

**КОМПЬЮТЕРНЫЙ АНАЛИЗ ТРАНСФОРМАЦИИ  
УЛЬТРАЗВУКА  
И ПРОЧНОСТИ БЕТОНА ПОД ВЛИЯНИЕМ ДОБАВОК**

**Коваль С.В., Сапожников В.А., Мартынов Е.В.**

*Одесская государственная академия строительства и архитектуры, Одесса, Украина*

В неоднородных материалах, к которым относится бетон, внутреннее строение, взаимодействие микрочастиц и крупных составляющих элементов непостоянно как по объему, так и по времени. В их структуру входят микро - и макропоры, трещины, которые могут быть сухими или наполненными водой. Непостоянным является и взаимное расположение крупных и мелких частиц. Все это приводит к тому, что плотность и скорость распространения в них ультразвука непостоянны и колеблются в больших пределах [1, 2]. Одной из причин, обуславливающей неточность прогноза прочности при ультразвуковом методе контроля, является изменение влажности контролируемого бетона к моменту испытания по сравнению с влажностью бетона тарировочных образцов [3]. Структурные изменения определяют зависимость скорости ультразвука от состава бетона, что отражается на точности контроля прочности по данным ультразвукового контроля [1].

Экспериментально проверено предположение, что степень корреляции между скоростью ультразвука и показателями свойств бетона будет зависеть от вида и количества добавок. Базой для анализа являлись экспериментально-статистические модели изменения прочности (1) и скорости ультразвука (2) под влиянием переменных концентраций суперпластификатора ( $X_1$ ), наполнителя – молотого известняка ракушечника ( $X_2$ ), вводимого для повышения однородности исследуемых равноподвижных ( $OK=18$  см) бетонных смесей, а также содержания цемента ( $X_3$ ):

Скорость ультразвука существенно возрастает с повышением количества суперпластификатора, что объясняется уплотнением структуры вследствие снижения В/Ц. По мере твердения скорость ультразвука увеличивается пропорционально вводимой добавке вне зависимости от уровней технологических факторов  $X_2$  и  $X_3$ , хотя в 3 суток

$$R=31,4 + 9,5x_1 \pm 0x_1^2 \pm 0x_1x_2 \pm 0x_1x_3 \pm 0x_2 \pm 0x_2^2 \pm 0x_2x_3 + 4,1x_3 + 2,8x_3^2 \quad (1)$$

$$v=4623+230x_1 \pm 0x_1^2 + 52x_1x_2 \pm 0x_1x_3 \pm 0x_2 + 34x_2^2 - 58x_2x_3 + 95x_3 + 3x_3^2 \quad (2)$$

Карбонатный наполнитель оказывает значительно меньшее влияние на скорость ультразвука, хотя, при этом может наблюдаться

некоторое увеличение или уменьшение скорости ультразвука в зависимости от значений других факторов состава. С одной стороны, введение дисперсного наполнителя повышает плотность, что приводит к росту скорости распространения ультразвуковых волн. С другой – карбонатный наполнитель имеет пористую структуру и в исследуемые сроки твердения еще не состоянием участвовать в процессах формирования прочности бетона вследствие незначительной гидравлической активности. Поэтому скорость ультразвука может снижаться в результате уменьшения плотности структуры

Анализ трансформации корреляционных связей проведен на основе вычислительного эксперимента [4, 5] в несколько этапов.

На первом этапе был сделан переход от полных трехфакторных моделей к двухфакторным, характеризующим влияние наполнителя  $x_2$  и содержания цемента  $x_3$  на прочность  $R$  и скорость ультразвука при фиксированном содержании суперпластификатора  $x_1$ . Фактор  $x_1$  изменялся на уровнях -1, 0, +1. Далее проведены вычислительные эксперименты, генерируя случайным образом уровни факторов  $x_3$  и  $x_4$ .

На случайных полях случайным образом отбирались  $N=15$  точек, т.е. выборка была такая же, как и объем натурального эксперимента. По 15 парам показателей  $R$  и  $v$  определялась оценка коэффициента корреляции. В соответствии с методом Монте-Карло процедура повторялась, и после 1000 реализаций формировалась информация, позволяющая проанализировать свойства различных статистических оценок вариации вне зависимости от степени приближения их распределений к нормальному [5].

При исследовании влияния содержания наполнителя процедура была аналогичной. Отличие заключалось в том, что фиксировалась в этом случае на трех уровнях ( $x_2=-1, 0$  и  $1$ ) дозировка карбонатной добавки, а уже уровни факторов  $x_1$  и  $x_3$  генерировались случайным образом. По результатам 1000 реализаций рассчитывался коэффициент корреляции.

Аналогично оценивалось влияние и третьего фактора  $x_3$  – расхода цемента при генерировании уровней факторов  $x_1$  и  $x_2$ .

По данным табл.1, распределение  $r\{R, v\}$  в случае  $x_1=0$  достаточно симметрично. Об этом можно судить по близости среднего и медианы [6]. Нижняя 5-ти процентная доверительная граница коэффициента корреляции – равна  $r_{05}=0,871$  и очень далека от нуля, а риск накрытия  $r\{R, v\}=0$  маловероятен, так как  $v_{05}=+0,871 < Me=+0,89$ . Без сомнения правдоподобно суждение о существовании хорошей корреляционной связи между  $R$  и  $v$ .

Таблица 1

Компонент	С-пластификатор			Наполнитель			Цемент		
Статистика	-1	0	+1	-1	0	+1	-1	0	+1
Среднее $r$	0,65	0,875	0,812	0,915	0,982	0,966	0,955	0,988	0,959
Отклонение $s$	0,16	0,06	0,07	0,04	0,01	0,01	0,02	0,01	0,02
Минимум $r_{min}$	-0,01	0,63	0,48	0,81	0,96	0,90	0,87	0,97	0,89
Максим. $r_{max}$	0,94	0,97	0,98	0,96	1,00	0,99	1,00	1,00	1,00
Медиана $Me$	0,67	0,89	0,82	0,93	0,98	0,97	0,96	0,99	0,96
Квантиль $r_{05}$	0,644	0,871	0,808	0,913	0,982	0,965	0,953	0,988	0,958
Квантиль $r_{95}$	0,664	0,879	0,817	0,918	0,983	0,967	0,956	0,989	0,961

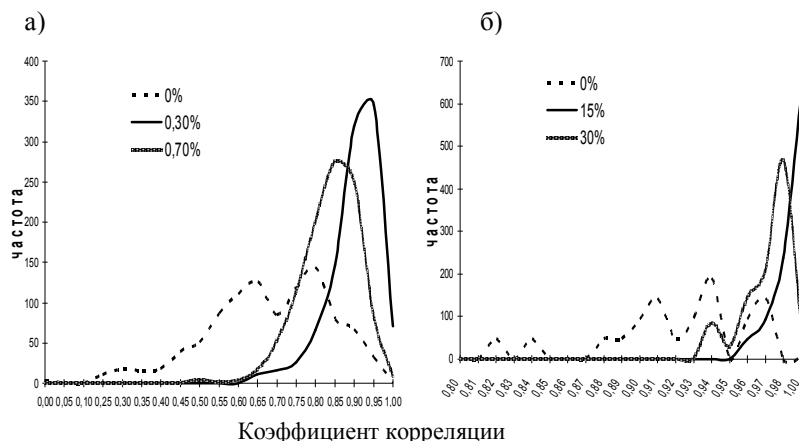


Рис.1. Изменение распределений эмпирических оценок  $r\{R_l, v\}$  с повышением в бетоне содержания суперпластификатора (а) и количества наполнителя (б)

Исходя из подобных расчетов, можно утверждать, что практически во всех рассмотренных в табл.1 случаях связь между показателями прочности и скорости ультразвука обнаруживается. Исключение составляет распределение, полученное при фиксации наполнителя на уровне  $x_2=-1$  и «расшатывании» уровней содержания суперпластификатора и цемента. Условие  $v_{05}=+0,913 < Me=+0,93 > v_{05}=0,918$  показывает, что распределение существенно отличается от нормального.

Анализ рис.1а показывает, что введение суперпластификатора в количестве 0,3% приводит к улучшению однородности распределения, что, по нашему мнению, повышает надежность прогнозирования прочности по данным ультразвукового контроля. В этом случае степень корреляции возрастает до  $r\{R_l, v\}=0,875$ , тогда как у бетона без этой добавки коэффициент вариации составляет только  $r\{R_l, v\}=0,65$ . Дальнейшее повышение количества добавки несколько ухудшает распределение.

На рис.1б показано влияние количества наполнителя на распределение  $r\{R_l, v\}$ . В случае дозировки  $H=0\%$  ( $x=-1$ ) гистограмма имеет расплывчатый характер, что позволяет утверждать о весьма плохой прогнозируемости прочности по данным ультразвукового контроля. С увеличением количества наполнителя статистические характеристики распределения значительно улучшаются, и в случае приближения к 30% наполнителя коэффициент вариации стремится к 1.

### Выводы

Проведенный анализ с использованием методов компьютерного материаловедения показывает, что степень прогнозируемости прочности бетона по данным ультразвукового контроля зависит от параметров состава бетона.

### SUMMARY

The article examines the impact of factors on the relationship of the concrete strength and performance of non-destructive quality control. To change the strength and density of the concrete structure in the experiment varied the dosage of superplasticizer, the amount of filler - ground limestone, and cement consumption. To evaluate the correlation technique is used, based on modeling and generation of random evaluations of properties.

### Литература

1. Лещинский М.Ю. Испытание бетона :Справочное пособие .-М.:Стройиздат, 1980. -360 с.
2. Шутилов В.А. Основы физики ультразвука. Л.: Изд-во Ленинградского университета, 1980. – 280 с.
3. Выровой В.Н., Воронов Ю.Н., Панасюк В.А. Влияние водонасыщения на изменение скорости ультразвука в бетоне длительного твердения /Вісник ОДАБА, 2010.
4. Компьютерный поиск компромиссных технологических решений. Методические указания//В.А.Вознесенский, Т.В.Ляшенко, А.Д.Довгань и др.-Одесса: ОГАСА, 2006,-10 с.
5. Использование метода Монте-Карло при анализе взаимосвязи между полями реологических показателей композиций для отделочных работ /Т.В.Ляшенко, В.А.Вознесенский, Т.И.Пищева, Я.Иванов // Вісник ОДАБА. –Одеса, 2001. –Вип.3. –С.57-64.
6. Айвазен С.А., Енюков М.С., Мешалкин Л.Д. Прикладная статистика. Исследование зависимостей. -М.: Финансы и статистика, 1985. -487 с.