

## Применение информационного подхода к решению задачи дефектоскопии методом свободных колебаний

**Хатьков Д.Н.**

*Институт физики прочности и материаловедения СО РАН, просп. Академический,  
2/4, Томск, 634055, Россия*

*e-mail: [xatek@yandex.ru](mailto:xatek@yandex.ru)*

### **Аннотация**

На примере метода свободных колебаний рассмотрена методология информационного подхода к решению задачи дефектоскопии, имеющей большое количество неопределенных факторов. Представлены, как общая концептуальная, так и частные блок-схемы в приложении к методу свободных колебаний, на которых указано место и взаимодействие таких способов анализа, как дедукция и индукция при раскрытии «черного ящика» дефекта. На теоретической модели произвольного сигнала и практических примерах, показаны положительные результаты применения данной методологии, не использующей расчеты физики сложных явлений при упругих взаимодействиях, сопровождающих использование метода свободных колебаний.

**Ключевые слова:** спектр, метод свободных колебаний, эталон, акустические волны, индукция и дедукция, методология информационного подхода.

## Введение

В настоящее время в области дефектоскопии применяется большое количество диагностических приборов, которые используют различные физические принципы выявления дефектов. Выбор того или иного способа обусловлен в большинстве своем физическими свойствами объекта контроля. Большое распространение получили методы акустического контроля, в области использования которых и будем рассматривать один из давно известных и редко используемых методов - метод свободных колебаний [1]. Он нашел достаточно устойчивое применение для контроля слоистых структур и объектов, имеющих стабильные акустические характеристики при их механическом возбуждении. Существует область, в которой этот метод просто незаменим – дефектоскопия крупных объектов, которые могут быть, как металлическими, так и не металлическими. При этом, основные проблемы использования других широко распространенных методов, связаны с размером и неопределенной формой объекта. При больших размерах объекта контроля применение, например, рентгеновских методов ограничено в связи со значительным ослаблением потока излучения и размытием радиационного сигнала, а использование ультразвуковых методов [2, 3] сопряжено с трудностями поиска отраженного от дефекта акустического сигнала, который может быть рассеян в произвольном направлении. Проблема контроля крупногабаритных объектов может усугубляться также их сложной формой, что чаще всего бывает на практике, а это обуславливает большое количество разнообразных помех, связанных с многократными отражениями сигнала. Кроме

того, ультразвуковой метод контроля требует определенного качества поверхности объекта, которое в большом числе случаев необходимо подготавливать или обеспечивать специальными мерами, например, осуществляя зачистку поверхности и применяя иммерсионные жидкости.

В этом отношении метод свободных колебаний имеет значительные преимущества. Механическое возбуждение акустических волн ударом по неподготовленной поверхности позволяет возбуждать в звуковом диапазоне волны большой мощности, которые вдобавок имеют существенно более низкое затухание, чем ультразвуковые и могут распространяться по всему изучаемому объекту на большие расстояния. Это позволяет выявлять дефекты в крупных объектах произвольной формы. Тем не менее, метод свободных колебаний не нашел такого широкого применения для крупных объектов, как ультразвуковой. Основная причина – технические трудности в определении дефекта по результатам анализа детектируемых колебаний.

### **Постановка задачи**

Метод свободных колебаний относится к методам, которые используют эталон. В качестве эталона в данном случае формируют детерминированный спектр акустических колебаний того или иного объекта. Поэтому основной проблемой при измерениях бывают трудности, связанные с формированием такого эталона. Если же каждый объект имеет произвольные размеры и форму, то эти трудности возрастают пропорционально числу диагностируемых объектов. Именно это обстоятельство,

как оказалось на практике, является основной причиной ограничения широкого применения метода свободных колебаний. В связи с этим, метод чаще всего используют на однотипных объектах, которые встречаются в большом количестве при серийном производстве или находятся в эксплуатации. Это один из путей решения данной проблемы. Например, в работе [4] проведен полный объем исследований, включая моделирование, по созданию эталона. Если рассмотреть операцию моделирования, которая описывает физический процесс распространения свободных колебаний в образце, включая процесс возбуждения акустических волн механическим ударом и не только, то видно, что она имеет большое количество допущений, ограничений на физическую реализуемость и вдобавок к этому является неполной. Кроме того, ее трудно распространить на изделия с другой формой и материалом.

В сложившейся ситуации для дальнейшего развития метода свободных колебаний предлагается другой подход в его реализации – информационный. При осуществлении дефектоскопии исследуемого объекта необходимо решать целый набор информационных задач. Это связано с самой спецификой определения дефекта как такового, который имеет основные свойства – тип, координаты центра, форма и ориентация. Наиболее трудной задачей является определение такого свойства дефекта, как его тип. Тип дефекта в основном определяется его физическими свойствами - заполненностью газом, жидкостью, различными изменениями плотности среды и др. Форма дефекта, координаты и его ориентация в существенной мере являются случайными характеристиками, обуславливающими

отражение акустических волн в произвольном направлении, несмотря на однотипность дефекта.

### **Результаты исследований и их обсуждение**

Решение основной задачи дефектоскопии по поиску координат дефекта, заведомо обладающего случайными характеристиками, требует использования инварианта, который не зависит от подобных свойств. Задача формирования такого инварианта относится ближе к классу информационных задач, чем физических. Привлечение информационных методов, в которых имеется большой кластер задач, связанных с эталонами, позволяет существенно расширить область нахождения решения по поиску дефекта и сделать его приемлемым и универсальным при поиске.

Для того, чтобы использовать информационный подход в методе свободных колебаний, необходимо пройти следующие этапы: разработать методику синтеза эталона, создать условия его применения для поиска дефекта. Оба этих этапа взаимозависимы, но имеют и существенные отличия. Взаимозависимость возникает на стадии проверки полученной методики в какой-либо итерации при ее подготовке, а различие заключается в том, что в одном случае используется уже апробированный метод, а в другом он только разрабатывается. При этом формируется функциональная модель, которая отражает в себе функциональные признаки оригинала. Функциональная модель, в свою очередь, позволяет абстрагироваться от вещественного содержания оригинала, а также ввести

абстрактные связи с внешней средой. Подобными свойствами обладает метод «черного ящика», который в кибернетике получил широкое распространение и глубокую проработку.

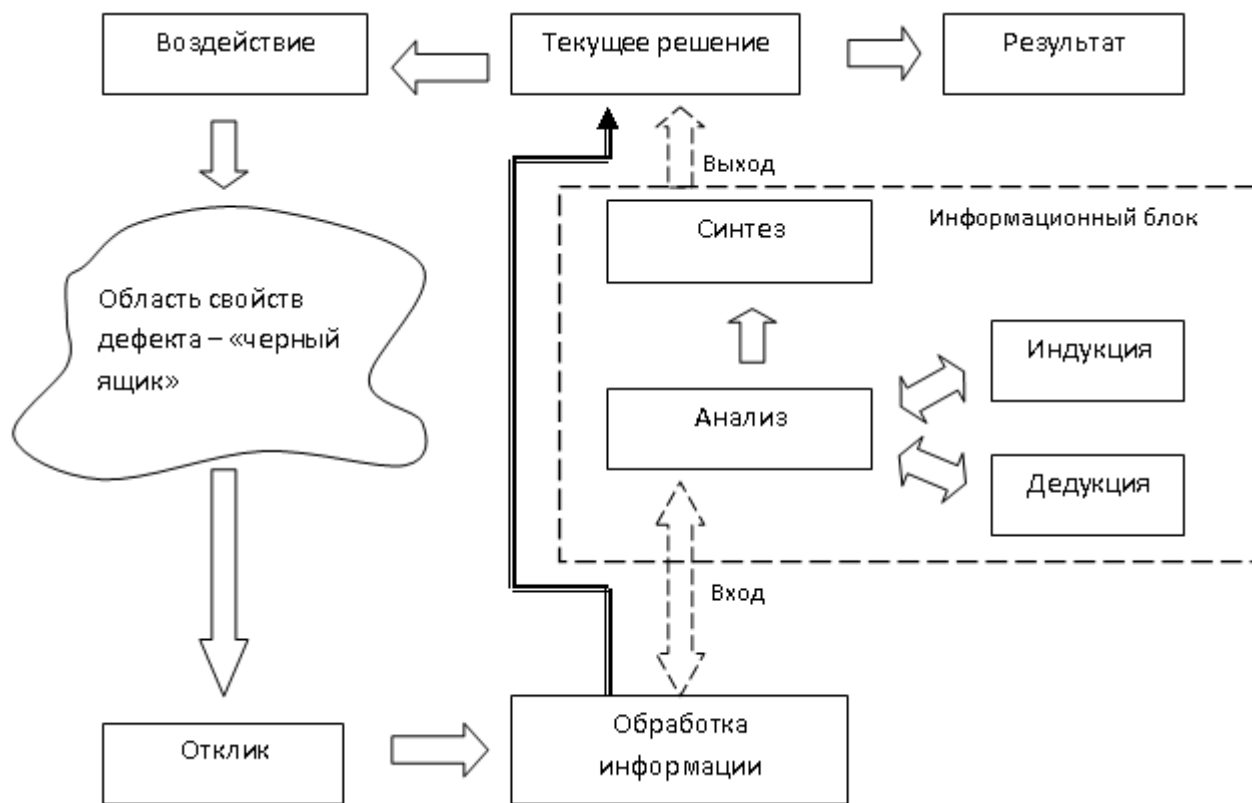


Рис. 1. Наличие информационной составляющей на стадии формирования модели эталона дефекта.

Считаем, что на начальном этапе изучения, внутренняя структура «черного ящика» неизвестна и недоступна для наблюдения, а известны лишь параметры «входа» - факторы и «выхода» - реакции. Для подключения информационной модели управления процессом выявления свойств дефекта необходимо предусмотреть во всей информационной структуре соответствующее место. С точки зрения практической реализуемости, ее удобно встроить так, как показано на (рис. 1). В этом случае задача управления будет сводиться к поиску таких уровней параметров,

которые бы обеспечили требуемые выходные оптимальные значения для формируемой модели эталона. При этом, вследствие использования дедуктивного метода, который обычно применяется для изучения «черного ящика», информационная модель будет усложняться. Поэтому для осуществления возможности понимания того, что происходит внутри «черного ящика», будем использовать в дополнение к анализу и метод индукции.

В качестве иллюстративного примера рассмотрим результаты следующего эксперимента. Было взято две одинаковых стеклянных обыкновенных бутылки емкостью по 0.25 л каждая с толщиной стенки 2.5 мм в исходном состоянии (без дефектов), с последующим нанесением на них каверн глубиной 1мм.

Возбуждение акустических колебаний осуществлялось ударом 100 г. молотка в разных местах бутылок – в центральной части с противоположной стороны от каверны и в верхней части ниже горла. Сами объекты расположены на микропористой резине вертикально. Акустический сигнал, распространяющийся во время механического удара по воздуху, записывался цифровым микрофоном, который был расположен на расстоянии 100 мм от поверхности бутылок. На (рис. 2) видно, что спектр затухающего сигнала содержит одну мощную гармонику для обоих экземпляров бутылок, но она отличается между ними.

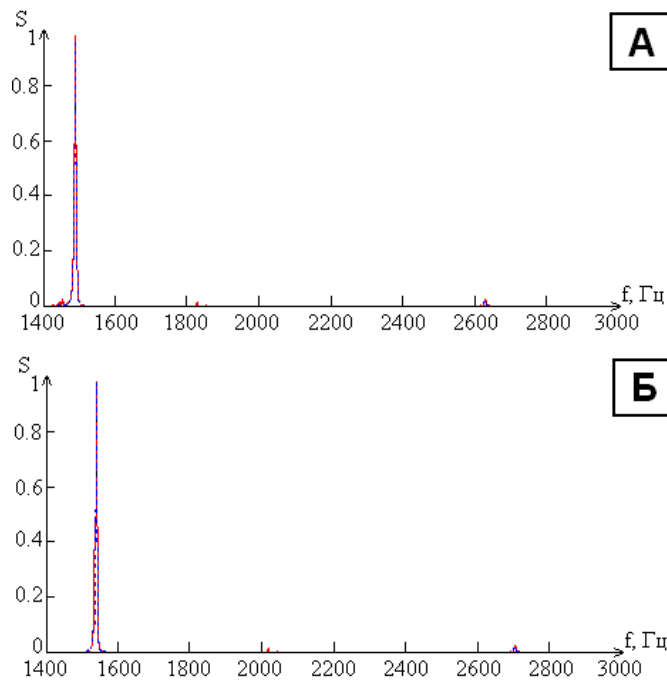


Рис. 2. Спектр акустических колебаний бутылки при возбуждении колебаний в центральной (синий) и верхней (красный) части без наличия каверны, а) первый образец, б) второй образец.

Это пример технологического разброса при изготовлении серийных образцов на конкретной автоматической линии, который определяется экспериментально по статистическим измерениям для бездефектной продукции. С информационной точки зрения выбор минимального числа воздействий в количестве двух, позволяет получить две точки в абстрактной системе координат, между которыми можно провести вектор, направление которого позволит осуществлять поступательное движение к следующему этапу дедукции. Так, первый и второй удары дали отклик, дедуктивный анализ которых, на основе метода экспертных оценок, позволил определить наиболее оптимальную информативную составляющую из всех свойств сигнала, как такового – спектральную, а наименее информативной – затухание. В дополнение они позволили выявить инвариантные свойства к месту точки



возбуждения акустических колебаний – спектрограммы для ударов в разных местах одни и те же для целых образцов. Кроме того, еще такие две независимые точки в абстрактной системе координат, как первый и второй объекты, подтвердили полученный вывод в виде появления разности основных частот гармоник у серийных объектов, которые не могут быть идеально одинаковыми.

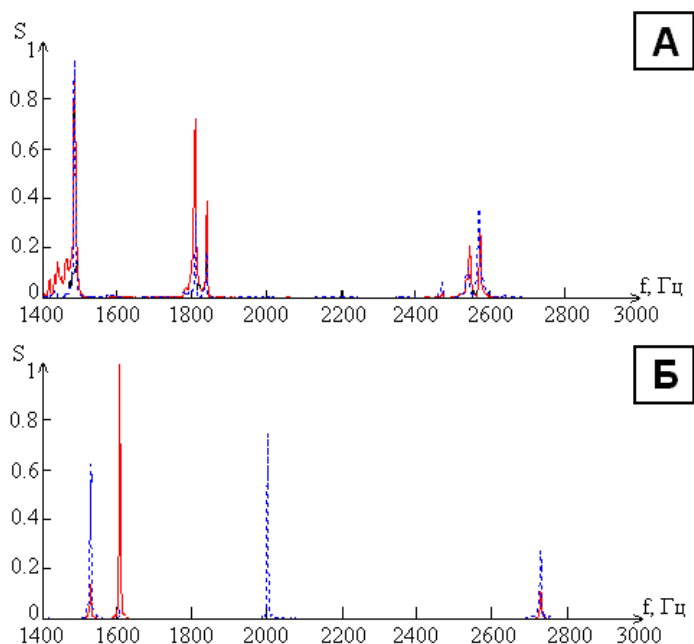


Рис. 3 Спектр акустических колебаний бутылки при возбуждении колебаний в центральной (синий) и верхней (красный) части с наличием каверны, а) первый образец, б) второй образец.

Следующий этап – проведение новых аналогичных практик, с теми же объектами, но с наличием каверн. Полученные спектральные отклики, представленные на (рис. 3) показывают, что появление новых гармонических составляющих в двух объектах является разным не только по одному месту удара, но и по разным местам. Какую либо характерную взаимозависимость между гармониками установить не удастся из-за случайных свойств дефекта. Для объединения результатов до наличия

дефекта (первый этап) и после его появления (второй этап) в абстрактной системе координат, содержащей две точки, используют метод индукции на третьем этапе – (рис. 4).

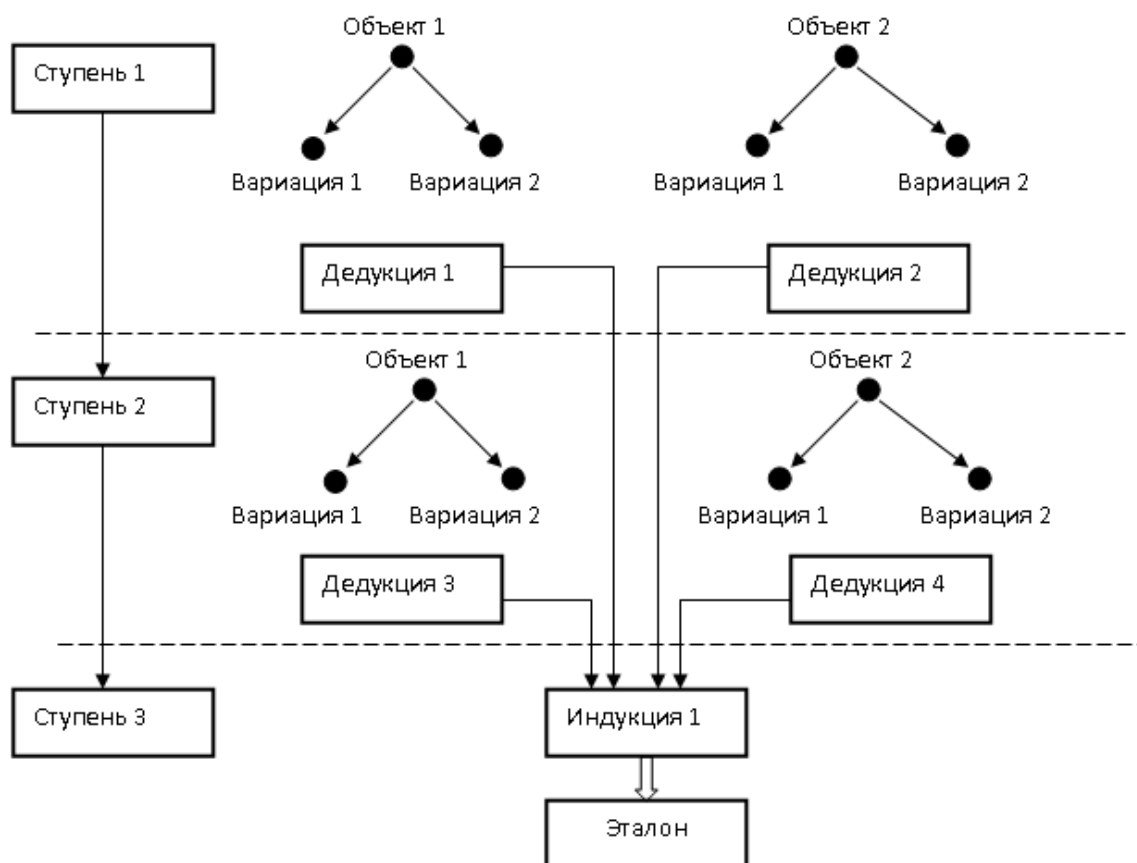


Рис. 4. Построение абстрактного информационного алгоритма для получения эталона в методе свободных колебаний.

На первом этапе результирующим будет некоторая область решений по наличию основных гармоник в частотном диапазоне, определяемом качеством изготовления серийных образцов, которое дополняется последующими статистическими измерениями, выявляющими границы этого диапазона. Увязка второй части решения с результатами, полученными на третьем этапе, позволяет определить уникальность полученного решения – факт наличия дополнительных гармоник

только в присутствии каверны. В результате частотный, в данном случае полосовой фильтр, полученный таким образом и будет тем эталоном, относительно которого в дальнейшем будет строиться работа аппаратуры по определению дефекта в стеклотаре. Следует отметить, что полученный эталон согласован со всем сложным аппаратурным трактом контактного возбуждения и бесконтактного приема акустического сигнала. При смене аппаратуры достаточно калибровочных измерений первого этапа на нескольких образцах выпускаемой продукции для получения граничных характеристик полосового фильтра, поскольку способ диагностики данного объекта установлен.

Таким образом, для получения параметров эталона с помощью абстрактного информационного алгоритма построенного по схеме (рис. 4) не требуется расчет физики возбуждения акустических колебаний в объекте сложной формы, его феноменологического описания при переизлучении в воздушную среду для приема микрофоном. Это позволяет применять подобную методику формирования эталона при использовании диагностического метода свободных колебаний для объектов произвольной сложной формы и состава материала. Кроме того, из этого следует, что создание основных процедур выявления дефектов в основном связано с сигнальной обработкой, которая лежит в плоскости информационной в большей степени, чем в физической. Использование информационных методов позволяет обойти трудности, возникающие при физических расчетах объектов контроля особенно в случаях, когда их много и они при этом, все разные. Конечно, в приведенном примере, рассмотрена только часть проблемы получения эталона для

метода свободных колебаний, которая позволяет сделать бинарную оценку о наличии дефекта или его отсутствия, но не о месте расположения, что в ряде прикладных случаев является важным. В этом случае, схему применения информационного алгоритма можно продлить далее, решая тем самым, все последующие задачи дефектоскопии объекта.

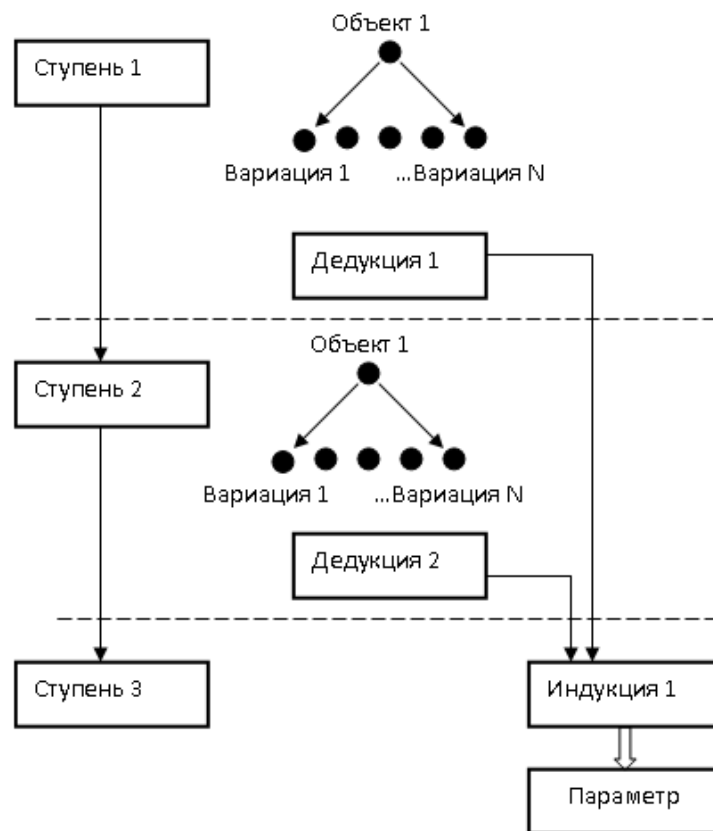


Рис. 5. Построение абстрактного информационного алгоритма для получения параметра, зависящего от местоположения дефекта, в методе локальных свободных колебаний.

Результатом может быть и получение данных о низкой вероятностной статистике всех факторов, определяющих свойства дефекта при его диагностике методом свободных колебаний, что позволит дать заключение о принципиальной не

применимости этого метода для данного объекта. Это тоже будет являться решением.

Одним известным недостатком метода свободных колебаний, является его трудноприменимость к поиску координат дефекта, что существенно ограничивает его практический диапазон использования. Поэтому в аспекте предложенного подхода рассмотрим возможность использования метода свободных колебаний и для поиска координат дефектов. Для этого потребуется другое построение информационного алгоритма, представленного на (рис. 5) Здесь основополагающим принципом при поиске координат дефекта возьмем последовательное перемещение точки возбуждения с некоторым линейным шагом по поверхности объекта, используя свойства метода локальных свободных колебаний.

В качестве объекта 1 на первом этапе возьмем произвольный предмет, не имеющий дефекта, а в качестве вариаций - набор точек возбуждения акустических волн на его поверхности. В целом расположение приемника акустических волн может быть выбрано произвольным и постоянным на все время измерений или синхронным, учитывающим движение источника возбуждения акустических волн. Выбирается наиболее удобный и эффективный способ их приема, учитывающий местные технические условия при проведении процедур с последующим результатом их анализа дедуктивным методом.

При этом акцент в конечном итоге осуществляется не на поиск эталона с которым будет сравниваться полученный результат измерений, а некоторого

эффективного дифференциального значения параметра, который будет изменяться при зондировании объекта от вариации к вариации. Зондирование на плоскости может быть векторным или матричным. Векторное используется на протяженных объектах, матричное чаще всего для анализа поверхностей. На второй стадии используется объект 1 с детерминированным пространственным положением дефекта и получением соответствующих векторов и матриц, содержащих информацию о дефекте. После проведения интегрированного векторного и матричного анализа с помощью индукции определяют необходимый параметр, на основе которого и осуществляют в дальнейшем диагностику.

Следует отметить, что поиск искомого параметра требует гораздо больше усилий, поскольку результат диагностики содержит в себе не бинарное заключение, а комплексное, основанное на аналоговых данных параметра. В целом технические условия для тех или иных объектов по определению в них координат дефектов могут быть разными, а значит и решения, которые могут быть получены для них. В качестве примера с целью упрощения решения задачи, рассмотрим только одномерный случай распространения акустических волн в направлении дефекта, расположенного перед отражающей стенкой, поскольку это соответствует максимальному количеству переотраженных волн в точке приема у ограниченного поверхностями объекта. Этого будет вполне достаточно для решения частной задачи поиска координат дефекта. Здесь примем, что направление нормали к фронту акустической волны образует по отношению к дефекту внутри объекта и стенке, одинаковый угол  $\beta=0$ . Если в такой одномерной системе учесть отраженные

акустические волны от дефекта, включая и переотражения «дефект – стенка», которые приходят в одну и ту же точку приема, то получим следующее выражение для сигнала в точке приема:

$$S(t, \tau_1, \tau_2, k, T) = k \cdot S_1(t, \tau_1, \alpha, T) + \sum_{i=1}^{\infty} \left\{ k^{i-1} \cdot (1-k)^{i+1} \cdot S_1[t, 2 \cdot (\tau_1 + i \cdot \tau_2), \alpha, T] \right\} \quad (1)$$

Здесь  $S_1(t, \tau, \alpha, T)$  - произвольный зондирующий акустический сигнал, зависящий от текущего времени  $t$ ,  $k$  – коэффициент отражения акустической волны от дефекта, временных задержек распространения сигнала  $\tau_1$  - «дефект – приемник» и  $\tau_2$  - «дефект – стенка», коэффициента затухания  $\alpha$  и длительности сигнала  $T$ .

Анализ выражения проведем численным методом для импульсного затухающего гармонического сигнала, функционально близкого к акустическому сигналу одного удара по поверхности объекта. Наибольший интерес представляет ситуация с соотношением величин задержек  $m = \frac{\tau_1}{\tau_2}$  при фиксированной длительности сигнала  $T$ . Чтобы сравнить различные ситуации, примем  $T = const, k = const$ , а  $m = var$ . Инвариантность к местоположению принимаемых сигналов на временной оси, обеспечим за счет коэффициента корреляции энергетических спектров сигналов без наличия дефекта и с наличием у объекта. При этом учтем, что возрастающая сложность сигнала (1) предполагает использование более точных методов его обработки из-за наличия многократных наложений затухающих компонент, а именно используем вейвлет анализ. Покажем оправданность такого анализа -

используем две точки абстрактного пространства – без вейвлета и, например, с вейвлетом Добеши.

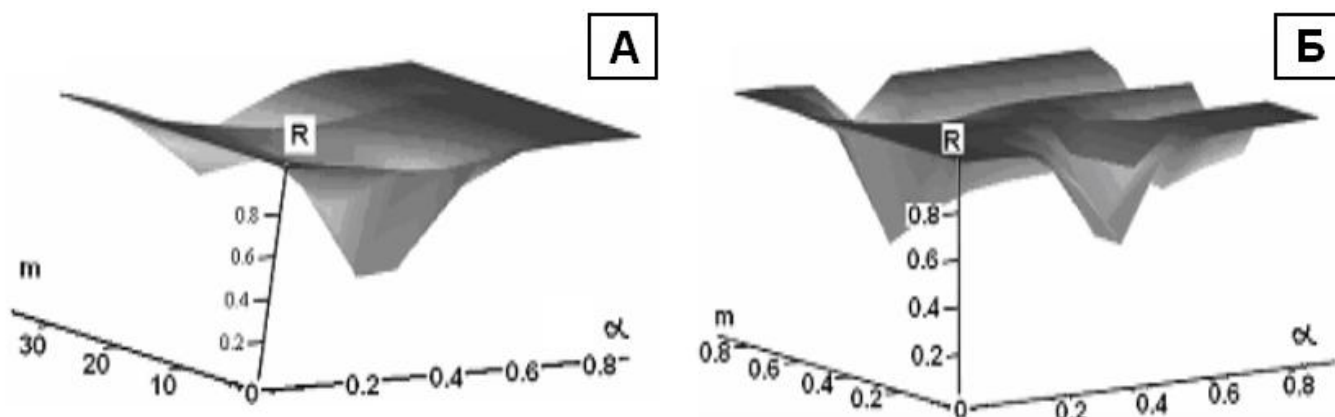


Рис. 6. Расчет коэффициента корреляции  $R$  спектров эталонного и отраженного сигналов в зависимости от соотношения задержек и коэффициента затухания  $\alpha$   
а) без вейвлета и б) с вейвлетом Добеши.

Проведя расчет коэффициента корреляции спектров двух сигналов, получаем, что в диапазоне  $0 < m < 1$  отсутствуют какие либо различия в спектрах, а для  $m=10$  они являются существенными. При использовании вейвлета Добеши, один из его коэффициентов, например, четвертый позволяет получить довольно существенные изменения корреляционной функции и для  $0 < m < 1$  (рис. 6). Видимо поэтому авторы [5] отмечали полезные свойства этого типа вейвлета для повышения чувствительности дискриминантных признаков трещины.

Таким образом, чтобы повысить чувствительность приборов, осуществляющих поиск дефектов в объектах, имеющих большое количество переотражений не только от стенок, как таковых, но и от дефектов, оказывается желательным при обработке спектров сигналов с вибродатчиков, использовать



подобранный набор вейвлет функций. Результаты подобного анализа были реализованы при получении 3D поверхности значений параметра – (рис. 7), с помощью электромеханического сканера на основе использования метода локальных свободных колебаний на объектах сложной и простой конфигурации с вейвлетом «Шапо». Датчик устанавливался в одной точке объекта и не перемещался за все время измерений. Используемым параметром являлась энергия сигнала в частотной области, выбранной на основе метода экспертных оценок. Трещины и расслоения в объектах имели размер в пределах 70мкм. В качестве объекта использовался один и тот же симметричный предмет, на одной стороне которого имелся дефект. Сканирование поверхности объекта производилось, как на целой стороне, так и на симметричной ей дефектной для последующего сравнения.

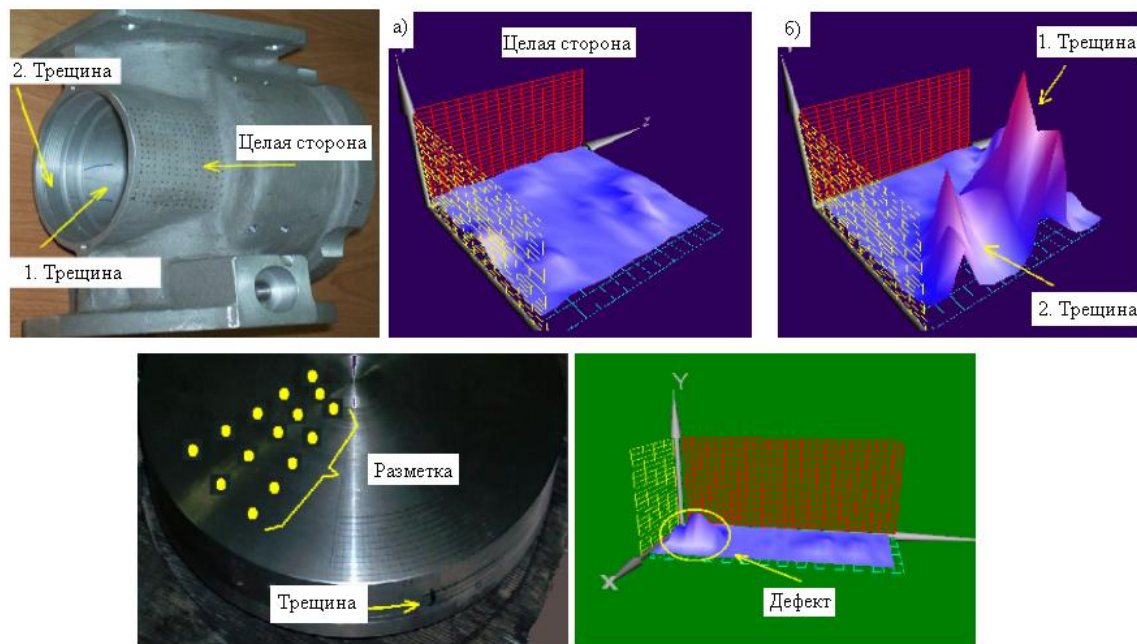


Рис. 7. Результаты измерений координат дефекта методом локальных свободных колебаний на основе аналогового параметра.

Визуализация измеряемого параметра позволяет осуществить координатную привязку его значений к конкретному месту объекта. Дальнейшая обработка полученных данных в виде поверхностей относится к другой информационной сфере и здесь не рассматривается.

### **Выводы**

Методика применения информационного подхода в методе свободных колебаний позволила практически исключить расчет физики явления сложного взаимодействия акустических волн при их возбуждении с поверхности механическим ударом, их распространения, взаимодействия с самим дефектом, имеющим случайные параметры и получить не только традиционную бинарную оценку его наличия, но и осуществить, например, получение координатной информации для объектов имеющих произвольную форму и состав.

### **Библиографический список**

1. Клюев В.В., Соснин Ф.Р., Румянцев С.В. и др. Неразрушающий контроль. Россия. 1990-2000 гг.: Справочник - М.: Машиностроение, 2001. - 616 с.
2. A. Soldatov, I. Bolotina, M. Dyakina, M. Kröning, F. Mohr, K. M. Reddy, Y. Zhantlessov. Ultrasonic arrays for quantitative nondestructive testing an engineering approach. Russian Journal of Nondestructive Testing. 2013, Volume 49, Issue 3, pp 145 - 158

3. Soldatov, A.I., Kvasnikov, K.G., Bolotina, I.O., Krening, K.M., Potapenko, A.A.

The use of geometrical acoustics for the solution of visualization problems. Russian Journal of Nondestructive Testing. 2013. 49 (11). pp. 625-630.

4. Казаков Р.Б. Разработка и создание диагностического комплекса для контроля технического состояния цилиндрических заготовок на основе метода свободных колебаний // Сборник материалов докладов XXIII Всероссийской межвузовской научно-технической конференции «Электромеханические и внутрикамерные процессы в энергетических установках, струйная акустика и диагностика, приборы и методы контроля природной среды, веществ, материалов и изделий». Казань, КВВКУ, 2011. С. 325-326.

5. Бурау Н.И., Сопилка Ю.В. Повышение чувствительности дискриминантных признаков трещины в задачах виброакустической диагностики элементов роторных систем // Акустический вестник. 2003. Т.6. № 3. С. 10-17.