пьезоэлемент и отраженная от демпфера (на рис. 2 движение этого импульса обозначено стрелками со штрихпунктирной линией с выходом на цифру 4), также добавляется к вышеозначенной сумме через время  $t_3 = 3 \cdot \lambda/2c$  и далее через время  $k \cdot \lambda/2c$ , с учетом корректировки амплитуды на соответствующие коэффициенты отражения от воды, протектора, пьезоэлемента, границы пьезоэлемент — демпфер —  $w$ , то есть с учетом коэффициента  $q^k \cdot v^{(k-1)} \cdot w$ , где  $k$  — номер отражения от демпфера. Тогда пятый акустический импульс, пятое слагаемое в интерференционную картину, обозначенное цифрой 4 на рис. 2, через время  $t_3 = 3 \cdot \lambda/2c$  будет иметь вид  $q \cdot w \cdot R(t)$ , шестое слагаемое через время  $t_4 = 2 \cdot \lambda/c$  будет иметь вид  $q^2 \cdot v \cdot w \cdot R(t)$  и так далее. На рис. 1 под номерами 5 и 6 приведены эти импульсы для  $k = 1$  и  $k = 2$ . Приведем интерференционный импульс  $I_4(t)$  для времени от  $t_0 = 0$  до  $t_3 = 3 \cdot \lambda/2c$ , то есть для цифры 4 по рис. 2:

$$I_4(t) = R(t_0 = 0) + q \cdot v \cdot R(t_1 = \lambda/2c) + q^2 \cdot v^2 \cdot R(t_2 = \lambda/c) + q^3 \cdot v^3 \cdot R(t_3 = 3 \cdot \lambda/2c) + q \cdot w \cdot R(t_3 = 3 \cdot \lambda/2c).$$

В скобках указан временной сдвиг (задержка) соответствующего импульса. Для рис. 1:  $R(t_0 = 0)$  соответствует кривой 2,  $q \cdot v \cdot R(t_1 = \lambda/2c)$  — кривая 3,  $q^2 \cdot v^2 \cdot R(t_2 = \lambda/c)$  — кривая 4,  $q \cdot w \cdot R(t_3 = 3 \cdot \lambda/2c)$  — кривая 5,  $q^2 \cdot v \cdot w \cdot R(t_4 = 2 \cdot \lambda/c)$  — кривая 6.

В общем виде излученный импульс  $I(t)$  в части отражений можно представить как

$$I(t) = q \cdot I(t=0) + \sum_{n=1}^{\infty} (q \cdot v)^n \cdot I[t-nT] + \sum_{n=3}^{\infty} w \cdot q^{(n-2)} \cdot v^{(n-3)} \cdot I[t-nT] + \sum_{n=4}^{\infty} w \cdot q^{(n-2)} \cdot v^{(n-3)} \cdot I[t-nT] + \\ + \sum_{n=5}^{\infty} w^2 \cdot (-v) \cdot q^{(n-4)} \cdot v^{(n-5)} \cdot I[t-nT] + \left\{ \left[ \sum_{n=6}^{\infty} w^2 \cdot (-v) \cdot q^{(n-4)} \cdot v^{(n-5)} + \sum_{n=6}^{\infty} w^2 \cdot q^{(n-4)} \cdot v^{(n-6)} \cdot D^{(n-5)} \right] \cdot I[t-nT] \right\},$$

где  $D = 4z_1 \cdot z_2 / (z_1 + z_2)^2$  — коэффициент прозрачности границы  $v$ .

В итоге, осуществив с учетом задержки суммирование 18 вышеописанных и переотраженных внутри пьезоэлемента протектора импульсов получаем искомый излученный акустический импульс согласованного преобразователя  $I(t)$ , например, для  $n = 6$  и  $k = 4$ , приведенный на рис. 1 (кривая 1). Из анализа кривых рис. 1 понятно, что акустический импульс (кривая 1) является результатом интерференции, наложения множества акустических импульсов со своей амплитудой, временем прихода, начальной фазой (полярность первого полупериода). Хорошо видно, что первые три полупериода кривой 1 имеют одинаковую фазу с импульсами кривых 2, 3, 4 и поэтому суммируются, давая увеличение амплитуды, а следующие полупериоды не имеют одинаковую фазу и поэтому происходит постепенная их взаимная компенсация, приводящая к укорочению длительности акустического импульса или кривой 1. Также из рис. 1 понятно, что любое отличие от предложенной модели по рис. 2, будь то материалы, размеры приведет к другой интерференционной картине, то есть к изменению формы импульса. Например, изменение границы  $q$  по рис. 2 в сторону увеличения приведет к временному смещению в сторону увеличения ряда импульсов, связанных с этой границей, что повлечет за собой уменьшение амплитуды и увеличение длительности, а в дальнейшем появление биений или второго импульса, вызывающего «двугорбый» спектр. В результате, как показано в начале статьи, это приводит к другим результатам и к другим выводам.

Рассмотрим далее. Излученный акустический импульс  $I(t)$ , отраженный от металлического изделия как от отражателя, вновь поступает на вход согласованного преобразователя. Его автосвертка и будет эхограммой (см. рис. 3, кривая 1), то есть записью того, что мы видим на экране дефектоскопа в виде эхоимпульса. На рис. 3 приведены теоретическая (кривая 1) и экспериментальная (кривая 2, взята из работы [10], рис. 7a) эхограммы. Заметим хорошее совпадение эхограмм, что подтверждает правильность расчетов. В данном и в последующих рисунках для лучшего восприятия эхограммы могут быть сдвинуты по временной или амплитудной осям друг относительно друга.

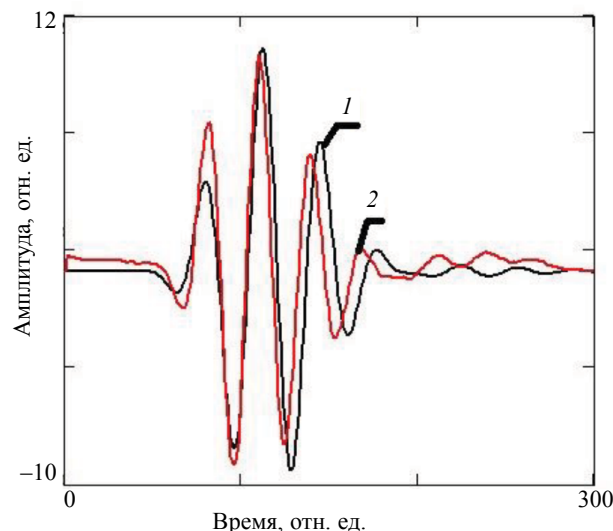


Рис. 3. Теоретическая (кривая 1) и экспериментальная (кривая 2) эхограммы.

## РАСЧЕТ ЭХОГРАММЫ КОНТАКТНОГО СПОСОБА

### Расчет эхограммы для модели акустического тракта, в которой слой контактной среды находится между двумя материалами с большим акустическим сопротивлением

В [4, 5, 20] рассмотрено прохождение и отражение импульса через плоский слой или слой контактной жидкости. В работах «приведены общие выражения для отраженного и прошедшего сигналов при нормальном падении акустического импульса» на плоский слой. Реализуем рекомендации данных работ, для конкретного случая, при этом устанавливаем слой минимальным, а для расчетов «падающим импульсом» будет излученный акустический импульс  $I(t)$ . Падающий импульс многократно отражается в слое и эти отражения добавляются к нему каждый раз через время  $T_0 = 2l/c_b$  двойного прохода слоя толщиной  $l$ , со скоростью звука в нем  $c_b$ , с учетом корректировки амплитуды на соответствующие коэффициенты отражения  $q$  и границы вода—отражатель (металлическое изделие)  $j$ , то есть с учетом коэффициента  $q^{(n-1)} \cdot j^n$ . Или в общем виде, используя [20, 21], с учетом коэффициента  $q^{(n-1)} \cdot j^n$  отраженный импульс  $ID(t)$  можно представить как

$$ID(t) = \sum_{n=1}^{\infty} q^{(n-1)} \cdot j^n \cdot I[t - (n-1)T_0] \cdot \exp\{j\omega[t - (n-1)T_0]\}.$$

Приведем часть импульса  $ID(t)$  для  $n = 1, 2, 3, 4$  и для времени от  $t_1 = T_0$  до  $t_4 = 4 \cdot T_0$  соответственно:

$$ID_4(t) = j \cdot I(t_0 = T_0) + q \cdot j^2 \cdot I(t_1 = 2 \cdot T_0) + q^2 \cdot j^3 \cdot I(t_2 = 3 \cdot T_0) + q^3 \cdot j^4 \cdot I(t_3 = 4 \cdot T_0).$$

Далее осуществляется свертка импульса  $ID(t)$ , например при  $n = 6$ , с импульсной характеристикой преобразователя  $I(t)$ . Полученная теоретическая эхограмма представлена на рис. 4 (кривая 1), при сравнении которой с экспериментальной (кривая 2) видно их хорошее совпадение. Однако результаты дальнейших экспериментов показали несостоятельность данного подхода для согласованного преобразователя. Во-первых, в большинстве случаев экспериментальная эхограмма отличается от приведенной на рис. 4. Такая эхограмма чаще присуща изделиям с шероховатой поверхностью. Во-вторых, не учтены отражения от границы пьезоэлемент—демпфер—w. В-третьих, при увеличении толщины контактного слоя растет задержка  $T_0$  между отражениями от границ слоя и эхограммы по рис. 4 «разделяются» на большее число импульсов их составляющих, что и показано на рис. 5.

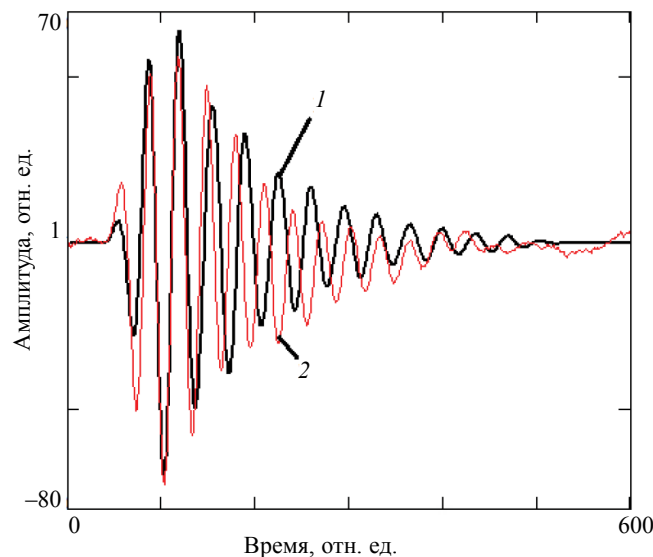


Рис. 4. Сравнение теоретической (кривая 1) и экспериментальной (кривая 2) эхограмм при минимальном контактном слое.

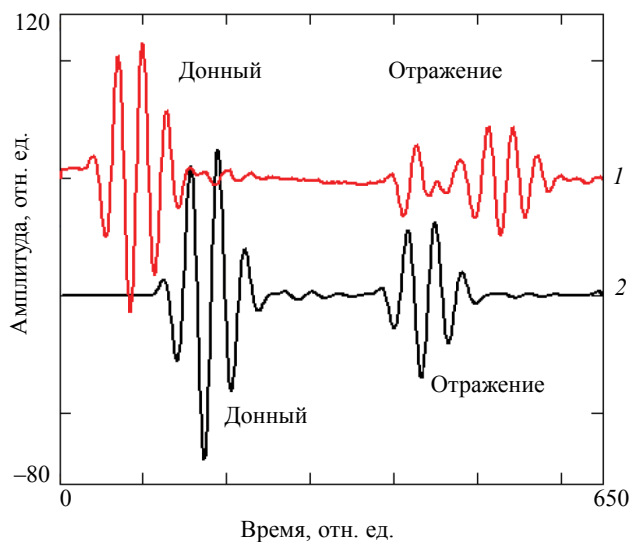


Рис. 5. Сравнение экспериментальной (кривая 1) и теоретической (кривая 2) эхограмм при увеличенном контактном слое.

На рис. 5 представлены экспериментальная (кривая 1) и теоретическая (кривая 2) эхограммы, при этом преобразователь находится на некотором расстоянии от изделия, то есть при увеличенном контактном слое. Для теоретической кривой введена меньшая задержка  $T_0$ , имитирующая расстояние от преобразователя до изделия, для лучшей наглядности. По рис. 5 на каждой эхограмме можно заметить по два импульса, где импульс слева назван «Донный», так как это донный эхоимпульс металлического изделия, и импульс справа, обозначенный как «Отражение», образованный донным эхоимпульсом, однократно отраженным от преобразователя и изделия. По времени импульсы «Отражение» кривых 1 и 2 совмещены.

Видно по рисунку, что импульсы «Донный» на эхограммах идентичны, следовательно, их расчет осуществлен верно, а импульсы «Отражение» не совпадают, следовательно, расчет импульса «Отражение» проведен неверно. Как показывают эксперименты, проведенные автором, это связано с более сложным отражением от многослойной структуры согласованного преобразователя с протектором, формирование которого не рассмотрено в известной литературе. Вышеприведенный расчет применим для модели акустического тракта, в которой слой контактной среды находится между двумя материалами с большим акустическим сопротивлением. Такими материалами может быть металлическое изделие и призма преобразователя, металлическое изделие и пьезоэлемент преобразователя.

### Расчет отражения от преобразователя. Многослойная модель

Приведем упрощенный расчет акустического импульса отражения от согласованного преобразователя для суммарного импульса, учитывающего только первые пять импульсов. Остальные импульсы рассчитываются по аналогии с учетом отражений и переотражений от границ раздела сред.

Расчет схож с приведенным выше расчетом излученного акустического импульса для согласованного преобразователя с протектором. Однако необходимо учитывать отличия. В данном случае, без учета потерь на прохождение сред и отражения от границы воздух — донная поверхность металлического изделия (отражателя) с акустическим сопротивлением материала  $ZM$ , на преобразователь через контактную среду поступает донный акустический эхоимпульс  $I(t)$ , обозначенный стрелкой с цифрой 0 на рис. 6, а согласованный преобразователь рассматривается как двухслойная структура, где первый слой состоит из материала протектора, дающий полуволновую задержку, второй — из материала пьезоэлемента, создающий задержку в длину волны. За слоем материала пьезоэлемента расположен материал демпфера. Сумма отражений от этой двуслойной структуры, которую обозначим как  $I'(t)$ , создает акустическое отражение от преобразователя.



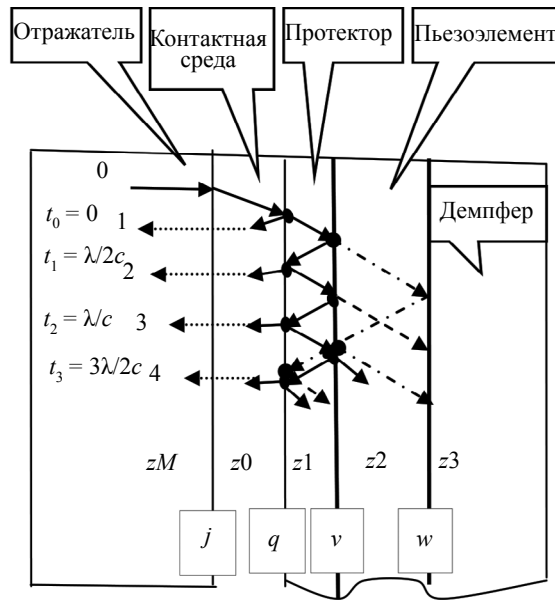


Рис. 6. Схема формирования акустического импульса отражения от согласованного преобразователя.

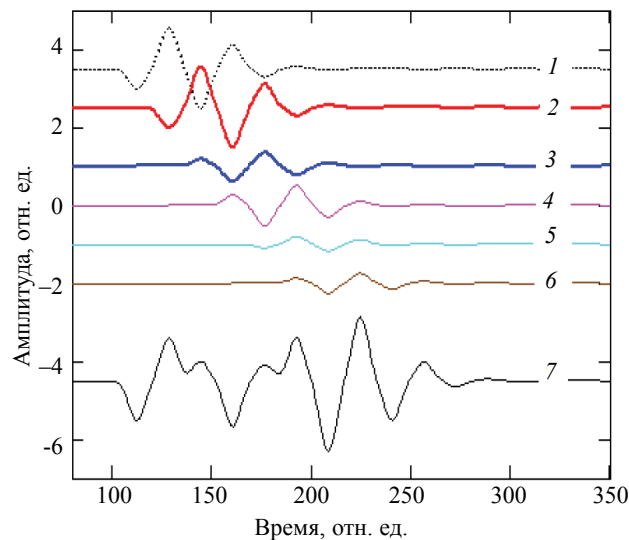


Рис. 7. Формирование в виде кривой 7 отражения от преобразователя как суммы импульсов:  
 1 — отражения от протектора; 2 и 3 — переотражений в протекторе; 4 и 5 — отражений от границы пьезоэлемент — демпфер;  
 6 — переотражений в пьезоэлементе.

Рассмотрим подробнее по рис. 6 и рис. 7, как формируется акустическое отражение от преобразователя. Донный акустический эхоимпульс  $I(t)$ , обозначенный стрелкой с цифрой 0 (см. рис. 6), пройдя контактную среду, частично отражается от протектора, давая первый импульс  $q \cdot I(t)$  для  $I'(t)$ , частично поступает в протектор. На рис. 6 импульс  $q \cdot I(t)$  обозначен стрелкой с цифрой 1 при  $t_0 = 0$ , а на рис. 7 — это кривая 1. Затем  $I(t)$ , прошедший в протектор, отраженный от границы  $v$ , как  $v \cdot I(t)$ , вновь добавляется к  $I'(t)$ . Этот импульс для  $n = 1$ ,  $t_1 = \lambda/2c$  приведен на рис. 7 под номером 2, а на рис. 6 он обозначен стрелкой с цифрой 2. Далее он добавляется к  $I'(t)$  через время  $t_2 = \lambda/c$  для  $n = 2$  как  $q \cdot v^2 \cdot I(t)$  и показан под номером 3 на рис. 7, а на рис. 6 он обозначен стрелкой с цифрой 3. Для  $n = 3$ ,  $t_3 = 3\lambda/2c$  импульс будет  $q^2 \cdot v^3 \cdot I(t)$  и обозначен стрелкой с цифрой 4 на рис. 6. Таким образом, с учетом отражений от границ  $q$  и  $v$  импульс  $I(t)$  добавляется к  $I'(t)$  каждый раз через время двойного прохода через протектор, равное  $n \cdot \lambda/2c$ , с учетом корректировки амплитуды на соответствующий коэффициент  $q^{n-1} \cdot v^n$ . Вторым импульсом, пришедшим в это же

время  $t_3 = 3\lambda/2c$  и который тоже обозначен цифрой 4 на рис. 6, является часть импульса  $I(t)$ , прошедшая через протектор в пьезоэлемент, отраженная от границы  $w$  (пьезоэлемент—демпфер) (на рис. 6 штрихпунктирная линия в материале пьезоэлемента) и равная  $w \cdot I(t)$ . Этот импульс под номером 4 приведен на рис. 7.

Через время  $\lambda/2c$  появится импульс второго отражения  $k = 2$  от границы  $w$  и равный  $q \cdot v \cdot w \cdot I(t)$ , который приведен на рис. 7 под номером 5. Таким образом, подобные импульсы отражения от границы  $w$  появляются через время  $t_{(2+k)} = \lambda/c + k \cdot \lambda/2c$  с учетом корректировки амплитуды на коэффициент  $q^{(k-1)} \cdot v^{(k-1)} \cdot w$ . Также необходимо учитывать отражения, происходящие между слоями. На рис. 7 кривая 6 учитывает отражение от границ  $w$  и  $v$ . Приведем интерференционный импульс отражения от согласованного преобразователя  $I'(t)$  для времени от  $t_0 = 0$  до  $t_3 = 3 \cdot \lambda/2c$ , то есть для цифры 4 по рис. 2, и учитывающий 5 импульсов:

$$I'(t) = q \cdot I(t_0 = 0) + v \cdot I(t_1 = \lambda/2c) + q \cdot v^2 \cdot I(t_2 = \lambda/c) + q^2 \cdot v^3 \cdot I(t_3 = 3 \cdot \lambda/2c) + w \cdot I(t_3 = 3 \cdot \lambda/2c).$$

В общем виде излученный импульс  $I(t)$  в части отражений можно представить как

$$I'(t) = q \cdot I(t = 0) + \sum_{n=1}^{\infty} q^{(n-1)} \cdot v^n \cdot I[t - nT] + \sum_{n=3}^{\infty} w \cdot (q \cdot v)^{(n-3)} \cdot I[t - nT] + \sum_{n=4}^{\infty} w \cdot (q \cdot v)^{(n-3)} \cdot I[t - nT] + \sum_{n=5}^{\infty} w^2 \cdot (-q) \cdot (q \cdot v)^{(n-5)} \cdot I[t - nT] + \left\{ \sum_{n=6}^{\infty} w^2 \cdot (-q) \cdot (q \cdot v)^{(n-5)} + \sum_{n=6}^{\infty} w^2 \cdot q^{(n-5)} \cdot D^{(n-5)} \right\} \cdot I[t - nT].$$

Импульс отражения от преобразователя  $I'(t)$ , рассчитанный для времени от  $t_0 = 0$  до  $t_3 = 7 \cdot \lambda/2c$  и учитывающий 18 импульсов, приведен на рис. 7 (кривая 7). Из рисунка видно, что импульс отражения от преобразователя (кривая 7) существенно отличается от падающего на преобразователь импульса (кривая 1, также см. рис. 1, кривая 1) по форме, длительности. Это показывает, что для согласованного преобразователя нельзя пользоваться расчетом эхограммы для модели акустического тракта, в которой слой контактной среды находится между двумя материалами с большим акустическим сопротивлением.

Для получения эхограммы отражения от преобразователя необходимо осуществить свертку интерференционного импульса  $I'(t)$ , рассчитанного для времени, например, от  $t_0 = 0$  до  $t_3 = 7 \cdot \lambda/2c$  с импульсом  $I(t)$ .

### АНАЛИЗ ЭХОГРАММ

На согласованный преобразователь от металлического изделия поступает серия отраженных импульсов через временные промежутки  $T_0 = 2l/c_v$  для толщины контактного слоя  $l$ . Ограничимся первыми двумя, как наибольшими по амплитуде импульсами и названными выше «Донный» или  $I(t)$  и «Отражение» или  $j \cdot I'(t)$  с задержкой  $T_0$ . Напомним что, импульс «Отражение» образовался в результате отражения «Донного» от преобразователя став импульсом  $I'(t)$  и от изделия с соответствующим временным сдвигом  $T_0$ . Происходит наложение импульсов, что позволяет вычислять итоговый импульс  $I''(t)$  как сумму всех импульсов, распространяющихся в данной среде или  $I''(t) = I(t) + I'(t)$  с учетом задержки  $T_0$ .

Эхограммы для различных толщин контактного слоя как свертки импульсной характеристики преобразователя  $I(t)$  с импульсом  $I'(t)$  с соответствующим  $T_0$  приведены на рис. 8, где кривые 1 — расчетные, а кривые 2 — экспериментальные эхограммы. На рис. 8а представлены эхограммы, где экспериментальная кривая 2 повторяет кривую 1 из рис. 5, при этом преобразователь находится на некотором расстоянии от изделия и поэтому импульсы «Донный» и «Отражение» разделены. Импульсы «Отражение» кривых 1 и 2 по времени совмещены, а теоретический «Донный» импульс смещен по времени для лучшей наглядности. Нетрудно заметить хорошее совпадение эхограмм 1 и 2, что подтверждает правильность вышеприведенных расчетов.

Для рис. 8б расстояния между изделием и преобразователем уменьшено до 0,1 мм, происходит наложение импульсов и амплитуда итогового импульса  $I''(t)$ , а также в какой-то мере эффективная частота, конечно, зависят от совпадения по фазе импульсов при наложении. Понятно, что максимум амплитуды  $I''(t)$  достигается при синфазном наложении и минимум при противофазном. Но так как импульс «Отражение» относительно мал по амплитуде, особенно в его начальной части для времени от  $t_0 = 0$  до  $t_3 = 2 \cdot \lambda/c$  по рис. 7, то существенное его влияние на импульс  $I''(t)$  не прослеживается. Для теоретической кривой 1 расчетное расстояние между изделием и преобразователем

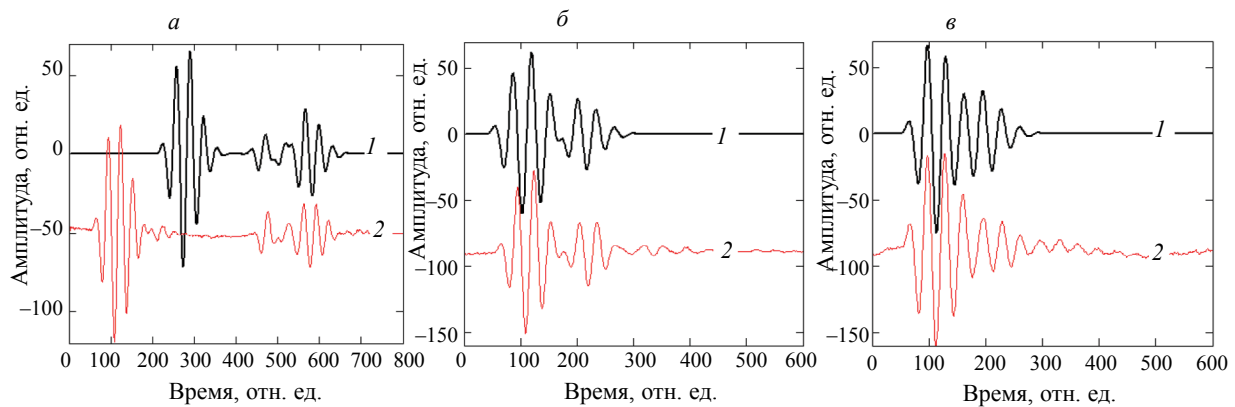


Рис. 8. Теоретическая (кривая 1) и экспериментальная (кривая 2) эхограммы для расстояния от преобразователя до изделия:  
а — 2,2 мм; б — 0,1 мм; в — вплотную.

составляет 0,108 мм. При установке преобразователя вплотную с изделием происходит близкое к максимальному наложению и при этом эхограммы также идентичны и приведены на рис. 8в. Изменение величины контактного слоя [20], влияние хорошей поверхности изделия ( $Ra = 0,65$ ) [3] на нестабильность акустического контакта (изменение чувствительности) не отмечено.

На рис. 9 представлены амплитудно-частотные характеристики тракта (далее — АЧХ) для согласованного преобразователя, нагруженного: 1 — на иммерсионную среду (использовалась эхограмма из рис. 3, кривая 2); 2 — на контактный слой толщиной 0,1 мм (использовалась эхограмма из рис. 8б, кривая 2); 3 — на сталь (использовалась эхограмма из рис. 8в, кривая 2).

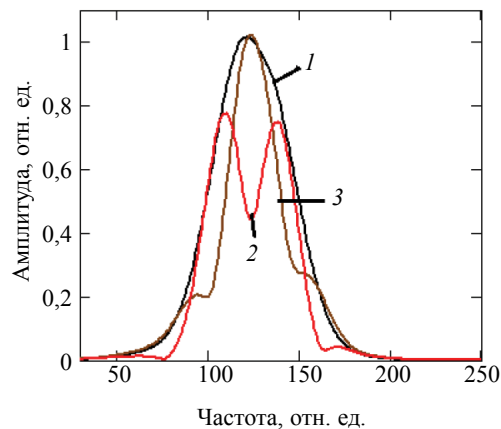


Рис. 9. АЧХ для согласованного преобразователя, нагруженного:  
1 — на иммерсионную среду; 2 — на контактный слой в 0,1 мм; 3 — на сталь.

Как видно из рис. 9 (кривая 1, по сравнению с кривыми 2 и 3), «явления существенного уменьшения частоты максимума спектра эхосигнала при нагружении прямого преобразователя на иммерсионную среду по сравнению с нагружением на сталь» [3] не происходит. «Двугорбость» АЧХ (см. рис. 9, кривая 2) объяснено в [10, 15] и это связано с образованием линейчатого спектра из-за наличия «отдельного» импульса «Отражение» (см. рис. 8б, кривые 1, 2). Далее, при уменьшении контактного слоя импульс «Отражение» смещается по времени к импульсу «Донный», происходит их наложение, образующее «единый» итоговый импульс большей длительности (см. рис. 8в, кривые 1, 2), что и приводит к сужению АЧХ (кривая 3). Кроме того, большая длительность импульса «Отражение», как показано выше, образуется из-за множественности отражений в многослойной структуре — контактный слой, протектор, пьезоэлемент, демпфер.

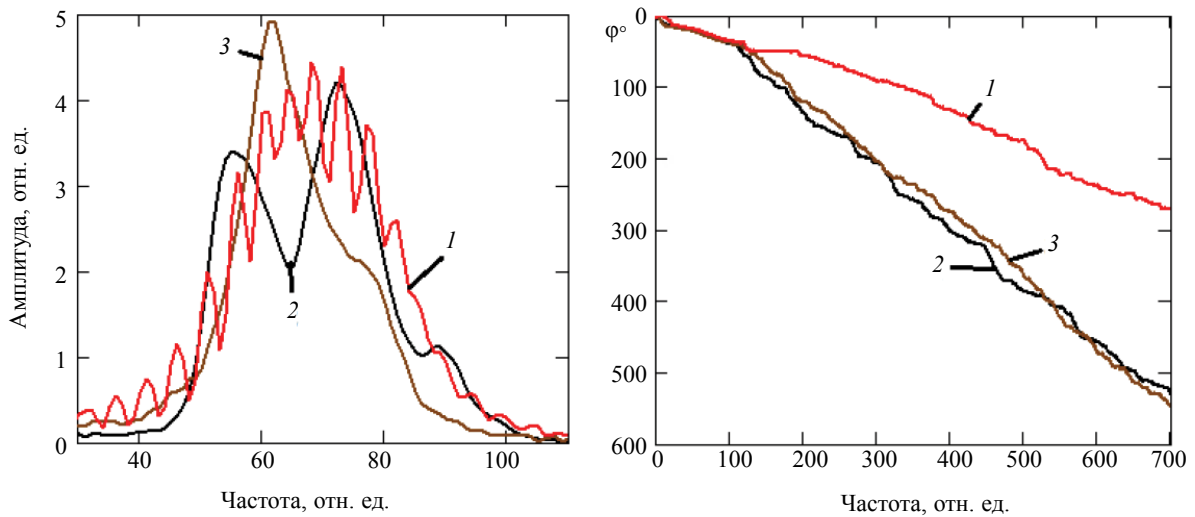


Рис. 10. АЧХ и ФЧХ при нагрузке преобразователя на контактный слой толщиной: 1 — 2,2 мм; 2 — 0,1 мм; 3 — вплотную.

На рисунке представлены АЧХ (рис. 10а) и фазочастотные характеристики тракта (далее — ФЧХ) (рис. 10б) для согласованного преобразователя, нагруженного на контактный слой толщиной: 1 — 2,2 мм (использовалась эхограмма из рис. 8а, кривая 2); 2 — 0,1 мм (использовалась эхограмма из рис. 8б, кривая 2); 3 — вплотную (использовалась эхограмма из рис. 8в, кривая 2).

Кривые 1 и 2 по рис. 10а — это АЧХ, представляющие собой линейчатые спектры, образованные от двух импульсов «Донный» и «Отражение» (см. рис. 8а и 8б), где временное расстояние между ними определяет частотную разницу между пиками спектра АЧХ и фазовый сдвиг кривых ФЧХ 1 и 2 по рис. 10б. Кривая 3 на рис. 10а — это сплошной спектр «единичного» импульса (см. рис. 8в), однако влияние второго импульса «Отражение» еще сказывается в «выпуклости» правой части АЧХ.

### ВАРИАНТ ПРАКТИЧЕСКОГО ПРИМЕНЕНИЯ

В результате разработки методики получена возможность для контактного способа прогнозировать эхограмму, форма которой наблюдается на экране ультразвукового импульсного дефектоскопа, а также форму импульсов ее составляющих. Это открывает новые возможности, например, компенсации мешающих, неинформативных импульсов. Предложим несколько вариантов, например: реконструкция полученной эхограммы по рекомендациям из [15, 18] с вычитанием из полученного реконструированного акустического импульса расчетного (от времени от  $t_0 = 0$  до  $t_3 = 7 \cdot \lambda / 2c$ ) акустического импульса  $I'(t)$ ; проведение свертки импульсов  $I'(t)$ ,  $I(t)$  с вычитанием ее из эхоимпульса; спектральные методы. На рис. 11 представлен второй вариант по улучшению разрешающей способности, как пример, для контактного или щелевого способов контроля, позволяющий устранить влияние контактного слоя на разрешающую способность.

Преобразователь через дистанционирующее кольцо выбранной толщины устанавливается на изделие. Для данной толщины контактного слоя и согласованного преобразователя рассчитывается компенсирующая эхограмма, которая приведена на рис. 11 (кривая 1) как свертка отражения от преобразователя  $I'(t)$  с импульсной характеристикой преобразователя  $I(t)$ . Отметим, что для преобразователя необходимо знание действительных акустических сопротивлений протектора, пьезоэлемента, демпфера [15]. Далее, из полученной от преобразователя эхограммы (рис. 11, кривая 2) вычитается расчетная компенсирующая эхограмма (кривая 1), что и позволяет получить только один «Донный» импульс в виде кривой 3. Таким образом, показана возможность устранения влияния контактного слоя на разрешающую способность, на «мертвую» зону контактного способа.

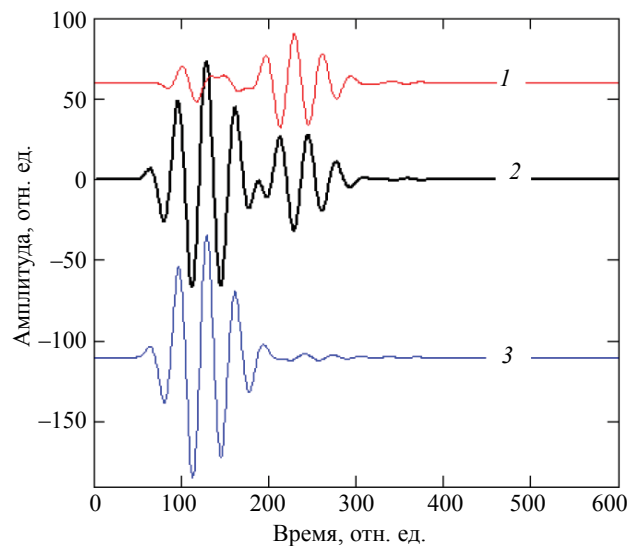


Рис. 11. Компенсация отражений для выбранной толщины слоя:  
 1 — расчетное отражение от преобразователя или компенсирующая эхограмма; 2 — эхограмма, 3 — эхограмма после компенсации.

## ВЫВОДЫ

Предложен метод расчета акустического тракта иммерсионного, щелевого, контактного способов контроля для согласованного с контактной средой преобразователя, позволяющий повысить разрешающую способность при сохранении чувствительности.

По результатам расчета для проектируемого акустического тракта можно спрогнозировать форму эхограммы, которая будет наблюдаться на экране дефектоскопа, определить методы по минимизации мешающих факторов, связанных с отражением от согласованного преобразователя при щелевом и контактном способов контроля.

Показано, что для согласованного с контактной средой преобразователя чувствительность иммерсионного способа не хуже чувствительности контактного способа контроля, при этом не отмечено наличие таких негативных факторов как нестабильность акустического контакта, явления существенного уменьшения частоты максимума спектра эхосигнала при нагружении прямого преобразователя на иммерсионную среду по сравнению с нагружением на сталь.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. ГОСТ Р ИСО 5577—2009. Контроль неразрушающий. Ультразвуковой контроль. Словарь. М.: Стандартиформ, 2011. 27 с.
2. Яблоник Л.М. Оценка чувствительности контактного и иммерсионного методов контроля // Дефектоскопия. 1967. № 1. С. 12—17.
3. Данилов В.Н. К вопросу о выборе параметров преобразователя при иммерсионном ультразвуковом контроле // Дефектоскопия. 2007. № 5. С. 76—87.
4. Коровин В.М., Брезгин С.Н., Харланов А.И. Метод расчета чувствительности ультразвукового преобразователя с учетом интерференции в слое контактной жидкости // Дефектоскопия. 1987. № 1. С. 15—21.
5. Гмырин С.Я. К вопросу об интерференции ультразвуковых волн при прохождении плоского слоя контактной жидкости // Дефектоскопия. 1992. № 3. С. 59—67.
6. Левитан Л.Я., Шарко А.В. Оценка влияния колебаний толщины контактного слоя на результат акустических измерений прочностных свойств стали // Дефектоскопия. 1988. № 1. С. 3—8.
7. Ермолов И.Н. Теория и практика ультразвукового контроля. М.: Изд-во Машиностроение, 1981. 240 с.
8. Данилов В.Н., Артемьев С.А., Захаров А.Ф. Исследование работы модели прямого ультразвукового преобразователя для иммерсионного и обычного способов контроля // Дефектоскопия. 2007. № 6. С. 3—19.
9. Коновалов С.И., Кузьменко А.Г. Особенности импульсных режимов работы электроакустических пьезоэлектрических преобразователей. СПб.: Политехника, 2014. 294 с.

10. *Мартыненко А.В.* Иммерсионный пьезоэлектрический преобразователь с улучшенными характеристиками // Дефектоскопия. 2015. № 8. С. 3—13.
11. *Данилов В.Н.* О влиянии толщины слоя контактной жидкости на характеристики упругих волн, излучаемых прямым преобразователем // Дефектоскопия. 1996. № 6. С. 23—29.
12. *Данилов В.Н.* К вопросу об использовании четвертьволновых согласующих протекторов в прямых преобразователях // Дефектоскопия. 2008. № 5. С. 69—75.
13. *Данилов В.Н., Королев В.Д.* К вопросу о выборе параметров протекторов прямых совмещенных преобразователей // Дефектоскопия. 2002. № 1. С. 71—77.
14. *Данилов В.Н., Воронков В.А., Изюфатова Н.Ю.* Исследование амплитудно-частотной характеристики акустического тракта прямого преобразователя в режиме излучения // Дефектоскопия. 1996. № 3. С. 37—45.
15. *Мартыненко А.В., Ермаченко В.П.* К вопросу об интерпретации эхограмм ультразвукового импульсного дефектоскопа // Дефектоскопия. 2021. № 8. С. 24—36.
16. *Мартыненко А.В.* К вопросу о возможности повышения чувствительности и разрешения иммерсионного пьезоэлектрического преобразователя // Дефектоскопия. 2015. № 7. С. 3—12.
17. *Мартыненко А.В.* Способ акустического согласования пьезоэлемента иммерсионного ультразвукового пьезоэлектрического преобразователя с контролируемой средой / Патент на изобретение № 2561778 от 05.08.2015, МПК<sup>8</sup>G01N 29/00.
18. *Мартыненко А.В., Ермаченко В.П.* Способ ультразвукового контроля материалов и изделий / Заявка на выдачу патента на изобретение № 2021114521 от 21.05.2021, МПК<sup>8</sup>G01N 29/00.
19. ГОСТ 23702—90. Контроль неразрушающий / Преобразователи ультразвуковые. Методы испытаний. М.: Госстандарт СССР, 1991. 57 с.
20. *Могильнер Л.Ю., Сахранов А.В., Урман Н.С.* Прохождение ограниченного ультразвукового пучка через плоский слой контактирующей жидкости при наклонном падении и импульсном режиме излучения // Дефектоскопия. 1986. № 1. С. 70—80.
21. *Меркулов Л.Г., Веревкин В.М.* Прохождение и отражение ультразвукового импульса для плоскопараллельной пластины в жидкости // Дефектоскопия. 1965. № 5. С. 13—21.