

# КОНТРОЛЬ ПРОЧНОСТИ БЕТОНА НЕРАЗРУШАЮЩИМИ МЕТОДАМИ: ПОВЫШЕНИЕ ДОСТОВЕРНОСТИ НА ОСНОВЕ ИХ КОМБИНИРОВАНИЯ

СНЕЖКОВ Д.Ю., ЛЕОНОВИЧ С.Н.

*Белорусский национальный технический университет*

**Введение.** Неадекватность по напряженно-деформированному состоянию бетона в зонах протекания измерительных процессов известных неразрушающих методов испытания ни между собой, ни процессу прессового испытания бетонного образца на одноосное сжатие по ГОСТ 10180-2012 «Бетоны. Методы определения прочности по контрольным образцам» составляет основную проблему неразрушающих испытаний прочности бетона конструкций. Проявляется она в том, что косвенные параметры разных неразрушающих методов испытаний в разной степени подвержены влиянию изменений физико-механических свойств контролируемого бетона. Это значит, что оценки прочности разными неразрушающими методами могут различаться, поскольку они в разной степени зависят не только от фактической прочности бетона (определяемой прессовыми испытаниями образцов), но и от других его параметров: модуля упругости, динамической вязкости, структурной неоднородности и др. Чувствительность к указанным параметрам бетона у методов испытаний, имеющих различие в физической основе, тоже разная. Данное обстоятельство, с одной стороны, позволяет говорить о селективной чувствительности того или иного неразрушающего метода к физико-механическим параметрам бетона, а с другой, - открывает возможность повышения точности и достоверности контроля путем объединения (комбинирования) нескольких неразрушающих методов. Особую актуальность вопрос достоверности контроля приобретает в условиях монолитного строительства, где учет факторов, приводящих к вариации прочностных показателей бетона, затруднен.

Исходным пунктом предлагаемого решения задачи комбинирования является подбор неразрушающих методов, обладающих свойством *комплементарности* (взаимной дополнительности) [1, 2], вы-

ражающемся во взаимной полной или частичной компенсации некоторых погрешностей при определении прочности бетона.

#### **Алгоритм комбинирования.**

Имеется ряд публикаций [3, 4, 5, 6], в которых рассматриваются алгоритмы объединения на уровне косвенных параметров ультразвукового импульсного метода и метода упругого отскока, - так называемый *SonReb* метод. Прочность бетона  $f_c$  рассматривается как функция двух косвенных параметров - скорости ультразвукового импульса  $V$  и индекса отскока  $I$ . Большое [5, 6] многообразие зависимостей  $f_c = F(V, I)$  свидетельствует о значительной неопределенности результата объединения методов.

Другой подход [1, 2] основан на объединении не косвенных параметров методов, а полученных каждым из методом оценок прочности бетона. Методически подбор комплементарных методов и алгоритм их объединение может базироваться:

- на основе статистического анализа массива экспериментальных данных испытаний одних и тех же образцов бетона разными методами при достаточно широком спектре факторов вариации прочности, анализируя результаты испытания образцов на предмет их корреляции;

- на основе анализа физики процессов, лежащих в основе изменений прочности бетона, уточняя характер влияния переменных факторов на косвенные параметры рассматриваемых методов испытаний, включая в комплекс те методы, у которых чувствительность к переменным факторам разного знака.

Обе методики комбинирования приводят в итоге к одинаковому алгоритму объединения – с использованием весовых коэффициентов, - так называемому аддитивному объединению вида

$$f_c = \frac{\sum_j (\mu_j \cdot f_{c,j})}{\sum_j \mu_j} = \sum_j (\omega_j \cdot f_{c,j}), \quad (1)$$

где  $f_{c,j}$  – оценка прочности бетона  $j$ -м методом;  $\mu_j$  – весовой коэффициент  $j$ -го метода.

Алгоритм (1) при статистическом подходе является фактически алгоритмом обработки массива данных неравноточных измерений.

В качестве весовых коэффициентов используются величины обратно пропорциональные дисперсиям оценок прочности  $f_{c,j}$ .

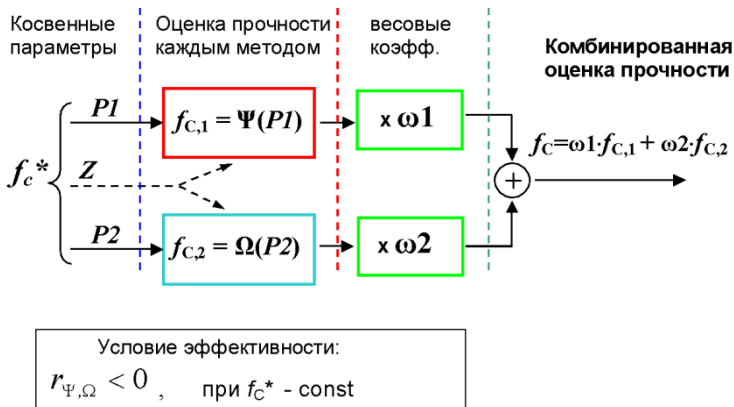


Рис. 1. Алгоритм аддитивного объединения оценок прочности 2-х методов испытаний

Трудности определения весовых коэффициентов на основе репрезентативного массива данных испытаний заключаются не только в большом объеме экспериментальной работы, но и в необходимости учета неисключенных систематических погрешностей, которые должны рассматриваться как случайные величины и могут быть представлены соответствующими многомерными законами распределений. Объем испытаний – количество совместных измерений контролируемого параметра  $M$  – будет определяться по формуле

$$M = n_1 \cdot n_2 \cdot \dots \cdot n_k, \quad (2)$$

где  $n_i$  – количество испытаний при построении градуировочных зависимостей для  $i$ -го метода в отдельности.

Отдельные составляющие погрешностей могут быть коррелированы между собой, что дополнительно усложняет анализ данных. Эти связи между суммируемыми составляющими погрешности должны быть учтены. Среднее квадратическое отклонение суммы двух коррелированных оценок прочности бетона определяется выражением

$$\sigma_\Sigma = \sqrt{\sigma_1^2 + 2r\sigma_1\sigma_2 + \sigma_2^2}, \quad (3)$$

$$r = \frac{1}{n} \frac{\sum_{i=1}^n (f_{c1,i} - \overline{f_{c1}})(f_{c2,i} - \overline{f_{c2}})}{\sigma_1 \cdot \sigma_2},$$

где  $r$  – коэффициент корреляции;  $\sigma_1, \sigma_2$  – среднеквадратическое отклонение оценок прочности бетона соответствующим методом.

Если величины  $f_{c1}$  и  $f_{c2}$  слабо коррелированы, то  $r \approx 0$  и дисперсия суммарной оценки  $\sigma_\Sigma^2$  прочности будет равна сумме дисперсий

$$\sigma_\Sigma = \sqrt{\sigma_1^2 + \sigma_2^2}. \quad (4)$$

При близких значениях  $\sigma_1, \sigma_2$  весовые коэффициенты  $\mu_1$  и  $\mu_2$  также будут приблизительно равны, дисперсия среднего арифметического  $f_{c1}$  и  $f_{c2}$  будет равна дисперсии для каждого из методов, то есть, выигрыш от комбинирования методов отсутствует.

При сильной корреляции величин  $f_{c1}$  и  $f_{c2}$ ,  $r \approx \pm 1$

$$\sigma_\Sigma \approx |\sigma_1 \pm \sigma_2|. \quad (5)$$

Очевидно, что критерием для отбора двух комплексобразующих методов может явиться отрицательное значение коэффициента корреляции  $r$ . В этом случае показатель неопределенности  $\sigma_\Sigma$  комбинированной оценки прочности (или иного параметра) бетона будет меньше, чем этот показатель каждого из методов в отдельности.

Разработанный НИЛ ПГС кафедры «Технология строительного производства» БНТУ комплексный метод, использующий объединение оценок прочности ультразвукового импульсного метода и метода упругого отскока, базируется на стандартных неразрушающих методах и не требует внесения в них изменений, лишь дополняется расчетной процедурой по формуле (1).

*Физическая основа методики комбинирования.* Для изотропной, квазиоднородной, упругопластичной среды, зависимость показаний прибора метода упругого отскока - индекса отскока бойка  $I$ , в первом приближении может быть представлена в следующем виде:

$$I = \psi \frac{\sigma_d^{5/4}}{E_d^*} + I_0, \quad (6)$$

где  $\sigma_d$  – динамический предел прочности материала;  $E_d^*$  – приведенный динамический модуль упругости системы «испытываемый материал – индентор»,  $\psi$  и  $I_0$  – коэффициенты, зависящие от физи-

ческих и конструктивных параметров ударного механизма склерометра: энергии удара, массы индентора и др.

Присутствие параметра  $E_d^*$  в формуле (6) вносит неоднозначность оценки прочностного показателя  $\sigma_d$  бетона по индексу отскока бойка  $I$ .

Акустические методы, в частности, ультразвуковой импульсный по ГОСТ 17624-2012 «Бетоны. Ультразвуковой метод определения прочности» и СТБ EN 12504-2014 «Методы контроля бетона в конструкциях ч.4: Определение скорости распространения ультразвукового импульса» в значительной мере свободны от этого недостатка. Даже при использовании поверхностного «прозвучивания» конструкции на базе измерения 12...15 см, толщина поверхностного слоя бетона, влияющего на распространения упругой волны, составляет 3...4 см. Скорость распространения УЗК в бетонном массиве определяется его упругими свойствами, в соответствии с формулами классической акустики

$$c_l = \sqrt{\frac{E(1-\nu)}{\rho(1+\nu)(1-2\nu)}}, \quad c_t = \sqrt{\frac{E}{2\rho(1+\nu)}} \approx 0,61 \cdot c_l, \quad (7)$$

где  $c_l$ ,  $c_t$  – скорости распространения продольной и поперечной упругих волн в массиве;  $\rho$  – плотность материала;  $E$ ,  $\nu$  – динамические модуль упругости и коэффициент Пуассона соответственно.

Алгоритм комбинированного метода оценки прочности бетона  $f_{c,comb}$  базируется на коррекции данных метода упругого отскока по ГОСТ 22690-2015 «Бетоны. Определение прочности механическими методами неразрушающего контроля», которые принимаются за опорные, поправкой, являющейся функцией разницы оценок прочности бетона ультразвуковым импульсным методом [1] и опорного метода, в соответствии с формулой

$$f_{c,comb} = f_{c,bas} + \delta(\Delta f_c), \quad (8)$$

где  $\Delta f_c = f_{c,add} - f_{c,bas}$ ;  $f_{c,bas}$ ,  $f_{c,add}$  – оценки прочности бетона опорным (базовым) и дополнительным методами соответственно. Практически, поправочную функцию  $\delta$  можно аппроксимировать линейной зависимостью вида

$$\delta(\Delta f_c) = \frac{k \cdot \Delta f_c}{1+k},$$

где  $k$  – коэффициент, рассчитываемый по формуле

$$k = \frac{df_{c,bas}}{df_{c,add}} . \quad (9)$$

С учетом формул (6), (7) выражение для  $k$  приобретает вид

$$k = \frac{df_{c,Sh}}{df_{c,us}} = \frac{4}{5} \frac{f_{c,Sh} \cdot \rho^2 (1 - 2\nu_c)^2}{2A \cdot E_c^{*2} \left( \frac{E_c^*}{E_I^*} + 1 \right) (1 - \nu_c)^4} , \quad (10)$$

где  $f_{c,Sh}$ ,  $f_{c,us}$  – соответственно, оценки прочности бетона склерометром Шмидта и ультразвуковым методом;  $E_c^*$  – приведенный модуль упругости бетона;  $\nu_c$  - коэффициент Пуассона бетона;  $E_I^*$  – приведенный модуль упругости индентора.

**Результаты натуральных испытаний.** На рисунке приведены данные испытаний бетона монолитных колонн, имеющих близкие сроки набора прочности, неразрушающими методами, включая метод отрыва со скалыванием (ОМШ-1), ультразвуковой импульсный метод (УЗ), метод ударного импульса (ИПС-МГ4) и описанный выше комбинированный (комплексный) методом с объединением оценки прочности по формуле

$$f_{is,I} = \frac{f_{is,1} + \theta \cdot f_{is,2}}{1 + \theta} , \quad (11)$$

где  $f_{is,1}$  и  $f_{is,2}$  – оценки прочности бетона конструкции методами неразрушающими комбинированный метод;  $\theta$ - относительный коэффициент влияния.

Таблица 1 – Значения относительного коэффициента влияния  $\theta$  для бетона классов С25/30...С35/45

Срок твердения бетона $t_H$ , сутки	$1 \leq t_H < 2$	$2 \leq t_H < 4$	$4 \leq t_H < 7$	$7 \leq t_H < 28$	$28 \leq t_H$
$\theta$	3.5	2.4	1.9	1.5	1.35

Ордината гистограмм соответствует разнице оценок прочности бетона колонн методом отрыва со скалыванием  $f_{c,СКОЛ}$  и соответствующим неразрушающим методом  $f_{c,I}$ , то есть:  $\Delta f_{c,I} = f_{c,СКОЛ} - f_{c,I}$ ;

индексы горизонтальной оси графика соответствуют условным номерам колонн. Для первых двух методов испытаний использовались градуировочные зависимости «косвенный параметр – прочность бетона», полученные стандартной методикой совместных с прессовыми испытаний образцов-кубов. Данные метода ударного импульса (прибор ИПС-МГ4.01) корректировались поправочной функцией вида

$$f_{c,ИПС} = 29,3 \cdot \ln(f_{c,basic}) - 57,9, \text{ МПа},$$

где  $f_{c,basic}$  – оценка прочности бетона, полученная с использованием базовой градуировки прибора,  $f_{c,ИПС}$  – оценка прочности бетона с учетом коррекции.

Среднее значение прочности бетона  $f_{cm,СКОЛ}$  данной группы колонн по данным метода отрыва со скалыванием составило 45,2 МПа, при коэффициенте вариации  $V_c = 10,8\%$ .

Как следует из таблицы, наименьший разброс оценок (показатель  $S_{Тм}/f_{cm,СКОЛ}$ ) обеспечивается совместным использованием методов упругого отскока и ультразвукового импульсного.

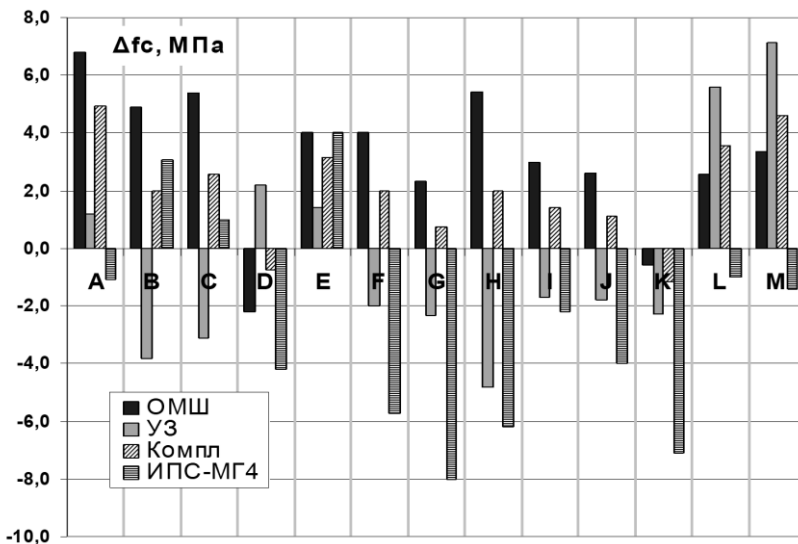


Рис. 2. Разница оценок прочности бетона монолитных колонн 500x500 мм (группа I) методом отрыва со скалыванием и неразрушающими методами: бетон проектного класса С35/45, срок твердения – 115...140 суток, (экспертный метод – отрыв со скалыванием)

Таблица 2 – Показатели погрешности оценки прочности бетона монолитных колонн неразрушающими методами

Тип прибора	Группа колонн I			Группа колонн II		
	$S_{Tm}/f_{cm,CKOЛ}, \%$	Коэфф. коррелл. $r$	Ср.прочн. для группы $f_{cm}, \text{МПа}$	$S_{Tm}/f_{cm,CKOЛ}, \%$	Коэфф. коррелл. $r$	Ср.прочн. для группы $f_{cm}, \text{МПа}$
ОМШ-1	12,4*/7,7	0,92	42,0	8,0	0,96	42,9
УК1401	10,8*/9,6	0,85	46,2	9,2	0,87	44,8
комб. ОМШ+УК	8,1*/5,3	0,95	43,7	4,4	0,96	43,3
ИПС-МГ4	12,0/10,1	0,93	47,8	8,5	0,91	45,7
Скол-МГ4	0	1	45,2	0	1	43,9

$S_{Tm}$  – среднее значение остаточного среднего квадратического отклонения оценок прочности бетона группы колонн неразрушающим методом  $S_{Tm} = (\sum S_T)/n$ ;

\* - данные получены без коррекции градуировочных зависимостей

Остаточное среднее квадратическое отклонение  $S_T$  оценки прочности бетона каждой колонны для каждого из методов определялось по формуле

$$S_T^i = \sqrt{\frac{\sum_{j=1}^n (f_{c.cube,j}^i - f_{c,CKOЛ})^2}{n-2}}, \quad (12)$$

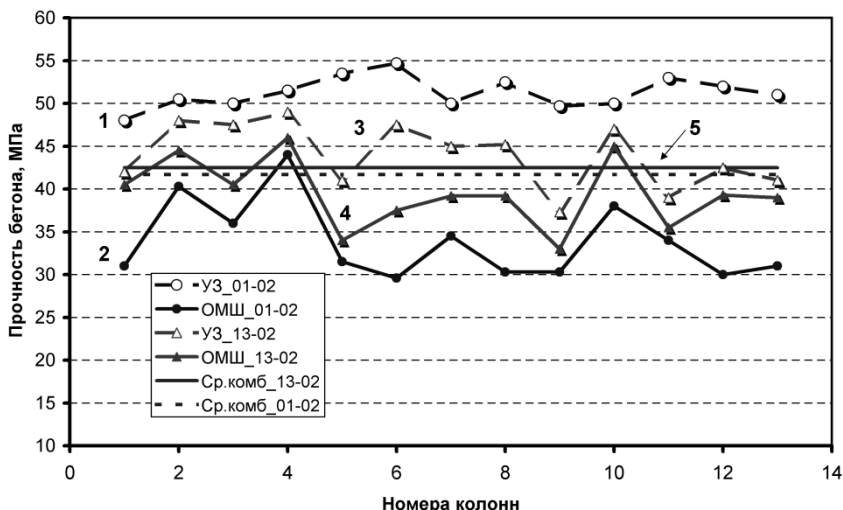
где  $f_{c.cube,j}^i$  – оценка прочности  $j$ -го участка контроля  $i$ -м неразрушающим методом;  $f_{c,CKOЛ}$  – оценка прочности бетона колонны по ГОСТ 22690-2012;  $n$  – количество испытаний (участков контроля).

Полученные данные свидетельствуют в пользу использования комплекса «ультразвуковой метод – метод упругого отскока»,



и адекватности рассматриваемой (6) физической модели процесса индентирования бетона.

На рис. 3 приведены диаграммы испытаний прочности бетона колонн находившихся на момент испытаний в замороженном состоянии более 5 суток и после оттаивания.



- 1 – оценки прочности замороженного бетона ультразвуковым методом;
- 2 - оценки прочности замороженного бетона методом упругого отскока;
- 3 – оценки прочности бетона после оттаивания ультразвуковым методом;
- 4 - оценки прочности бетона после оттаивания методом упругого отскока;
- 5 – средняя прочность бетона всей группы колонн комбинированным методом

Рис. 3. Прочность бетона монолитных колонн по данным неразрушающих методов испытаний: проектный класс бетона по прочности С35/45

Монолитные колонны бетонировались с использованием технологии электропрогрева греющим проводом, с последующим 3–5-суточным выдерживанием при положительной температуре около  $+2..+5^{\circ}\text{C}$ , после чего произошло снижение температуры до отрицательных значений. Испытания проводились в возрасте бетона 14–16 суток, температура бетона на момент испытаний составила  $-8..-10^{\circ}\text{C}$ . Полученным данным испытаний замороженного бетона соответствуют на рисунке диаграммы 1 и 3. Характерным явилось и отрицательное значение коэффициента взаимной корреляции

оценок прочности молотком Шмидта и ультразвуковым методом:  
 $r_{Sh,us} = -0,24$ .

Приведенные результаты согласуются с представлениями о физике процессов использованных неразрушающих методов. При малых значениях влажности замена поровой влаги льдом приводит к увеличению динамического модуля упругости бетона, а это, в свою очередь, дает приращение скорости распространения ультразвукового импульса и, соответственно, - завышение оценки прочности. Снижение оценок метода упругого отскока также можно объяснить увеличением модуля упругости бетона при постоянной прочности (6).

На диаграммах приведены данные испытаний тех же колонн после оттаивания в течение 4 суток при средней температуре воздуха  $+5^{\circ}\text{C}$ . Разброс оценок прочности каждым из методов заметно уменьшился, а коэффициент корреляции оценок прочности поменял знак и увеличился до значения 0,72.

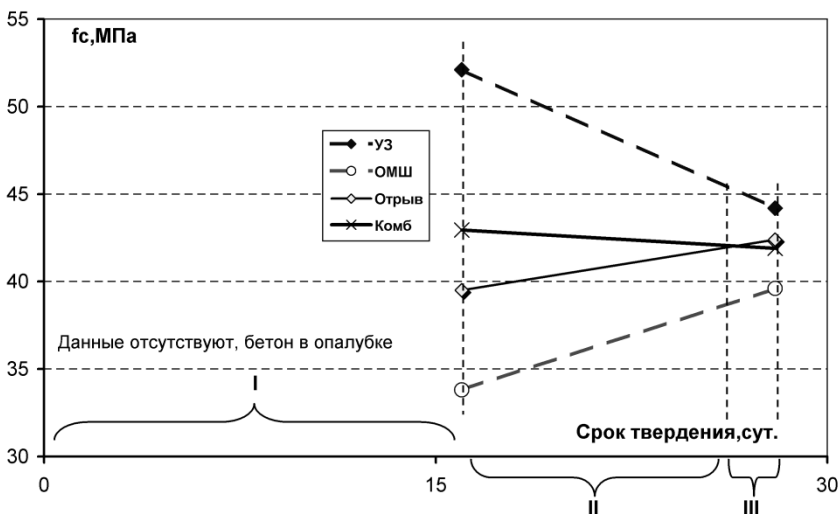
В приведенном примере можно отметить две особенности, свидетельствующие в пользу применения комбинированного метода неразрушающих испытаний бетона в конструкциях:

- показатели испытаний оттаявшего бетона (показаны треугольными маркерами) не выходят за пределы области ограниченной значениями этих же показателей (круглые маркеры) для замороженного бетона;

- средние значения прочности по данным комбинированного метода для всей группы колонн (показаны горизонтальными линиями) практически совпадают, - для замороженного бетона  $f_{cp} = 42,1$  МПа, для оттаявшего -  $f_{cp} = 45,5$  МПа.

На рисунке и в таблице приведены данные кинетики набора прочности бетона колонн в привязке к характерным периодам температуры окружающего воздуха и к экспертным оценкам прочности методом отрыва со скалыванием.

Полученные данные показывают, что для оценки прочности бетона  $f_{c,ts}$  в проектном возрасте (28 сут.) комбинированным методом, после оттаивания бетона в течение 4 суток при положительной температуре можно обойтись без введения каких-либо корректирующих коэффициентов при использовании зависимости (11), при значении весового коэффициента  $k = 1,31$ .



- 1 – интервал времени – 16 суток, температура воздуха  $-2..-10^{\circ}\text{C}$ ;  
 2 – интервал времени – 8 суток, температура воздуха  $-10..-4^{\circ}\text{C}$ ;  
 3 – интервал времени – 4 суток, температура воздуха  $0..+5^{\circ}\text{C}$ ;

Рис. 4. Кинетика твердения монолитного бетона по данным неразрушающих методов испытаний

Таблица 3 – Показатели испытаний прочности бетона монолитных колонн

Срок твердения, сут	16	28
$\Delta f_{c, I}$	-6 МПа (15,2%)	-3,6 МПа (9,1%)
$\Delta f_{c, US}$	13 МПа (33%),	2,8 МПа (7,2%)
$\Delta f_{c, COMB}$	3,6 МПа (9,0%)	-0,8 МПа (2,1%)
$f_{c, Pull Out}$	39,5 МПа	42,5 МПа

Применение формулы (11) для оценки прочности замороженного бетона дало завышение около 3 МПа, что составляет около 7%, что само по себе является удовлетворительным результатом, учитывая, что погрешности для отдельных методов входящих в комплекс составляю: для ультразвукового метода – 13 МПа (33%), для метода упругого отскока – 6 МПа (15,4%).

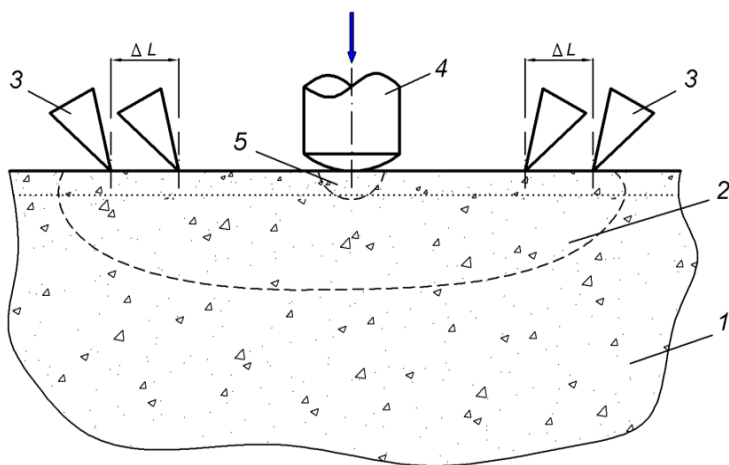
## Экстраполирующий (мультипликативный) алгоритм комбинирования

Свойство комплементарности методов измерений может рассматриваться и в ином аспекте. Например, оно может выражаться различием в пространственной локализации «охватываемых» каждым из методов областей контролируемого бетона. Использование таких различий методов контроля приобретает смысл, если физико-механические свойства бетона в пределах указанных областей отличаются. Специфичность условий укладки и твердения бетона монолитных конструкций характеризуется большой вариабельностью факторов влияющих на его прочностные показатели. Преждевременное расплубливание конструкции, её замораживание-размораживание на ранней стадии набора бетоном прочности, и другие факторы могут приводить к заметному снижению прочности поверхностного слоя по отношению к внутренним глубинным областям бетонного массива. Комбинирование методов потенциально позволяет обнаружить неоднородность бетонного массива по его физико-механическим свойствам, получить количественную оценку неоднородности, и, используя её, - «экстраполировать» контролируемый показатель поверхностного слоя на внутренние области.

Рассмотренный выше популярный метод упругого отскока, судя по наблюдающейся тенденции развития механических методов контроля [1], трансформируется в более информативный метод динамического индентирования [7]. Он позволяет отдельно определить модуль упругости  $E$  и твердость бетона  $H$ , – параметр, имеющий более устойчивую корреляция с прочностью бетона, чем индекс отскока. С помощью ультразвукового импульсного метода можно распространить (экстраполировать) твердость бетона, полученную методом динамического индентирования на внутреннюю подповерхностную область бетонного массива. В этом случае используется потенциальная способность ультразвукового импульсного метода прохождения по ГОСТ 17624 «чувствовать» состояние внутренних участков бетонного массива, в отличие от механических методов индентирования, область «проникновения» в бетон которых не распространяется более чем на 1 см.

На рисунке показана схема испытаний с использованием экстраполирующего комбинированного метода для определения прочности бетона подповерхностной области бетонного массива конструк-

ции [8]. Опорным является метод динамического индентирования [7,9], который позволяет по косвенным параметрам определить модуль упругости  $E$  поверхностного слоя бетона и его прочность  $f_{с.л.}$ . Область 5 - радиус зоны пластической деформации бетона - определяется диаметром отпечатка индентора 4. Свойства этой области определяют оценку прочности бетона в слое на глубину приблизительно равной двойному диаметру отпечатка – 6...10 мм. Область 2 – зона влияния свойств бетона на показатели ультразвукового метода. Границы зоны зависят от расстояния между преобразователями 3, длины волны ультразвука и ее типа, и метода регистрации времени распространения ультразвукового импульса.



*1 – контролируемое изделие; 2 – область бетона, участвующая в передаче ультразвукового импульса от излучателя к приемнику; 3 – излучающий и приемный ультразвуковые преобразователи; 4 – индентор; 5 – область индентирования бетона*

Рис. 5. Схема измерений экстраполирующим комбинированным методом «индентирование – ультразвуковой импульсный метод»

В качестве калибровочного (экстраполирующего) использован ультразвуковой импульсный метод. С его помощью производится коррекция данных метода динамического индентирования. В качестве скорости распространения ультразвука на участке контроля берется наибольшее из массива значений  $\Delta L/\Delta T$ , полученных по

результатам профилирования участка контроля. Это значение будет соответствовать скорости  $c$  ультразвукового импульса в подповерхностной области бетона [1]. По скорости ультразвука  $c$  из соотношений (7) можно определить динамический модуль упругости  $E_{d,c}$ . Разница модулей упругости  $E_{d,c} - E$  может рассматриваться в качестве параметра экстраполяции прочности поверхностного слоя бетона  $f_{c,I}$  в прочность бетона подповерхностного слоя  $f_c$ . Прочность бетона  $f_c$  участка контроля определяют в зависимости от разницы динамических модулей упругости поверхностного слоя бетона  $E$  и внутренней области бетона участка контроля  $E_{d,c}$  решением системы уравнений

$$f_c = \frac{1}{1+\theta} \left( \theta \cdot e^{0.091(E_{d,c}-E)} f_{c,I} + f_{c,US} \right), \quad (13)$$

$$\theta = 0,0026 \cdot f_c^2 - 0,115 \cdot f_c + 2,79,$$

где  $f_c$  – прочность бетона в контролируемого участка конструкции, МПа;  $f_{c,I}$  и  $f_{c,US}$  – соответственно оценки прочности бетона участка контроля методом индентирования и ультразвуковым импульсным методом, МПа;  $\theta$  – безразмерный коэффициент.

**Заключение.** Несовпадение оценок прочности бетона при использовании разных неразрушающих методов испытаний является общеизвестным фактом. С формальных позиций, различие результатов можно объяснять неточностью построения градуировочных зависимостей - их взаимным несоответствием, и требовать строгого соблюдения методик построения. В реальности, градуировочная зависимость может быть «точной» только для тех образцов бетона, по которым она строилась. Применение полученной зависимости для контроля бетона в натуральных условиях всегда сопряжено с влиянием на результат испытаний таких факторов, которые отсутствовали в процессе градуировочных испытаний. Поэтому «неточность» градуировочных зависимостей является неизбежной при любых методиках их построения. Действующие ТНПА рекомендуют применять процедуру коррекции градуировочных зависимостей данными экспертных методов испытаний, в частности, - метода испытания выбуренных кернов по ГОСТ 28570 и метода отрыва

со скалыванием по ГОСТ 22690. Коррекция является эффективным методом повышения точности контроля, но эффективность эта достигается за счет частичной замены неразрушающего контроля разрушающим, при всех сопутствующих ему недостатках.

Объединение нескольких методов неразрушающих испытаний прочностных показателей бетона обладающих свойством комплементарности позволяет не только улучшить точность оценки прочности за счет взаимной компенсации неточностей градуировочных зависимостей используемых методов, но и повысить информативность контроля за счет расширения перечня контролируемых параметров бетона, в частности, - его модуля упругости.

Данные натуральных испытаний показывают, что приемлемую для практики точность контроля прочности бетона проектных классов по прочности C20/25..C35/45 можно получить на основе стандартизированных методов испытаний без использования процедуры коррекции их градуировочных зависимостей.

### Список использованной литературы

1. Снежков, Д.Ю. Основы мониторинга возводимых и эксплуатируемых железобетонных конструкций неразрушающими методами / Д.Ю. Снежков, С.Н. Леонович - Минск: БНТУ, 2016. - 330 с.
2. Leonovich, S.N. Complex method of strength estimation of the monolithic reinforced concrete structures / S.N. Leonovich, D.U. Snezhkov // Concrete structures stimulators of development: proceedings of international FIB conference. – Dubrovnik, – 2007. - P. 947-954.
3. Джонс, Р. Неразрушающие методы испытаний бетонов / Р. Джонс, И. Фэкзоару. – М.: Стройиздат, 1974. – 295 с.
4. RILEM draft recommendation, TC-43-CND. Combined non-destructive testing of concrete. Draft recommendation for in situ concrete strength determination by combined non-destructive methods. Materials and Structures, 1993. – P.43-49.
5. Pucinotti, R. The use of multiple combined non destructive testing in the concrete strength assessment: applications on laboratory specimens / R. Pucinotti // [Electronic resource], 2003. - Mode of access: [http://www.ndt.net/article/hsndtct2007/files/Pucinotti\\_Crisci\\_etat.pdf](http://www.ndt.net/article/hsndtct2007/files/Pucinotti_Crisci_etat.pdf). - Date of access: 02.02.2008.

6. Runkiewicz, L. Application of the Ultrasonic and Sclerometric Methods for the assessment of the structures made of high-strength concrete (HSC) / L. Runkiewicz, M. Runkiewicz // [Electronic resource], 2003. - Mode of access: <http://www.ndt.net/article/wcndt00/>. - Date of access: 24.12.2007.

7. Matsulevich, O. Device with advanced facilities for nondestructive testing of mechanical properties of concrete / O. Matsulevich, V. Rudnitsky, A. Kren // Proceedings of 10<sup>th</sup> European Conference on NDT [Electronic resource]. – Moscow, 2010, CD-ROM. – P.3.

8. Способ определения прочности бетона в конструкциях методом неразрушающего контроля: пат. № 20585 Респ. Беларусь, МПК G 01 N 33/38/ Д.Ю. Снежков, С.Н. Леонович; заявитель БНТУ (BY). - № а 20130687; заявл. 29.05.2013; опубл 09.08.2016 // Афіцыйны бюл./ Нац. центр інтелектуал. уласнасці. – 2016.- №6 (113). - С.111-112.

9. Способ определения твердости и модуля упругости бетона: пат. 16469 Респ. Беларусь, МПК7 G 01 N 33/38/ В.А. Рудницкий [и др.]; заявитель ГНУ «Ин-т прикладной физ. НАН Беларуси». - № а 20100971; заявл. 24.06.2010; опубл 30.10.2012 // Афіцыйны бюл./ Нац. центр інтелектуал. уласнасці. – 2012.- №5. - С.140.