

## МЕТОД ОПРЕДЕЛЕНИЯ ПРОСТРАНСТВЕННЫХ КООРДИНАТ ОБЛАСТИ ДЕФЕКТООБРАЗОВАНИЯ В ЖЕЛЕЗОБЕТОННЫХ КОНСТРУКЦИЯХ

Оксень Е.И.  
Пархоменко В.В.  
Цокур В.Г

*Автомобильно-дорожный институт Донецкого национального технического университета*

---

### 1. Введение

Измерение и фиксирование сигналов акустической эмиссии, как правило [1, 2], осуществляют с помощью контактных пьезокерамических преобразователей и аналого-цифровых преобразователей, подключенных к компьютеру или микропроцессорному комплексу. Применение цифровых методов измерения и обработки сигналов [3] с частотой опроса 300÷400 Ксемпл позволяет выполнить аппаратуру диагностирования с временными интервалами фиксирования, соответствующими прохождению акустических импульсов в исследуемом объекте расстояния не более 1÷5 см. Использование для анализа нескольких расположенных на обусловленном расстоянии друг относительно друга датчиков создаёт возможность определения координат области дефектообразования по разности времени поступления к ним сигналов [4].

В настоящей работе рассмотрены вопросы разработки метода определения пространственных координат области дефектообразования в железобетонных конструкциях на основе анализа сигналов акустической эмиссии, полученные совместно с ГосдорНИИ.

### 2. Цель работы

Цель работы – повышение надежности и уменьшение трудовых расходов обследований технического состояния железобетонных конструкций и асфальтобетонных покрытий путем определения пространственных координат зон дефектообразования при статических и эксплуатационных нагрузках.

### 3. Методика исследований

Исследование особенностей распространения сигналов акустической эмиссии во времени в железобетонных конструкциях относительно решётки датчиков проводилось на основе цифрового четырёхканального комплекса акустического контроля (рис. 1а), состоящего из ноутбука 1 в защищённом исполнении производства фирмы Panasonic (Япония), аналогово-цифрового преобразователя (АЦП) ADA-1406 (14 разрядный АЦП, 8 входных дифференциальных каналов, 350 Ксемпл) 2 производства фирмы Холит Дейта Системс (Украина), усилителя заряда LE-41 (4 канала, максимальная амплитуда заряда 9 нКл, верхняя граница полосы пропускания 22000 Гц, пик-пик выходного напряжения ±8 В) 3 производства фирмы L-card (Россия). Управление и передача сигналов от АЦП ADA-1406 осуществлялось по шине USB. Для питания усилителя заряда LE-41 в комплексе применены два источника питания 4 производства фирмы MeanWell (Тайвань).

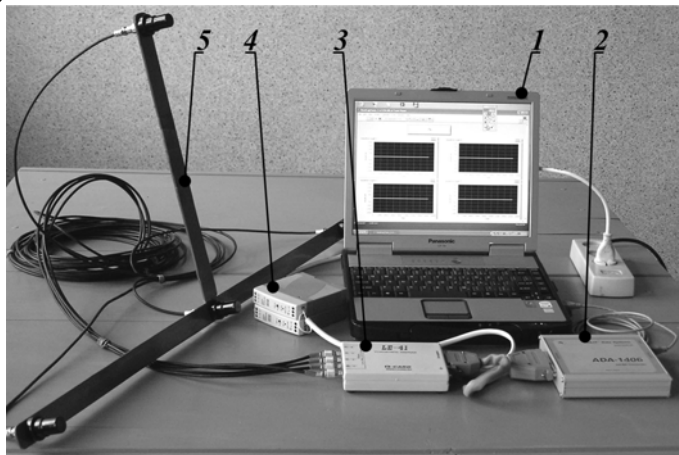
Антенная решётка датчиков (АРД) 5 Т-образной формы с четырьмя регулярно расположенными датчиками (рис. 1, б) выполнена с размером ячейки  $a = 0,4$  м. Расчётная схема поступления акустического сигнала к датчикам антенной решётки представлена на рис. 2. Принцип действия антенной решётки датчиков основан на том, что при позиционировании АРД относительно плоской поверхности исследуемого объекта скорость распространения акустической волны  $v$  в его материале принимается одинаковой во всех направлениях, время

поступления акустического импульса от предполагаемой области дефектообразования  $I$  к каждому из датчиков  $1-4$  определяется координатами  $x, y, z$  и размером ячейки  $a$ .

Для управления функционированием комплекса акустического контроля разработано специализированное программное обеспечение, состоящее из программ:

– **Read4Channels** – визуализация на отдельных дисплеях сигналов с четырёх датчиков антенной решётки в режиме реального времени. Предназначена для настройки и предварительного контроля работоспособности комплекса;

а)



б)



а) общий вид; б) крепление пьезодатчика на решётке

Рис. 1. Комплекс акустического контроля

– **ReadWrite4Channels** – запись в файл сигналов от четырёх датчиков антенной решётки в течение заданного периода времени. Является основной измерительной программой комплекса акустического контроля;

– **SpeedOfWave** – расчёт скорости распространения акустической волны в материале исследуемого элемента конструкции;

– **CoordinateOfBug** – расчёт координаты области дефектообразования по временной разности поступления акустической волны к датчикам антенной решётки.

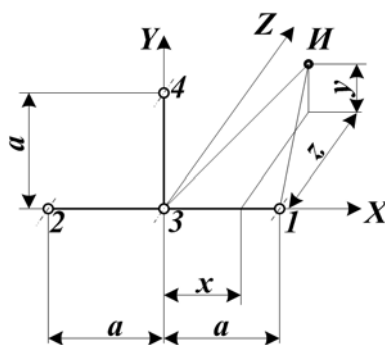


Рис. 2. Схема локации области образования дефекта антенной решёткой датчиков

#### 4. Результаты исследований

**4.1. Определение скорости распространения акустической волны в материале исследуемого элемента конструкции.** При определении скорости распространения акустической волны фиксируется процесс прохождения акустического импульса, смоделированного на поверхности исследуемого объекта, относительно которой позиционирована АД так, что точка генерирования акустического импульса обязательно совпадает с осью  $X$  (рис. 2) датчиков  $1-3-2$ . Вид смоделированного на поверхности исследуемого объекта акустического импульса, зафиксированного при частоте опроса  $SR = 20000$  Ксмпл датчиками  $1$  и  $2$ , приведен на рис. 3.

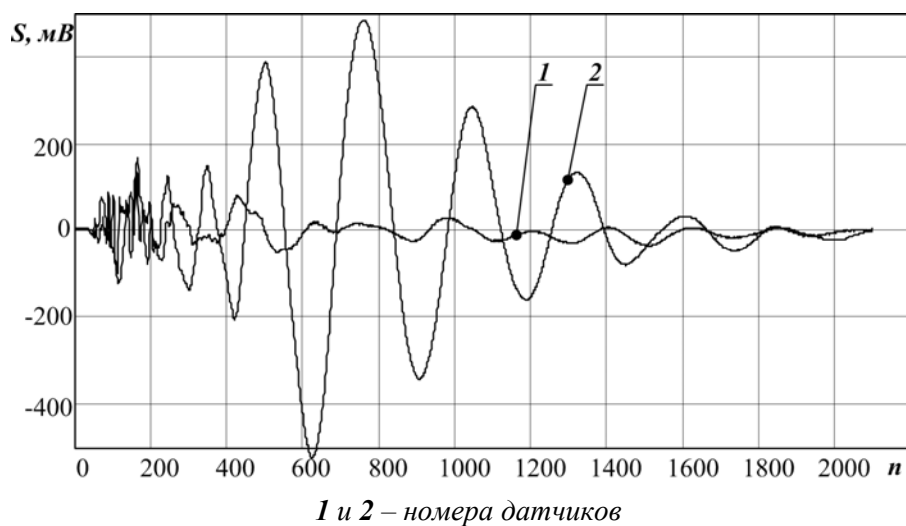


Рис. 3. Вид смоделированного на поверхности исследуемого объекта акустического импульса

В соответствии с рекомендациями [4] за момент прихода акустического импульса к датчикам принималось развитие максимальных значений интенсивности импульса в первой положительной полуволе колебаний. На диаграмме начального фрагмента (рис. 4) разность хода акустического импульса относительно датчиков  $1$  и  $2$  показана как  $T_{1-2}$ .

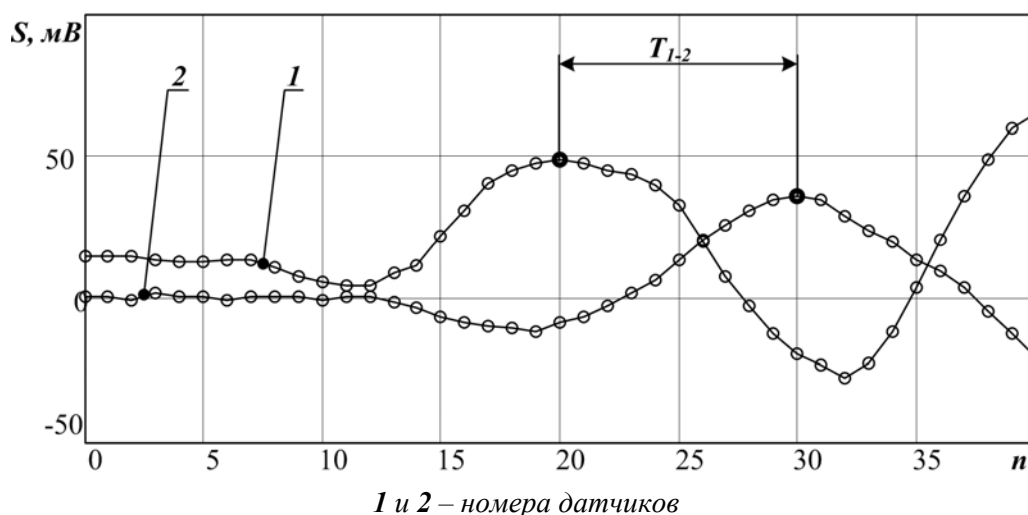


Рис. 4. Диаграмма начального фрагмента акустического импульса

Поскольку на диаграмме по оси абсцисс отложены номера серий опроса группы датчиков  $I-4$ , то, с учётом принятой частоты опроса величина временной задержки поступления сигнала к датчикам составит

$$T_{1-2} = t_2 - t_1 = \frac{n_2 - n_1 + 1}{SR}, \quad (1)$$

где  $t_i$  – момент время достижения максимального значения интенсивности импульса на  $i$ -м датчике, с;

$n_i$  – номер серии опроса  $i$ -го датчика с максимальным значением интенсивности импульса.

Значение временной задержки сигнала (1) может быть уточнено на основе оценки характера изменения сигнала в зоне локальных максимумов, например, интерполяции кубическими сплайн-функциями. Так, приняв за область интерполяции временной промежуток из 6 серий опросов (три интервала до максимума, два – после) и вычислив коэффициенты кубического сплайна, можно построить кусочно-гладкое приближение  $F \text{ int}$  функции сигнала – кривая  $1$  на рис. 5. Вычислив производную приближения функции сигнала на исследуемом временной промежутке

$$dF \text{ int}_i = \frac{d(F \text{ int}_i)}{dt}$$

и решив уравнение

$$dF \text{ int}_i = 0 \quad (2)$$

можно получить уточнение времени достижения максимального значения интенсивности импульса на  $i$ -м датчике  $\Delta t_i$ . На рис. 5 представлено такое решение для сигнала, зафиксированного датчиком  $1$ .

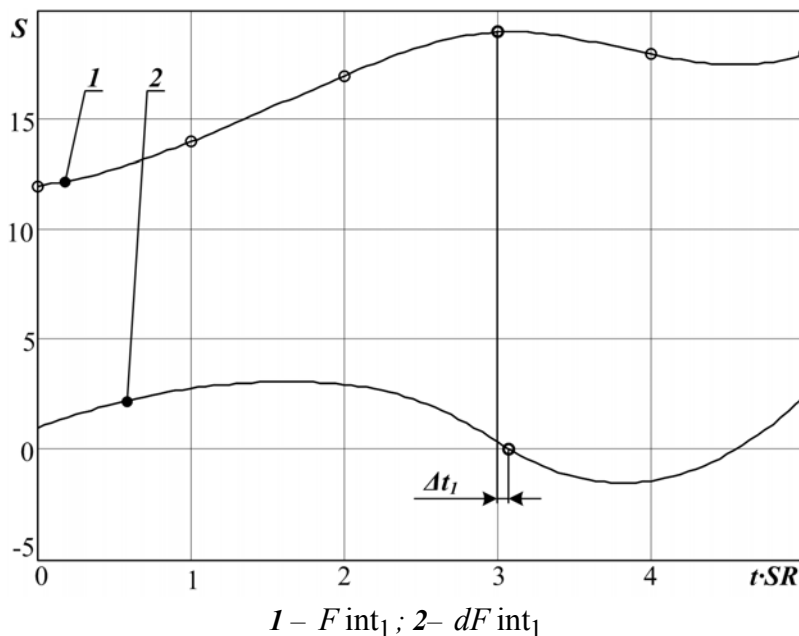


Рис. 5. Уточнение временной задержки сигнала кубическими сплайн-функциями

Тогда скорость распространения акустической волны в исследуемом объекте для принятого расположения датчиков в АРД может быть определена как

$$v = \frac{2 \cdot a}{t_2 - t_1} = \frac{2 \cdot a \cdot SR}{n_2 - n_1 + 1 + SR \cdot (\Delta t_2 - \Delta t_1)}. \quad (3)$$

**4.2. Определение координат области дефектообразования.** В соответствии с расчётной схемой (см. 2) временная разность поступления акустической волны к датчикам антенной решётки определится уравнениями

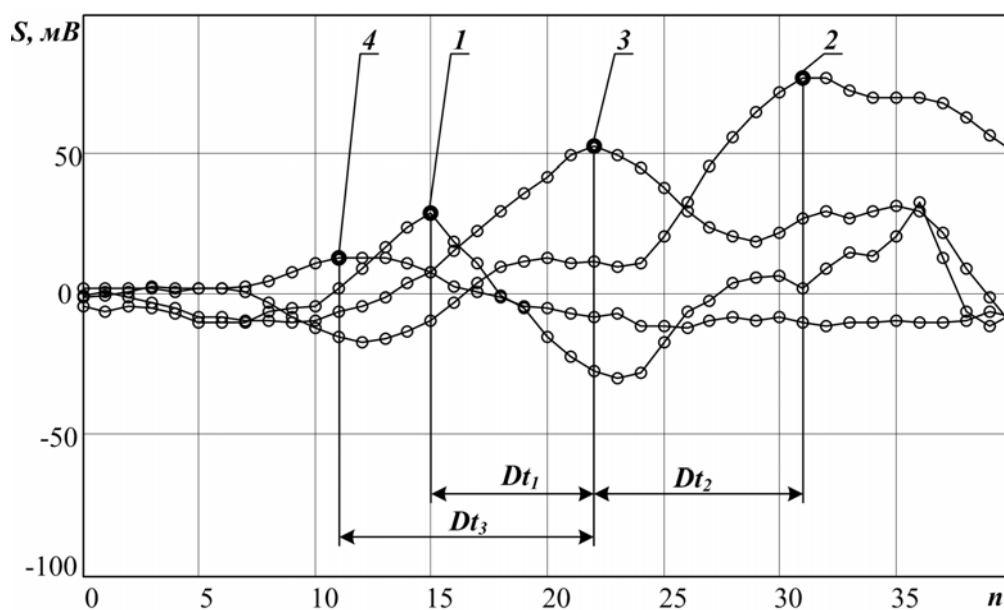
$$\begin{cases} Dt_1 = \frac{\sqrt{(a-x)^2 + y^2 + z^2} - \sqrt{x^2 + y^2 + z^2}}{v}, \\ Dt_2 = \frac{\sqrt{(a+x)^2 + y^2 + z^2} - \sqrt{x^2 + y^2 + z^2}}{v}, \\ Dt_3 = \frac{\sqrt{x^2 + (a-y)^2 + z^2} - \sqrt{x^2 + y^2 + z^2}}{v}. \end{cases} \quad (4)$$

где  $Dt_1 = t_1 - t_3$ ,  $Dt_2 = t_2 - t_3$ ,  $Dt_3 = t_4 - t_3$ .

Решением системы (4) при заданных временных разностях поступления акустической волны к датчикам  $Dt_i$  были получены аналитические зависимости для расчёта координат  $x, y, z$  области дефектообразования  $\mathbf{I}$  вида

$$\begin{cases} x = P_1(Dt_1, Dt_2, Dt_3, a, v), \\ y = P_2(Dt_1, Dt_2, Dt_3, a, v), \\ z = P_3(Dt_1, Dt_2, Dt_3, a, v). \end{cases} \quad (5)$$

Зависимости для расчёта координат  $P_i$  представляют собой многочлены, и ввиду громоздкости в статье не приводятся, но обеспечивают удобство программирования и быстроту вычислений. Временные разности поступления акустической волны к датчикам  $Dt_i$  рассчитываются в соответствии с алгоритмом, изложенным в п.1. Графическое представление схемы расчёта приведено на рис. 6 для примера записи файла сигналов от четырёх датчиков антенной решётки.



1, 2, 3 и 4 – номера датчиков

Рис. 6. Диаграмма начального фрагмента акустического импульса

Таким образом, временная разность поступления акустической волны к датчику 1 относительно датчика 3 будет определена как

$$Dt_1 = \frac{n_1 - n_3 + 2}{SR} + \Delta t_1 - \Delta t_3.$$

Лабораторные испытания разработанного комплекса акустического контроля при моделировании образования дефектов в железобетонных плитах строительной части лабораторного корпуса показали, что точность определения координат  $x$ - $y$  координат составляет 2÷5 % при расстоянии от центра АРД до 5 м.

## Выводы

1. Разработанные метод определения пространственных координат области дефектообразования в железобетонных конструкциях, аппаратура и программное обеспечение комплекса акустического контроля могут быть рекомендованы для принятия за основу методики цифровой локации дефектов в железобетонных конструкциях и асфальтобетонных покрытиях.
2. Разработанные аппаратура и программное обеспечение комплекса акустического контроля могут быть рекомендованы для промышленной апробации при проведении испытаний железобетонных конструкций.

## Литература

1. Филоненко С. Ф. Акустическая эмиссия. Измерения, контроль, диагностика. – К.: КНУЦА, 1999. – 304 с.
2. Скальський В.Р., Коваль П.М. Акустична емісія під час руйнування матеріалів, виробів і конструкцій. Методичні аспекти відбору та обробки інформації. – Львів: СПОЛОМ, 2005. – 396 с.
3. Оксень Е.И. Аппаратно-программный комплекс измерения параметров деформирования зернистых сред // Наукові праці Донецького національного технічного університету. Серія: Обчислювальна техніка та автоматика: Збірн. наук. праць. – Донецьк: ДонНТУ, 2002. Вип. 47. – С. 277-283.
4. Оксень Е.И., Пархоменко В.В., Мосиенко Н.П., Сергийчук Н.П., Семененко И.И. Экспериментальные исследования усиленных железобетонных балок // Дороги і мости. – Київ: ДерждорНДІ, 2006. – Вип. 6. – С. 134-144.