

СРАВНЕНИЕ МУЛЬТИВОЛНОВЫХ МЕТОДОВ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ДИНАМИЧЕСКОГО КОЭФФИЦИЕНТА ПУАССОНА БЕТОНА

СНЕЖКОВ Д. Ю.

Белорусский национальный технический университет

Совместная интерпретация параметров волн различных типов позволяет получать дополнительную информацию о бетоне, в частности, – его упругих модулях. Для однородной изотропной среды известно [1, 2] соотношение

$$\nu_{\partial} = \frac{V_L^2 - 2V_T^2}{2(V_L^2 - V_T^2)}, \quad (1)$$

где E_d – динамический модуль Юнга; ν_d – динамический коэффициент Пуассона;

V_T – скорость распространения поперечной упругой волны;

V_L – скорость распространения продольной упругой волны.

Формула (2) указывает на принципиальную возможность оперативного неразрушающего безобразцового определения динамического коэффициента Пуассона на основе данных о скорости распространения продольной и поперечной объемных волн. Информация о практических методиках определения динамического коэффициента Пуассона бетона в конструкциях неразрушающими методами отсутствует. В то же время этот параметр весьма чувствителен к изменению свойств контролируемого материала, в частности, – пористости и трещиноватости. Кроме того, коэффициент Пуассона должен приниматься во внимание при определении динамического модуля Юнга бетона в натуральных условиях. Проблема в использовании формулы (2) заключается в сложности селекции волн двух типов – продольной и поперечной – на малых измерительных базах, из-за их интерференции в точке регистрации. Применение типовых приборных средств не позволяет на измерительных базах 0,15...0,3 м произвести селекцию продольной и поперечной акустических волн с необходимой точностью. На рис. 1 приведена временная диаграмма волнового процесса в точке регистрации на по-

верхности бетонного образца для двух значений чувствительности приемного трата прибора – кривые а и в. Начальная часть импульса поперечной волны маскирует «хвост» импульса продольной волны, а основная часть поглощается значительно большим по размаху импульсом волны Релея.

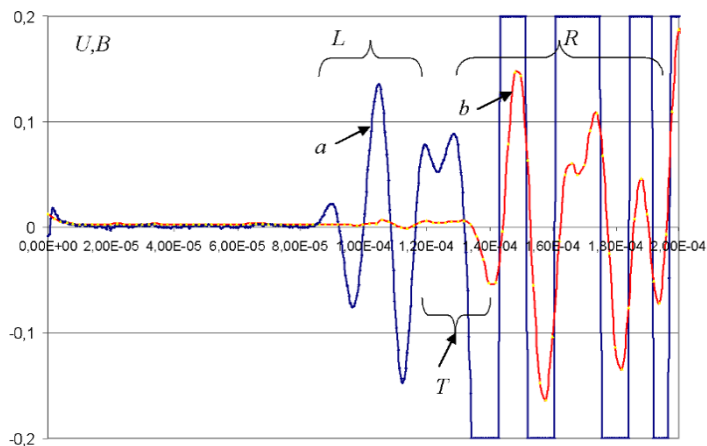


Рисунок 1. Временная диаграмма принятого ультразвукового импульса:
L – импульс продольной волны; *R* – начальная часть импульса волны Релея;
T – начальная часть импульса поперечной волны; база измерения – 50 см; частота – 55 кГц; направление вектора принятых колебаний нормальное к поверхности бетона

В разработанной в НИЛ ПГС БНТУ безобразцовой методике определения коэффициента Пуассона [5] используется поверхностная волна, что позволяет выполнить селекцию волн по амплитудному признаку на небольших измерительных базах, начиная от 15 см до 20 см. Методика может быть реализована с использованием распространенных приборов шультразвукового контроля бетона типа «Пульсар 2.2» и аналогичных по своим функциям. Зависимость v_d от параметра η аппроксимируется выражением вида

$$v_d = \frac{a + b \cdot \eta}{1 + c \cdot \eta + d \cdot \eta^2}, \quad (2)$$

где $a = 0,50607613$;

$b = -0,817673$;

$c = -1,3740213$;

$$d = 0,05049. \eta = V_R/V_l.$$

V_R и V_l скорости распространения импульса поверхностной и продольной подповерхностной волн.

Выражение (3) положено в основу методики оперативного определения коэффициента Пуассона по данным поверхностного прозвучивания бетона. Недостатком указанной методики является высокая чувствительность к погрешности измерения скорости продольной и поверхностной волн, которая может быть рассчитана по формуле

$$\frac{dv}{d\eta} = \frac{b}{d \cdot \eta^2 + c \cdot \eta + 1} - \frac{(a + \eta \cdot b) \cdot (c + 2 \cdot \eta \cdot d)}{(d \cdot \eta^2 + c \cdot \eta + 1)^2} = 2,65, \quad (3)$$

К мультиволновому можно отнести акустический контроль, когда измерения выполняют при разных частотах зондирующих колебаний, например, совмещая измерения ультразвуковым методом и методом свободных колебаний. Ниже рассматривается методика контроля применительно к бетонным элементам различных габаритов.

Для образца размерами 400 x 100 x 100 мм длина волны первой моды продольных колебаний равна удвоенной длине образца и составляет 800 мм, которая практически на порядок превосходит поперечные размеры образца. При таком соотношении величин скорость продольной акустической волны приближается к «стержневой» V_s , определяемой из соотношения

$$V_s = \sqrt{\frac{E}{\rho}}, \quad (4)$$

где E – динамический модуль нормальной упругости; ρ – плотность бетона.

Частотный спектр представлен на рис. 2. Для регистрации свободных колебаний бетонных элементов использовался прибор диагностики свай «Спектр-3» в штатной комплектации. Максимальная частота приемного тракта прибора «Спектр-3.0» – 23 кГц, что позволяет регистрировать акустические сигналы свободных колебаний элементов с габаритами порядка 0,5 м и более.

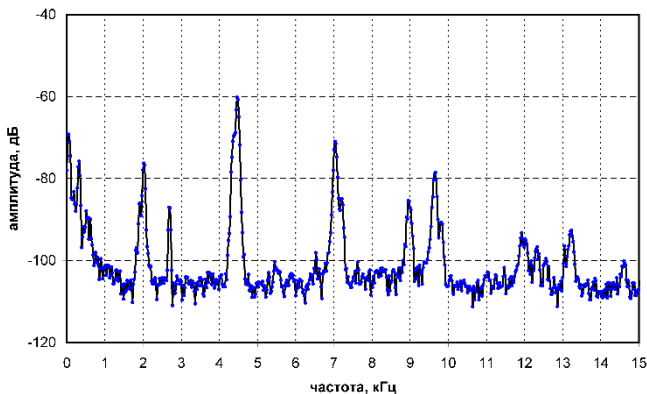


Рисунок 2. Частотный спектр свободных колебаний образца-призмы 400 x 100 x 100 мм

Частота первой моды колебаний равна 4463 Гц, длина волны – 0,8 м. Определяем скорость распространения волны V_s

$$V_s = f_1 \cdot \lambda = 4463 \cdot 0.8 = 3570.4 \text{ м/с}, \quad (5)$$

Для пакета колебаний ультразвукового импульса длину волны можно определить по периоду колебаний τ и скорости распространения V_l . Период колебаний τ можно с достаточной скоростью определить из временной диаграммы сигнала, взяв для анализа 2...3 периода колебаний. Началу пакета соответствует временная отметка 70 мкс, завершению трех периодов – 120 мкс. Один период будет равен 17 мкс, что соответствует частоте колебаний $f_1 = 58,8$ кГц. Длина волны определена из соотношения $\lambda = V_l/f_1$. При скорости $V_l \approx 4000$ м/с длина волны составит 6,7 см, что меньше поперечного сечения образца. В этом случае продольную ультразвуковую волну можно рассматривать как объемную. Для объемной продольной волны скорость распространения определяется из соотношения

$$V_l = \sqrt{\frac{E}{\rho} \cdot \frac{(1-\nu)}{(1+\nu)(1-2\nu)}}, \quad (6)$$

где ν – динамический коэффициент Пуассона.

Рассматривая выражения (4) и (6) как систему уравнений, по отношению скоростей V_l и V_s можно рассчитать коэффициент Пуассона ν

$$\left(\frac{V_l}{V_s}\right)^2 = \varphi^2 = \frac{(1-\nu)}{(1+\nu) \cdot (1-2\nu)}, \quad (7)$$

Для призмы 400 x 100 x 100 мм «стержневая» скорость продольной волны $V_s = 3570,4$ м/с, продольной объемной – $V_l = 3743,95$ м/с. Уравнение (7) имеет два корня

$$\varphi := 1.05$$

$$\nu = \begin{pmatrix} \frac{\sqrt{9 \cdot \varphi^4 - 10 \cdot \varphi^2 + 1} - \varphi^2 + 1}{4 \cdot \varphi^2} \\ -\frac{\varphi^2 + \sqrt{9 \cdot \varphi^4 - 10 \cdot \varphi^2 + 1} - 1}{4 \cdot \varphi^2} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0.194 \\ -0.24 \end{pmatrix}, \quad (8)$$

из которых физический смысл имеет положительное значение $\nu = 0,194$.

Для фундаментного блока габаритами 119x31x58 см измерения проводились по типовой методике Impact-Echo метода [7], а также с использованием мультипликативного метода [3, 4]. Значения скорости распространения составили: $V_s = 4159 \pm 6$ м/с, $V_l = 4453 \pm 7$ м/с. Решение уравнения (7) дало два корня:

$$\varphi := 1.07$$

$$\nu = \begin{pmatrix} \frac{\sqrt{9 \cdot \varphi^4 - 10 \cdot \varphi^2 + 1} - \varphi^2 + 1}{4 \cdot \varphi^2} \\ -\frac{\varphi^2 + \sqrt{9 \cdot \varphi^4 - 10 \cdot \varphi^2 + 1} - 1}{4 \cdot \varphi^2} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0.222 \\ -0.285 \end{pmatrix}. \quad (9)$$

Полученные положительные, значения $v = 0,194$ и $v = 0,222$ несколько выше статического показателя, и согласуется с типичными значениями этого параметра бетона полученными по методике [5, 6].

Для сопоставления чувствительность результата определения коэффициента Пуассона к погрешности определения соотношения скоростей V_I и V_S выполнен расчет первой производной для v

$$\frac{dv}{d\varphi} = 1 - \frac{2 \cdot \varphi + \frac{20 \cdot \varphi - 36 \cdot \varphi^3}{2 \cdot \sqrt{9 \cdot \varphi^4 - 10 \cdot \varphi^2 + 1}}}{4 \cdot \varphi^2} - \frac{\sqrt{9 \cdot \varphi^4 - 10 \cdot \varphi^2 + 1} - \varphi^2 + 1}{2 \cdot \varphi^3}$$

Для $\varphi = 1,07$ $dv/d\varphi = 1,25$, что в два раза меньше, чем по методике (2). Но следует заметить, что данный показатель сам является чувствительным к значению φ , для $\varphi = 1,03$ $dv/d\varphi = 2,27$, что близко к показателю чувствительности метода (2).

Для известной методики по формуле (1) чувствительность к погрешности оценки скорости имеет вид

$$\frac{dv}{d\psi} = 1 - \frac{4 \cdot \psi}{2 \cdot \psi^2 - 2} - \frac{4 \cdot \psi \cdot (2 \cdot \psi^2 - 1)}{(2 \cdot \psi^2 - 2)^2}, \quad (10)$$

где $\psi = V_T/V_I$.

Для для типичного для бетона $\psi = 0,6$ $dv/d\psi = -1,46$, что практически совпадает с показателем чувствительности для методики расчета по формуле (8). В таблице 1 приведены показатели чувствительности рассмотренных методик.

Таблица 1

	Методика #1 (1)	Методика #2 (2)	Методика #3 (8)
Косвенный параметр	$\psi = V_T/V_I$.	$\eta = V_R/V_I$;	$\varphi = V_L/V_S$
Показатель чувств. к вариации косв. параметра	-1,45	2,68	2,27

Формально, по показателю чувствительности к погрешности косвенного параметра, «классическая» методика #1 имеет преимущество перед остальными. Но, как указывалось выше, необходимость в разработке альтернативных методик #2 и #3 обусловлена большими техническими затруднениями в реализации методики #1.

Список использованных источников:

1. Гринченко, В. Т. Гармонические колебания и волны в упругих телах / В. Т. Гринченко, В. В. Мелешко. – Киев: Наукова Думка, 1981. – 284 с.
2. Зацепин, А. Ф. Акустические измерения / А. Ф. Зацепин – Москва: Юрайт, 2019. – 211 с.
3. Качанов, В. К. Проблемы ультразвукового контроля протяженных сложноструктурных изделий с большим затуханием сигналов / В. К. Качанов, И. В. Соколов // Дефектоскопия. – 2007. № 8. С. 82 – 93.
4. Качанов, В. К. Многоканальный мультипликативный метод акустического контроля крупногабаритных компактных строительных конструкций из бетона / В. К. Качанов, И. В. Соколов // Дефектоскопия. – 2008. № 12. С. 23 – 37.
5. Снежков, Д. Ю. Основы мониторинга возводимых и эксплуатируемых железобетонных конструкций неразрушающими методами / Д. Ю. Снежков, С. Н. Леонович. – Минск: БНТУ, 2016. 330 с.
6. Снежков, Д. Ю. Мультиволновой ультразвуковой контроль бетона / Д. Ю. Снежков, С. Н. Леонович // Наука и техника. – 2017. Том 16, № 4. – С. 289 – 297.
7. Christian, U. Impact-Echo measurement on fresh and hardening concrete / U. Christian, H. Grosse, W. Reinhart, R. Beutel // Institute of Construction Materials, University of Stuttgart, 2003. – 6 p.