



ПРИМЕНЕНИЕ КОМПЛЕКСА ГЕОФИЗИЧЕСКИХ МЕТОДОВ ПРИ ИССЛЕДОВАНИИ ФУНДАМЕНТНЫХ ПЛИТ

В.В. Капустин, А.В. Кувалдин

ООО “Научно-исследовательский институт GEOTECH”

111024, Москва, 2-я ул. Энтузиастов, 5, стр. 39, Россия; e-mail: 9704361@mail.ru

В практике современного строительства широко используются крупногабаритные монолитные железобетонные конструкции, которые изготавливаются непосредственно на объекте строительства. Авторами рассматриваются результаты применения комплекса ультразвуковых, георадарных и акустических методов, позволяющих исследовать интегральные свойства разных по величине объемов среды, а также состояния контакта фундаментной плиты с грунтовым основанием. Рассмотрено влияние временной и пространственной дисперсии на результаты натуральных наблюдений.

Импакт-метод, добротность колебаний, резонанс, дисперсия, фактор объема, акустические и ультразвуковые методы, георадиолокация

INTEGRATED GEOPHYSICAL APPROACH FOR TESTING GROUND SLABS

V.V. Kapustin, A.V. Kuvaldin

GEOTECH Research and Survey Institute

110024, Moscow, Entuziastov st., 5, bldg. 39, Russia; e-mail: 9704361@mail.ru

Large *in-situ* reinforced concrete structures are broadly used in the modern construction practice. The properties of concrete ground slabs are studied with an integrated approach jointly by ultrasonic, sonic, and radar (GPR) testing methods. The approach allows investigating concrete volumes of different sizes in terms of their integrated properties, as well as the state of subgrade at the slab—ground contact. The testing results are interpreted with regard to dispersion (frequency dependence) of velocity and attenuation.

Impact method, Q-factor, resonance, dispersion, volume factor, sonic and ultrasonic surveys, GPR

В последнее время в стране уделяется значительное внимание развитию методов неразрушающего контроля бетонных конструкций. Это связано, прежде всего, с повышением требований к качеству бетона для строительства новых зданий и сооружений, что обусловлено развитием технологии монолитного строительства, а также увеличением размеров и усложнением формы применяемых конструктивных элементов. Вместе с тем количество сооружений, требующих капитального ремонта, с каждым годом растет, что также подразумевает применение методов неразрушающего контроля для оперативной оценки уровня аварийности и локализации ослабленных зон, требующих особого внимания.

В практике обследования состояния бетонных и железобетонных конструкций основное место среди неразрушающих методов занимают ультразвуковые. Сегодня в отечественной и зарубежной практике используется портативная ультразвуковая аппаратура, в том числе ультразвуковые томографы и скважинные комплексы, позволяющие изучать распространение продольных, поперечных и поверхностных волн в широком диапазоне ультразвуковых частот (от 20 до 100 КГц). Наряду с ультразвуковыми методами при обследовании бетонных и железобетонных конструкций широко применяются георадарные методы, несколько уступающие ультразвуковым методам по разрешающей способности, но превосходящие их по производительности и глубине исследования. Основ-

ной проблемой ультразвуковых методов является их невысокая глубина исследования (1.0–1.5 м) при поверхностных наблюдениях и при сквозном прозвучивании. При большей мощности бетонной конструкции могут быть использованы скважинные ультразвуковые измерения, но данный способ уже нельзя отнести к неразрушающим методам.

Комплекс геофизических методов, довольно успешно используемых в нашей стране, включает такие волновые методы, как ультразвуковой, акустический и георадиолокационный. На сегодня накоплен огромный опыт практического применения указанных методов для контроля строительных конструкций, и во многих западных странах они приняты и стандартизованы на государственном уровне. К большому сожалению, в российских нормативных документах из всех вышеперечисленных методов достойное освещение получил только ультразвуковой, что, несомненно, является огромным упущением и значительно тормозит развитие строительной сферы.

Рассмотрим применение комплекса геофизических методов на примере исследования фундаментных плит. Монолитные фундаментные плиты, возводимые для современных сооружений, как правило, имеют объемное армирование и могут достигать толщины в несколько метров. Ультразвуковые методы неразрушающего контроля для фундаментных плит большой толщины позволяют исследовать только поверхностную часть бетонной конструкции, а применение сква-

жинных ультразвуковых исследований зачастую сталкивается с серьезными техническими трудностями. В этой ситуации требуется проводить наблюдения в акустическом диапазоне от 0.5 до 20 кГц.

Акустические наблюдения могут быть проведены по следующим методикам:

– дистанционные наблюдения с регистрацией голографов прямой, рефрактированной, а для плит большой толщины и отраженной волны;

– импакт-метод.

Импакт-метод основан на явлении “толщинного резонанса”, возникающего в плите при возбуждении в ней колебаний вертикальной импульсной нагрузкой интерференции падающей и отраженных от верха и низа плиты упругих волн определенной частоты. Зависимость для резонансных частот плиты со свободными поверхностями выглядит следующим образом:

$$f(n) = \frac{nV}{2d}, \quad (1)$$

где $f(n)$ – резонансные частоты, $n = 1, 2, 3, \dots$, d – толщина плиты, V – скорость упругих волн в материале плиты.

При условии, что акустическая жесткость подстилающих грунтов много меньше акустической жесткости бетона, приведенное выражение можно использовать для определения резонансных частот плиты.

Как уже отмечалось, в отличие от ультразвуковых методов, применение акустических методов для ис-

следования бетона не регламентировано российскими нормативными документами. Это серьезно осложняет использование акустических методов при исследовании бетонных конструкций. Импакт-метод регламентирован европейскими и американскими стандартами, стандартами стран Азиатского региона и некоторых стран постсоветского пространства. Конечно, можно пытаться “притянуть” акустические методы к нормативным документам, разработанным для ультразвуковых методов, но помня при этом, что измерения относятся к разным объемам изучаемой среды.

Значения скоростей упругих волн тесно связаны с прочностными характеристиками материала, переход к которым осуществляется при помощи корреляционных зависимостей. Это определяет преимущественную роль ультразвуковых и акустических методов для диагностики бетонных конструкций. Отличие ультразвуковых волн от акустических заключается в диапазоне частот возбуждаемых колебаний, что во многом определяет особенности их распространения в среде.

Бетон является гетерогенным материалом, состоящим из твердого заполнителя и цементной части с включениями песка. В зависимости от типа и назначения бетона соотношение между этими элементами и их состав могут значительно варьировать. Как правило, твердый заполнитель, который может состоять из гранита, гальки кремния или песчаника, доломита или других материалов, обладает большей плотностью и скоростью продольных волн, чем цементный раствор. Для ультразвуковых волн в бетоне (длина волны $\lambda = 5-8$ см) в большей мере выполняются условия лучевого метода ($\lambda \rightarrow 0$). Лучи ультразвуковой волны при прохождении через бетон будут менять свою траекторию в соответствии с принципом Ферма, т. е. по траектории с наименьшим временем (рис. 1). А поскольку скорость в твердом заполнителе выше, то лучевые траектории с увеличением частоты в большей мере будут проходить по высокоскоростному заполнителю.

При возбуждении акустических волн, когда длина волны во много раз больше размера частиц твердого заполнителя и неоднородностей (при возбуждении волн в бетоне ударным способом частота составляет порядка 0.5–5 кГц, а длина волны – 0.8–8 м), бетон можно считать материалом, близким к однородному. Условия лучевого приближения могут быть невыполнимы, а скорость продольной волны в этом случае будет близка к скорости, рассчитанной по уравнению среднего времени. Таким может быть элементарное объяснение наблюдаемому на практике факту, что скорость акустических волн в большинстве случаев меньше скорости ультразвука $V^a \leq V^u$.

Более строгое объяснение наблюдаемым фактам можно дать с позиции наличия у бетона временной (физической) и пространственной (геометрической) дисперсий. Временная дисперсия связана с наличием временного запаздывания в реакции среды на волновое возмущение, пространственная дисперсия возникает, когда поведение элемента среды зависит не только от воздействия на него, но и от влияния соседних элементов среды, в частности от неоднородности среды. Дисперсия называется нормальной, если фазовая скорость уменьшается с ростом частоты, и аномальной в противоположном случае. В поглощающих средах временная дисперсия, как правило, аномальная, т. е. скорость растет с увеличением частоты. При наличии

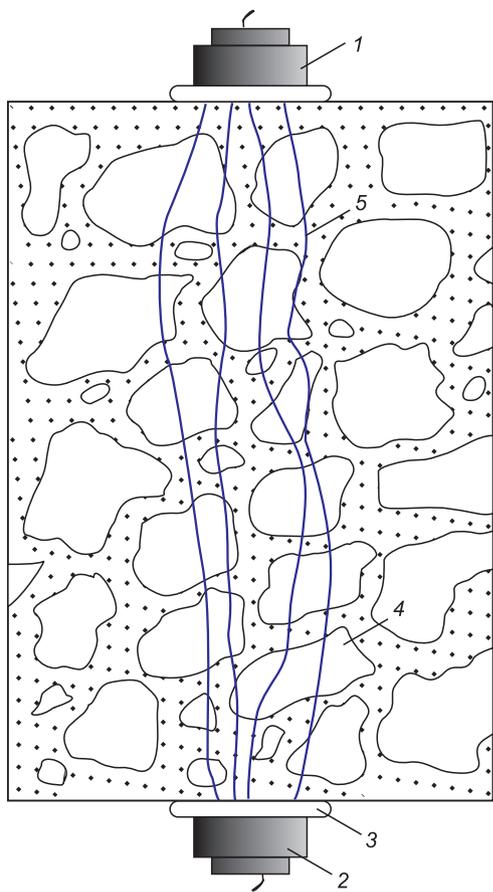


Рис. 1. Лучевая схема распространения ультразвуковой волны в бетоне: 1 – источник, 2 – приемник, 3 – контактный слой, 4 – распространение волн в твердом заполнителе, 5 – распространение волн в растворной части.

пространственной дисперсии это правило может нарушаться. Более того, в неоднородных (гетерогенных) средах провести однозначное разделение на пространственную и временную дисперсии бывает не всегда возможно.

В общем виде, как показано в работах [Ампилов, 1992; Philippidis, Aggelis, 2005], для бетона и скальных пород дисперсионные кривые, полученные эмпирическим путем (рис. 2), а также рассчитанные для моделей Кельвина–Фойгта, Максвелла и стандартного линейного тела, будут иметь общую тенденцию к увеличению фазовой скорости с частотой.

Приведенные на рисунке экспериментальные графики для бетона не описываются в полной мере ни одной из вышеназванных теоретических моделей сред, так как помимо вязкого трения в механизме поглощения и, соответственно, дисперсии участвует рассеяние волн. Дисперсионные кривые соответствуют довольно широкому диапазону частот и, как видно из графиков, диапазон применения акустических и ультразвуковых методов (0.5–100 кГц) соответствует участку дисперсионной кривой с наибольшим градиентом.

В отношении распространения упругих волн бетон является нелинейной средой. Это проявляется в первую очередь в наличии нелинейного затухания волн (рис. 3) и, как следствие, частотной дисперсии.

Как видно из рис. 3, и в данном случае диапазон частот (0.5–100 кГц) соответствует наиболее высокоградиентному участку дисперсионной кривой.

Сложный характер поведения кривой поглощения в бетоне, по-видимому, обусловлен действием нескольких механизмов внутреннего трения и наличием многократного рассеяния. С помощью феноменологических подходов, изложенных в работах [Гуревич, 1984; Калинин и др., 1967; Левшин и др., 1980], может быть установлена связь между зависимостью коэффициента поглощения от частоты и частотной зависимостью фазовой скорости, что позволит определить дисперсионную кривую фазовой скорости и по экспериментально определенной зависимости коэффициента поглощения от частоты.

Во всех предыдущих рассуждениях бетон рассматривался как двухкомпонентная среда, состоящая из цементно-песчаного связующего раствора и твердого заполнителя, равномерно распределенных в объеме. В действительности на свойства бетона также оказывают влияние влажность, трещины и дефекты, которые могут быть распределены в объеме конструкции неравномерно. В этом случае на свойства бетона начинает влиять так называемый объемный фактор. Объем среды, оказывающий существенное влияние на прохождение упругих волн, может быть определен

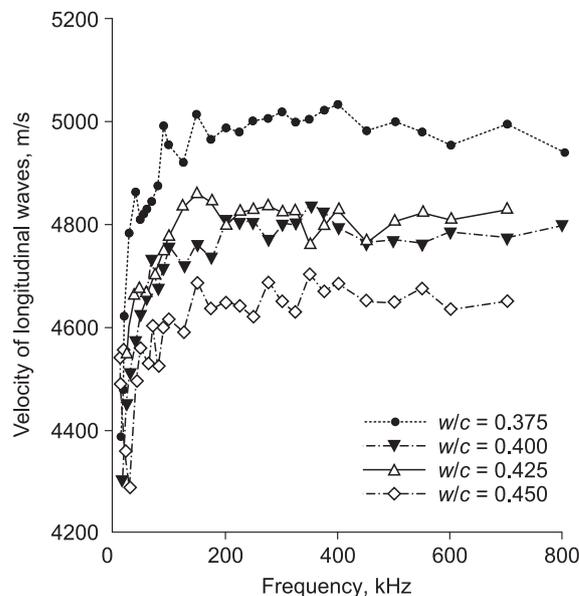


Рис. 2. Дисперсионные кривые для бетона с разным водно-цементным отношением (из [Philippidis, Aggelis, 2005]).

как $\vartheta \approx 0, 2L\lambda^2$, где L – расстояние между источником и приемником, λ – длина волны [Савич, Яценко, 1979]; более точно он может быть определен из соотношения для первых зон Френеля. Что касается железобетона, то арматурный каркас, безусловно, воздействует на изменение его акустических и электрических свойств. В первую очередь это выражается в изменении скорости электромагнитных волн, так как магнитную проницаемость железобетона нельзя считать равной единице (как это принято для большинства грунтов), и в изменении скорости ультразвуковых и акустических волн. Однако подробное рассмотрение указанных явлений выходит за рамки настоящей статьи.

При использовании ультразвуковых способов для бетона ($V^u = 4000$ м/с, $L = 20$ см, $f = 60\,000$ Гц) объем среды, влияющий на прохождение ультразвука, примерно равен кубу с ребром 6 см, для акустической волны ($V^a = 4000$ м/сек, $L = 1$ м, $f = 1000$ Гц) объем среды равен кубу с ребром порядка 1.5 м. В практике натуральных измерений это выражается в том, что скорость ультразвуковых волн стабильно выше скорости акустических $V^a \leq V^u$, и чем больше доля твердого заполнителя в общем объеме бетона и меньше трещин и дефектов, тем значительнее разница в скорос-

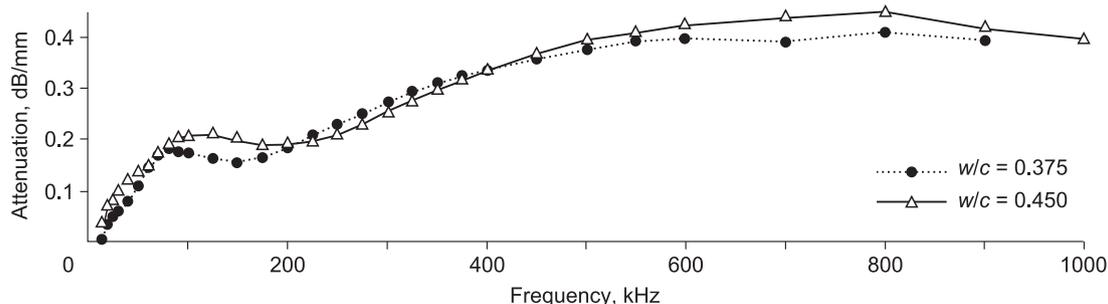


Рис. 3. Зивисимость поглощения от частоты для бетона с разным водно-цементным соотношением (w/c) (из [Philippidis, Aggelis, 2005]).

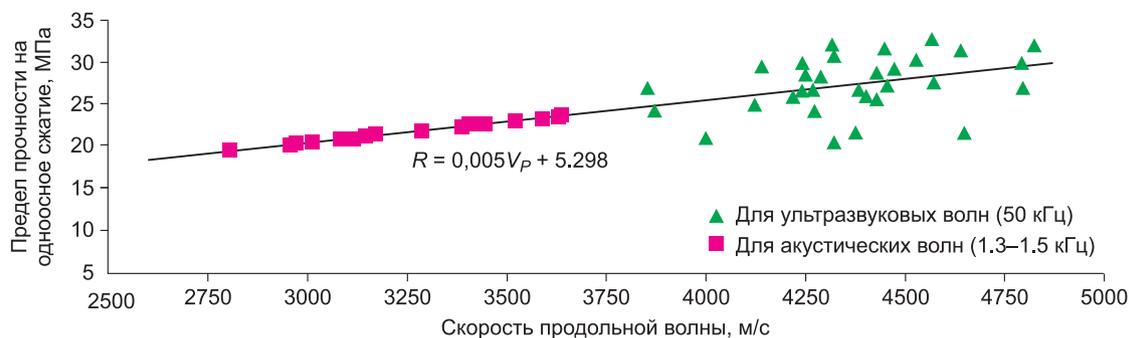


Рис. 4. Пример графиков зависимости прочности от скорости продольных волн для ультразвуковых и акустических волн, построенных на одной и той же выборке.

тах. Наиболее полное представление о поведении фазовой скорости и о проявлении влияния неоднородности можно получить, построив зависимость $V = f(\vartheta)$.

Особенностью резонансных акустических измерений на фундаментных плитах является то обстоятельство, что при неизменной толщине плиты объем среды, влияющий на прохождение акустических волн, является величиной постоянной. Это следует из выражения $f_{\text{рез}} = \frac{V}{2d}$, при $d = \text{const} \rightarrow 2d = \frac{V}{f_{\text{рез}}} = \lambda = \text{const}$.

Длина волны на резонансной частоте всегда постоянна при постоянной толщине плиты, следовательно, “захватываемый” объем все время одинаков.

На рис. 4 приведен пример определения корреляционной зависимости между скоростью ультразвуковых волн и прочностью на одноосное сжатие на основании штамповых испытаний выбуренного из фундаментной плиты керна, т. е. образцов бетона, соответствующих масштабам ультразвуковых измерений.

На участках отбора испытываемых образцов были проведены также акустические измерения импакт-методом. Полученные значения скоростей акустических волн оказались ниже скоростей, полученных ультразвуковым методом. Соотношение скоростей составило примерно 0.7. Учитывая линейный характер зависимости между скоростью и прочностью, полученной в результате ультразвуковых измерений, можно допустить, что она сохранится и для акустического диапазона. В этом случае значениям акустических скоростей будут соответствовать меньшие значения проч-

ности, чем определенные ультразвуковым способом, что в большей мере соответствует свойствам изучаемой среды. Понятно, что данный способ является довольно приблизительным. Для того чтобы получить более точную зависимость, необходимо подвергнуть штамповым испытаниям образцы, объем которых соответствует объему среды при акустических измерениях, что осуществить технически сложно.

Из рассмотренных примеров можно сделать следующие выводы:

1. Объемный фактор обуславливает необходимость отнесения полученного при ультразвуковых наблюдениях результата к небольшому, фактически точечному объему среды. Чтобы получить достоверную оценку значения скорости волн некоторого объема бетонной конструкции, во много раз превышающего зону “захвата” ультразвуковой волны, необходимо получить выборку ультразвуковых измерений, равномерно распределенных по всему исследуемому объему (рис. 5). Вместе с тем акустические наблюдения позволяют получить сразу интегральную характеристику данного объема при одном измерении.

2. Для определения корреляционной зависимости между скоростью упругих волн в бетоне и пределом прочности на одноосное сжатие при использовании ультразвуковых измерений можно добиться соответствия объемов испытываемых на прочность образцов объемам среды при измерениях скорости. В случае акустических измерений реализовать на практике соответствие масштабов испытаний становится технически сложной задачей.

3. Соотношение скоростей акустической и ультразвуковой волн может служить характеристикой однородности бетона. Чем ближе это соотношение к единице, тем ближе изучаемый материал к однородной изотропной среде. Для бетонов может быть построена собственная классификация по степени трещиноватости по аналогии с ГОСТ 25100–2011* для скальных пород. Отличие ее будет заключаться в том, что для бетонов реально наблюдаемые соотношения лежат в пределах от 0.4 до 1.

На сегодня накоплен значительный опыт применения комплекса геофизических методов, включающих ультразвук, акустику и георадиолокацию, для решения следующих задач, связанных с обследованием бетонных конструкций:

– определение геометрических размеров находящихся в грунте бетонных конструкций;

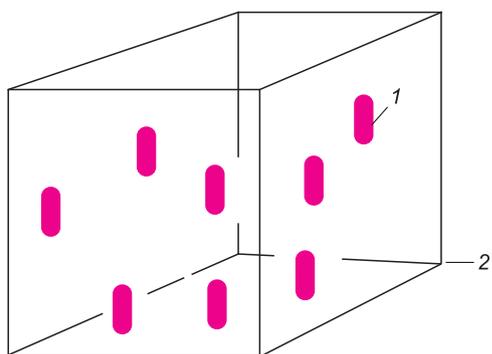


Рис. 5. Соотношение объемов, изучаемых при ультразвуковых (1) и акустических (2) измерениях.

* ГОСТ 25100–2011 “Грунты. Классификация”. М.: Стандартинформ, 2013. 63 с.

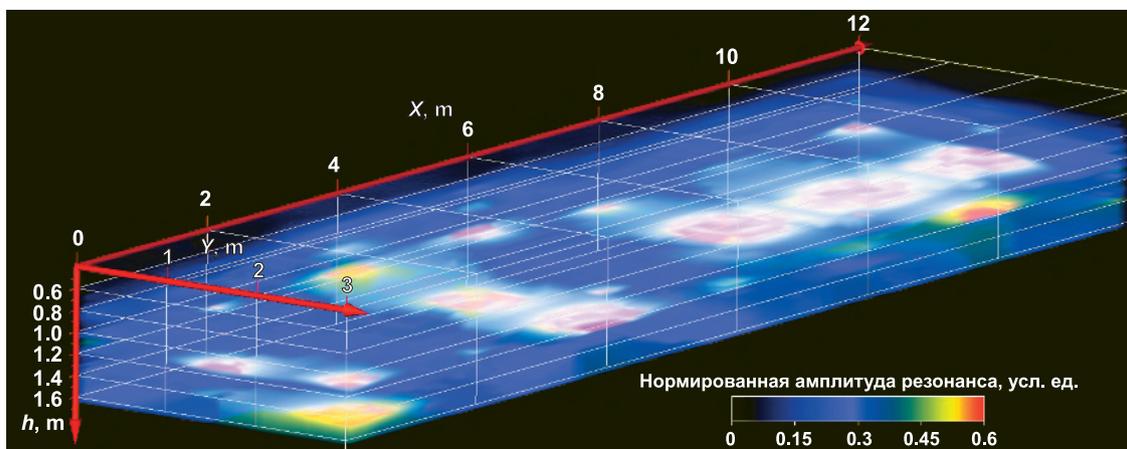


Рис. 6. Пример дефектограммы, представленной в трехмерном виде. Плита короля шлюза. Максимумы нормированной амплитуды резонанса соответствуют трещинам и дефектам.

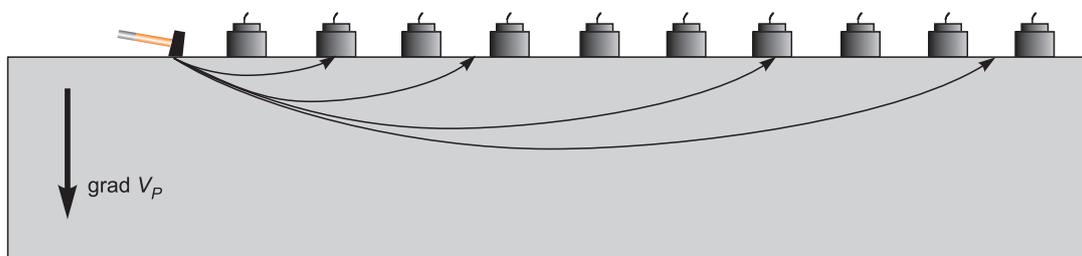


Рис. 7. Схема образование прямой рефрагированной волны.

- определение деформационных и прочностных характеристик;
- оценка наличия металлической арматуры и других конструктивных элементов;
- поиск пустот, областей повышенной трещиноватости и увлажнения (рис. 6);
- оценка условий контакта объекта с вмещающим грунтом;
- оценка однородности грунтового основания.

При отсутствии информации о мощности фундамента для ее определения целесообразно применение георадиолокации, а измеренную частоту собственных колебаний использовать для расчета скорости продольных волн и прочности бетона. Кроме того, для получения более полной информации о скорости распространения упругих волн можно использовать метод прямых и рефрагированных волн (рис. 7).

Рефрагированные волны образуются в слоисто-неоднородных средах и проявляются в непрямолинейном распространении лучей (рис. 8). Рефракция проявляется тем сильнее, чем резче изменяется скорость волны с глубиной и больше угол падения на неоднородную среду. Волны в неоднородной среде могут выйти на ту же поверхность, с которой производится ввод. При контроле бетонных конструкций метод рефрагированных волн применяют преимущественно в случаях, когда верхний слой бетона сильно разрушен. С такой ситуацией приходится сталкиваться при обследовании гидротехнических сооружений, особенно на участках, где бетонные конструкции контактируют с водой.

В этом случае верхний слой бетона подвергается интенсивному физическому выветриванию и теряет

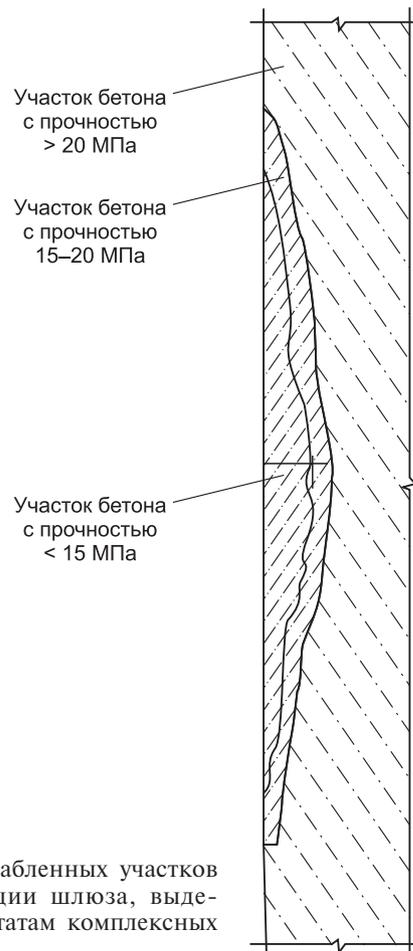


Рис. 8. Схема ослабленных участков бетона конструкции шлюза, выделенных по результатам комплексных обследований.

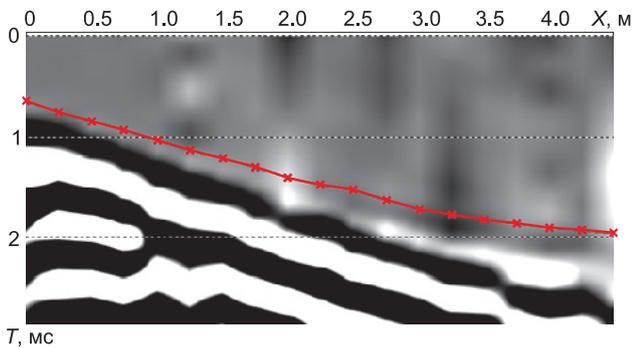


Рис. 9. Пример сейсмограммы ОПВ с пропикированными первыми вступлениями.

свои прочностные свойства. Здесь требуется определить толщину нарушенного бетонного слоя для дальнейших ремонтных работ. Методика наблюдений и обработка данных аналогична наземной сейсмотомографии по первым вступлениям (рис. 9).

Итоговым результатом обработки является скоростной разрез (рис. 10). Несмотря на все преимущества метода и ценность получаемой информации, он обладает одним существенным недостатком – достаточно большой трудоемкостью.

Одной из важных задач при обследовании фундаментных плит является оценка контактных условий плиты с грунтовым основанием. Для фундаментных плит небольшой толщины (до 1.0–1.5 м) для оценки состояния контакта могут использоваться как георадарные, так и акустические методы. При больших толщинах применимы в основном акустические методы. В основе акустического метода лежит возможность определения добротности плиты как резонирующей системы под действием свободных (или вынужденных) колебаний. Добротность системы в полосе

резонанса можно определить на основании спектральной характеристики процесса:

$$Q \approx \frac{f_{\text{рез}}}{\Delta f}, \quad (2)$$

где $f_{\text{рез}}$ – резонансная частота плиты, Δf – ширина спектра по уровню $\frac{1}{\sqrt{2}}$ от максимума. Значение резонансной частоты найдем из формулы (1) $f_{\text{рез}} = \frac{V}{2d}$ и подставим в формулу (2). Получим

$$Q \approx \frac{V}{2d\Delta f}. \quad (3)$$

Таким образом, при постоянной толщине плиты величина добротности Q определяется значением фазовой скорости и ширины спектра Δf в интервале “толщинного” резонанса.

Значение ширины спектра Δf определяется потерями, вызванными поглощением внутри плиты по закону e^{-zad} , где a – коэффициент поглощения, d – толщина плиты, а также излучением акустической энергии в подстилающий грунт, зависящим от величины коэффициента отражения на границе фундамент–грунт. Величина коэффициента поглощения в бетоне в диапазоне от 0.5 до 100 кГц в среднем составляет 0.01–0.1, значение коэффициента отражения может варьировать от 0.5 до 1.0 при наличии пустоты под фундаментной плитой. С помощью простых вычислений можно убедиться, что основные потери определяются коэффициентом отражения. На практике при одинаковых контактных условиях наблюдается зависимость между добротностью и фазовой скоростью, близкая к линейной (рис. 11). Резкие отклонения значения добротности от линейной зависимости в сторону увеличения могут интерпретироваться как участки нарушения контактных условий.

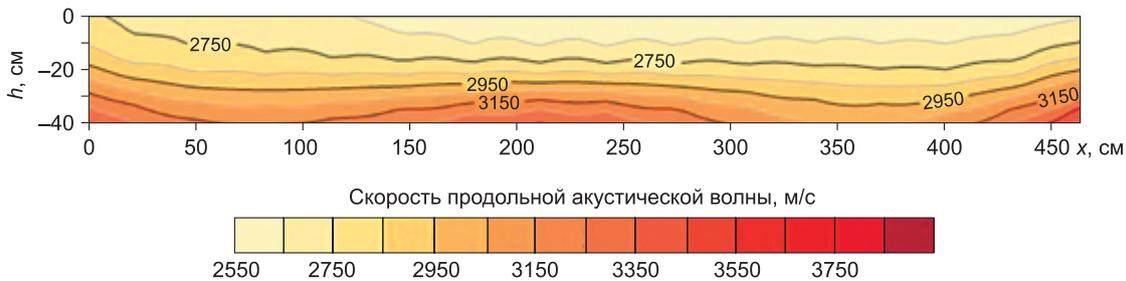


Рис. 10. Итоговый скоростной разрез по данным метода прямых рефрагированных волн.

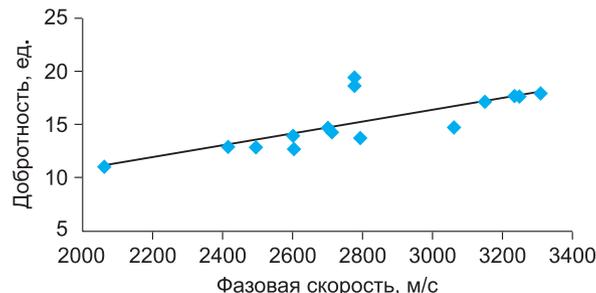


Рис. 11. Экспериментально полученная зависимость показателя добротности от скорости акустических волн для фундаментной плиты толщиной 0.8 м (точки расположены на одном профиле).

ВЫВОДЫ

1. Импакт-метод позволяет определить интегральное значение скорости упругих волн, соответствующее определенному объему среды, который может быть рассчитан в каждом конкретном случае.

2. Соотношение скоростей акустической и ультразвуковой волн может использоваться в качестве меры однородности среды и масштабного коэффициента.

3. Значение показателя акустической добротности фундаментной плиты может использоваться для оценки состояния контактных условий с грунтовым основанием.

4. Комплексование ультразвуковых, акустических и георадарных методов позволяет получить более полную информацию об изучаемом объекте и контролировать достоверность получаемой информации.

Литература

Ампиров Ю.П. Поглощение и рассеяние волн в неоднородных средах. М.: Недра, 1992. 155 с.

Гуревич Г.И. Деформируемость сред и распространение сейсмических волн. М.: Наука, 1974. 474 с.

Калинин А.В., Азими Ш.А., Калинин В.В. К оценке дисперсии фазовой скорости в поглощающих средах // Известия АН СССР. Сер.: Физика Земли. 1967. № 4. С. 78–83.

Левшин А.Л., Ратникова Л.И., Сакс М.В. О дисперсии и поглощении упругих волн в горных породах // Вычислительная сейсмология. М.: Наука, 1980. Вып. 13. С. 134–142.

Савич А.И., Яценко З.Г. Исследование упругих и деформационных свойств горных пород сейсмоакустическими методами. М.: Недра, 1979. 216 с.

Philippidis T.P., Aggelis D.G. Experimental study of wave dispersion and attenuation in concrete // Ultrasonics. 2005. V. 43. P. 584–595.

*Поступила 10 марта 2015 г.,
в окончательном варианте – 25 марта 2015 г.*

КОРОТКО ОБ АВТОРАХ

КАПУСТИН Владимир Викторович – кандидат физико-математических наук, технический директор ООО “НИИ ГЕОТЕХ”.

КУВАЛДИН Алексей Валерьевич – инженер-геофизик ООО “НИИ ГЕОТЕХ”, аспирант МГРИ–РГГРУ.