
Диагностические возможности аппаратуры для УЗК бетона



**Шевалдыкин
Виктор
Гаврилович**

Зам. директора
ООО «АКС» по
научной работе,
д. т. н.

Существующую в настоящее время аппаратуру для УЗК бетонных и железобетонных конструкций можно условно разделить на четыре класса:

- измерители времени с цифровым отсчетом;
- устройства прозвучивания с осциллографическим индикатором;
- эхо-импульсные дефектоскопы;
- визуализирующие системы (томографы).

Приборы с цифровым отсчетом измеренного времени распространения ультразвука в бетоне — наиболее простые из всех названных классов приборов. Их используют, в основном, для оценки прочности бетона по скорости ультразвука при поверхностном или сквозном прозвучивании и относительно небольших базах расстановки пьезопреобразователей (менее 1 м).

Приборы с осциллографическим индикатором обычно перекрывают возможности приборов первого класса. Они также являются весьма точными измерителями времени (или скорости) распространения ультразвука в бетоне. Поскольку с их помощью можно детально рассмотреть вид принимаемого сигнала и измерить его характерные параметры, приборы этого класса часто используют для дефектоскопии бетонных конструкций методами прохождения [1–4].

Эхо-импульсные дефектоскопы — это приборы, работающие на низких частотах ультразвука (не более 150–200 кГц) и отображающие на экране эхо-сигналы в контролируемой конструкции в привычной для дефектоскопистов форме: в виде А-развертки, то есть в координатах амплитуда — глубина отражателя [5, 6]. Наряду с А-разверткой возможно представление

принятых сигналов в виде *B*-развертки, то есть двумерного изображения сечения объекта контроля (ОК) с яркостным отображением уровня отраженного сигнала [6].

Приборы с томографическим представлением результатов контроля дают наиболее полную информацию о внутренней структуре ОК при одностороннем доступе. Они обладают наибольшей чувствительностью к различным нарушениям структуры бетона, так как в основе их работы используется метод синтезированной фокусируемой апертуры (САФТ) [6]. Важным отличием томографа от эхо-импульсного дефектоскопа с *B*-разверткой является то, что в нем акустическая апертура больших волновых размеров синтезируется при сканировании антенным устройством некоторой площади поверхности ОК. В результате отражательная способность любой точки объема ОК, находящейся в зоне облучения, формируется (и отображается на томограмме) по сигналам от нескольких соседних положений антенного устройства. В эходефектоскопе с *B*-разверткой совместную когерентную обработку сигналов от соседних положений сканируемого антенного устройства, как правило, не используют.

Характеристики, возможности и некоторые примеры практического применения аппаратуры всех перечисленных классов изложены в работах [1–7]. Примеры практического использования томографической аппаратуры для контроля бетона можно найти в [8, 9].

Наиболее доступными для пользователей по методике контроля и стоимости, а потому и наиболее распространенными на практике, являются приборы первых трех классов. Ниже мы рассмотрим результаты практического применения ультразвукового тестера УК1401 и эходефектоскопа А1220 в некоторых нетрадиционных случаях УЗК бетонных объектов.

Тестер УК1401 — измеритель времени и скорости распространения ультразвука в бетоне способом поверхностного прозвучивания на постоянной базе 150 мм. В нем используются преобразователи с сухим точечным контактом (СТК) [6]. В последних модификациях этого прибора появилась возможность измерений глубин трещин (до 50 мм), выходящих на поверхность бетона.

Дефектоскоп А1220* обеспечивает отображение эхо-сигналов в виде *A*- и *B*-разверток, а также позволяет запоминать множество *B*-изображений,

* Основные характеристики УК1401 и А1220 приведены в журнале «В мире НК», 2002, № 2(16), с. 11. В настоящее время начат серийный выпуск существенно модернизированного варианта этого прибора под названием «А1220 Монолит». Подробности на сайте www.acsys.ru

которые затем можно детально анализировать на компьютере. Кроме контроля антенным устройством (решеткой преобразователей с СТК) этот прибор позволяет вести измерения парой разнесенных преобразователей: измерять амплитуду и время распространения ультразвуковых импульсов в ОК с одновременным наблюдением на экране принятого сигнала. То есть дополнительно он может выполнять функции приборов второго класса.



Рис. 1. Строительство методом скользящей опалубки

Строительство одного из новых зданий МНПО «СПЕКТР» в 2000 г. (рис. 1) вели методом скользящей опалубки. УК1401 использовали на этой стройке для контроля динамики набора прочности бетона и последующей ее оценки при 28-суточном возрасте бетона. Благодаря встроенной памяти на 4000 результатов измерений и связи с компьютером, тестер УК1401

позволял накапливать и затем анализировать большие массивы данных о скорости распространения ультразвука в различных частях строящегося здания. Для сопоставления измеренной тестером скорости с прочностью бетона использовали метод отрыва со скалыванием. На рис. 2 и 3 приведены зависимость прочности бетона в одной из стен здания от возраста и распределение прочности бетона в другой стене между перекрытиями. Аналогичные зависимости были построены для большинства стен и колонн здания по данным, полученным с помощью УК1401 [10].



Рис. 2. Зависимость прочности бетона от возраста



Рис. 3. Распределение прочности бетона по вертикали между перекрытиями

Приведенный пример использования этого простого в эксплуатации прибора показывает, что с его помощью можно не только вести контроль прочности бетона на предприятиях сборного железобетона или стройплощадках, но и составлять карты распределений скорости ультразвука по поверхностям больших бетонных объектов. В сочетании с методом отрыва со скалыванием такие карты позволяют выявлять места аномалий прочности бетона в эксплуатируемых сооружениях.

Одной из часто встречающихся на практике задач является определение целостности монолитного бетона за слоем металла, а также степени адгезии бетона к металлу. Для оценки возможности решения такой задачи при одностороннем доступе к ОК нами в мае 2003 г. были проведены эксперименты на специально изготовленной для этого бетонной опоре. Такие опоры, в частности, используются при строительстве речных причалов. Опора была выполнена путем заливки раствора бетона марки 300 в стальную трубу диаметром 1020 мм и толщиной стенок 15 мм. Виброукладка не применялась. Возраст бетона на момент контроля составил 12 дней. Схема опоры приведена на рис. 4.

Контроль проводился с помощью дефектоскопа А1220 эхо-импульсным методом при сканировании поверхности трубы антенной решеткой дефектоскопа. Рабочая частота ультразвука 55 кГц, тип ультразвуковых волн — поперечные. Максимальная глубина просмотра эхо-сигналов у А1220—1,5 м. Прибор был настроен на среднюю скорость поперечных ультразвуковых волн в бетонах, равную 2750 м/с. Действительное значение скорости в бетоне опоры не измеряли из-за больших трудностей доступа к бетону.

В процессе контроля были записаны четыре массива данных, полученных при сканировании антенной решеткой поверхности трубы слева направо поперек образующей вдоль кольцевых траекторий, показанных на рис. 4 горизонтальными штриховыми линиями. Шаг сканирования был равен 80 мм. Длина окружности трубы вдоль траектории сканирования примерно равна 3200 мм. На поверхность трубы антенную решетку устанавливали 40 раз на каждой траектории сканирования. При этом последнее положение антенной решетки при сканировании оказывалось около первого. Первые положения антенной решетки у траекторий 1–3 располагались точно одно под другим на начальной линии (рис. 4). Сканирование по траектории 4 было начато на 400 мм левее начальной линии.

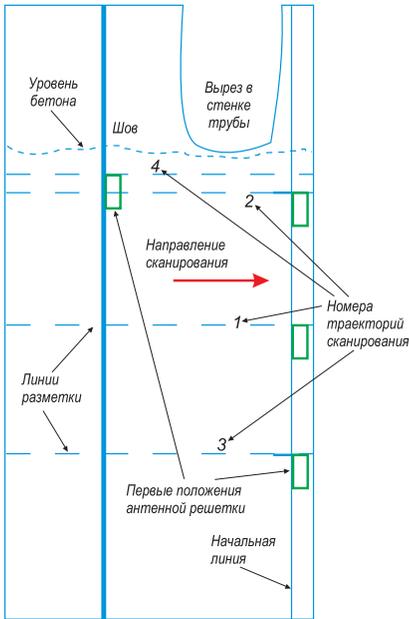


Рис. 4. Схема опоры

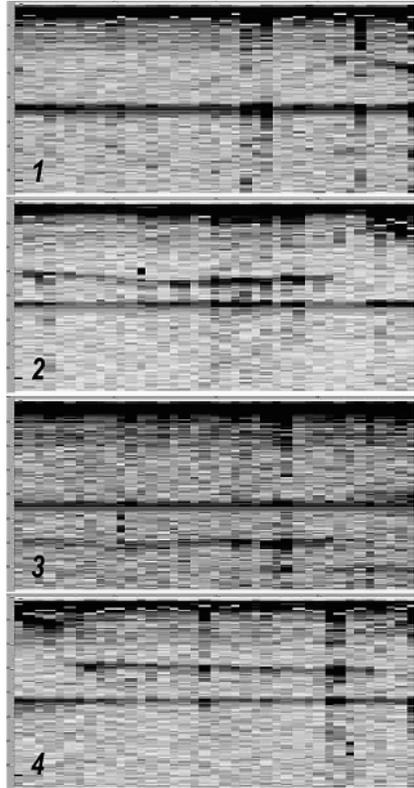


Рис. 5. Изображения разверток поперечных сечений опоры, номера изображений соответствуют номерам траекторий сканирования

По записанным массивам данных были построены изображения разверток поперечных срезов опоры. Они приведены на рис. 5. Номера изображений соответствуют номерам траекторий. На этих изображениях вертикальная ось —

это ось глубин, горизонтальная — ось, направленная вдоль траектории сканирования. Номера положений антенной решетки на этой оси возрастают слева направо. Поверхность трубы на этих изображениях находится сверху. Серыми тонами отображена амплитуда эхо-сигнала: большей амплитуде соответствует более темный тон.

На всех приведенных изображениях присутствует темная прямая горизонтальная полоса, располагающаяся на глубине 840–870 мм (примерно в середине каждого изображения по глубине). При скорости ультразвука 2750 м/с, установленной в приборе, это соответствует времени задержки сигнала ≈ 620 мкс. Именно такое время задержки должно быть

у сигнала, распространяющегося в стенке трубы по ее окружности в виде нормальной симметричной волны нулевого порядка. Ее скорость распространения приблизительно равна 5200 м/с, что несколько меньше скорости продольных волн в стали. Таким образом, можно с большой вероятностью предположить, что эти темные горизонтальные полосы на изображениях сформированы паразитным сигналом в стенке трубы и не являются сигналами из бетона. Темные горизонтальные полосы, располагающиеся на малых глубинах на всех изображениях, дополнительно свидетельствуют о том, что по стенке трубы проходит сильный паразитный сигнал непосредственно от излучающих элементов решетки к приемным.

На изображении 1 (рис. 5) кроме образов этих паразитных сигналов практически ничего нет. Короткая темная полоса у правого края этого изображения на глубине ≈ 550 мм может быть образом какого-то сигнала из бетона, прошедшего через границу между бетоном и сталью. Отсутствие других сколько-нибудь значительных образов на этом изображении говорит о том, что адгезия бетона к стенкам трубы в области, где были сняты данные для изображения 1, весьма слабая.

Изображения 2 и 4 на рис. 5, снятые почти на одном и том же уровне опоры (рис. 4), отличаются практически только положением (на горизонтальной оси) темной полосы, лежащей на глубине около 600–650 мм. Данные для этих изображений были сняты при разных начальных позициях антенной решетки на стенке трубы (рис. 4). Глубина расположения этих образов, пересчитанная во время задержки эхо-сигналов через скорость 2750 м/с, приблизительно соответствует времени 460 мкс. Если учесть, что при той ориентации антенной решетки, которая была при сканировании поверхности опоры, решетка излучает и способна принимать по направлению вдоль образующей трубы поперечные волны с горизонтальной поляризацией, то происхождение этих образов (горизонтальных полос на глубине 600–650 мм) можно объяснить отражениями сигналов этих волн от верхней кромки трубы. Обратный пересчет времени 460 мкс в расстояние до кромки через скорость поперечных волн в стали (примерно 3200 м/с) дает значение порядка 700–740 мм. Разрывы этих образов на изображениях дополнительно подтверждают правильность такого предположения, так как в стенке трубы сверху присутствует большой вырез (рис. 4), экранирующий эхо-сигналы от верхней кромки при расположении антенной решетки под ним.

Изображение 3 на рис. 5, кроме уже упомянутой полосы на глубине 840–870 мм, содержит некий образ в виде слегка изогнутой горизонтальной полосы с разной степенью черноты, расположенной на глубинах порядка 1100–1200 мм. Это, скорее всего, образ донной поверхности опоры, то есть противоположной поверхности опоры относительно той, на которой располагалась антенная решетка при сканировании. Таким образом, в данном нижнем сечении опоры, по-видимому, адгезия бетона к стенкам трубы достаточно хорошая, и сигналы, преодолевая границу сталь — бетон, распространялись по бетону и возвращались обратно к антенной решетке. Некоторое превышение измеренной глубины донной поверхности (1100–1200 мм) над реальной (диаметр трубы ≈ 1 м) можно объяснить завышенным значением установленной в приборе скорости ультразвука: 2750 м/с. В бетонах малого возраста (менее 2–3 недель) скорость распространения поперечных волн при достаточно большом разбросе иногда бывает меньше 2300–2400 м/с.

Таким образом, УЗК качества бетона за слоем металла возможен эхо-методом на частотах порядка 50–100 кГц, хотя и не с такой достоверностью, как при непосредственном доступе к поверхности бетона. Степень адгезии бетона к металлу можно оценивать по наличию, величине или отсутствию донного сигнала от противоположной относительно антенной решетки поверхности ОК.

Сильная коррозия арматуры бетонного топливного резервуара (рис. 6) в районе Копенгагена привела к растрескиванию и отслоению



Рис. 6. Разрушение стен железобетонного топливного резервуара

защитного слоя бетона в некоторых частях стен. Сотрудникам компании «Форс Текнолоджи», Дания, было предложено провести обследование реального повреждения стен резервуара и дать заключение о наиболее подходящем методе их восстановления и объеме ремонтных работ [11]. Простой акустический контроль с помощью молотка был невозможен из-за весьма толстых стен резервуара.

Поэтому был выбран импульсный эхо-метод. После откапывания грунта стены были очищены от грязи сильной струей воды. Затем было

выполнено обследование всех стен по сетчатой разметке 50×50 см дефектоскопом А1220.

На рис. 7 приведен пример *B*-изображения, полученного на одной из стен резервуара. Контроль выполнялся на частоте 33 кГц. По оси *Y* на этом рисунке отложены номера точек установки антенной решетки дефектоскопа с шагом 50 см. По оси *X* — глубина расположения отражателей под поверхностью бетонной стены. Как и на рис. 5, большей амплитуде эхо-сигнала соответствует более темный тон.

Основным критерием целостности защитного слоя бетона стен была амплитуда донного сигнала: если сигнал большой, то бетон, очевидно, монолитен, если сигнал мал или его нет вообще, — значит защитный слой бетона не сцеплен с основным массивом. На рис. 7 донный сигнал выглядит как темная вертикальная полоса на глубине около 400 мм. Справа даны распределения амплитуд эхо-сигналов при некоторых характерных положениях антенной решетки дефектоскопа на поверхности бетона. Эти положения выбраны для разных уровней донного сигнала. Они обозначены красными линиями.

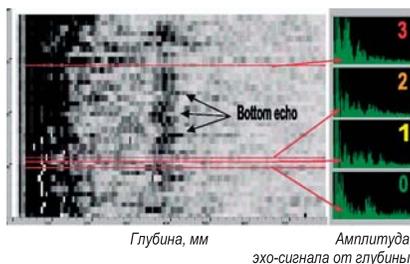


Рис. 7. Пример *B*-изображения среза одной из стен резервуара при сканировании вдоль горизонтальной линии: справа – изображения эхо-сигналов в координатах амплитуда–глубина

В результате обследования резервуара оказалось, что ~ 20% площади его стен поражены отслоениями защитного слоя бетона. В ходе последующего ремонта было обнаружено, что результаты УЗК хорошо коррелируют с действительными местами разрушения бетона [11].

Контроль качества забетонированных рельсовых путей (рис. 8) при строительстве обычно выполняют визуально. Но многие не найденные подповерхностные дефекты бетона (полости, расслоения) проявляются только после длительной эксплуатации пути, когда их уже нельзя отремонтировать. Особенность таких путей — укладка рельсов на двухблочные шпалы, замоналиченные в бетонное



Рис. 8. Железнодорожный путь с забетонированными двухблочными шпалами

основание. В результате экспериментов, проведенных специалистами Федерального института по исследованию и испытанию материалов, Берлин, Германия, было предложено для НК таких путей наряду с методом волны удара и радиоволновым методом использовать ультразвуковой импульсный эхо-метод [12].



Рис. 9. Рабочий момент контроля качества сцепления шпал с бетоном эхodefектоскопом A1220: справа — дефектоскоп A1220

Исследования вели дефектоскопом A1220, сканируя антенной решеткой полотно вдоль пути между рельсами (рис. 9). Использовали рабочую частоту сигналов 55 кГц. Сканирование каждого блока шпал вели с шагом 20 мм в направлении пути. Для большей достоверности результатов проводили сканирование

каждого блока по четырем параллельным линиям с расстоянием между ними в 20 мм. Всего на каждом блоке шпалы получалось по 40 положений антенной решетки.

На рис. 10 показаны *B*-изображения, полученные на блоке шпалы с хорошим качеством сцепления ее с омоноличивающим бетоном (рис. 10 *а*) и на блоке с плохим сцеплением (рис. 10 *б*). Критерием качества омоноличивания шпал является донный сигнал от границы монолитного бетона с глубины 240 мм или, еще лучше, от границы между бетонным основанием и подстилающим покрытием с глубины 540 мм при одновременном отсутствии многократных отражений ультразвуковых импульсов в блоках шпал. Наоборот, наличие таких многократных отражений с периодом в 85 мм (толщина блока) означает, что шпала с монолитным бетоном сцеплена плохо. На рис. 10 *а* хорошо видна темная горизонтальная полоса на глубине 540 мм, в то время как на рис. 10 *б*

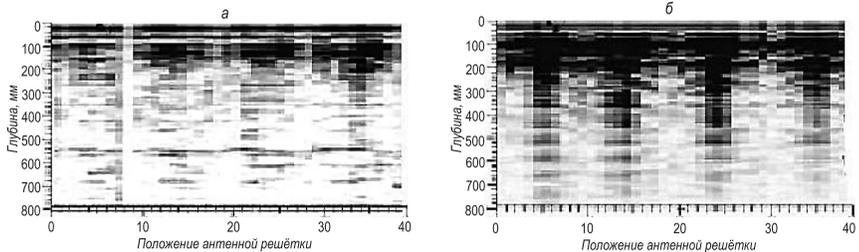


Рис. 10. *B*-изображения, полученные при контроле шпал в пути: *а* — с хорошим сцеплением с омоноличивающим бетоном; *б* — с плохим сцеплением

она отсутствует. Зато там явно заметна полосатая структура изображения, вызванная многократными отражениями сигнала в блоке шпалы.

Точно такие же измерения были проведены на специально изготовленном тестовом образце с полным соблюдением технологии омоноличивания шпал. В тестовом образце были смоделированы различные нарушения механической связи блоков шпал с монолитным бетоном. Анализ полученных результатов показал хорошее совпадение проявлений моделируемых и реальных дефектов [12].

Еще одной областью применения эходефектоскопов для бетона является контроль состояния анкерных болтов, крепящих различные сооружения или крупные агрегаты к массивным бетонным основаниям. Сущность задачи состоит в том, чтобы определить длину болта и степень его механической связи с монолитным бетоном.

Принцип контроля анкерных болтов заключается в следующем. С помощью совмещенного преобразователя на рабочую частоту не выше 30–40 кГц в торец болта посылают короткий импульс и наблюдают характер сигналов, принятых этим же преобразователем. Короткий импульс распространяется вдоль тела болта, отражается от его противоположного конца и возвращается обратно. Если анкерный болт не замоноличен в бетон или нет адгезии его тела к бетону, то импульс, почти не затухая, проходит до другого конца болта и возвращается обратно, немного изменив свою форму. Таких челночных проходов импульса по болту может быть несколько, пока вся энергия сигнала не рассеется. На экране прибора при этом видны повторяющиеся сигналы почти одинаковой амплитуды и формы. Ультразвуковой импульс распространяется по болту со скоростью стержневой продольной волны. Эта скорость лежит в диапазоне от 4800 до 5500 м/с в зависимости от марки стали. Зная эту скорость, в конкретном болте легко определить его длину, если он оборван, или оценить — на какой глубине находится сужение его поперечного сечения или другой дефект, соизмеримый с размерами поперечного сечения болта. Выбор столь низкой рабочей частоты сигналов обеспечивает волноводное распространение их в теле болта. Длина ультразвуковой волны в болте, как правило, в 3–5 раз превышает диаметр болта.

Если анкерный болт хорошо связан с бетоном, то энергия импульса рассеивается через боковую поверхность болта в бетон, и обратно к преобразователю сигнал приходит сильно ослабленным. При хоро-

шей адгезии болта к бетону и длине болта более 1 м сигнал от противоположного конца болта можно даже не увидеть на экране из-за того, что он будет ниже уровня помех. В то же время при этом на экране можно наблюдать колебания, приходящие с расстояний, меньших длины болта. Эти колебания могут быть вызваны отражениями от мест, где хорошая связь бетона с болтом частично нарушена.

Из опыта контроля анкерных болтов также известно, что если болт только начал корродировать, то он распирает бетон, и его связь с ним даже усиливается. Поэтому на этой стадии по характеру сигналов нельзя определить степень коррозии болта. Но болт в этом случае держится в бетоне еще очень хорошо. При более сильной коррозии, когда толщина пораженного слоя доходит до 1–2 мм, связь болта с бетоном ухудшается, и это уже можно определить по наличию импульса отражения от противоположного конца болта. Вообще практически лучше наблюдать за поведением сигналов в анкерных болтах на протяжении всего периода эксплуатации агрегатов.

В августе 2003 г. нами были обследованы анкерные болты компрессорных агрегатов одной из нефтеперекачивающих станций нефтепровода «Дружба» в Брянской области. Контроль проводили с помощью дефектоскопа А1220 «Монолит» без остановки агрегатов. Использовали прямой совмещенный преобразователь S0202 с рабочей частотой 25 кГц, который устанавливали на торцы болтов. Краску с торцов не удаляли.

На рис. 11 приведена осциллограмма многократных эхо-сигналов в свободном анкерном болте, не замоноличенном в бетон. Горизонтальная шкала на этом и следующем рисунке проградуирована в метрах с учетом скорости распространения импульса по телу болта. Эта скорость была определена по известной длине свободного болта. Она равна в данном случае 5200 м/с.



Рис. 11. Осциллограмма эхо-сигналов в свободном анкерном болте

Фронт первого эхо-импульса на рис. 11 находится на расстоянии 1 м, т. е. длина болта равна 1 м. Между началом координат и фронтом первого эхо-импульса никаких колебаний нет, за исключением собствен-

ных колебаний преобразователя, затухающих практически к моменту времени, соответствующему длине 0,5 м. Это означает, что тело болта не имеет заметных дефектов.

Рис. 12 иллюстрирует реальный вид сигналов, полученных на разных анкерных болтах, замоноличенных в фундаменты агрегатов, работающих на станции. Масштаб по вертикали на рис. 12 существенно крупнее, чем на рис. 11, так как болты хорошо схвачены с бетоном, и сигналы, принятые из них, намного (примерно на 20 дБ) меньше, чем эхо-сигналы в свободном анкерном болте, уровень которых был заранее измерен. Это еще один показатель хорошей адгезии болта с бетоном. Энергия зондирующего сигнала почти вся уходит в окружающий бетон и назад к преобразователю приходит малая ее часть.

Длину болтов, сигналы из которых представлены на рис. 12, можно оценить примерно равной 0,7 м. На осциллограммах 2 и 3, рис. 12, эхо-сигналы от внутренних концов болта видны достаточно отчетливо, и их фронты расположены на отметках порядка 0,7 м. На осциллограмме 1, рис. 12, фронт такого же сигнала выделить труднее. Но, судя по малой амплитуде колебаний, принятых с глубин более 0,5 м, можно с уверенностью сказать, что длина этого болта не менее 0,6 м, и он хорошо схвачен с бетоном. В противном случае эхо-импульс от конца болта был бы существенно больше по амплитуде.

Беспорядочные затухающие колебания, которые видны на осциллограммах, рис. 12, на глубинах более 1 м, вызваны малой частью энергии зондирующего сигнала, которая осталась в теле болта. Важно то, что на этих осциллограммах нет сосредоточенных повторяющихся сигналов, похожих на импульсы рис. 11. Если бы такие импульсы были, даже с более быстрым

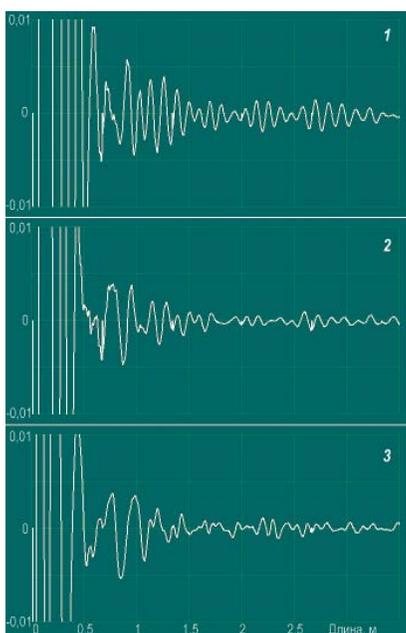


Рис. 12. Осциллограммы сигналов, полученные при контроле забетонированных анкерных болтов

уменьшением амплитуды от импульса к импульсу, то это означало бы, что энергия зондирующего сигнала недостаточно сильно поглощается бетоном, то есть связь с бетоном ослаблена.

Приведенными примерами практического использования тестера УК1401 и низкочастотного дефектоскопа А1220 далеко не исчерпывается весь круг задач УЗК и диагностики, которые может решать подобная аппаратура.

Литература

1. Почтовик Г. Я., Липник В. Г., Филонидов А. М. Дефектоскопия бетона ультразвуком в энергетическом строительстве. –М.: Энергия, 1977. — 121 с.
2. Штенгель В. Г. О методах и средствах НК для обследования эксплуатируемых железобетонных конструкций. — В мире НК. 2002. № 2 (16). С. 12–15.
3. Ультразвуковая дефектоскопия: вчера, сегодня, завтра/Штенгель В.Г. Бетон и строительные конструкции. — В мире НК. 2002. № 4 (18). С. 19–20.
4. Штенгель В. Г., Евдокимов Б. А., Иванов П. М. НК неметаллических строительных конструкций из разнородных материалов. — В мире НК. 2003. № 3 (21). С. 32–35.
5. Рапопорт Ю. М. Ультразвуковая дефектоскопия строительных деталей и конструкций. — Л.: Стройиздат, 1975. — 128 с.
6. Козлов В. Н., Самокрутов А. А., Шевалдыкин В. Г. Ультразвуковая дефектоскопия бетона эхо-методом: состояние и перспективы. — В мире НК. 2002. № 2 (16). С. 6–10.
7. Козлов В. Н., Подольский В. И., Самокрутов А. А., Шевалдыкин В. Г. Оценка состояния железобетонных опор контактной сети ультразвуковым прибором поверхностного прозвучивания. — В мире НК. 2000. № 1 (7). С. 45–47.
8. Козлов В. Н., Самокрутов А. А., Шевалдыкин В. Г. Контроль бетона ультразвуковым эхо-импульсным томографом с сухим контактом. — Контроль. Диагностика. 1998. № 1. С. 49–51.
9. Krause M., Mielentz F., Milman B. et al. Ultrasonic imaging of concrete members using an array system. — Insight. 2000. Vol. 42. No. 7. P. 447–450.
10. Kovalev A. V., Kozlov V. N., Samokrutov A. A. et al. Instruments and means for reinforced concrete structures inspection. — In: 15th World Conf. on Non-Destructive Testing, October 15–21, 2000, Roma (Italy).
11. Concrete News, January 2002, No. 4/Newsletter from FORCE Technology on Concrete Inspection and Analysis. Internet: www.force.dk/ciad
12. Gardei A., Mittag K., Wiggenger H. et al. Inspection of concrete-embedded tracks process development for the quality assurance of concrete-embedded tracks using non-destructive testing methods. www.force.dk/ciad In: Intern. Symp. (NDT-CE 2003) Non-Destructive Testing in Civil Engineering 2003. September 16–19, 2003, Berlin (Germany).