

УДК 620.179.16

МОДЕЛИРОВАНИЕ АКУСТИЧЕСКОГО ТРАКТА ДЛЯ МАЛОРАКУРСНОЙ УЛЬТРАЗВУКОВОЙ ТОМОГРАФИИ ПРИ ТЕНЕВОМ КОНТРОЛЕ**Буй В.Д., Макаров В.С., Солдатов А.И., Солдатов А.А.***ФГАОУ ВО Национальный исследовательский Томский политехнический университет, Томск, e-mail: asoldatof@tpul.ru*

В статье приведено описание модели для исследования акустического тракта при трансмиссионном методе контроля. Особенностью модели является использование антенных решеток для реконструкции малоракурсного томографического изображения зоны контроля. Показана возможность моделирования как одного дефекта в зоне контроля, так и двух. Приведены алгоритмы получения томографического изображения зоны контроля по результатам малоракурсного зондирования, а также представлены результаты моделирования, которые позволили выявить ряд особенностей модели.

Ключевые слова: томограмма, дефект, модель, трансмиссионный метод, акустический тракт, антенная решетка**SIMULATION OF ACOUSTIC PATH FOR SHADOW METHOD OF SMALL-ANGLE ULTRASONIC TOMOGRAPHY****Buy V.D., Makarov V.S., Soldatov A.I., Soldatov A.A.***National Research Tomsk Polytechnic University, Tomsk, e-mail: asoldatof@tpul.ru*

The paper describes a model for the study of the acoustic path of used in shadow testing method. The model specificity is in use of antenna arrays for reconstruction of a small-angle tomographic of testing zone. The possibility of modeling of one or two defects in the testing zone is shown. The algorithm for reconstruction of tomographic image of testing zone is presented. The results of simulation, which showed a number of features of the model, are presented.

Keywords: tomography, defect, model, method of transmission, acoustic path, antenna array

Практическое применение теневого метода в неразрушающем контроле с применением ультразвукового излучения известно давно [2, 4]. В основном, использование ограничивалось акустическим трактом, образованным одним излучателем и одним приёмником. Однако, начиная с семидесятых годов прошлого столетия, делались неоднократные попытки разработки и исследования аппаратуры, основанной на линейных антенных решётках [3, 7]. В качестве преимущества предлагаемых решений указывалось на высокую производительность контроля по сравнению с одиночным каналом.

Активное совершенствование теневого метода контроля началось с внедрением реконструктивной томографии, вычислительный аппарат которой основан на преобразовании И. Радона. Убедительные достижения наблюдаются в медицинской диагностике, основанной на рентгеновской томографии. Неразрушающий контроль, и особенно ультразвуковой неразрушающий контроль таких успехов не демонстрирует. Связано это со сложностью получения необходимого набора проекций, который, как правило, ограничен размерами и конфигурацией контролируемого изделия. Например, весьма эффективен теневой контроль для исследования многослойных композиционных материалов, используемых в вертолестроении [1]. Однако их плоскостная конфигурация позволяет проводить только

малоракурсные проекции. Термин «малоракурсная» по отношению к томографии может иметь два значения. Во-первых, это может означать, что имеется всего две проекции, которые сдвинуты на угол 90° . Анализ такой ситуации приведён в работе [6]. Во-вторых, это может отражать ситуацию, когда имеется ограниченный набор проекций, причём диапазон углов, под которыми они получены, составляет значительно меньше 90° . Именно такое положение возникает при контроле многослойных композиционных материалов. Задача данной работы состоит в анализе возможностей акустической томографии именно в таком, втором значении.

Постановка задачи. Целью данной статьи является построение алгоритма и разработка программы моделирования акустического тракта трансмиссионного метода контроля, использующего в качестве приёмника и излучателя антенные решётки. В результате появляется возможность применения ультразвуковой двухмерной визуализации для теневого метода.

Для количественной оценки выявляемости дефектов при теневом методе вводят коэффициент k_D .

$$k_D = \frac{A_D}{A_0}, \quad (1)$$

где A_0 – амплитуда сигнала при отсутствии дефекта, A_D – амплитуда сигнала при наличии дефекта.

Коэффициент k_d изменяется от 0 до 1, значение его тем меньше, чем больше дефект, и оно не зависит от номинального значения амплитуды сигнала A_0 [4]. При моделировании используются две одинаковых линейных антенных решетки, расположенные параллельно. Одна решетка является излучателем, а другая – приемником. Эти решетки являются эквидистантными, а элементарные преобразователи их составляющие абсолютно одинаковы.

Алгоритм работы акустического тракта основан на принципе: элементы излучающей решетки излучают последовательно один за другим, а все элементы приемной решетки принимают одновременно. В результате формируется множество, состоящее из n^2 данных измерения, где n – число элементов в антенной решетке [5]. Полученные данные используются для визуализации зоны контроля [8]. Состав и конфигурация акустического тракта показаны на рис. 1.

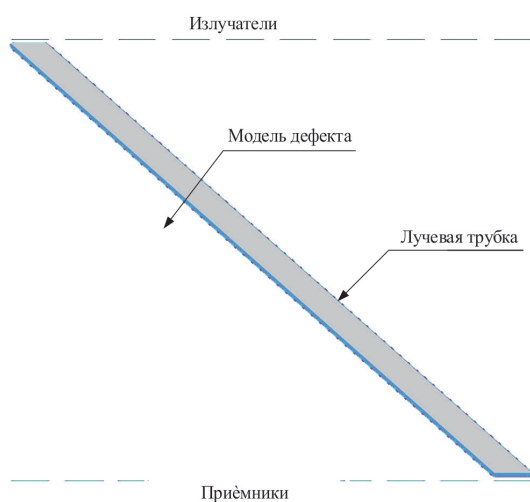


Рис. 1. Акустический тракт с использованием акустических антенных решеток

Условия функционирования моделируемого акустического тракта предполагают оптикогеометрическую нотацию траекторий излучения. На основании теории дифракции Кирхгофа [5] и предположении о наличии абсолютно плоских волн в данном акустическом тракте можно утверждать, что дифракционный интеграл (интеграл Рубиновича) в области тени очень быстро стремится к нулю. Таким образом, данная цифровая модель акустического тракта справедлива для высокочастотного случая соотношения длины волны и периметра модели дефекта.

Кроме того, следует подчеркнуть, что расстояние между излучателем и приёмни-

ком предполагается достаточно большим. Следовательно, пьезопреобразователи, составляющие антенные решетки, располагаются в зоне дифракции Фраунгофера, а их рабочая поверхность значительно меньше первой зоны Френеля. Это позволяет считать распределение ультразвукового давления на элементарном приёмном элементе равномерным, а амплитуду принятого сигнала прямопропорциональной «озвученной» поверхности. Кроме того, линейный размер элементов решеток больше длины волны излучения. Поэтому каждая пара элементов излучатель-приемник формирует лучевую трубку, форма и размеры которой определяются элементами антенных решеток и расстоянием между приёмником и излучателем.

Предполагается, что модель дефекта полностью экранирует падающее на неё излучение. Очевидно, что только дефект, перекрывающий лучевую трубку, влияет на амплитуду сигнала приемника, которая линейно зависит от площади тени, перекрывающей приемник. Если дефект полностью закрывает лучевую трубку, то на приёмник не поступает сигнал, т.е. коэффициент k_d равен 0. Если дефект частично перекрывает лучевую трубку, то коэффициент рассчитывается по формуле:

$$k_d = 1 - \frac{S_d}{S_0}, \quad (2)$$

где S_d – часть площади дефекта, закрывающая лучевую трубку, S_0 – площадь сечения лучевой трубки.

Следовательно, если дефект отсутствует полностью, то k_d равен 1.

Описание модели. Моделирование томографической реконструкции теневого метода контроля состоит из двух очевидных этапов. Первый этап содержит процедуру создания множества нормированных сигналов приёмной антенны при условии расположения заданной модели дефекта в зоне контроля. Второй этап заключается в реконструкции по этим исходным данным двумерного томографического изображения.

На первом этапе задаётся дефект в форме одного диска, или двух дисков. Исследователь определяет координаты расположения моделей дефектов в декартовой системе координат, а также радиус диска. Множество сигналов приёмной антенны рассчитывается в соответствии с выражением (2) с помощью методов аналитической геометрии, который был реализован в виде алгоритма.

Второй этап моделирования содержит процедуру реконструкции томографического изображения двумерной области, пред-

ставляющей собой зону контроля между приёмной и передающей антенными решётками. Реконструкция основана на несколько модифицированном методе обратных проекций [10], который также был реализован в виде алгоритма.

Зона контроля разбивается условно на конечное число элементарных участков. Для декартовой системы координат удобно использовать квадраты, которые в дальнейшем играют роль пикселей изображения. Затем, методами аналитической геометрии, определяются все лучи, пересекающие данный элемент. Степень контрастности вычисляется путём суммирования коэффициентов k_{DP} найденных предварительно на предыдущем этапе моделирования. Полученное множество нормируется к единице.

По этим алгоритмам была написана программа моделирования на языке Delphi. Графический интерфейс программы показан на рис. 2. Вначале оператор вручную вводит исходные параметры в соответствующие окошки. Все параметры можно разделить на две части.

1. Характеристики акустического тракта: число пьезоэлементов, составляющих линейную акустическую эквидистантную антенную решётку; размер пьезоэлемента; расстояние между пьезоэлементами в решётке; расстояние между антенными решётками.

2. Характеристики модели дефектов и зоны контроля: размер элемента разбиения зоны контроля; радиус модели первого дефекта; радиус модели второго дефекта; координаты расположения центра модели первого дефекта в зоне контроля; координаты расположения центра модели второго дефекта в зоне контроля.

По желанию оператора можно выбрать моделирование одного или двух дефектов. Последняя возможность необходима при анализе такого важного параметра как разрешающая способность системы контроля.

Запуск программы осуществляется нажатием на кнопку «ОК». Результаты автоматических вычислений выводятся в графической форме, причём амплитудные значения представлены цветовой гаммой.

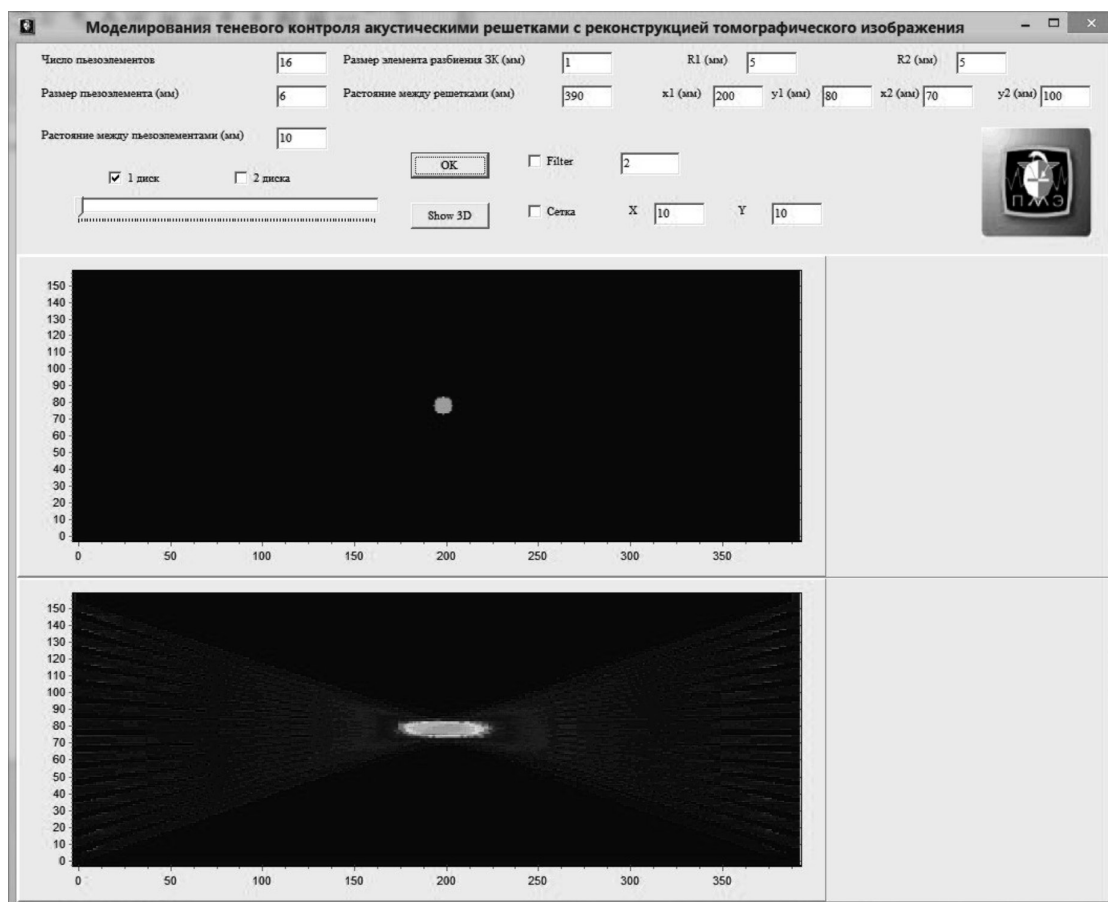


Рис. 2. Графический интерфейс программы моделирования теневого контроля

Графическая часть интерфейса разделена на две части. На верхней части изображается модель дефекта в виде диска в декартовой системе координат. Её размеры и положение полностью соответствуют выбранным исходным параметрам. На второй нижней части воспроизводится томографическое изображение, полученное в результате моделирования по методу обратных проекций.

При нажатии на кнопку «Show 3D», появляется ещё один график. Он предназначен для наблюдения результата моделирования в виде трехмерного изображения. На данном графике можно не только определить положение дефекта, но и оценить амплитуду сигнала с возможностью изменения угла наблюдения.

Результаты исследования и их обсуждение

Исследования, проведённые на базе представленной системы моделирования, позволили выявить ряд интересных особенностей томографии с помощью антенных решёток. Первый, вполне ожидаемый, результат показал возможность выделения зоны

вероятного расположения дефекта в акустическом тракте теневого дефектоскопа. Оказалось, что размер этой зоны зависит от величины дефекта и места его расположения. Для определённых соотношений размера пьезоэлемента и размера дефекта степень локализации может быть весьма высокой. Причём, размер в направлении продольной оси антенной решётки почти точно соответствует размеру дефекта. В ортогональном направлении, т.е. вдоль акустических лучей, размер дефектной зоны в несколько раз больше, чем реальный размер дефекта. Наилучший результат фиксируется в центре акустического тракта. Перемещение модели дефекта в сторону излучателя или приёмника приводит к заметному увеличению томографического изображения дефекта вдоль акустических лучей.

Исследование фронтальной разрешающей способности показали высокую потенциальную возможность фиксации двух дефектов. На рис. 3 видно, что два дефекта уверенно фиксируются на томографическом изображении. Причём, дефект, смещённый к краю зоны контроля, генерирует изображение худшего качества.

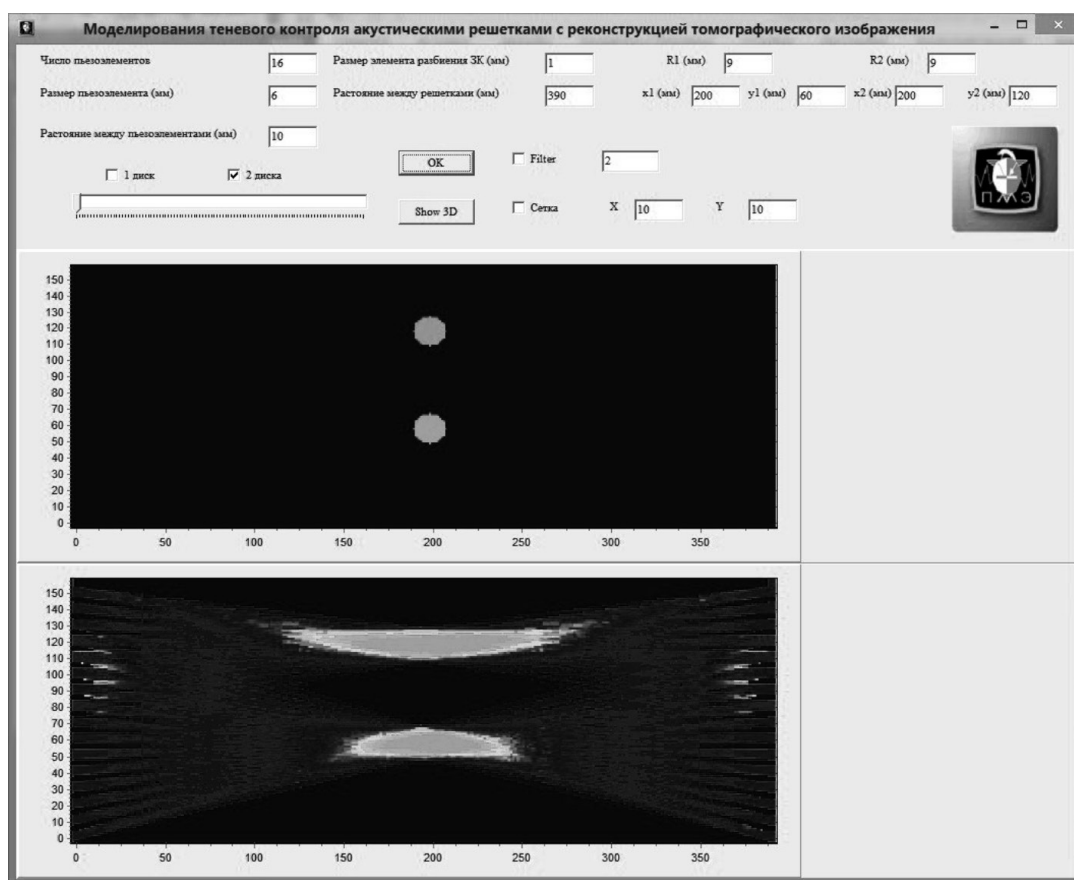


Рис. 3. Моделирование двух дефектов и его результат

Еще одна особенность проявилась при расположении моделей дефектов на одной линии, соединяющей излучатель с приемником. Если размеры моделей дефектов выбраны одинаковыми, то на изображении практически исчезает тот дефект, который расположен ближе к излучателю. Если модели дефектов выбрать больших размеров, то на изображении исчезает дефектная зона, расположенная ближе к приёмнику.

Указанные особенности, а также ряд выявленных зависимостей следует, безусловно, учитывать в ходе проектирования теневого дефектоскопа.

Заключение

Предложенная авторами модель позволяет исследовать акустический тракт малоракурсного томографа при трансмиссионном методе контроля. Результаты исследований можно использовать для определения требований к акустическому тракту теневого дефектоскопа (размер антенной решетки, количество элементов и его размер в антенной решетке, минимальный размер обнаруживаемого дефекта, разрешающая способность, погрешность определения координат дефектов и оптимальный размер зоны контроля) для достижения требуемых технических характеристик. В заключении авторы считают необходимым указать, что исполняемый файл данной программы находится

в свободном доступе на сайте Томского политехнического университета.

Список литературы

1. Акустическая дефектоскопия многослойных материалов, используемых в вертолетостроении / Солдатов А.И., Макаров В.С., Сорокин П.В., Солдатов Д.А. // Контроль. Диагностика. – 2013. – №13. – С. 74–77.
2. Бергман Л. Ультразвук и его применение в науке и технике. / Пер. с нем. – М.: Изд. иностр. лит., 1957. – 726 с.
3. Макаров В. С. Акустический дефектоскоп на основе принципа полисканирования для обнаружения внутренних несплошностей и неоднородностей: дис. кан. техн. наук. – Томск. 1988. – 170 с.
4. Приборы для неразрушающего контроля материалов и изделий. Справочник: в 2 т., Т.2 / Под ред. Клюева В.В. – М.: Машиностроение, 1976. – 326 с.
5. Скучик Е. Основы акустики: в 2 т., Т.2 / Пер. с англ. – М.: Мир, 1976. – 520 с.
6. Филонин А.В. Малоракурсная вычислительная томография в физических исследованиях: дис. док. техн. наук. – Самара. 2006. – 463 с.
7. Цехановский С.А. Разработка и исследование ультразвукового дефектоскопа с визуализацией дефектов на экране электронно-лучевой трубки: дис. канд. техн. наук. – Томск, 1975. – 185 с.
8. Dynamic imaging acoustic fields in research practice / Soldatov A., Makarov V., Sorokin P., Kvasnikov K., Selesnev A., Kroening M. // Russian Journal of Nondestructive Testing. – 2013. V.49, № 11. – P. 625–630.
9. The use of geometrical acoustics for the solution of visualization problems / Kvasnikov K.G., Soldatov A.I., Bolotina I.O., Krenning K.M., Potapenko A.A. // Proceedings – 2012 7th International Forum on Strategic Technology. – 2012. – P. 6357734–6357737.
10. Wubbeling F. Mathematical Methods in Image Reconstruction/ Wubbeling F. and N. Frank // Philadelphia, PA: Society for Industrial and Applied Mathematics. – 2001. ISBN 0-89871-472-9, DOI: <http://dx.doi.org/10.1137/1.9780898718324>.