

# ПРИМЕНЕНИЕ МОДЕЛИ ВЗАИМОДЕЙСТВУЮЩИХ ЧАСТИЦ С ОБРАЩЕНИЕМ ВРЕМЕНИ ДЛЯ ВОССТАНОВЛЕНИЯ ИСТОЧНИКОВ АКУСТИЧЕСКИХ ВОЛН

Д. Я. Суханов, А. Кузовова

Томский государственный университет

Поступила в редакцию 03.08.2020 г.

**Аннотация.** Предложен метод решения обратной задачи восстановления источников акустических волн, по измерениям поля на некоторой поверхности на основе метода динамики частиц. В работе рассматривается представления среды в виде множества частиц в кубической объемно-центрированной кристаллической решетке. Рассматривается только ближний порядок взаимодействия частиц. В рассматриваемой решетке каждая частица имеет 14 соседей. Рассматривается случай линейной зависимости силы притяжения частиц от расстояния, однако, без существенных изменений, возможно моделирование любой нелинейной зависимости. Данный подход позволяет рассматривать неоднородные среды с широкой вариацией плотности и скорости звука в рамках одной модели. В отличие от методов основанных на решении волнового уравнения, предлагаемая модель позволяет учитывать нелинейные эффекты и исследовать макроскопическую динамику объектов под действием акустических колебаний. Численно показана возможность визуализации двух сферических источников акустических волн в воде, несмотря на наличие поперечных волн в рассматриваемой модели твёрдого тела, их влияние пренебрежимо мало в рассматриваемом случае. Проведена экспериментальная проверка предложенного метода для визуализации ультразвуковых излучателей в воде и восстановления изображения колебаний звукоизлучающего объекта на частотах 30 кГц, 63 кГц, 80 кГц и 100 кГц.

**Ключевые слова:** акустика, обращение времени, множество частиц, кубическая объемно-центрированная кристаллическая решетка, звукоизлучающий объект, сферический источник.

## APPLICATION OF THE TIME-REVERSED INTERACTING PARTICLE MODEL TO RECOVER ACOUSTIC WAVE SOURCES

D. Y. Sukhanov, A. Kuzovova

**Abstract.** A method is proposed for solving the inverse problem of acoustic visualization of sources on the basis of representing the medium as a set of particles in a cubic body-centered crystal lattice. In such a lattice, each particle has 14 nearest neighbors. In this paper, we use the case of a linear dependence of the attractive force of particles on distance, however, without significant changes; it is possible to simulate any nonlinear dependence. This approach allows one to consider in-homogeneous media with a wide variation in the density and speed of sound within the framework of one model. In contrast to methods based on the solution of the wave equation, the proposed model allows one to take into account nonlinear effects and study the macroscopic dynamics of objects under the influence of acoustic vibrations. The possibility of visualizing two spherical sources of acoustic waves in water is shown numerically. The possibility of visualizing two spherical sources of acoustic waves in water is shown numerically, despite the presence of transverse waves in the considered model of a rigid body, their influence

is negligible in the case under consideration. Experimental verification of the proposed method for visualization of ultrasonic emitters in water and reconstruction of the image of vibrations of a sound-emitting object at frequencies of 30 kHz, 63 kHz, 80 kHz and 100 kHz has been carried out.

**Keywords:** acoustics, time reversal, many particles, cubic volume-centered crystal lattice, sound-emitting object, spherical source.

## ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время методы акустической томографии находят широкое применение в неразрушающем контроле, в геофизике, акустике океана [1–4]. Для восстановления изображения неоднородности нужно решить обратную задачу — по рассеянному от неоднородности сигналу восстановить ее форму и характеристики. Распространенным методом обработки результатов измерений является метод согласованной фильтрации [5–6]. Однако он требует к вычислительным ресурсам. Широкое распространение для решения обратных задач получил метод временного обращения волн (ВОВ) [7–12]. Чтобы получить временное обращение волн необходимо в принятом сигнале изменить направление хода времени на обратное, а затем излучить его в ту же среду из области измерений. Использование данного метода позволяет осуществлять фокусировку полей, применяемую, например, в активной локации. Метод временного обращения волн (ВОВ) состоит из двух этапов. На первом этапе в среду с помощью исследуемого источника излучается тестовый сигнал, после чего в некоторых точках пространства проводится одновременно измерение волнового поля. На втором этапе методом численного моделирования, вычисляются сигналы, обратно распространяемые в среду в тех точках, где они были приняты, с изменением направления хода времени на отрицательный.

Метод обращения времени позволяет получать изображение исследуемого источника в неоднородных средах с известными характеристиками среды, в которой находится источник. Благодаря учёту неоднородностей и границ раздела сред при решении обратной задачи повышается эффективность фокусировки поля. В работе [13] была теоретически рассмотрена возможность применения метода обращения волнового фронта при нелинейном рассеянии плоской звуковой волны на пульсирующей сфере. В работах [3, 8] был применен метод временного обращения волн для задач распространения волн в мелком море. Также метод временного обращения волн находит применение и в задачах измерения коэффициента акустического поглощения в образцах биологических тканей [14]. В работе [4] метод временного обращения волн был применен для локализации неоднородностей в упругой пластине. Возможность обнаружения неоднородности в среде, и определения ее размеров в настоящее время является актуальной задачей в неразрушающем ультразвуковом контроле. В работе [15] возможность обратимости волнового процесса во времени была применена для восстановления распределения нормальной скорости и акустического давления на поверхности излучателя.

В рассмотренных выше работах метод временного обращения волн применялся для рассмотрения среды как непрерывной. Однако в настоящее время все более актуальной становится концепция уменьшения размеров объектов. Развитие нанотехнологий привело к необходимости оценивать характеристики объектов состоящих всего из нескольких слоев атомов. Таким образом, становится актуальной проблема рассмотрения объектов, на микро уровне основываясь на дискретных методах. Для аналитического и численного описания процессов, происходящих в телах с микроструктурой, удобно воспользоваться методом динамики частиц, состоящим в представлении тела как совокупности взаимодействующих частиц (материальных точек или твердых тел), движущихся согласно классическим уравнениям динамики под действием заданных законов взаимодействия между частицами [16]. Одним из наиболее хорошо разработанных вариантов этого метода является метод молекулярной динамики. В классической молекулярной динамике поведение отдельной частицы описывается

уравнениями движения Ньютона [17–18].

Преимущество такого подхода по сравнению с методами, основанными на концепции сплошной среды, заключается в том, что он требует значительно меньше априорных предположений о свойствах материала. Возможен учёт таких сложных эффектов, как пластичность, образование трещин, разрушение, температурное изменение свойств материала, фазовые переходы [19]. Для описания каждого из этих эффектов в рамках сплошной среды требуется отдельная теория, в то время как при моделировании методом динамики частиц эти эффекты получаются автоматически, в результате интегрирования уравнений движения.

Используемые при моделировании частицы не обязательно представляют собой атомы или молекулы, они могут рассматриваться как элементы более высокого масштабного уровня, описываемые как материальные точки. Несмотря на это, часто используется традиционное название метод МД, однако, в данном случае, более правильно говорить о методе динамики частиц. В методе динамики частиц рассматриваемая среда представляется в виде совокупности взаимодействующих материальных точек, для которых записываются классические уравнения движения. Взаимодействие частиц описывается посредством потенциалов взаимодействия, основным свойством которых является отталкивание при сближении и притяжение при удалении [16].

В данной работе мы предлагаем на основе метода динамики частиц и метода обращения волн реализовать восстановление источников звука в неоднородных средах. Новизна предлагаемого подхода заключается в том, что метод динамики частиц применён для расчёта обращённых во времени акустических процессов, что позволяет визуализировать источники акустических волн.

Данный метод применим для изучения металла, из которого изготавливаются ультразвуковые излучатели, в частности, для оценки неоднородности структуры металла и процесса распространения ультразвука в такой структуре. Вычисление полей волн обратного распространения на основе модели динамики частиц позволяет восстановить распределение источников звука в жидкой среде и визуализировать области колебаний звукоизлучающего объекта. При этом возможен учёт неоднородности среды, в которой находится объект и в рамках одной модели учёт перехода волн между различными материалами. Как правило, притяжение и отталкивание между частицами задаётся через потенциал Леннарда-Джонса. В данной работе непосредственно задана сила взаимодействия между частицами в виде линейной функции, описывающей зависимость силы притяжения между частицами от расстояния. Так как рассматривается линейный процесс распространения волн при решении обратной задачи, это позволяет минимизировать искажение спектра сигнала восстанавливаемого источника. Нелинейный характер взаимодействия привёл бы к обогащению спектра сигнала, что нежелательно для решения обратной задачи.

## ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ

Представим твёрдое тело в виде множества частиц упорядоченных в кубической объемно-центрированной кристаллической решётке. Каждая частица описывает конечный объём среды, а взаимодействие между частицами описывается силой, обеспечивающей устойчивость кристаллической решётки. Если расстояние между частицами равно равновесному (периоду решётки), то сила притяжения между частицами равна нулю, становится положительной, если частицы удаляются и отрицательной, если частицы сближаются. Взаимодействуют только ближайшие частицы, и, всего, в данной решётке, у каждой частицы может быть не больше 14 соседей. Распространение волн в этой структуре происходит за счёт последовательной передачи сдвиговых возмущений от частицы к частице. Аналогичные волновые возмущения характерны не только для сдвигов, но и для скоростей частиц.

Рассмотрим линейную зависимость силы притяжения частиц от расстояния вида  $F =$  ВЕСТНИК ВГУ. СЕРИЯ: ФИЗИКА. МАТЕМАТИКА. 2021. № 2 19

$k(x - d)$ , при этом считаем, что между собой взаимодействуют только ближайшие частицы. Линейная зависимость применяется для минимизации искажений спектра сигнала при решении обратной задачи восстановления источников. Нелинейная зависимость может породить дополнительные спектральные компоненты, которых не было в исходном сигнале. Поскольку мы рассматриваем волновые процессы, а распространение волн в средах, как правило, описывается линейным волновым уравнением, то применение линейной зависимости оправдано. Коэффициент  $k$  определяется из скорости звука  $c$  массы частиц  $m$ , и расстояния между частицами  $d$  в состоянии равновесия:  $k = c^2 m / d^2$ . Данное решение следует из сведения одномерной модели взаимодействующих частиц к волновому уравнению. Рассмотрим силы, действующие на одну частицу вдоль оси  $x$ , и запишем уравнение движения частицы:

$$m \frac{\partial^2 X(x, t)}{\partial t^2} = k (X(x - d, t) - 2X(x, t) + X(x + d, t)), \quad (1)$$

где  $X(x, t)$  — смещение частицы в момент времени  $t$  в плоскости  $x$  ( $x$  — координата частицы в невозмущенном состоянии),  $X(x - d, t)$  — сдвиг соседней частицы на расстояния  $x - d$ . Приближенно  $X(x - d, t) - 2X(x, t) + X(x + d, t) \approx d^2 \frac{\partial^2 X}{\partial x^2}$ , следовательно,  $m \frac{\partial^2 X(x, t)}{\partial t^2} = kd^2 \frac{\partial^2 X}{\partial x^2}$ , что является формой волнового уравнения где скорость звука рассчитывается через выражение,  $1/c^2 = m/(kd^2)$ , следовательно,  $c = d\sqrt{k/m}$ , а  $k = \frac{c^2 m}{d^2}$ . С помощью выражения  $k = \frac{c^2 m}{d^2}$  можно задать ключевой параметр предлагаемой модели  $k$  через скорость звука  $c$  и плотность среды  $\rho$ . Плотность среды и масса частиц связаны соотношением:  $m = \rho d^3 / 2$ ; где  $d$  — шаг размещения частиц в сетке ( $d^3$  — объём куба, деление на 2 вызвано тем, что есть частицы в центре каждого куба, что удваивает общее количество частиц). Из представленного рассуждения видно, что предложенная модель эквивалентна решению волнового уравнения при устремлении расстояния между частицами к нулю. Известно, что при численном решении волнового уравнения или уравнения Гельмгольца [20] требуется выбирать шаг пространственной сетки многое меньше длины волны  $\lambda$ , как правило, выбирается шаг менее  $\lambda/6$ . Предполагается, что для модели динамики частиц справедливо аналогичное требование и целесообразно выбрать  $d < \lambda/6$ . Шаг по времени  $\Delta t$  предлагается выбирать исходя из условия Куранта  $c\Delta t < d$  [21].

Траектории частиц рассчитываются согласно уравнениям движения с шагом по времени  $\Delta t$  на основе выражения:

$$\mathbf{R}(t + \Delta t) = \mathbf{R}(t) + \mathbf{v}(t) \Delta t + \frac{\mathbf{a}\Delta t^2}{2} \quad (2)$$

где  $\mathbf{v}(t + \Delta t) = \mathbf{v}(t) + \mathbf{a}\Delta t$ ,  $\mathbf{R}(t)$  — радиус вектор координаты частиц в момент времени  $t$ ;  $\mathbf{a} = \mathbf{F}/m$  — ускорение частицы;  $\mathbf{F} = \sum_n k(|\mathbf{r}_n - \mathbf{R}| - d) \frac{\mathbf{r}_n - \mathbf{R}}{|\mathbf{r}_n - \mathbf{R}|}$  — сила действующая на рассматриваемую частицу со стороны соседних частиц;  $\mathbf{r}_n$  — радиус вектор координаты соседних частиц.

В данной модели частицы являются материальными точками без вращательных степеней свободы. Каждая частица описывает некий конечный объём среды определённой массы. Несмотря на то, что рассматриваемая модель исходит из представления вещества в виде кристаллической решётки, замена атомов укрупнёнными частицами, считается справедливой для длин волн много больше шага решётки. Частица описывается тремя координатами  $(x, y, z)$  в пространстве и тремя компонентами скорости  $(v_x, v_y, v_z)$ . Для каждой частицы хранятся в памяти номера 14-и соседних с ней частиц для ускорения вычисления силы взаимодействия.

Предложенный метод численного моделирования движения частиц в кристаллической решётке реализован на основе технологии параллельных вычислений OpenCL. Распараллеливание алгоритма обеспечивается возможностью независимого вычисления положения каждой частицы в следующий момент времени.

Для численного моделирования среда распространения волн была задана в виде куба состоящего из 32000 частиц высотой 20мм шириной 20мм и толщиной 4 мм. Расстояние между

частичами  $d=0.5$  мм шаг по времени  $dt = 8 \cdot 10^{-9}$  с. В качестве моделируемой среды рассматривалась вода (скорость звука 1440 м/с, плотность 1000 кг/м<sup>3</sup>). В процессе моделирования рассматривались продольные волны, которые характерны как для твердого тела, так и для жидкости, что позволяет с помощью предложенного метода описать распространения акустических волн в воде. Трактовка акустических волн в жидкости как волн в твёрдом теле является приближением. В ходе численного моделирования прямого распространения волн в качестве источника задаётся продольная сферическая волна. Возникающие поперечные сдвиги частиц пренебрежимо малы и связаны с ограниченностью размеров источника. В центре области моделирования располагались два источника заданных в виде сфер находящихся на расстоянии 10 мм друг от друга. На верхней границе расчетной области были размещены приёмники с шагом 1 мм. Исходный сигнал имеет синусоидальную форму и излучается на частоте 800 кГц. Сферическая волна вносится в виде возмущения координат частиц лежащих в центре куба. На рис. 1 представлено изображение поля волны (вертикальная компонента скорости частиц) распространяющейся от сферических излучателей.

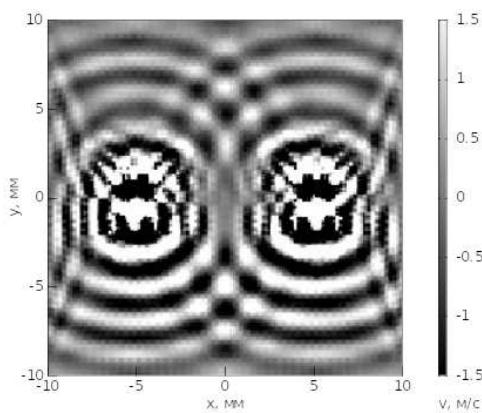


Рис. 1. Распределение поля синусоидальной волны (вертикальная компонента скорости частиц) на частоте 800 кГц от сферических излучателей в воде находящихся на расстоянии 10 мм друг от друга.

Решение обратной задачи основано на методе обратного распространения волн. Обратное распространение волн вычисляется, по сути, тем же способом численного моделирования, что и прямая задача, но здесь шаг по времени принимается отрицательным. Вместе с этим, точки приёма становятся излучателями, причём они излучают именно тот сигнал, который был принят в соответствующий момент времени.

В нашем случае, точки приёма располагаются сверху, поэтому волна обратного распространения будет проходить сверху вниз. В точках, где находятся моделируемые сферические излучатели, волны обратного распространения, сходятся. Источники обратной волны задаются через возмущение вертикальной компоненты скорости ( $v_y$ ) частиц на верхней границе среды. В обратной задаче рассматриваются продольные волны, направленные по оси  $y$ , но поле источника имеет и  $x$  компоненты скорости частиц. В результате, восстановление поля источника происходит в узкой диаграмме направленности пропорциональной  $\sin \theta$ , где  $\theta$  — угол между осью  $y$  и волновым вектором. Это приведёт к эффекту уменьшению апертуры измерений, и, как следствие, к ухудшению разрешения восстанавливаемых изображений. Кроме того, могут возникать искажения, вызванные наличием поперечных волн в модели твёрдого тела, однако их амплитуда значительно меньше амплитуды продольных компонент. На рис. 2 представлено восстановленное изображение двух сферических излучателей методом обратного распространения волн.

Для восстановленных изображений двух сферических излучателей представленных на

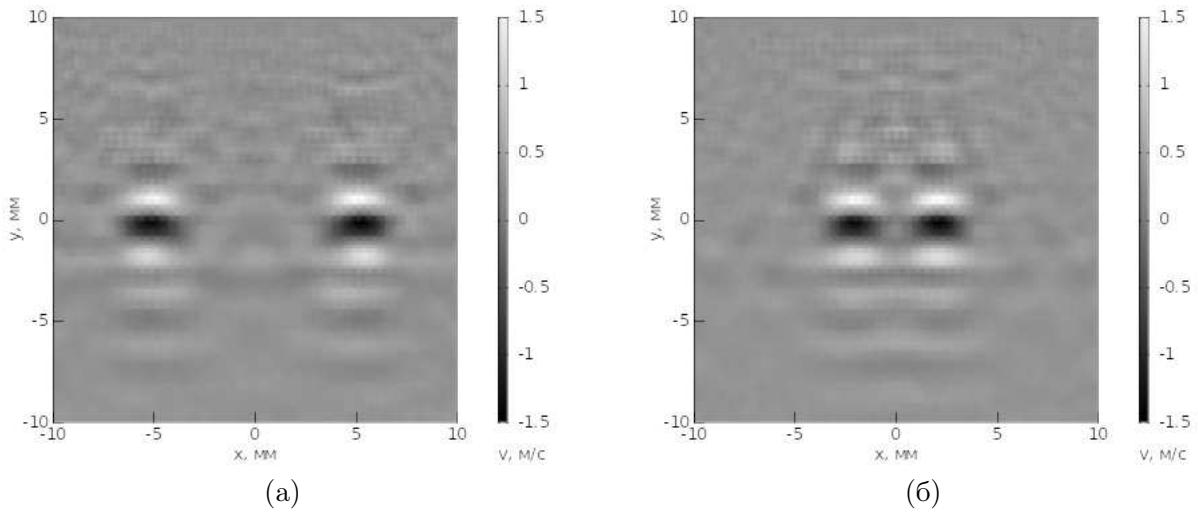


Рис. 2. Восстановленное изображение (вертикальная компонента скорости частиц) двух сферических источников методом обратного распространения волн на расстоянии 10мм (а), и 4мм (б).

рис. 2 (а, б) была проведена оценка дифракционного предела по формуле  $\Delta x = 2\frac{z\lambda}{B}$ , где  $\Delta x$  — разрешение;  $z$  — дальность от области измерения до точечного источника;  $\lambda$  — длина волны;  $B$  — размер области измерений.

Полученное разрешение для восстановления источников сферических волн составляет порядка 2,5 мм, тогда как теоретическая оценка разрешения (дифракционный предел) составляет 1,75 мм. Разрешение хуже дифракционного предела, что связано с эффектом ограничения диаграммы направленности из-за учёта только вертикальной компоненты скорости частиц в области регистрации.

Таким образом, результаты численного моделирования показывают возможность восстановления сферических источников в среде с высоким пространственным разрешением, что подтверждает применимость предложенного метода. Но полученные изображения являются, по сути, результатом применения одного и того же алгоритма для решения прямой и обратной задачи. Для проверки возможности решения обратной задачи было рассмотрено аналитическое решения прямой задачи для двух источников гармонических сферических волн на частоте 800 кГц. Размеры области моделирования при аналитическом решении обратной задачи соответствуют размерам области при численном моделировании. Прямое распространение волн от двух сферических источников было рассчитано аналитически. Далее рассчитанный аналитический сигнал вносился в модель в виде возмущения координат частиц являющихся приемниками (которые при решении обратной задачи становятся излучателями) расположенных на верхней границе расчетной области. На рис. 3 представлено восстановленное изображение сферических источников на расстоянии 10мм и 4мм методом обратного распространения для сигнала источников заданного аналитически.

Процесс обратного распространения волн был остановлен после достижения передним фронтом области размещения источников. Можно видеть, что при рассмотрении численного решения (рис. 2) не визуализируется гармоническое поле выше размещения источников. Это связано с тем, что прямая задача моделировалась ограниченное время, и, в область измерений дошло незначительное количество периодов фронта волны. Ограничение времени было вызвано необходимостью экономии памяти при вычислениях. В целом результаты моделирования обратного распространения волнового поля для численного и аналитического решения согласуются, и, наблюдается локализованное изображение сферических источников. Данный

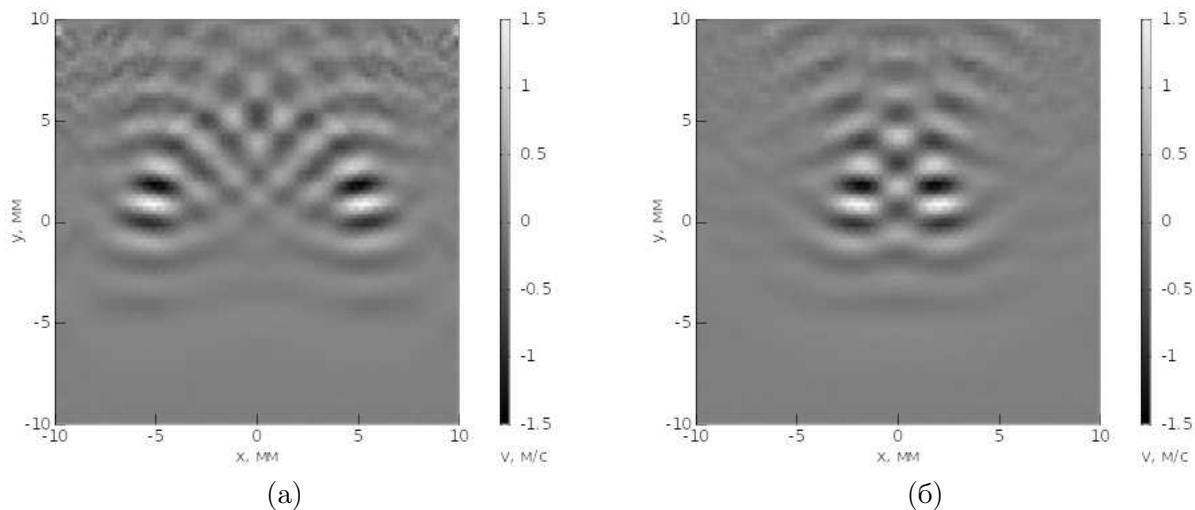


Рис. 3. Восстановленное изображение (вертикальная компонента скорости частиц) двух сферических источников волн методом обратного распространения для сигнала источников заданного аналитически расположенных на расстоянии 10мм (а), и 4мм (б) друг от друга.

результат показывает применимость обращения времени в модели частиц для восстановления источников волнового поля в однородной звукопроводящей среде.

Также было проведено численное моделирование в неоднородной среде. Среда распространения волн была задана в виде параллелепипеда размерами 32x20x1 мм с шагом размещения частиц 0,4 мм шаг по времени  $dt = 8 \cdot 10^{-9}$  с. В качестве моделируемой среды рассматривалась вода (скорость звука 1440 м/с, плотность 1000 кг/м<sup>3</sup>). Неоднородность представляла собой параллелепипед размерами 4x2x1мм и затеняла один из источников сферических волн. Скорость звука в материале неоднородного включения составила 2000 м/с, а плотность 500 кг/м<sup>3</sup>. В центре области моделирования располагались два источника сферических волн находящихся на расстоянии 10 мм друг от друга. Источники в начальный момент времени синхронно излучали короткий гауссов импульс длительностью 250 нс. В ходе решения прямой задачи записывалось пространственное распределение вертикальной компоненты скорости колебаний частиц на верхней границе воды (область измерений) в течение 10 мкс. За это время акустические импульсы продольных волн успевали дойти до области измерений.

В результате решения обратной задачи методом обращения волн было получено изобра-

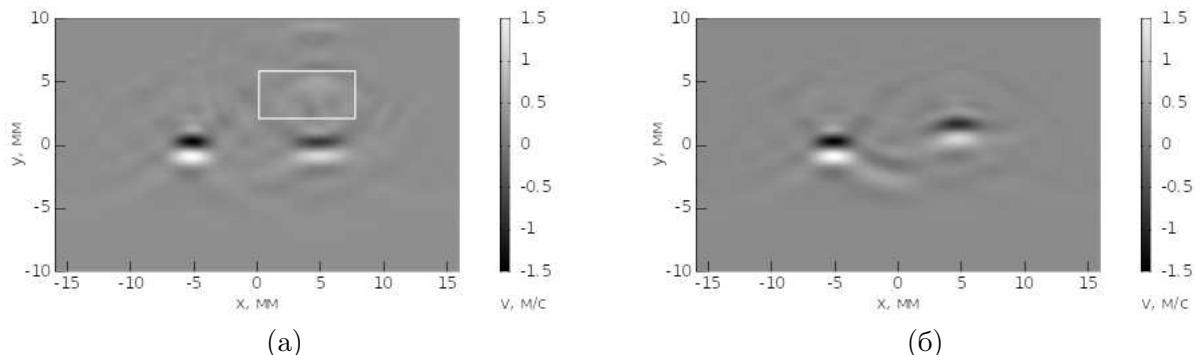


Рис. 4. Восстановленное изображение двух сферических источников в неоднородной среде на расстоянии 10мм с учетом фоновой неоднородности (а) (белым прямоугольником показана фоновая неоднородность), и без учета фоновой неоднородности (б). Визуализирована вертикальная компонента скорости частиц.

жение (рис. 4а), на котором видно, что в точках, где находятся сферические излучатели волны обратного распространения, сходятся. Для сравнения было проведено решение обратной задачи без учёта фоновой неоднородности (рис. 4б). Видно, что без учёта фоновой неоднородности изображение источника смешается, что вызывает ошибку в определении его координат. Изображения частиц сглажены для улучшения визуализации.

В рассматриваемом случае граница раздела среды и фоновой неоднородности имеет низкий коэффициент отражения, поэтому интенсивность восстановленного изображения затенённого неоднородностью источника сравнима с интенсивностью незатенённого.

## ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ

Была проведена экспериментальная проверка возможности восстановления ультразвуковых излучателей в воде методом обратного распространения волн. Для визуализации ультразвуковых излучателей в воде, в качестве экспериментальной установки использовался двухкоординатный сканер, на котором закреплялся приемник рис. 5.

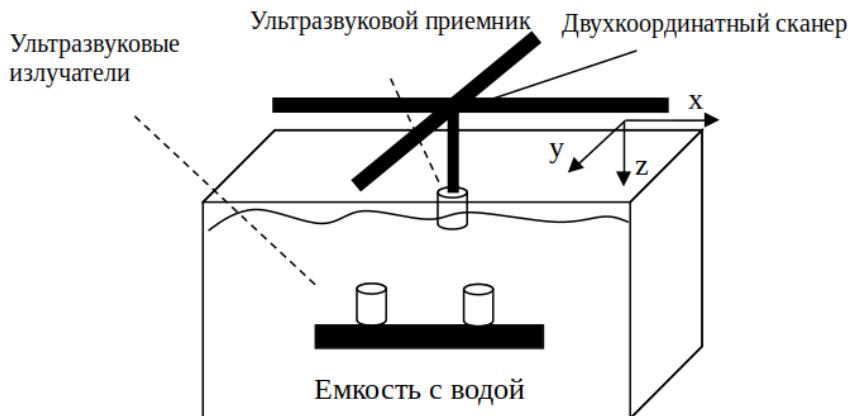


Рис. 5. Схема измерения поля ультразвуковых излучателей через воду.

Ультразвуковой излучатель диаметром 18 мм с резонансной частотой 40 кГц погружался в воду на глубину 55мм, а ультразвуковой приемник крепился на двухкоординатном сканере и погружался в воду в соответствии со схемой измерений представленной на рис. 5. Измерение сигнала ультразвукового излучателя проводилось в области 128Х128мм. Сигнал, полученный, по результатам измерений, представляет собой трёхмерный массив данных — амплитуда сигнала в зависимости от времени и двух координат датчика на плоскости. Измеренный в ходе эксперимента сигнал вносился в численную модель в виде возмущения координат частиц расположенных на верхней границе расчетной области (излучателей) а направление хода времени было изменено на обратное. В области нахождения ультразвукового излучателя волны обратного распространения сходятся, что позволяет визуализировать ультразвуковой излучатель.

Также было проведено экспериментальное измерение сигнала от двух ультразвуковых излучателей размещенных на расстоянии 33мм друг от друга. Измерения проводились в области 128Х128мм, а ультразвуковые излучатели погружались в воду на глубину 55мм. На рис. 6 представлен результат восстановления изображения ультразвукового излучателя в воде методом обратного распространения волн, а на рис. 7 представлен результат восстановления изображения двух ультразвуковых излучателей расположенных на расстоянии 33мм друг от друга в воде методом обратного распространения волн.

Также была проведена экспериментальная проверка возможности визуализации звукоиз-

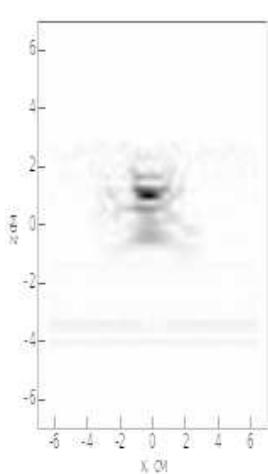


Рис. 6. Восстановленное изображение ультразвукового излучателя в воде методом обратного распространения волн.

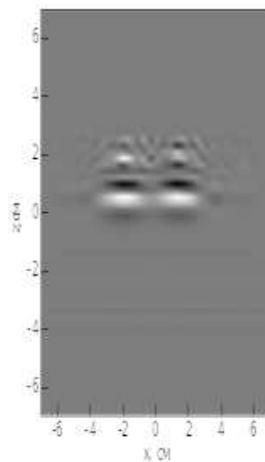


Рис. 7. Восстановленное изображения двух ультразвуковых излучателей в воде методом обратного распространения волн размещенных на расстоянии 33мм друг от друга

лучающего объекта сложной формы. На рисунке 8 представлена конструкция звукоизлучающего объекта из титана.

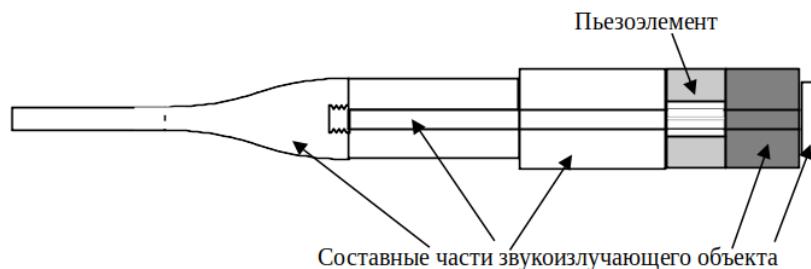


Рис. 8. Рассматриваемая конструкция звукоизлучающего объекта из титана.

Пространственное распределение колебаний на поверхности звукоизлучающего объекта определяет области наибольших сдвигов в конструкции, характеризует амплитуду колебаний на различных частотах. Для визуализации распределения акустических колебаний предлагается применить метод обратного распространения волн для измерения поля на поверхности воды. Звукоизлучающий объект из титана погружается в воду, а на его пьезоэлемент подается короткий импульсный сигнал. Широкая полоса спектра импульсного сигнала позволяет исследовать колебания звукоизлучающего объекта на всех частотах в ходе одного пространственного сканирования.

Плоское пространственное сканирование ультразвуковым датчиком в воде позволяет измерить распределение поля ультразвуковых колебаний на плоскости с заданным шагом. В каждой точке проводится оцифровка временной зависимости акустического сигнала в воде. Результатом измерений является трёхмерный массив данных — амплитуда сигнала в зависимости от времени и двух координат датчика на плоскости. Полученные данные необходимо обработать для восстановления колебаний в звукоизлучающем объекте. Кроме информации о колебаниях измеренное поле несёт сведения о наличии дефектов и рассеивающих частей

объекта.

Вычисление полей волн обратного распространения на основе модели частиц позволяет восстановить распределение источников звука в воде и визуализировать области колебаний звукоизлучающего объекта. Был проведён эксперимент по исследованию колебаний звукоизлучающего объекта с применением предложенного метода. В ёмкость с водой (рис.9) был погружен звукоизлучающий объект из титана.

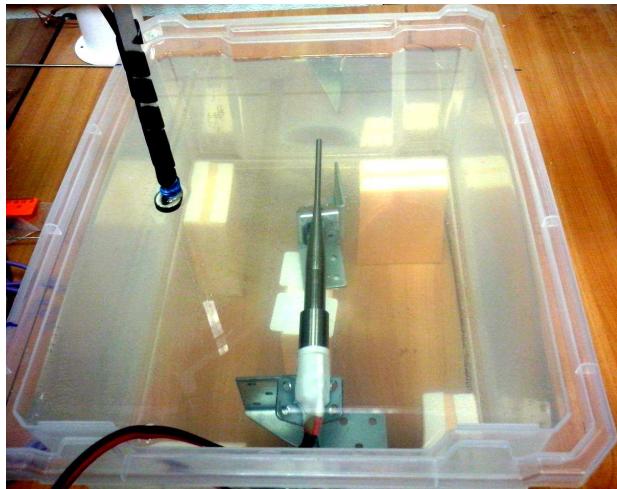


Рис. 9. Фотография эксперимента по двухкоординатному сканированию акустического поля звукоизлучающего объекта из титана, погруженному в воду.

Пространственное сканирование проводилось на квадратной области 32 см на 32 см с частотой оцифровки 310 кГц. На рис. 10 представлен сигнал, измеренный в воде над звукоизлучающим объектом. В данном случае интерес представляют первые 0,2 мс сигнала, поскольку далее возникают переотражённые сигналы от стенок ёмкости.

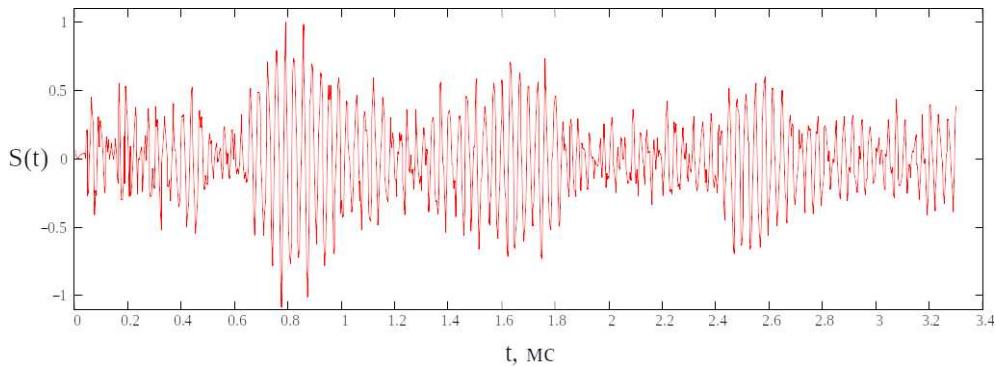


Рис. 10. Сигнал, измеренный в одной из точек двухкоординатной области сканирования в ходе эксперимента по сканированию поля звукоизлучающего объекта из титана, погружённого в воду ультразвуковым датчиком.

Для решения обратной задачи в модели взаимодействующих частиц необходимо сигнал, измеренный в ходе эксперимента внести в модель. Сигнал, полученный, по результатам измерений, представляет собой трёхмерный массив данных — амплитуда сигнала в зависимости от времени и двух координат датчика на плоскости. Измеренный в ходе эксперимента сигнал вносился в численную модель в виде возмущения координат частиц расположенных на верхней границе расчетной области (излучателей) а направление хода времени было изменено на

обратное. В области нахождения звукоизлучающего объекта волны обратного распространения сходятся.

На рис. 11 представлены результаты обработки для частот 30 кГц, 63 кГц, 80 кГц и 100 кГц. С помощью обращения времени в модели взаимодействующих частиц были восстановлены изображения колебаний звукоизлучающего объекта.

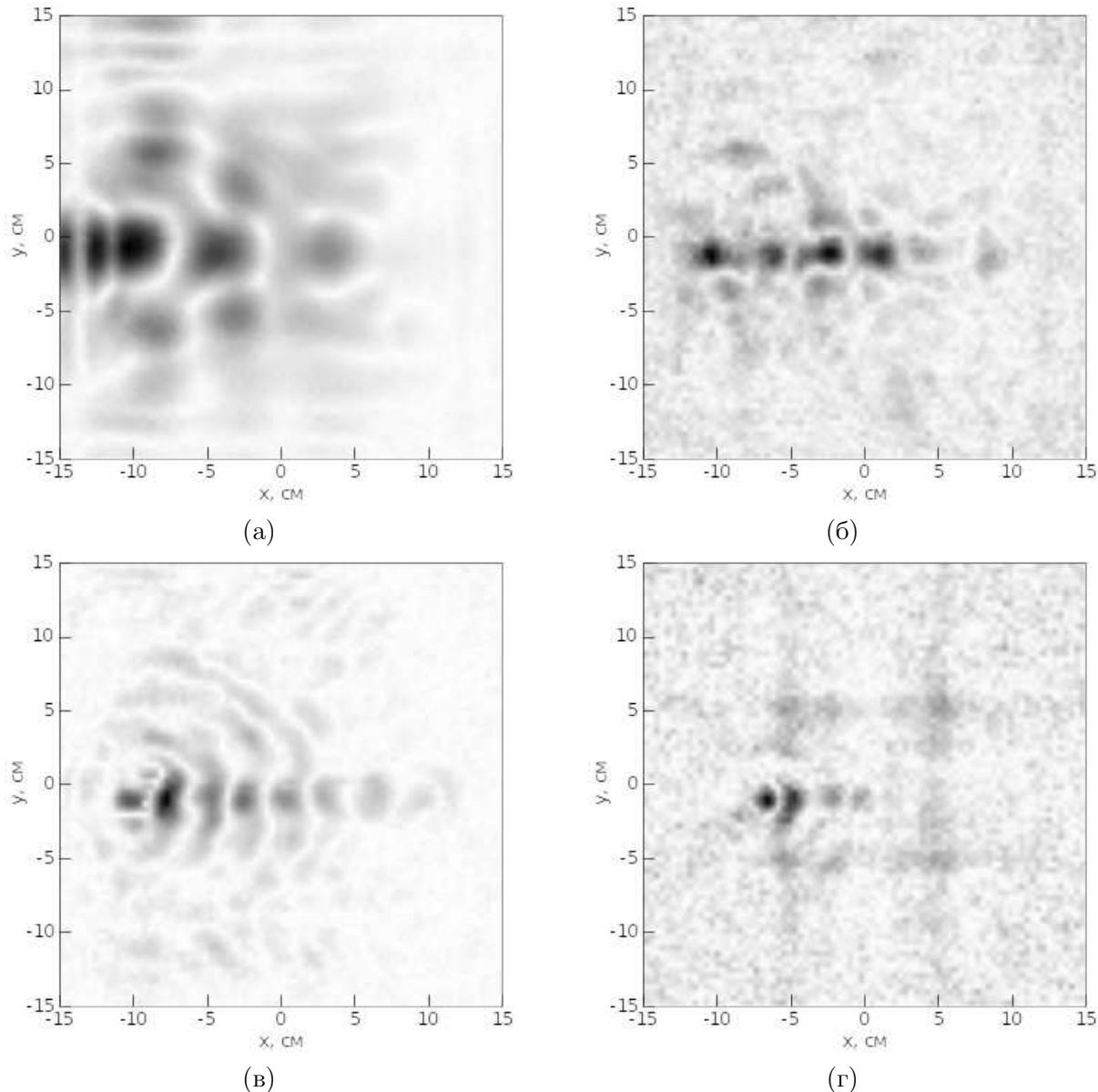


Рис. 11. Визуализированные колебания методом обратного распространения волн на различных частотах (а – 30 кГц, б – 63 кГц, в – 80 кГц, г – 100 кГц) звукоизлучающего объекта из титана (визуализирована величина пропорциональная амплитуде вертикальной компоненте скорости частиц, тёмные области соответствуют большей амплитуде), погруженного в воду.

На восстановленных изображениях можно видеть максимумы поля в области пучностей стоячих волн звукоизлучающего объекта. Кроме того, заметно, что наибольший сигнал исходит из области контакта пьезоэлемента и звукоизлучающего объекта. Это свидетельствует о необходимости улучшения согласования металлической части с керамическим пьезоэлемен-

там.

Результаты экспериментов и численного моделирования показывают возможность визуализации ультразвуковых излучателей и вибрирующих частей звукопроводящих объектов. Данный метод может применяться для целей дефектоскопии, например, для обнаружения дефектов в звукоизлучающих объектах. Отличие картины распределения максимумов колебаний звукоизлучающего объекта от эталонного сигнализирует о наличии дефектов или об отсутствии контакта частей звукоизлучающего объекта.

## **ЗАКЛЮЧЕНИЕ**

Предложен метод численного моделирования восстановления источников акустических волн, по измерениям поля на некоторой поверхности на основе представления среды в виде множества частиц. Представлены результаты восстановления сферических источников акустических волн в однородной среде по результатам численного моделирования. Показана возможность применения предложенного метода для восстановления сферических источников акустических волн в неоднородной среде с учетом и без учета рассеивающей неоднородности. Проведены экспериментальные исследования в воде по восстановлению ультразвуковых излучателей и визуализации области колебаний звукоизлучающего объекта. Показана экспериментальная возможность визуализации ультразвуковых излучателей в воде. Были визуализированы области колебаний звукоизлучающего объекта на 30 кГц, 63 кГц, 80 кГц, и 100 кГц. Предложенный метод рассчитан на применение для обнаружения дефектов в твёрдых звукопроводящих телах, однако, как показали численные и натурные эксперименты может применяться и для жидких сред.

## **СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ**

1. Бриганте, М. Акустические методы в неразрушающем контроле бетона: обзор зарубежных публикаций в области теоретических исследований / М. Бриганте, М. А. Сумбатян // Дефектоскопия. — 2013. — № 4. — С. 3–16.
2. Ультразвуковые решетки для количественного неразрушающего контроля. Инженерный подход / И. О. Болотина и др. // Дефектоскопия. — 2013. — № 3. — С. 21–40.
3. Локализация источника звука в океанических волноводах / Т. Н. Беседина, Г. Н. Кузнецова, В. М. Кузькин, С. А. Переселков // Акустический журнал. — 2015. — Т. 61, № 2. — С. 207–215.
4. Годин, О. А. Использования обращения волнового фронта для пассивного акустического зондирования океана / О. А. Годин, Б. Г. Кацнельсон, Н. А. Заботин // Акустический журнал. — 2017. — Т. 63. — № 3. — С. 283–295.
5. Локализация неоднородностей в упругой пластине методом обращения волн / А. А. Еремин, Е. В. Глушков, Н. В. Глушкова, Р. Ламмеринг // Акустический журнал. — 2017. — Т. 63, № 5. — С. 523–531.
6. Янакова, Е. С. Методы согласованной фильтрации широкополосных сигналов с минимальными временными задержками / Е. С. Янакова // Проблемы разработки перспективных микро и наноэлектронных систем. — 2010. — № 1. — С. 478–481.
7. Черниховская, Г. Л. Применение согласованной фильтрации при обработке сверхширокополосных эхо сигналов в запрергадной радиолокации / Г. Л. Черниховская, И. А. Татомир // Известия ЮФУ. Технические науки. — 2013. — С. 51–58.
8. Зверев, В. А. Принцип акустического обращения волн и голограммия / В. А. Зверев // Акустический журнал. — 2004. — Т. 50, № 6. — С. 792–801.
9. Зверев, В. А. Пространственная протяженность области акустического обращения волн / В. А. Зверев, П. И. Коротин, А. А. Стромков // Акустический журнал. — 2008. — Т. 54, № 5. — С. 823–830.

10. Синельников, Е. Д. Обращения времени в фокусирующих излучателях и приемниках ультразвука / Е. Д. Синельников, А. М. Сутин, А. П. Сарвазян // Акустический журнал. — 2010. — Т. 56, № 2. — С. 206–217.
11. Лямшев, Л. М. Обращение волнового фронта при нелинейном рассеянии звука на пульсирующей сфере / Л. М. Лямшев, П. В. Саков // Акустический журнал. — 1988. — Т. 34. — № 1. — С. 127–134.
12. Denison, M. H. The effects of source placement on time reversal focusing in rooms / M. H. Denison, B. E. Anderson // Applied Acoustics. — 2019. — V. 156, iss. 15. — P. 279–288.
13. A Modified Time Reversal Method for Guided Wave Based Bolt Loosening Monitoring in a Lap Joint / C. Xu et. al. // Journal of Nondestructive Evaluation. — 2019. — V. 38, iss. 4. — P. 1–13.
14. Измерение коэффициента акустического поглощения в образцах биологических тканей с помощью обращенных ультразвуковых волн / Н. В. Смагин, Л. М. Крутянский, З. В. Зеленова, А. П. Брысов // Акустический журнал. — 2014. — Т. 60, № 2. — С. 199–203.
15. Сапожников, О. А. Восстановления распределения нормальной скорости на поверхности ультразвукового излучателя на основе измерения акустического давления вдоль контрольной поверхности / О. А. Сапожников, Ю. А. Пищальников, А. В. Морозов // Акустический журнал. — 2003. — Т. 49, № 3. — С. 416–424.
16. Кривцов, А. М. Деформирование и разрушение твердых тел с микроструктурой / А. М. Кривцов. — М. : ФИЗМАТЛИТ, 2007.
17. Gould, H. An Introduction to Computer Simulation Methods / H. Gould, J. Tobochnik, W. Christian. — Chapter 8. — 2005. — P. 267–268.
18. Шайтан, К. В. Молекулярная динамика / К. В. Шайтан, С. С. Сарайкин. — 1999. [Электронный ресурс]. URL: <http://www.library.biophys.msu.ru/MolDyn/>
19. Лагунов, В. А. Компьютерное моделирования деформирования и разрушения кристаллов / В. А. Лагунов, А. Б. Синани // Физика твердого тела. — 2001. — Т. 43, № 4. — С. 644–650.
20. Marburg, S. Six boundary elements per wavelength: Is that enough? / S. Marburg // Journal of Computational Acoustics. — 2002. — V. 10, № 1. — P. 25–51.
21. Вержбицкий, В. М. Основы численных методов : Учебник для вузов / В. М. Вержбицкий. — М. : Высшая школа, 2002.

## REFERENCES

1. Brigante M., Sumbatyan M.A. Acoustic methods in non - destructive testing of concrete: A review of foreign publications in the field of theoretical research. [Brigante M., Sumbatyan M.A. Akusticheskie metody v nerazrushayushhem kontrole betona: obzor zarubezhnyx publikacij v oblasti teoreticheskix issledovanij]. *Defektochkiya – Russian Journal of Nondestructive Testing*, 2013, no. 4, pp. 3–16.
2. Bolotina I.O. et. al. Ultrasonic gratings for quantitative non - destructive testing. Engineering approach. [Bolotina I.O. i dr. Ultrazvukovye reshetki dlya kolichestvennogo nerazrushayushhego kontrolya. Inzhenernyj podxod]. *Defektochkiya – Russian Journal of Nondestructive Testing*, 2013, no. 3, pp. 21–40.
3. Besedina T.N., Kuznetsov G.N., Kuzkin V.M., Pereselkov S.A. Localization of a sound source in oceanic waveguides. [Besedina T.N., Kuznecov G.N., Kuzkin V.M., Pereselkov S.A. Lokalizaciya istochnika zvuka v okeanicheskix volnovodax]. *Akusticheskiy zhurnal – Acoustical Physics*, 2015, vol. 61, iss. 2, pp. 207–215.
4. Godin O.A., Katsnelson B.G., Zabotin N.A. Using wavefront reversal for passive acoustic ocean sounding. [Godin O.A., Kacnelson B.G., Zabotin N.A. Ispolzovaniya obrashheniya volnovogo fronta dlya passivnogo akusticheskogo zondirovaniya okeana]. *Akusticheskiy zhurnal – Acoustical Physics*, 2017, vol. 63, iss. 3, pp. 283–295.

5. Eremin A.A., Glushkov E.V., Glushkova N.V., Lammering R. Localization of inhomogeneities in an elastic plate by the method of wave inversion. [Eremin A.A., Glushkov E.V., Glushkova N.V., Lammering R. Lokalizaciya neodnorodnostej v uprugoj plastine metodom obrashheniya]. *Akusticheskiy zhurnal – Acoustical Physics*, 2017, vol. 63, iss. 5, pp. 523–531.
6. Yanakova E.S. Methods of matched filtering of wideband signals with minimal time delays. [Yanakova E.S. Metody soglasovannoj filtracii shirokopolosnyx signalov s minimalnymi vremennymi zaderzhkami]. *Problemy razrabotki perspektivnyx mikro i nanoelektronnyx system – Problems of the development of promising micro and nanoelectronic systems*, 2010, iss. 1, pp. 478–481.
7. Chernikhovskaya G.L., Tatomir I.A. Application of matched filtering in processing ultra – wideband echo signals in behind the wall radar. [Chernikovskaya G.L., Tatomir I.A. Primenenie soglasovannoj filtracii pri obrabotke sverxshirokopolosnyx exo signalov v zapregradnoj radiolokacii]. *Izvestiya YUFU. Tekhnicheskie Nauki – Izvestia SFU. Technical science*, 2013, pp. 51–58.
8. Zverev V.A. Principle of acoustic wave inversion and holography. [Zverev V.A. Princip akusticheskogo obrashheniya voln i golografiya]. *Akusticheskiy zhurnal – Acoustical Physics*, 2004, vol. 50, iss. 6, pp. 792–801.
9. Zverev V.A., Korotin P.I., Stromkov A.A. Spatial extent of the region of acoustic wave reversal. [Zverev V.A., Korotin P.I., Stromkov A.A. Prostranstvennaya protyazhennost oblasti akusticheskogo obrashheniya voln]. *Akusticheskiy zhurnal – Acoustical Physics*, 2008, vol. 54, iss. 5, pp. 823–830.
10. Sinelnikov E.D., Sutin A.M., Sarvazyan A.P. Time reversal in focusing emitters and ultrasound receivers. [Sinelnikov E.D., Sutin A.M., Sarvazyan A.P. Obrashheniya vremeni v fokusiruyushhix izluchatelyax i priemnikax ultrazvuka]. *Akusticheskiy zhurnal – Acoustical Physics*, 2010, vol. 56, iss. 2, pp. 206–217.
11. Lyamshev L.M., Sakov P.V. Wave front reversal in nonlinear scattering of sound by a pulsating sphere. [Lyamshev L.M., Sakov P.V. Obrashhenie volnovogo fronta pri nelinejnom rasseyaniyu zvuka na pulsiruyushhej sfere]. *Akusticheskiy zhurnal – Acoustical Physics*, 1988, vol. 34, iss. 1, pp. 127–134.
12. Denison M.H., Anderson B.E. The effects of source placement on time reversal focusing in rooms. *Applied Acoustics*, 2019, vol. 156, iss. 15, pp. 279–288.
13. Xu C., Wu G., Du F., Zhu W., Mahdavi S.H. A Modified Time Reversal Method for Guided Wave Based Bolt Loosening Monitoring in a Lap Joint. *Journal of Nondestructive Evaluation*, 2019, vol. 38, iss. 4, pp. 1–13.
14. Smagin N.V., Krutyanskiy L.M., Zelenova Z.V., Brysev A.P. Measurement of the acoustic absorption coefficient in biological tissue samples using reversed ultrasonic waves. [Smagin N.V., Krutyanskij L.M., Zelenova Z.V., Brysev A.P. Izmerenie koefficiente akusticheskogo pogloshcheniya v obrazcakh biologicheskix tkanej s pomoshhyu obrashhennyx ultrazvukovyx voln]. *Akusticheskiy zhurnal – Acoustical Physics*, 2014, vol. 60, iss. 2, pp. 199–203.
15. Sapozhnikov O.A., Pishchalnikov Yu.A., Morozov A.V. Reconstruction of the normal velocity distribution on the surface of an ultrasonic transducer based on the measurement of acoustic pressure along the control surface. [Sapozhnikov O.A., Pishchalnikov Yu.A., Morozov A.V. Vosstanovleniya raspredeleniya normalnoj skorosti na povernosti ultrazvukovogo izluchatelya na osnove izmerenija akusticheskogo davleniya vdol kontrolnoj povernosti]. *Akusticheskiy zhurnal – Acoustical Physics*, 2003, vol. 49, iss. 3, pp. 416–424.
16. Krivtsov A.M. Deformation and Fracture of Solids with Microstructure. [Krivcov A.M. Deformirovanie i razrushenie tverdyx tel s mikrostrukturoj]. Moscow, 2007. [0] Gould H., Tobochnik J., Christian W. An Introduction to Computer Simulation Methods, Chapter 8, Third edition, 2005. pp. 267–268

17. Shaitan K.V., Sarakin S.S. Molecular dynamics. [Shajtan K.V., Sarajkin S.S. Molekulyarnaya dinamika]. Electronic resource, Available at: <http://www.library.biophys.msu.ru/MolDyn/>.
18. Lagunov V.A., Sinani A.B. Computer simulation of deformation and destruction of crystals. [Lagunov V.A., Sinani A.B. Kompyuternoe modelirovaniya deformirovaniya i razrusheniya kristallov]. *Fizika tverdogo tela — Solid state physics*, 2001, vol. 43, iss. 4, pp. 644–650.
19. Marburg S. Six boundary elements per wavelength: Is that enough? *Journal of Computational Acoustics*, 2002, vol. 10, no. 1. pp. 25–51.
20. Verzhbitsky V.M., Fundamentals of Numerical Methods: Textbook for universities. [Verzhbitskij V.M., Osnovy chislennyh metodov: Uchebnik dlya vuzov]. Moscow: Higher school, 2002.

*Суханов Д. Я., д.ф.-м.н., профессор кафедры радиофизики Томского государственного университета, Томск, Россия*  
E-mail: sdy@mail.tsu.ru

*Sukhanov D. Ya., Doctor of physical and mathematical science, Professor, Department of Radiophysics, Tomsk State University, Tomsk, Russia*  
E-mail: sdy@mail.tsu.ru

*Кузовова А., аспирант кафедры радиофизики Томского государственного университета, Томск, Россия*  
E-mail: Ang\_kuz93@mail.ru

*Kuzovova A., PhD student, Department of Radiophysics, Tomsk State University, Tomsk, Russia*  
E-mail: Ang\_kuz93@mail.ru