

**Keywords:** *construction market; contracting company; competitiveness; organization of construction production; organizational process; optimization model.*

УДК 624.012.45:620.179.16

**Д.Ю. Снежков**

канд. техн. наук, доцент

**С.Н. Леонович**

докт. техн. наук., професор

Белорусский национальный технический университет

## **ОПРЕДЕЛЕНИЕ ДИНАМИЧЕСКОГО КОЭФФИЦИЕНТА ПУАССОНА БЕТОНА В ЖЕЛЕЗОБЕТОННЫХ КОНСТРУКЦИЯХ УЛЬТРАЗВУКОВЫМ МУЛЬТИВОЛНОВЫМ МЕТОДОМ**

*Мультиволновой контроль позволяет улучшить метрологические показатели и повысить информативность ультразвукового метода прохождения при определении физико-механических свойств бетона. В статье рассматривается возможность совместного использования продольных подповерхностных волн и волн Релея для определения динамического коэффициента Пуассона бетона конструкций в натурных условиях, приведены практические результаты.*

**Ключевые слова:** *бетон, ультразвук, модуль упругости, коэффициент Пуассона, волна Релея.*

**Введение.** Сложившаяся к настоящему времени в Республике Беларусь система нормирования неразрушающего контроля возводимых и эксплуатируемых железобетонных конструкций ориентирована исключительно на определение прочностных показателей бетона. Это в полной мере относится и к нормативным документам стран Евросоюза, и СНГ. Определение же показателей упругости конструкционного бетона оказывается за пределами регламентации, несмотря на то, что для оценки и прогнозирования деформаций разномодульных элементов несущего каркаса здания эти показатели бетона не менее важны, чем его прочность.

Одним из немногих стандартизированных неразрушающих методов испытаний бетона является ультразвуковой импульсный метод [1, 5]. Его особенностью, в отличие от склерометрических методов – упругого отскока, ударного импульса, пластической деформации – является то, что косвенный параметр – скорость распространения ультразвукового импульса – не имеет прямой причинно-следственной связи с прочностью бетона, а определяется динамическими упругими модулями бетона – нормальным динамическим модулем упругости  $E_d$  и коэффициентом Пуассона  $\nu_d$ .

В то же время, использование акустических волн различных типов и совместная интерпретация их параметров прохождения позволяет получать информацию об упругих параметрах бетона. Для однородной изотропной среды известны [2] соотношения:

$$E_d = \rho \frac{V_T^2 (3V_l^2 - 4V_T^2)}{V_l^2 - V_T^2}, \quad (1)$$

$$\nu_d = \frac{V_l^2 - 2V_T^2}{2(V_l^2 - V_T^2)}, \quad (2)$$

где  $E_d$  – динамический модуль Юнга;

$v_d$  – динамический коэффициент Пуассона;

$V_T$  – скорость распространения поперечной упругой волны;

$V_L$  – скорость распространения продольной упругой волны.

В настоящее время в литературных источниках нет информации о практических способах определения динамического коэффициента Пуассона бетона в эксплуатируемых конструкциях неразрушающими методами. Часто этот параметр не рассматривается как характеристический и его значение выбирается произвольно в диапазоне 0,18..0,20. В реальности этот параметр весьма чувствителен к изменению состояния бетона, в частности – его пористости и трещиноватости, и может рассматриваться как информационный показатель. Кроме того, коэффициент Пуассона должен приниматься во внимание при определении динамического модуля Юнга бетона в натуральных условиях по скорости распространения импульса продольной волны.

**Постановка задачи.** Формула (2) указывает на принципиальную возможность оперативного определения динамического коэффициента Пуассона на основе данных о скорости распространения продольной и поперечной объемных волн. Практическая реализация этой методики сталкивается с затруднением, обусловленным необходимостью раздельного приема указанных типов волн. Типовые приборы ультразвукового контроля, использующие одинарные электроакустические преобразователи, не позволяют раздельно излучать и принимать только какой-либо один тип волны, что связано со значительной реверберацией ультразвуковых колебаний в самом преобразователе – излучающем и приемном. При этом за время реверберации может происходить многократная смена поляризации вектора колебаний протектора излучателя, а в приемном преобразователе – взаимная трансформация и смешивание всех принятых колебаний. На рис.1 приведена временная диаграмма сигнала на выходе приемного тракта ультразвукового прибора. Сигнал сформирован преобразователями с точечным акустическим контактом. Расстояние между точками возбуждения и приема импульса 0,5 м. На приведенной диаграмме можно выделить два характерных временных участка. На участке 1 присутствует сигнал только от продольной подповерхностной волны. На участке 2 происходит наложение сигналов от поперечной волны с вертикальной поляризацией (SV-волна) и поверхностной волны. Определить с необходимой точностью момент появления импульса поперечной волны по данной диаграмме затруднительно, поскольку его начало маскируется «хвостом» импульса продольной волны. Характер реверберации во многом случаен, реверберационные процессы экземпляров электроакустических преобразователей (ЭАП) даже одного типа могут значительно отличаться.

Определенные преимущества при акустических испытаниях бетона может предоставить использование поверхностных волн (волн Релея). Энергетические показатели импульса волны Релея, особенно на больших базах прозвучивания, позволяют осуществить его селективный прием с использованием типовых приборных средств испытаний [3, 4]. Основа методики состоит в селекции составляющих волнового процесса по амплитудному признаку. Если рассматривать только геометрический эффект рассеивания энергии волны, не принимая во внимание тепловые потери мощности и потери на рассеяние на неоднородностях и дефектах, то соотношение мощностей  $Q_L$  сигналов акустического импульса продольной подповерхностной волны описывается выражением:

$$\frac{Q_{L,I2}}{Q_{L,I1}} = \left(\frac{l1}{l2}\right)^2, \quad (3)$$

где  $l1$  и  $l2$  – базы прозвучивания.

Для импульса волны Релея соотношение мощностей  $Q_R$  принимает вид

$$\frac{Q_{R,I2}}{Q_{R,I1}} = \frac{l1}{l2}. \quad (4)$$

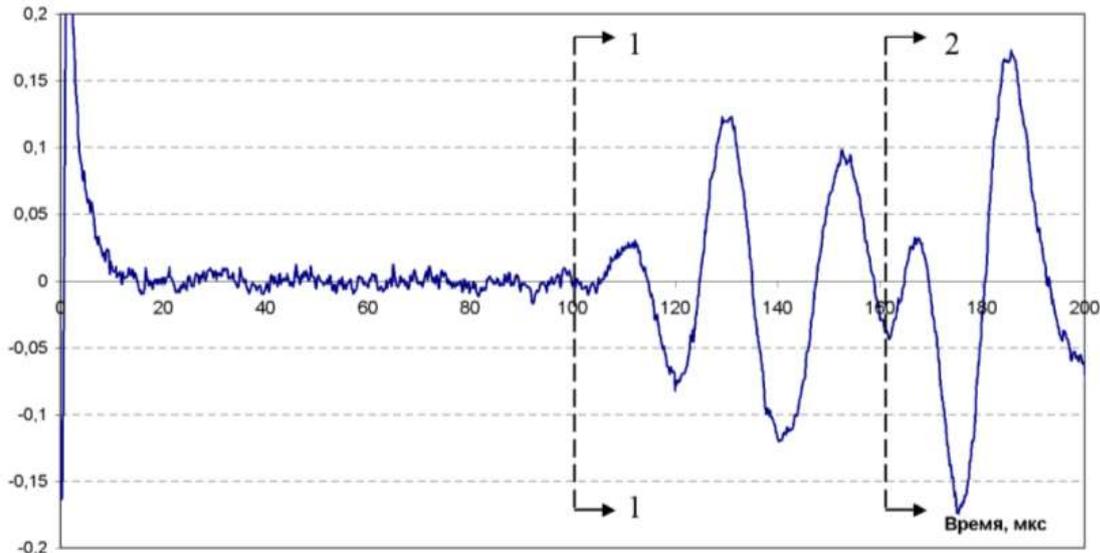


Рис. 1. Временная диаграмма акустического сигнала на базе прозвучивания 50 см с использованием сухого точечного акустического контакта ЭАП: 1 – вступление подповерхностной продольной волны; 2 – временной интервал наложения импульса поперечной волны

Соответственно для амплитуд  $A$  сигналов принятых импульсов справедливы выражения

$$A_{L,I2} = A_{L,I1} \frac{l1}{l2}, \quad (5)$$

$$A_{R,I2} = A_{R,I1} \sqrt{\frac{l1}{l2}}. \quad (6)$$

Из выражений (5) и (6) следует, что по мере увеличения базы измерения  $l$ , соотношение амплитуд импульсов волны Релея и продольной подповерхностной волны будет возрастать прямо пропорционально корню квадратному из относительной базы прозвучивания. Это означает, что процедура определения скорости импульса волны Релея упрощается на больших базах прозвучивания, так как в этом случае сигнал волны Релея не будет подвержен искажением «остатками» импульсов продольной и поперечной волн. Отличительным признаком импульса волны Релея будет являться его большая амплитуда. На рис. 2 показаны расчетные временные диаграммы волновых процессов в точке поверхности образца на

расстоянии 150 мм от точки приложения иницирующего импульса силы, полученные методом КЭ моделирования.

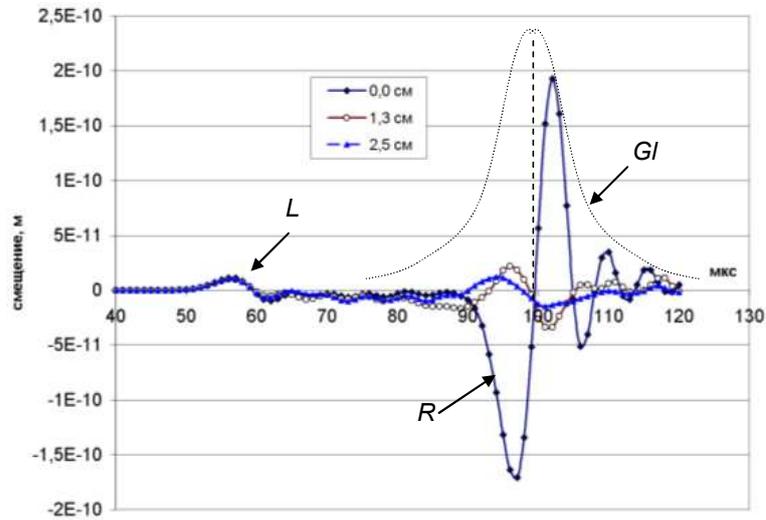


Рис. 2. Временные диаграммы импульсов смещения узлов КЭ модели в направлении нормальном к поверхности в точке на расстоянии 150 мм от точки возбуждения нормальным к поверхности импульсом: L – импульс инициированный продольной подповерхностной волной; R – импульс волны Релея; Gl – колоколообразная огибающая импульса волны Релея; длительность инициирующего полусинусоидального импульса давления – 7 мкс, амплитудное значение силы – 1 Н

Первое вступление колебаний, обусловленных волной Релея, имеет фазу противоположную фазе импульса продольной волны и достигает в амплитуде  $1,7 \cdot 10^{-10}$  м, что более чем на порядок превышает уровень первого вступления продольной волны –  $1 \cdot 10^{-11}$  м. Ярко выражена поверхностная локализация волны Релея – на глубине 1,3 см наблюдается (см. рис. 2) снижение ее интенсивности и изменение фазы колебаний.

Принимая во внимание, что импульс продольной волны существующих ультразвуковых приборов с применением ЭАП с СТК надежно регистрируется на расстоянии 15..25 см от точки возбуждения и то, что затухание мощности волны Релея прямо пропорционально расстоянию от точки возбуждения, можно рассчитывать, что ее импульс будет надежно регистрироваться обычными приборами ультразвукового контроля на расстоянии порядка 1,5..2 м от точки возбуждения.

**Определение динамического коэффициента Пуассона.** Взаимосвязь между динамическим коэффициентом Пуассона и скоростью распространения различных типов волн описывается дисперсионным уравнением [2], которое можно записать в виде

$$\zeta^6 - 8\zeta^4 + 8\zeta^2 \left( 3 - 2 \frac{V_T^2}{V_L^2} \right) - 16 \left( 1 - \frac{V_T^2}{V_L^2} \right) = 0; \quad (7)$$

где  $\zeta = V_R/V_T$ .

Принимая во внимание известные соотношения:

$$V_L = \sqrt{\frac{E_\delta \cdot (1 - v_\delta)}{\rho \cdot (1 + v_\delta) \cdot (1 - 2v_\delta)}}; \quad (8)$$

$$V_T = \sqrt{\frac{E_\delta}{2\rho \cdot (1 + v_\delta)}}; \quad (9)$$

можем записать:

$$\frac{V_L}{V_T} = \sqrt{\frac{1 - 2v_\delta}{2 \cdot (1 - v_\delta)}}; \quad (10)$$

С учетом (10) уравнение (7) можно записать в виде

$$\zeta^6 - 8\zeta^4 + 8\zeta^2 \left( 3 - 2 \left[ \frac{(1 - 2v_\delta)}{2 \cdot (1 - v_\delta)} \right] \right) - 16 \left( 1 - \left[ \frac{(1 - 2v_\delta)}{2 \cdot (1 - v_\delta)} \right] \right) = 0. \quad (11)$$

Для параметра  $\zeta$  уравнение (11) имеет 6 корней. Для  $v_\delta$  в диапазоне 0...0,2637 все корни действительные и попарно сопряженные по знаку. В диапазоне 0,2637...1 остается одна пара действительных корней и две пары комплексных корней.

Анализ решений уравнения (11) целесообразно выполнить, принимая в качестве неизвестной величины параметр  $v_\delta$ , рассматривая его выражение в диапазоне действительных положительных значений параметра  $\zeta$ . В этом случае получим единственное значение  $v$  для всего диапазона значений  $\zeta$

$$v_\delta = \frac{\zeta^6 - 8\zeta^4 + 16\zeta^2 - 8}{\zeta^6 - 8\zeta^4 + 8\zeta^2}. \quad (12)$$

Рассмотрим уравнение (11), выполнив подстановку

$$\zeta = \eta \cdot \sqrt{\frac{2 \cdot (1 - v_\delta)}{1 - 2v_\delta}}. \quad (13)$$

где  $\eta = V_T/V_L$ .

Полученное уравнение

$$\left[ \eta \cdot \sqrt{\frac{2 \cdot (1 - v_\delta)}{1 - 2v_\delta}} \right]^6 - 8 \cdot \left[ \eta \cdot \sqrt{\frac{2 \cdot (1 - v_\delta)}{1 - 2v_\delta}} \right]^4 + 8 \cdot \left[ 3 - 2 \cdot \left[ \frac{(1 - 2v_\delta)}{2 \cdot (1 - v_\delta)} \right] \right] \times \left[ \eta \cdot \sqrt{\frac{2 \cdot (1 - v_\delta)}{1 - 2v_\delta}} \right]^2 - \quad (14)$$

$$- 16 \cdot \left[ 1 - \frac{(1 - 2v_\delta)}{2 \cdot (1 - v_\delta)} \right] = 0$$

имеет 4 корня для  $v_\delta$ , из которых только один является действительным. Ниже, в качестве примера, приведены решения уравнения (14) для  $\eta = 0,48$ , полученные в среде MathCad.

$$v_d = \begin{pmatrix} -2.7106068394785636957 \\ 0.31859261361164420878 \\ 0.47448917867442340242 - 0.016325282660833714262i \\ 0.47448917867442340242 + 0.016325282660833714262i \end{pmatrix}$$

Если в качестве переменной рассматривать величину  $\eta$ , то уравнение (14) будет иметь 6 корней. В диапазоне значений  $v_d$  от 0 до 0,5 имеется два действительных, сопряженных по знаку и четыре комплексных корня. В диапазоне значений  $v_d$  от 0,5 до 1,0 имеется два мнимых и четыре комплексных корня для  $\eta$ . Символьные аналитические выражения для корней уравнения (14) слишком громоздки, - выражение только для одного корня занимает страницу. Поэтому для анализа результата удобнее использовать выражение, приближенно описывающее связь между  $v_d$  и  $\eta$ . Зависимость  $v_d$  от  $\eta$  хорошо аппроксимируется выражением вида

$$v_d = \frac{a + b \cdot \eta}{1 + c \cdot \eta + d \cdot \eta^2}, \quad (15)$$

где  $a = 0,50607613$ ;  $b = -0,817673$ ;  $c = -1,3740213$ ;  $d = 0,05049$ .

Выражение (15) может служить основой методики оперативного определения коэффициента Пуассона по данным поверхностного прозвучивание бетона.

**Экспериментальная часть.** Для проверки возможности регистрации импульса поверхностной волны и оценки метрологических показателей методики измерений была выполнена серия ультразвуковых измерений на натурном крупноразмерном бетонном образце габаритами 50x40x200 см. На рис. 3 и рис. 4 приведены временные диаграммы сигналов приемного тракта ультразвукового прибора «Пульсар-1.2» для различных баз измерения времени распространения ультразвукового импульса.

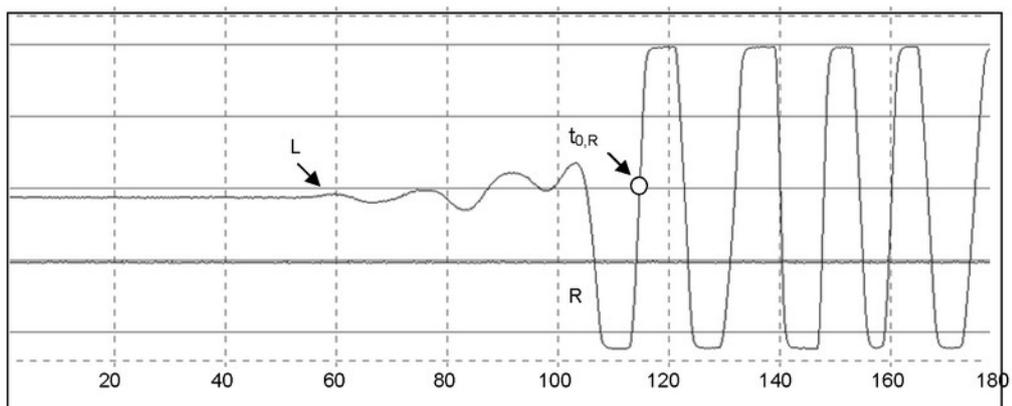


Рис. 3. Временная диаграмма акустического сигнала на базе прозвучивания 25 см с использованием вязкого акустического контакта ЭАП: L – первое вступление подповерхностной продольной волны; R - первое вступление импульса волны Релея; горизонтальная координата соответствует оси времени, отметки – в

микросекундах, вертикальная координата соответствует уровню сигнала предусилителя прибора «Пульсар-1.2», масштаб – 0,5 В/деление

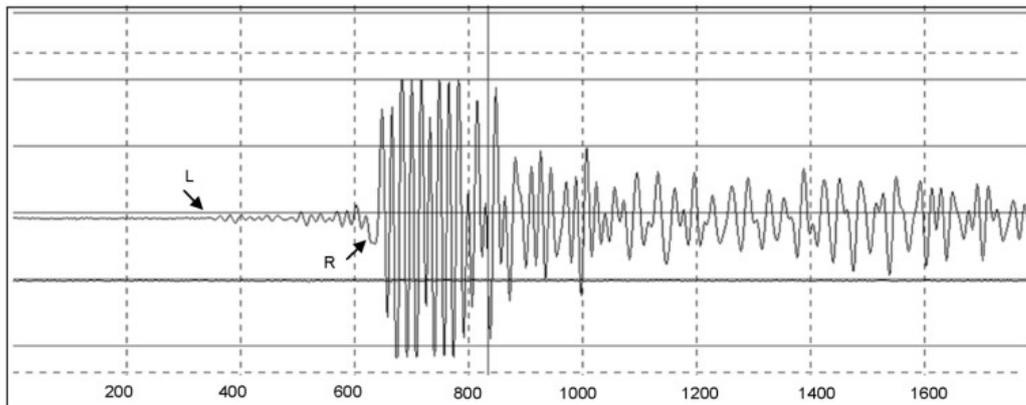


Рис. 4. Временная диаграмма акустического сигнала на базе прозвучивания 175 см с использованием вязкого акустического контакта ЭАП: L – первое вступление подповерхностной продольной волны; R - первое вступление импульса волны Релея; горизонтальная координата соответствует оси времени, отметки – в микросекундах, вертикальная координата соответствует уровню сигнала предусилителя прибора «Пульсар-1.2», масштаб по вертикали – 0,5 В/деление

Очевидной является значительная разница амплитуд колебаний продольной и поверхностной волн. Большая временная протяженность «хвоста» продольной составляющей – между отметками L и R (см. рис. 4) – обусловлена, вероятно, интерференцией прямого и отраженного от боковых граней бетонного образца ультразвуковых импульсов. Это препятствует точному определению момента появления импульса поверхностной волны. Для регистрации скорости-времени распространения импульса поверхностной волны использована методика продольного профилирования, в соответствии с которой, в качестве оценки скорости распространения принималась т.н. дифференциальная скорость  $V_{d,R}$ , рассчитываемая по формуле

$$V_{d,R} = \frac{\Delta t_{0,R}}{\Delta l}, \quad (16)$$

где  $\Delta t_{0,R}$  – приращение времени распространения поверхностной волны ультразвукового импульса при изменении базы распространения на  $\Delta l$ .

Отметки времени  $\Delta t_{0,R}$  определялись по смещению точки  $t_{0,R}$  (см. рис. 3) при перемещении ультразвукового преобразователя.

В таблице 1 приведены данные измерений скоростей ультразвукового импульса с использованием вязкого акустического контакта ЭАП с бетоном на различных базах: от 25 см до 1,75 м:  $V_{d,L}$ ,  $V_{d,R}$  – дифференциальные значения скорости импульсов продольной и поверхностной волн.

Таблиця 1

**Данные регистрации параметров акустических волн**

База, см	$t_{0,L}$ , мкс	$\Delta t_{0,L}$ , мкс	$v_{d,L}$ , м/с	$\Delta v/v_L$	$t_{0,R}$ , мкс	$\Delta t_{0,R}$ , мкс	$v_{d,R}$ , м/с	$\Delta v/v_R$
25	56	56	4464	0,000	114,5	105	2381	0,002
50	110	54	4630	-0,037	220	105,5	2370	0,007
75	169	59	4237	0,051	326	106	2358	0,011
100	221	52	4808	-0,077	431	105	2381	0,002
125	284	63	3968	0,111	538	107	2336	0,021
150	338	54	4630	-0,037	641	103	2427	-0,017
175	392	54	4630	-0,037	743	102	2451	-0,027
К.вариации		0,072	<b>0,069</b>			0,013	<b>0,013</b>	
ср. знач.		56,0	4464,3			104,8	2385,8	
				<b>r =</b>	<b>0,705</b>			

Для полученных значений скоростей распространения ультразвукового импульса (см. таб. 1)  $V_L = 4464,3$  м/с,  $V_R = 2385,8$  м/с получим:  $\eta = V_R/V_L = 0,5345$ ;  $v_d = 0,247$ . Значение динамического коэффициента Пуассона оказалось заметно выше часто принимаемого в расчетах статического значения – 0,18..0,2.

**Заклучение.** Практическое применение поверхностной волны для целей диагностики состояния бетонного массива возможно с использованием типовых ультразвуковых электроакустических преобразователей.

В основе методики селекции поверхностных акустических волн на базах прозвучивания бетона более 0,4..0,5 м может быть положено амплитудное разделение составляющих акустического сигнала, а также использование корреляционной его обработки.

**Список литературы:**

1. Бетоны. Ультразвуковой метод определения прочности: ГОСТ 17624-2012. – Введ. 01.01.2014. – М.: 2014. – 16 с.
2. Гринченко, В.Т. Гармонические колебания и волны в упругих телах / В.Т Гринченко, В.В. Мелешко. – Киев: Наукова Думка, 1981. – 284 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. Снежков, Д.Ю. Основы мониторинга возводимых и эксплуатируемых железобетонных конструкций неразрушающими методами / Д.Ю. Снежков, С.Н. Леонович - Минск: БНТУ, 2016. - 330 с.
5. СТБ EN 12504-4-2014 Методы контроля бетона в конструкциях. Часть 4. Определение скорости распространения ультразвукового импульса – Введ. 01.01.2015. Госстандарт, Минск, 2014. – 15 с.

**Д.Ю. Снежков, С.Н. Леонович С.Н.**

**Определение динамического коэффициента Пуассона бетона в железобетонных конструкциях ультразвуковым мультиволновым методом**

Мультиволновой контроль позволяет улучшить метрологические показатели и повысить информативность ультразвукового метода прохождения при определении физико-механических свойств бетона. В статье рассматривается

*возможность совместного использования продольных подповерхностных волн и волн Релея для определения динамического коэффициента Пуассона бетона конструкций в натуральных условиях, приведены практические результаты.*

**Ключевые слова:** бетон, ультразвук, модуль упругости, коэффициент Пуассона, волна Релея.

**D. Snezhkov, S. Leonovich**

***Determination of dynamic poisson ratio of concrete in reinforced concrete structures by ultrasonic multi-wave method***

*Multi-wave testing allows to improve the metrological performance and to enhance the usefulness of the ultrasonic method of passing when in the determination of physical and mechanical properties of concrete. The article discusses the possibility of joint use of longitudinal subsurface waves and Rayleigh waves to determine the dynamic Poisson ratio of concrete structures in full-scale conditions, practical results.*

**Key words:** concrete, ultrasound, elastic modulus, Poisson ratio, Rayleigh wave.

УДК69.003:658.15.011.46

**І.А.Шатрова**

канд. техн наук , доцент

**В.В.Титок**

старший викладач

**Н.І.Нікогосян**

канд техн. наук, доцент

Київський національний університет будівництва і архітектури

## **ОРГАНІЗАЦІЙНО-ТЕХНОЛОГІЧНИХ УМОВИ І ЇХ ВПЛИВ НА ЕФЕКТИВНІСТЬ ПРОЦЕСУ ВИКОНАННЯ РОБІТ ЖИТЛОВОГО БУДІВНИЦТВА**

*В статті наведений аналіз залежності ефективності процесу виконання робіт від організаційно-технологічних умов зведення житлових будинків. Аналіз виконано з використанням математичного апарату теорії масового обслуговування.*

**Ключові слова:** тривалість робіт, аналіз організаційно-технологічних умов, характеристики виконання будівельно-монтажних робіт.

**Вступ.** В умовах економічної кризи необхідно підвищувати ефективність капітальних вкладень. Це в значній мірі залежить від тривалості робіт і своєчасного введення житлових будинків в експлуатацію. На ефективність процесу виконання робіт і їх тривалість значно впливають організаційно-технологічні умови їх виконання.

**Аналіз досліджень і публікацій з проблеми.** В той же час відомо, що визначення тривалості робіт житлового будівництва, у більшості випадків, здійснюється з використанням детермінованих методів [2,3], які недостатньо ураховують організаційно-технологічні умови їх виконання і вплив великої кількості випадкових факторів, обумовлених імовірнісним характером будівельного виробництва, що призводить до значного відхилення фактичної тривалості робіт від проектуємої її величини. Існуючі методики [1,4], що тим чи іншим чином ураховують при визначенні тривалості робіт імовірнісний характер будівельного