ОБРАТНЫЕ ЗАДАЧИ УЛЬТРАЗВУКОВОЙ ТОМОГРАФИИ В НЕРАЗРУШАЮЩЕМ КОНТРОЛЕ: МАТЕМАТИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ И ЭКСПЕРИМЕНТ

© 2019 г. Е.Г. Базулин^{1,*}, А.В. Гончарский^{2,**}, С.Ю. Романов^{2,***}, С.Ю. Серёжников^{2,****}

¹ООО «Научно-производственный центр «ЭХО+», Россия 123458 Москва, ул. Твардовского, 8,

Технопарк «Строгино»

² МГУ им. М.В. Ломоносова, Россия 119992 Москва, Воробьевы горы, 1, стр. 4, E-mail: *bazulin@echoplus.ru; **gonchar@srcc.msu.ru; ***romanov60@gmail.com; ****s2110sj@gmail.com

> Поступила в редакцию 13.11.2018; после доработки 24.04.2019 Принята к публикации 29.04.2019

Статья посвящена разработке ультразвуковых томографических методов в неразрушающем контроле. Обратная задача реконструкции скоростного разреза рассматривается как нелинейная коэффициентная обратная задача для скалярного волнового уравнения. Разработаны эффективные итерационные методы ее решения на суперкомпьютере, использующие прямые формулы для вычисления градиента функционала невязки между рассчитанным и экспериментально измеренным волновым полем на детекторах. Эффективность алгоритмов апробирована на экспериментальных данных. Проведены первые эксперименты на специально изготовленных твердотельных образцах с простейшим расположением включения при регистрации сигналов стандартными ультразвуковыми антенными решетками на частоте 5 МГц. Показано, что с помощью разработанных томографических методов в схеме на отражение и прохождение в реальном эксперименте можно не только обнаружить границы отражателей, но и определить скоростной разрез внутри отражателей.

Ключевые слова: обратные задачи, ультразвуковая томография, ультразвуковой неразрушающий контроль, антенная решетка, скорость звука.

DOI: 10.1134/S0130308219060046

1. ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время томографические методы широко используются как в медицине, так и в промышленности. Наиболее распространены рентгеновские томографы. Если в томографе использовать ультразвуковые источники, то для интерпретации томографических данных необходимо применять волновые модели. Математические методы решения обратных задач волновой томографии намного сложнее, чем в рентгеновской томографии. В последние годы появилось большое количество публикаций в области разработки методов решения обратных задач томографии в волновых моделях.

Прорывные результаты в области решения задач волновой томографии как коэффициентных обратных задач связаны с возможностью на математическом уровне строгости вычисления градиента функционала невязки между расчетным волновым полем и измеренным в эксперименте [1—4]. В этой постановке модель учитывает волновые эффекты, а искомыми коэффициентами являются как скорость распространения волны, так и коэффициент поглощения как функции координат.

В настоящее время методы волновой томографии уже используют в медицине и сейсмике. В сейсмике существует направление «full waveform inversion», в котором обратная задача рассматривается как нелинейная задача в волновой модели, для решения которой применяют итерационные методы [5, 6]. Специфика задач в сейсмике такова, что используются в основном только отраженные волны. В такой постановке можно реконструировать только границы слоев. В отличие от этих работ в настоящей статье используется томографический подход, в котором регистрируются как отраженные, так и прошедшие волны. Именно прошедшие через неоднородность волны позволяют восстанавливать скоростной разрез неоднородности.

В ультразвуковом неразрушающем контроле (УЗК) количество публикаций в области реконструкции скоростного разреза томографическими методами в волновых моделях с применением проходящих волн невелико, в отличие от сейсмоакустики и медицины. Считается, что в задачах УЗК можно использовать методы решения обратных задач, разработанные для сейсмоакустики. Как и в сейсмоакустике, эти попытки в УЗК также связаны только с использованием отраженного излучения [7, 8]. Примером могут служить методы синтезированной апертуры (Synthetic Aperture Focusing Technique (SAFT)) [9—16], которые ориентированы на определение границ дефектов в твердом теле. Продвинутые варианты получили название «topological imaging», «time reverse» [17—23]. На уровне модельных задач сделаны попытки применить методы «full waveform inversion» в задачах УЗК [24, 25]. В модельных расчетах используется очень маленькое количество источников и приемников и грубые сетки, что существенно ограничивает возможности томографических методов. Как показано в настоящей статье, высокое разрешение в обратных задачах можно получить при существенном увеличении количества узлов сетки, количества источников и количества приемников. К сожалению, зависимость количества операций от числа узлов сетки имеет вид n^3 . В настоящей статье показано, что томографический подход в задачах УЗК вполне реализуем на высокопроизводительных вычислительных системах.

Что касается апробации томографических методов реконструкции скоростного разреза в волновых моделях с использованием проходящих волн в УЗК на экспериментальных данных, то количество таких работ практически стремится к нулю. В данной работе впервые предлагаемые томографические методы апробированы на экспериментальных данных. Отметим также исследования по применению лучевых моделей в томографии для нахождения скорости и поглощения [26, 27].

2. ПОСТАНОВКА ОБРАТНОЙ ЗАДАЧИ УЛЬТРАЗВУКОВОЙ ТОМОГРАФИИ В 2D-ДЕФЕКТОСКОПИИ И МЕТОДЫ ЕЕ РЕШЕНИЯ

В задачах УЗК в силу своей простоты широко распространена скалярная волновая модель, которая достаточно точно описывает распространение отдельно продольных или поперечных волн. Ограничимся рассмотрением продольных волн, которые при проведении измерений в эксперименте можно отделить от поперечных волн по времени прихода на детекторы. Будем описывать распространение продольной волны скалярным волновым уравнением с нулевыми начальными условиями:

$$c(r)u_{n}(r,t) - \Delta u(r,t) = \delta(r-r_{0})g(t), \qquad u(r,t=0) = u_{t}(r,t=0) = 0.$$
(1)

Здесь u(r, t) — скалярное волновое поле, $r \in \mathbb{R}^N$, $N = 2, 3, c^{-0.5}(r) = v(r)$ — функция скорости продольной волны в среде, Δ — оператор Лапласа по переменной r. Генерируемый источником импульс описывается функцией g(t). Расчет волнового поля при заданном c(r) из уравнений (1) представляет собой прямую задачу.

Проведем постановку обратной задачи ультразвуковой томографии в УЗК. Рассмотрим простейшую двумерную задачу, в которой исследуемое тело представляет собой область Q, на границе которой расположены ультразвуковые антенные решетки (AP) с номерами от 1 до 4 (рис. 1). Внутри области Q расположена область G. Скорость волны v(r) в области G, форма области G и ее расположение внутри области Q — неизвестны. Скорость волны v(r) в области Q\G постоянна и известна $v(r) = \text{const} = v_0$. В исследуемом теле Q различными элементами AP последовательно возбуждаются ультразвуковые импульсы. Обратная задача заключается в восстановлении неизвестной функции скорости v(r) в области Q по данным измерения четырьмя AP волны на границе ∂Q . Возможны различные схемы эксперимента. Наиболее перспективной является схема, в которой используются данные как на отражение, так и на прохождение. Более подробно различные томографические схемы описаны ниже.



Рис. 1. Схема эксперимента.



Рис. 2. Форма зондирующего импульса.

Таким образом, обратная задача ультразвуковой томографии в скалярной модели заключается в реконструкции неизвестной скорости волны v(r) из уравнения (1) в области Q по экспериментально измеренному волновому полю u(r,t) на границе области Q при зондировании области G источниками, расположенными на границе ∂Q . При решении обратной задачи не используется никакой информации о форме области G и ее расположение внутри области Q, скорость внутри области G ищется не как одно неизвестное число, а как функция v(x, y). Заметим, что измерения волнового поля могут проводиться только на части границы S $\subset \partial Q$. В нашем примере исследуемая область Q является квадратом (рис. 1). На рис. 2 представлена форма зондирующих импульсов длительностью 2-3 периода центральной частоты.

Запишем функционал невязки $\Phi(c)$ от аргумента c(r) между экспериментальными данными и рассчитанным полем при заданном c(r) на границе S [28, 29]

$$\Phi(c) = \sum_{j=1}^{M} \frac{1}{2} \int_{0}^{T} \int_{S} \left(u^{j}(s,t;c) - U(s,t) \right)^{2} ds dt.$$
⁽²⁾

Здесь U(s, t) — экспериментальные данные на границе S $\subset \partial Q$ за время (0,T); $u^{i}(s,t;c)$ — волновое поле при решении прямой задачи (1) при заданном коэффициенте c(r). Скорость v(r) и коэффициент c(r) связаны соотношением $c^{-0.5}(r) = v(r)$. Заметим, что при использовании нескольких источников зондирующего излучения функционал невязки представляет собой сумму по j = 1, ..., M значений невязки, полученных для каждого источника. При каждом фиксированном источнике j интеграл суммируется по времени (0,T) и по области всех приемников, принимающих сигналы для выбранного источника, T — время регистрации сигнала на приемниках. Время T выбирается с таким расчетом, чтобы все учитываемые отраженные и преломленные волны достигли приемников. Обратная задача ставится как задача поиска функции $\overline{c}(r)$, минимизирующей функционал невязки (2) $\overline{c}(r) : \min \Phi(c) = \Phi(\overline{c})$. Функция $\overline{c}(r)$ принимается за приближенное решение задачи.

Эффективными методами минимизации функционала невязки $\Phi(c)$ являются градиентные методы. Выражение для градиента $\Phi(c)$ в строгой математической постановке получено в [3, 4] и имеет вид:

$$\Phi_{c}'(c) = \sum_{j=1}^{M} \frac{1}{2} \int_{0}^{T} w_{t}^{j}(r,t;c) u_{t}^{j}(r,t;c) dt, \qquad (3)$$

где $u^{j}(r,t;c)$ — решение «основной» задачи (1); $w^{j}(r,t;c)$ — решение «сопряженной» задачи [30, 31]

$$c(r)w_{tt}(r,t) - \Delta w(r,t) = E(r,t)\Big|_{r \in S}, \quad w(r,t=T) = w_{t}(r,t=T) = 0.$$
(4)

Здесь $w_{tt}(r, t)$ — вторая производная по времени, Δ — оператор Лапласа по переменной r, $w^{j}(r, t; c)$ в уравнениях (4) ищется при заданном коэффициенте c(r) для фиксированного *j*-го источника. В уравнении (4) E(r, t) = u(s, t) - U(s, t) и определена на части границы S $\subset \partial Q$, где измерена U(s, t). На границе расчетной области ∂Q ставится условие «неотражения».

Имея явное выражение для градиента (3), можно построить различные итеративные алгоритмы минимизации функционала невязки. Приведем метод наискорейшего спуска. Будем считать, что найден коэффициент $c^{(n)}$ на *n*-й итерации. Для построения следующего итерационного приближения $c^{(n+1)}$ вычислим градиент $\Phi'_c(c)$ в точке $c^{(n)}$ и решим задачу минимизации одномерного функционала в направлении градиента. Следующее итерационное приближение $c^{(n+1)}$ определяется соотношением $c^{(n+1)} = \arg\min_{\alpha>0} \Phi(c^{(n)} - \alpha \Phi'_c(c^{(n)}))$ путем минимизация функционала по параметру α .

3. ЧИСЛЕННЫЕ МЕТОДЫ

Для численного решения обратной задачи в прямоугольной области объекта Q (см. рис. 1) был использован конечно-разностный метод во временной области в двумерном случае. Как показано в [32], использование около 15 точек на длину волны центральной частоты для схемы 4-го порядка аппроксимации вдоль пространственных координат уравнения (1) обеспечивает достаточную точность расчетов прямой задачи при характерных параметрах задачи. В экспериментах не использовались 4 первых и 3 последних элемента AP, расположенные близко к боковым границам (см. рис. 1), в результате чего волны, отраженные от границ прямоугольного объекта Q, приходили на детекторы

с большой задержкой по времени по сравнению с прямой волной от источника. Это позволило выбирать время Т так, чтобы отсекать по времени волны, отраженные от границ. Последнее позволяет использовать условие «неотражения» на границе [33].

Для решения рассматриваемой нелинейной обратной задачи необходимо провести огромный объем вычислений. Это невозможно без использования высокопроизводительных вычислительных кластеров. Используемая явная разностная схема, позволяет провести высокоэффективное распараллеливание расчетов на вычислительных узлах кластера [34, 35]. Особенность рассматриваемой задачи ультразвуковой томографии в УЗК в том, что используется большое число (~100) источников. Вычисления распространения волн в «основной» и «сопряженной» задачах для каждого источника выполняются практически независимо. Простейшая схема распараллеливания расчетов состоит в использовании ~100 вычислительных ядер, каждое из которых проводит расчеты только для своего источника. Такая схема позволяет ускорить вычисления почти в 100 раз по сравнению с однопроцессорным компьютером.

4. ЧИСЛЕННЫЕ ЭКСПЕРИМЕНТЫ

Численные эксперименты для 2D-обратных задач ультразвуковой томографии в УЗК проводились по схеме эксперимента, показанной на рис. 1 для различных схем зондирования. Наиболее простая и часто встречающаяся в дефектоскопии схема зондирования, в которой данные собираются на отражение. В нашем эксперименте в схеме на отражение экспериментальные данные собираются следующим образом. Сначала используется только AP, обозначенный цифрой 1. Последовательно излучает каждый из элементов AP номер 1. При этом в качестве приемников используются все элементы AP номер 1. Затем эксперимент продолжается для AP номер 2, 3 и 4. Таким образом, описанный режим зондирования на отражение включает 4 этапа сбора данных.

В схеме на прохождение данные собираются следующим образом. Сначала используются только две AP с номерами 1 и 2. Последовательно излучает каждый из элементов AP номер 1. При этом в качестве приемников используются все элементы AP номер 2. Затем последовательно излучает каждый из элементов AP номер 2, а принимают все элементы AP номер 1. Затем эксперимент продолжается для AP с номерами 3 и 4. Описанный режим на прохождение включает 4 этапа сбора данных. В схеме на прохождение и на отражение используются все описанные выше режимы и на отражение, и на прохождение, что в совокупности дает 8 этапов эксперимента по сбору данных.

В численном эксперименте сначала решалась прямая задача распространения волны в неоднородной модельной среде для тестового объекта на рис. 1 для каждого положения источника. На границе области расчетов Q ставилось граничное условие «неотражения». Волновое поле на детекторах на границе области Q сохранялось и использовалось в качестве численных экспериментальных данных для решения обратной задачи.

Обратная задача решалась для двух схем зондирования, описанных выше: 1) на прохождение и 2) на прохождение и отражение. В численном эксперименте скорость звука в области Q\G равна $v_0 = 2,33$ мм/мкс, скорость звука в круглой неоднородности G равна 2,45 мм/мкс и отличается от v_0 примерно на 5 %. Такие параметры примерно соответствуют модельным образцам, изготовленным для реального физического эксперимента, описанного ниже. Длина волны центральной частоты импульса $\lambda = 0,466$ мм (частота 5 МГц), размер расчетной области — 20×20 мм, размер разностной сетки — 700×700 точек. В расчетах использовалось 100 положений источников, располагавшихся равномерно на каждой стороне Q, как показано на рис. 1 (по 25 источников с каждой стороны) с шагом 0,6 мм. Аналогично располагались приемники.

На рис. За в растровом виде показано исходное изображение (скоростной разрез) тестового объекта. На рис. Зб приведено полученное после 40 итераций изображение при проведении расчетов в схеме эксперимента на отражение. На рис. Зв — полученное после 40 итераций изображение по данным на отражение и прохождение. Начальное приближение итерационного процесса в обоих случаях было выбрано $v_0 = \text{const} = 2,33 \text{ мм/мкс}$. На рис. 3 соответствие уровня серого значениям функции скорости волны в мм/мкс определяется шкалой яркости.

Как видно из рис. 36, в схеме численного эксперимента по отраженным данным удается восстановить только границы объекта, что теоретически обосновано в [36], а также согласуется с численными экспериментами, приведенными в [37—39]. В данном расчете время регистрации сигнала Tбыло ограничено приемом отраженных сигналов только от ближней к источнику границы области G. Как показано в [38, 39], если в расчетах учитывать отражение также от дальней от источника границы, то это приводит к эффекту удвоения границ.



Рис. 3. Модельные расчеты:

a — фантом; *б* — реконструированное изображение в схеме на отражение; *в* — реконструированное изображение в схеме на отражение и прохождение.

Скорость внутри области G, восстановленная в модели на отражение, получилась такая же как в окружающей среде $v_0 = 2,33$ мм/мкс. Как видно из рис. 3*в*, схема эксперимента с данными на отражение и прохождение, позволяет достаточно хорошо восстанавливать границы и с высокой точностью скорость внутри объекта. Восстановленная скорость внутри области G составила 2,41 мм/мкс, что отличается на ~1,5 % от заданной. Форма области G на рис. З*в* воспроизводится не совсем точно. Артефакты на изображении связаны, прежде всего, с тем, что объект контроля зондируется не со всех сторон, а с малого набора ракурсов — только в вертикальном и горизонтальном направлениях. Это видно из результатов модельных расчетов, приведенных на рис. 4, где использовались дополнительные ракурсы зондирования объекта через каждые 22,5 град. Артефакты на изображении исчезли, и форма области G стала кругом. Однако проведение реального физического эксперимента с дополнительными ракурсами зондирования требует значительного усложнения стенда для проведения измерений. Как показано на численных экспериментах в [4, 38, 39], предлагаемые томографические методы при полноракурсном зондировании имеют разрешение менее длины волны центральной частоты при шуме в измерениях 5-10 %.



Рис. 4. Модельные расчеты. Реконструированное изображение в схеме на отражение и прохождение при добавлении зондирования через каждые 22,5 град.

5. ПОСТАНОВКА МОДЕЛЬНОГО ЭКСПЕРИМЕНТА УЛЬТРАЗВУКОВОЙ ТОМОГРАФИИ В ТВЕРДОМ ТЕЛЕ

В нашем эксперименте использовалось две линейные эквидистантные AP, содержащие по 32 одинаковых приемно-излучающих пьезоэлемента. Центральная частота излучаемого импульса решеток 5 МГц, размер активного пьезоэлемента 0,5 мм и зазор между элементами 0,1 мм. Ширина лепестка диаграммы направленности каждого элемента в эксперименте составила 50—60 град. Малый размер пьезоэлемента обеспечивает регистрацию сигнала с шагом, сравнимым с длиной волны в эксперименте.

Для модельного эксперимента использована следующая простейшая схема объекта контроля. В качестве объекта контроля выбран брусок в виде вытянутого вдоль оси Z параллелепипеда, который имеет квадратное сечение в плоскости XY. Размер стороны квадрата 20 мм, размер бруска вдоль оси Z — 40 мм. В бруске вдоль оси Z просверлено цилиндрическое отверстие. В это отверстие вставляется цилиндрический вкладыш из другого материала. При проведении экспериментов четыре AP располагались на боковой поверхности бруска в плоскости XY при некотором фиксированном $z = z_0$. Активные элементы AP имеют ширину 0,5 мм и длину около 10 мм и располагались длинной стороной вдоль оси Z. При такой геометрии эксперимента можно считать оправданным предположение о том, что элементы излучают в плоскости XY цилиндрическую волну через цилиндрический брусок. Это приближение позволяет использовать двумерную модель задачи по реконструкции сечения бруска в плоскости $z = z_0$, то есть объект контроля — квадрат, а вкладыш представляет собой круг.

Поверхность цилиндрического вкладыша и отверстия должны быть максимально гладкие для уменьшения отражения от них. В качестве контактной жидкости между вкладышем и стенкой отверстия бруска использовался глицерин. Эскиз образца со сквозным отверстием приведен на рис. 5. Было изготовлено два бруска: из рексолита и плексигласа. Выбор материалов объяснялся хорошим согласованием акустических параметров с антенными решетками, что позволило получать короткие импульсы длиной 2-3 периода в объектах контроля. Акустические параметры в этих материалах таковы, что длина волны на частоте 5 МГц составляет порядка 0,5 мм. Таким образом, длина стороны бруска составляет порядка 40 длин волн.



Рис. 5. Эскиз образца со сквозным отверстием: a — вертикальное сечение; δ — горизонтальное сечение.



Рис. 6. Фото стенда для проведения измерений.

Для проведения измерений был собран стенд (рис. 6) для фиксации AP номер 1 и 2 на поверхности образца 3. Образец со вставкой 4 устанавливается с помощью фиксаторов 5 и может поворачивать на 90 град для проведения экспериментов на других сторонах бруска. При повороте образца на 90 град по часовой стрелке AP номер 1 станет называться AP номер 3, а AP номер 2 станет называться AP номер 4 (см. рис. 1).

Для проведения экспериментов по УЗК в твердом теле использовали ультразвуковой многоканальный дефектоскоп АВГУР-АРТ фирмы ООО «НПЦ «ЭХО+» (Россия) в комплектации с управляющим компьютером и антенными решетками фирмы IMASONIC (Франция). Для уменьшения уровня белого шума более чем на 12 дБ измерения сигналов проводили 20 раз с последующим усреднением и частотной фильтрацией в полосе от 1 до 8 МГц.

6. РЕКОНСТРУКЦИЯ СКОРОСТНОГО РАЗРЕЗА ПО РЕЗУЛЬТАТАМ МОДЕЛЬНЫХ ЭКСПЕРИМЕНТОВ

Проведем сравнение результатов решения обратной задачи ультразвуковой томографии по реальным сигналам модельных экспериментов и по данным, полученным из численного решения прямой задачи. Схема и значения параметров физических экспериментов максимально совпадают с численным экспериментом, описанным в разделе 4.

В эксперименте использовали бруски с просверленным отверстием диаметром 4 мм. В первом эксперименте в брусок из рексолита был вставлен цилиндрический вкладыш из эбонита. Скорость продольной волны в рексолите (2,33 км/с) ниже, чем в эбоните (2,4 км/с). Во втором эксперименте

в брусок из плексигласа был вставлен вкладыш из капролона. Скорость продольной волны в плексигласе (2,7 км/с) выше, чем в капролоне (2,64 км/с). Различие скорости в бруске и вкладыше не превышало 5 %. Длина волны центральной частоты импульса около 0,5 мм (частота 5 МГц), размер расчетной области — 20×20 мм, размер разностной сетки — 700×700 точек. В эксперименте использовалось 100 положений источников, располагавшихся на каждой стороне прямоугольника, как показано на рис. 1, с шагом 0,6 мм. Аналогично располагались приемники.

На рис. 7*а* приведен восстановленный скоростной разрез в первом эксперименте (рексолитэбонит) при проведении расчетов в схеме эксперимента на рис. 1 на прохождение. В итерационном процессе начальное приближение скорости в среде было выбрано $v_0 = \text{const} = 2,33$ мм/мкс. На рис. 7*б* приведено восстановленное изображение в схеме на прохождение и отражение после 40 итераций. На рис. 8*a* приведен восстановленный скоростной разрез во втором эксперименте (плексиглас-капролон) в схеме на прохождение. Начальное приближение скорости в среде было выбрано $v_0 = \text{const} = 2,7$ мм/мкс. На рис. 8*б* приведено восстановленное изображение в схеме на прохождение и отражение после 40 итераций. И в первом, и во втором экспериментах после 40 итераций функционал невязки (2), практически перестал уменьшаться, а восстановленное изображение визуально перестало приближаться к точному.



Рис. 7. Скоростные разрезы, восстановленные в образце рексолита с эбонитовой вставкой: *a* — по данным на прохождение; *б* — по данным на прохождение и отражение.

Как видно из рис. 7 и 8, структура восстановленных изображений, полученных в модельных экспериментах, похожа на структуру восстановленного изображения в численных экспериментах (см. рис. 3). Восстановленная в модельном эксперименте скорость продольной волны во вкладыше из эбонита равна 2,38-2,39 мм/мкс, во вкладыше из капролона — 2,63-2,64 мм/мкс. Артефакты на рис. 7, 8 и 3 имеют похожую структуру и, как отмечено в разделе 4, связаны, прежде всего, с малым набором ракурсов зондирования. Волновые эффекты вокруг вставок на рис. 76, 86 имеют характерный размер порядка длины волны и связаны погрешностями в экспериментальных данных.



Рис. 8. Скоростные разрезы, восстановленные в образце плексигласа со вставкой из капролона: *a* — по данным на прохождение; *б* — по данным на прохождение и отражение.

Предложенный метод решения обратных задач волновой томографии и предложенная схема проведения томографического эксперимента, в отличие от традиционных методов УЗК, позволяют по данным на прохождение и отражение не только локализовать неоднородность, найти ее границу, но и определить скорость в ней с точностью около 1 % в центральной части неоднородности. Знание скорости внутри неоднородности чрезвычайно важно в задачах УЗК. К таким задачам можно отнести задачу контроля сварных швов, задачу контроля смесевого соотношения компонентов в цилиндрических объектах при разработке изделий из полимерных материалов, когда разные компоненты имеют разные скорости.

В задаче контроля сварных швов различие в скорости звука в основном металле и в сварном соединении может составлять порядка 10 %. Кроме того, и в самом сварном шве скорость может меняться в пределах 10 %. Поэтому для корректного описания внутренней структуры необходимо восстанавливать скорость хотя бы с точностью 1 %. Заметим также, что когерентные методы восстановления дефектов (томографические, SAFT) эффективно работают в случае, когда ошибки расчета времен распространения импульсов меньше чем четверть периода центральной частоты. Только в этом случае происходит эффективное когерентное накопление сигнала. Исходя из этих требований, можно оценить точность определения скорости звука в сварном соединении как величину порядка 1 % при характерном размере шва ~40 мм и частотах ~5 МГц. Более того, незнание скорости внутри неоднородного объекта может приводить к тому, что восстановленные по отраженным данным границы и отражатели окажутся смещенными относительно реального их залегания, будут искажены размеры и тип отражателя. В настоящее время в УЗК изображение восстанавливается, как правило, в предположении, что объект контроля однородный.

В настоящей статье выбраны простые объекты для реконструкции, использовано волновое приближение без учета поглощения. Гораздо более сложные объекты, в которых изменение скорости в пределах объекта составляло около ±20 %, в моделях с учетом поглощения использовались авторами в численных экспериментах по решению задач ультразвуковой томографии в приложении к медицине [28, 37—39]. Однако цель статьи не просто провести численные эксперименты, а решить обратную задачу по экспериментальным данным реального физического эксперимента и сравнить его с численным экспериментом.

Расчеты проводили с использованием суперкомпьютера «Ломоносов-2» МГУ имени М.В. Ломоносова [40]. Время вычисления 40 итераций составило около 1 ч. Вычисления проводили на 100 вычислительных ядрах СРU, что составляет менее 0,1 % мощности суперкомпьютера. Для решения рассматриваемых обратных задач можно использовать любые высокопроизводительные вычислительные системы. Наиболее эффективно использование кластеров на графических картах.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда (проект № 17—11— 01065) в Московском государственном университете имени М.В. Ломоносова. Работа выполнена с использованием оборудования Центра коллективного пользования сверхвысокопроизводительными вычислительными ресурсами МГУ имени М.В. Ломоносова.

7. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В статье на экспериментальных данных апробированы разработанные авторами математические методы решения обратных томографических задач реконструкции скоростного разреза для УЗК в скалярном волновом приближении. В отличие от хорошо изученных в ультразвуковой дефектоскопии методов восстановления границ неоднородностей по отраженным данным, в настоящей работе на рассмотренных экспериментах продемонстрировано, что при использовании проходящих волн предлагаемые методы позволяют находить не только границы включений, но и функцию скорости внутри образца. В рассмотренных экспериментах используются только продольные волны, отсекаемые по времени прихода. Для этих экспериментов показана состоятельность при решении обратной задачи использования скалярной волновой модели для продольных волн. Разработанные авторами методы решения нелинейной обратной задачи томографии требуют значительного объема вычислений, которые могут быть реализованы только на высокопроизводительных вычислительных системах.

В работе рассмотрен простейший эксперимент, демонстрирующий принципиальные возможности метода на реальных данных. В дальнейших работах авторы предполагают усложнить эксперимент, увеличив количество ракурсов зондирования и добавив в объект контроля два вкладыша из разных материалов. Планируется восстановить распределение коэффициента поглощения в объекте контроля.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Natterer F. Possibilities and limitations of time domain wave equation imaging / Contemporary Mathematics. V. 559. Providence : AMS, 2011. P. 151–162.

2. Бейлина Л., Клибанов М.В., Кокурин М.Ю. Адаптивность и релаксация для некорректных задач и глобальная сходимость для коэффициентной обратной задачи // Проблемы математического анализа. 2010. № 46. С. 3—44.

3. Goncharsky A.V., Romanov S.Y. Supercomputer technologies in inverse problems of ultrasound tomography // Inverse Probl. 2013. V. 29. № 7. P. 075004.

4. Goncharsky A.V., Romanov S.Y. Iterative methods for solving coefficient inverse problems of wave tomography in models with attenuation // Inverse Problems. 2017. V. 33. N 2. P. 025003.

5. Pratt R.G. Seismic waveform inversion in the frequency domain, Part 1: Theory and verification in a physical scale model // Geophysics. 1999.V. 64. № 3. P. 888—901.

6. Virieux J., Operto S. An overview of full-waveform inversion in exploration geophysics // Goephysics. 2009. V. 74. № 6. P. WCC1—WCC26.

7. Blitz J., Simpson G. Ultrasonic Methods of Non-destructive Testing. London: Springer, 1995.

8. Langenberg K.-J., Marklein R., Mayer K. Ultrasonic Nondestructive Testing. CRC Press, 2012.

9. Hall T.E., Doctor S.R., Reid L.D., Littlield R.J., Gilber R.W. Implementation of real-time ultrasonic SAFT system for inspection of nuclear reactor components // Acoustical Imaging. 1987. V. 15. P. 253–266.

10. Mayer K., Markelein R., Langenberg K.J., Kreutter T. Three-dimensional imaging system based on Fourier transformation synthetic aperture focusing technique // Ultrasonics. 1990. V. 28. P. 241–255.

11. Schmitz V., Chakhlov S., Müller W. Experiences with synthetic aperture focusing in the field // Ultrasonics. 2000. V. 38. P. 731-738.

12. Jensen J.A., Nikolov S.I., Gammelmark K.L., Pedersen M.H. Synthetic aperture ultrasound imaging // Ultrasonics. 2006. V. 44. P. 5—15.

13. *Базулин Е.Г.* Сравнение систем для ультразвукового неразрушающего контроля, использующих антенные решетки или фазированные антенные решетки // Дефектоскопия. 2013. № 7. С. 51—74.

14. Базулин Е.Г., Садыков М.С., Коновалов Д.А. Метод конечных разностей во временной области. Ч. 2. Расчет эхосигналов в анизотропных неоднородных материалах, структурный шум // Дефектоскопия. 2018. № 8. С. 3—10.

15. Самокрутов А.А., Шевалдыкин В.Г. Ультразвуковая томография металлоконструкций методом цифровой фокусировки антенной решетки // Дефектоскопия. 2011. № 1. С. 21—38.

16. Качанов В.К., Соколов И.В., Тимофеев Д.В., Туркин М.В., Шалимова Е.В. Обнаружение отражающих плоскостей при ультразвуковой томографии строительных конструкций из бетона // Дефектоскопия. 2010. № 5. С. 36—44.

17. Bellis C., Bonnet M. Crack identification by 3D time-domain elastic or acoustic topological sensitivity // C. R. Mecanique. 2009. V. 337. № 3. P. 124—130.

18. Lubeigt E., Mensah S., Rakotonarivo S., Chaix J-F., Baquè F., Gobillot G. Topological imaging in bounded elastic media // Ultrasonics. 2017. April. V. 76. P. 145—153.

19. Dominguez N., Gibiat V. Non-destructive imaging using the time domain topological energy // Ultrasonics. 2010. V. 50. № 3. P. 367—372.

20. Rodriguez S., Deschamps M., Castaings M., Ducasse E. Guided wave topological imaging of isotropic plates // Ultrasonics. 2014. V. 54. № 7. P. 1880—1890.

21. Metwally K., Lubeigt E., Rakotonarivo S., Chaix JF., Baqué F., Gobillot G., Mensah S. Weld inspection by focused adjoint method // Ultrasonics. 2018. February. V. 83. P. 80—87.
22. Bachmann E., Jacob X., Rodriguez S., Gibiat V. Three-dimensional and real-time two-dimensional

22. Bachmann E., Jacob X., Rodriguez S., Gibiat V. Three-dimensional and real-time two-dimensional topological imaging using parallel computing // The Journal of the Acoustical Society of America. 2015. V. 138. N_{2} 3. P. 1796.

23. Kocur G.K., Saenger E.H., Grosse C.U., Vogel T. Time reverse modeling of acoustic emissions in a reinforced concrete beam // Ultrasonics. 2016. V. 65. P. 96—104.

24. Seidl R., Rank E. Iterative time reversal based flaw identification // Computers & Mathematics with Applications. 2016. August. V. 72. № 4. P. 879–892.

25. *Rao J., Ratassepp M., Fan Z.* Guided Wave Tomography Based on Full Waveform Inversion // IEEE Trans Ultrason Ferroelectr Freq Control. 2016. V. 63. № 5. P. 737—745.

26. Кошевой В.В., Кривин Е.В., Муравьев А.М., Романишин И.М. Особенности ультразвуковой томографии толстолистовых изделий // Дефектоскопия. 2004. № 7. С. 3—16.

27. Солдатов А.А., Сорокин П.В., Солдатов А.И., Костина М.А., Шульгина Ю.В. Малоракурсная акустическая томография при теневом контроле антенными решетками // Дефектоскопия. 2018. № 7. С. 3—8.

28. Goncharsky A.V., Romanov S.Y., Seryozhnikov S.Y. Inverse problems of 3D ultrasonic tomography with complete and incomplete range data // Wave Motion, 51. 2014. № 3. P. 389–404.

29. Goncharsky A.V., Romanov S.Y. Inverse problems of ultrasound tomography in models with attenuation

// Phys. Med. Biol. 2014. V. 59. № 8. P. 1979–2004.

30. Гончарский А.В., Романов С.Ю. О двух подходах к решению коэффициентных обратных задач для волновых уравнений // ЖВММФ. 2012. Т. 52. № 2. С. 263—269. 31. Гончарский А.В., Романов С.Ю., Серёжников С.Ю. Низкочастотная трехмерная ультразвуковая

томография // Доклады РАН. 2016. Т. 468. № 3. С. 268—271.

32. Romanov S. Optimization of Numerical Algorithms for Solving Inverse Problems of Ultrasonic Tomography on a Supercompute // Communications in Computer and Information Science. 2017. V. 793. P. 67—79.

33. Engquist B., Majda A. Absorbing boundary conditions for the numerical simulation of waves // Math. Comput. 1977. V. 31. P. 629-651.

34. Goncharsky A., Seryozhnikov S. The Architecture of Specialized GPU Clusters Used for Solving the Inverse Problems of 3D Low-Frequency Ultrasonic Tomography // Communications in Computer and Information Science. 2017. V. 793. P. 363-375.

35. Bazulin E.G., Goncharsky A.V., Romanov S.Y., Seryozhnikov S.Y. Parallel CPU- and GPU-algorithms for inverse problems in nondestructive testing // Lobachevskii Journal of Mathematics. 2018. V. 39. № 4. P. 486-493.

36. Natterer F. Incomplete data problems in wave equation imaging // Inverse Problems and Imaging. 2010. V. 4, № 4. P. 685—691.

37. Гончарский А.В., Романов С.Ю., Серёжников С.Ю. Задачи волновой томографии с неполным диапазоном данных // Выч. методы и программ. 2014. Т. 15. № 2. С. 274—285.

38. Romanov S. Исследование томографических схем низкочастотной ультразвуковой диагностики на суперкомпьютерах // CEUR Workshop Proceedings. 2015. V. 1482. P. 199—205. 39. Goncharsky A.V., Romanov S.Y., Seryozhnikov S.Y. A computer simulation study of soft tissue

characterization using low-frequency ultrasonic tomography // Ultrasonics. 2016. V. 67. P. 136–150.

40. Центр коллективного пользования сверхвысокопроизводительными вычислительными ресурсами МГУ имени М.В. Ломоносова. URL: https://parallel.ru/cluster (дата обращения: 01.02.2019).