

УДК 666.972.038:620.179

Повышение достоверности контроля прочности бетона неразрушающими методами на основе их комбинирования

Дмитрий Юрьевич СНЕЖКОВ, кандидат технических наук, доцент, email: snezhkov-d-u@yandex.ru

Сергей Николаевич ЛЕОНОВИЧ, доктор технических наук, профессор, зав. кафедрой технологии строительного производства, e-mail: SLeonovich@mail.ru

Белорусский национальный технический университет, Республика Беларусь, 220013 г. Минск, просп. Независимости, 65

Аннотация. Несовпадение оценок прочности бетона при использовании разных неразрушающих методов испытаний является известным фактом. Применение градуировочных зависимостей для контроля бетона в натурных условиях всегда сопряжено с влиянием на результат испытаний таких факторов, которые отсутствовали в процессе градуировочных испытаний. Здесь рассматривается возможность объединения стандартных методов неразрушающих испытаний прочности бетона – ультразвукового импульсного и метода упругого отскока. Объединение этих методов позволяет не только уменьшить ошибку при оценке прочности бетона конструкций, но и повысить информативность контроля за счет расширения перечня контролируемых параметров бетона, в частности его модуля упругости. Необходимое условие эффективного объединения физически разных методов – их комплементарность, которая является следствием различий физики измерительных процессов. Она может проявляться во взаимной компенсации чувствительности объединяемых методов к мешающим факторам. Другое проявление комплементарности – возможность экстраполяции данных одного метода испытаний на область, где он физически не может быть применен. Вторым методом испытаний исполняет роль экстраполирующего (калибровочного). В статье представлены данные испытаний прочности бетона монолитных колонн комбинированным методом. Приемлемую для практики точность контроля прочности бетона можно получить на основе стандартизированных методов испытаний без использования процедуры коррекции их градуировочных зависимостей.

Ключевые слова: бетон, неразрушающий контроль, ультразвуковой метод, индентирование, комбинирование, аддитивный алгоритм, мультипликативный алгоритм, комплементарность, корреляция.

IMPROVING RELIABILITY OF TESTING CONCRETE STRENGTH BY NON-DESTRUCTIVE METHODS ON THE BASIS OF THEIR COMBINATION

Dmitry U. SNEZHKOVA, e-mail: snezhkov-d-u@yandex.ru

Sergei N. LEONOVICH, e-mail: SLeonovich@mail.ru

Belarus National Technical University, prosp. Nezavisimosti, 65, Minsk 220013, Republic Belarus

Abstract. The discrepancy between estimates of the concrete strength when using different non-destructive test methods is a well-known fact. The use of calibration dependences for the concrete testing in situ is always associated with the influence on the test results of such factors, which were absent in the process of calibration tests. The article discusses the issues of combining of non-destructive standard methods of concrete strength testing: ultrasonic pulse method and rebound resilience method. Combining these non-destructive testing techniques makes it possible not only to reduce the error when estimating the strength of concrete structures, and to enhance monitoring by expanding the list of controlled parameters of concrete, in particular, its modulus of elasticity. A necessary condition for effective integration of physically different methods is their complementarity which is a consequence of differences in the physics of measurement processes. It can manifest itself in the mutual compensation of sensitivity of combined methods against disturbing factors. Another manifestation of complementarity is the possibility to extrapolate the data of one test method to the area where it physically can't be applied. The second test method plays the extrapolating (calibration) role. The article presents the data of concrete strength testing of monolithic columns by the combined method. An acceptable precision of concrete strength control can be obtained on the basis of standardized test methods without using the correction procedure of their calibration dependencies.

Key words: concrete, non-destructive testing, ultrasonic technique, indentation, combination, additive algorithm, multiplicative algorithm, complementarity, correlation.

Введение

Повышение достоверности контроля прочности бетона по его напряженно-деформированному состоянию в процессе испытания контрольных образцов

неразрушающими методами составляет основную проблему при испытании прочности бетона конструкций. Проявляется она в том, что косвенные параметры различных неразрушающих ме-

тодов испытаний в неодинаковой степени подвержены влиянию изменений физико-механических свойств контролируемого бетона. Это значит, что оценка прочности при разных методах может

различаться, поскольку она зависит не только от фактической прочности бетона (определяемой прессируемыми испытаниями образцов), но и от других его параметров: модуля упругости, динамической вязкости, структурной неоднородности и др. Чувствительность этих параметров бетона у методов испытаний, различающихся по своей 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.

Основой предлагаемого решения задачи комбинирования является подбор неразрушающих методов, обладающих свойством *комплементарности* (взаимной дополняемости) [1, 2], выражающимся во взаимной полной или частичной компенсации некоторых погрешностей при определении прочности бетона.

Алгоритм комбинирования

Известен ряд публикаций [3–6], 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 . Многообразные зависимости $f_c = F(V, I)$

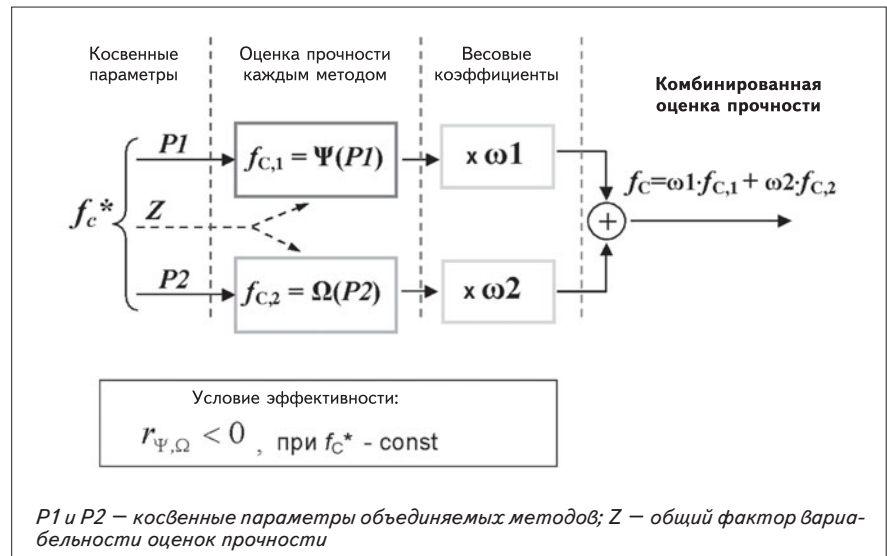


Рис. 1. Алгоритм аддитивного объединения оценок прочности бетона двух методов испытаний

[5, 6] свидетельствует о значительной неопределенности результата объединения методов.

Другой подход [1, 2] основан на объединении не косвенных параметров методов, а оценок прочности бетона, полученных каждым из методов.

Методически подбор комплекментарных методов и алгоритм их объединения могут базироваться на основе следующих факторов:

- статистическом анализе массива экспериментальных данных испытаний одних и тех же образцов бетона разными методами при достаточно широком спектре факторов вариации прочности с анализом результатов испытания образцов на предмет их корреляции;
- анализе физики процессов, лежащих в основе измерений прочности бетона с уточнением характера влияния переменных факторов на косвенные параметры рассматриваемых методов испытаний, включая в комплекс те методы, чувствительность которых к переменным факторам имеет разные знаки.

Обе методики комбинирования приводят в итоге к одинако-

вому алгоритму объединения — с использованием весовых коэффициентов, к так называемому аддитивному объединению (рис. 1) вида:

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

где $f_{c,j}$ — оценка прочности бетона j -м методом; μ_j и ω_j — весовые коэффициенты j -го метода.

Алгоритм (1) при статистическом подходе фактически является алгоритмом обработки массива данных неравноточных измерений. В качестве весовых коэффициентов μ_j используются величины, обратно пропорциональные дисперсиям оценок прочности $f_{c,j}$.

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_k — количество испытаний при построении градуировочных зависимостей для k -го метода в отдельности.

Фактор варибельности Z может проявить себя коррелированностью погрешностей каждого из методов, 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

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

где σ_1 и σ_2 — среднее квадратическое отклонение оценок прочности бетона соответствующим методом; r — коэффициент корреляции,

$$r = \frac{1}{n} \frac{\sum_{i=1}^n (f_{c1,i} - \bar{f}_{c1})(f_{c2,i} - \bar{f}_{c2})}{\sigma_1\sigma_2}.$$

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

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

При близких значениях σ_1 и σ_2 весовые коэффициенты μ_1 и μ_2 также будут приблизительно равны, дисперсия среднего арифметического f_{c1} и f_{c2} будет равна дисперсии для каждого из методов, т. е. выигрыш от комбинирования методов по формуле (1) отсутствует.

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

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

откуда следует, что критерием для подбора двух комплексобразующих методов может явиться отрицательное значение ко-

эффициента корреляции r оценок прочности при действии общего фактора варибельности Z . В этом случае показатель неопределенности σ_Σ комбинированной оценки прочности (или иного параметра) бетона будет меньше показателя каждого из методов в отдельности.

Разработанный научно-исследовательской лабораторией кафедры технологии строительного производства Белорусского национального технического университета (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 σ_d — динамический предел прочности материала; E_d^* — приведенный динамический модуль упругости системы «испытуемый материал — индентор»; ψ и I_0 — коэффициенты, зависящие от физических и конструктивных параметров ударного механизма склерометра: энергии удара, массы индентора и др.

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» регламентируют определение прочности бетона по скорости распространения ультразвукового импульса. В первом при-

ближении связь прочности бетона и скорости ультразвукового импульса можно выразить линейной зависимостью вида

$$f_{c,US} = a_1 c + a_0, \quad (7)$$

где c — скорость распространения ультразвукового импульса; a_0 и a_1 — коэффициенты.

В соответствии с формулами классической акустики скорость распространения ультразвуковых колебаний в бетонном массиве определяется его упругими свойствами:

$$c_l = \sqrt{\frac{E_d(1 - \nu_d)}{\rho(1 + \nu_d)(1 - 2\nu_d)}}, \quad (8)$$

$$c_t = \sqrt{\frac{E_d}{2\rho(1 + \nu_d)}} \approx 0,61c_l,$$

где c_l и c_t — скорости распространения продольной и поперечной упругих волн в массиве; ρ — плотность материала; E_d и ν_d — динамический модуль упругости и коэффициент Пуассона среды соответственно.

Из формул (7) и (8) следует, что положительному приращению модуля упругости E соответствует положительное приращение оценки прочности бетона $f_{c,US}$. Приращение же индекса отскока I в соответствии с (6) при увеличении параметра упругости E_d^* будет отрицательным, т. е. по фактору упругости бетона метод упругого отскока и ультразвуковой импульсный метод являются комплементарными, а модуль упругости бетона является фактором варибельности для указанных методов определения его прочности.

Рабочий 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 импульс-

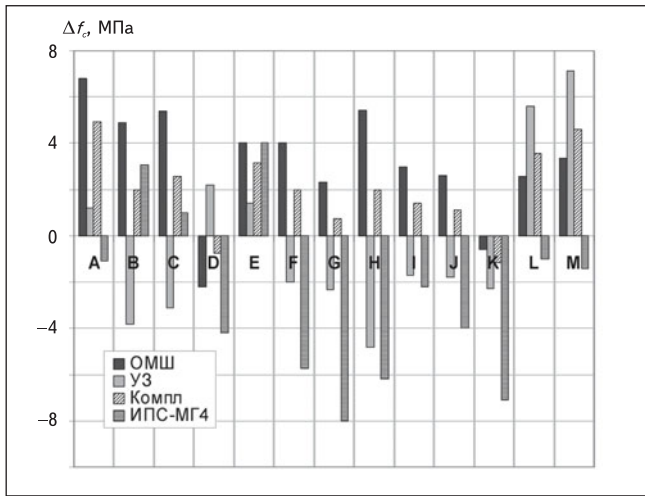


Рис. 2. Разница оценок прочности бетона монолитных колонн 500×500 мм (группа I) методом отрыва со скалыванием (экспертный метод) и неразрушающими методами (бетон проектного класса С35/45, срок твердения – 115–140 сут)

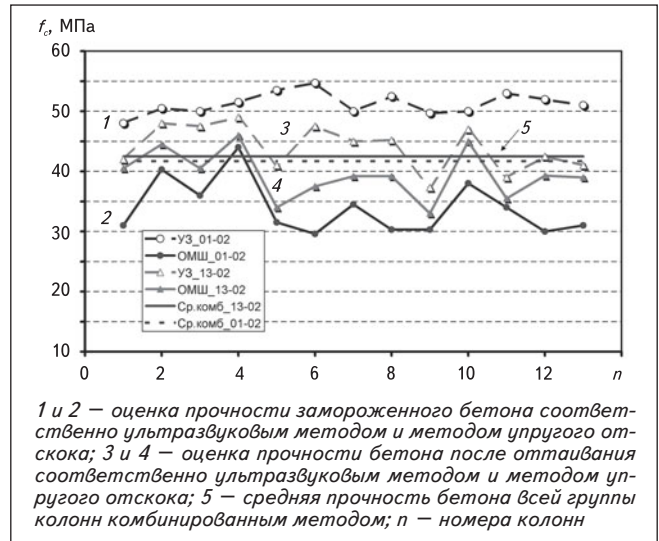


Рис. 3. Прочность бетона монолитных колонн по данным неразрушающих методов испытаний (проектный класс бетона по прочности С35/45)

ным методом [1] и опорного метода, в соответствии с формулой

$$f_{c,comb} = f_{c,bas} + \delta(\Delta f_c), \quad (9)$$

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

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

где k – коэффициент, рассчитываемый по формуле

$$k = \frac{df_{c,bas}}{df_{c,add}}. \quad (10)$$

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

$$k = \frac{df_{c,Sh}}{df_{c,us}} = \frac{4}{5} \frac{f_{c,Sh} \rho^2 (1 - 2\nu_c)^2}{2AE_c^* \left(\frac{E_c^*}{E_I^*} + 1 \right) (1 - \nu_c)^2}, \quad (11)$$

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

Результаты натурных испытаний

На рис. 2 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) метод с объединением оценок прочности по формуле

$$f_{is,l} = \frac{f_{is,1} + \theta f_{is,2}}{1 + \theta}, \quad (12)$$

где $f_{is,1}$ и $f_{is,2}$ – оценки прочности бетона конструкции ультразвуковым методом и методом упругого отскока; θ – относительный коэффициент влияния (табл. 1).

Ордината гистограмм соответствует разнице оценок прочности бетона колонн методом отрыва со скалыванием $f_{c,СКОЛ}$ и неразрушающим методом $f_{c,b}$ т. е. $\Delta f_{c,l} = f_{c,СКОЛ} - f_{c,l}$; индексы горизонтальной оси графика обозначают условные номера колонн.

Для первых двух методов испытаний использовались градуировочные зависимости «косвенный параметр – прочность бетона», полученные стандартной методикой совместных с прессовы-

ми испытаний образцов-кубов. Данные, полученные методом ударного импульса (прибор ИПС-МГ4.01), корректировались поправочной функцией:

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

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

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

Как следует из табл. 2, наименьший разброс оценок (показатель $S_{Tm}/f_{cm,СКОЛ}$) получается при совместном использовании методов упругого отскока и ультразвукового импульсного.

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

$$S_T^i = \sqrt{\frac{\sum_{j=1}^n (f_{c,cube,j}^i - f_{c,СКОЛ})^2}{n - 2}}, \quad (13)$$

где $f_{c,cube,j}^i$ – оценка прочности j -го участка контроля i -м неразрушающим ме-

тодом; $f_{c, \text{скол}}$ — оценка прочности бетона колонны по ГОСТ 22690—2012; n — количество испытаний (участков контроля).

Полученные данные свидетельствуют в пользу 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 сут и после оттаивания.

Монолитные колонны бетонировались с использованием технологии электропрогрева греющим проводом, с последующим 3—5-суточным выдерживанием при положительной температуре около 2...5 °С, после чего произошло снижение температуры до отрицательных значений. Испытания проводились в возрасте бетона 14—16 сут, температура бетона на момент испытаний составила –8...–10 °С. Полученным данным испытаний соответствуют кривые 1 и 2 на рис. 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, протекающих при использовании 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).

1. Значения относительного коэффициента влияния для бетона классов С25/30...С35/45

Срок твердения бетона t_H , сутки	$1 \leq t_H < 2$	$2 \leq t_H < 4$	$4 \leq t_H < 7$	$7 \leq t_H < 28$	$28 \leq t_H$
Относительный коэффициент влияния θ	3,5	2,4	1,9	1,5	1,35

2. Погрешность оценки прочности бетона монолитных колонн неразрушающими методами

Тип прибора	Группа колонн I			Группа колонн II		
	$S_{Tm}/f_{cm, \text{скол}}$, %	r	f_{cm} МПа	$S_{Tm}/f_{cm, \text{скол}}$, %	r	f_{cm} МПа
ОМШ-1	12,4*/7,7	0,92	42	8	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	12/10,1	0,93	47,8	8,5	0,91	45,7
Скол-МГ4	0	1	45,2	0	1	43,9

Примечания.

- S_{Tm} — среднее значение остаточного среднего квадратического отклонения оценок прочности бетона группы колонн неразрушающим методом, $S_{Tm} = (\sum S_T)/n$; r — коэффициент корреляции; f_{cm} — средняя прочность для группы.
- Звездочкой отмечены данные, полученные без коррекции градуировочных зависимостей.

Кривые 3 и 4 рис. 3 соответствуют данным испытаний тех же колонн после оттаивания в течение 4 сут при средней температуре воздуха 5 °С. Разброс оценок прочности каждым из методов заметно уменьшился, а коэффициент корреляции оценок прочности поменял знак и увеличился до значения 0,72.

В приведенном примере (см. рис. 3) можно отметить две особенности, свидетельствующие в пользу применения комбинированного метода неразрушающих испытаний бетона в конструкциях:

- показатели испытаний оттаявшего бетона (показаны треугольными маркерами на рис. 3) 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

3. Показатели испытаний прочности бетона, МПа (%), монолитных колонн

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

(показаны горизонтальными линиями на рис. 3) практически совпадают: для замороженного бетона $f_{cp} = 42,1$ МПа, для оттаявшего — $f_{cp} = 45,5$ МПа.

На рис. 4 и в табл. 3 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 показыва-

ют, что для оценки прочности бетона f_c в проектном возрасте (28 сут) комбинированным методом после оттаивания бетона в течение 4 сут при положительной температуре можно обойтись без введения каких-либо корректирующих коэффициентов, используя зависимость (12) при значении весового коэффициента $k = 1,31$.

Применение формулы (12) для оценки прочности замороженного бетона дало завышение около 3 МПа (около 7 %), т. е. является удовлетворительным результатом, учитывая, что погрешность для отдельных методов, входящих в комплекс, составляет: 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 различаются. Специфичность условий укладки и твердения бетона монолитных конструкций характеризуется большой вариабельностью факторов, влияющих на его прочностные показатели. Преждевременное расплубливание конструкции, ее замораживание — оттаивание на ранней стадии набора бетоном прочности и другие факторы могут приводить к заметному снижению прочно-

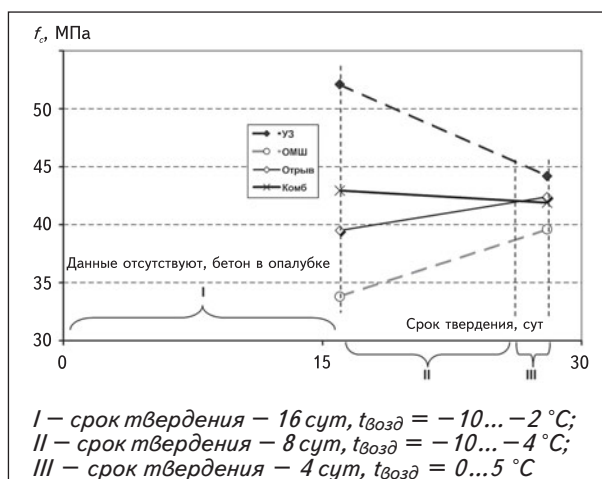


Рис. 4. Кинетика твердения монолитного бетона по данным неразрушающих методов испытаний

сти 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 ее, «экстраполировать» контролируемый показатель поверхностного слоя на внутренние области.

Рассмотренный здесь популярный метод упругого отскока, судя по наблюдающейся тенденции развития механических методов контроля [1], трансформируется в более информативный метод динамического индентирования [7]. Он позволяет отдельно определять модуль упругости E и твердость бетона H — параметр, имеющий более устойчивую корреляцию с прочностью бетона, чем индекс отскока [7, 8]. 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 (ГОСТ 17624) «чувствовать» со-

стояние внутренних участков бетонного массива, в отличие от механических методов индентирования, область проникания в бетон которых не распространяется более чем на 1–2 см.

На рис. 5 показана схема испытаний с использованием экстраполирующего комбинированного метода для определения прочности бетона подповерхностной области бетонного массива конструкции [9]. Опорным является метод динамичес-

кого индентирования [7, 8], который позволяет по косвенным параметрам определить модуль упругости E поверхностного слоя бетона и его прочность f_c . Область 5 (см. рис. 5) — радиус зоны пластической деформации бетона — определяется диаметром отпечатка индентора 4. Свойства этой области определяют оценку прочности бетона в слое на глубину, приблизительно равную 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, а также от метода регистрации времени распространения ультразвукового импульса.

В качестве калибровочного (экстраполирующего) использован ультразвуковой импульсный метод. С его помощью проводится коррекция данных метода динамического индентирования.

Параметром, характеризующим распространение ультразвукового импульса, является так называемая дифференциальная скорость:

$$c_{\text{dif}} = \Delta L / \Delta T.$$

По мере вовлечения в процесс распространения акустического импульса слоев бетона, располо-

женных на большей глубине от поверхности, происходит изменение конфигурации фронта упругой волны (позиции *a*, *b*, *c* на рис. 5) и увеличение скорости перемещения точки выхода фронта на поверхность.

Наибольшее из массива значений $\Delta L/\Delta T$, полученных по результатам профилирования участка контроля, будет соответствовать скорости ультразвукового импульса в подповерхностной области бетона [1].

По скорости ультразвука *c* из соотношений (8) 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 $f_{c,l}$ в прочность бетона подповерхностного слоя f_c .

Прочность бетона f_c участка контроля (см. рис. 5) определяют в зависимости от разницы динамических модулей упругости поверхностного слоя бетона E и внутренней области бетона участка контроля $E_{d,c}$ решением системы уравнений:

$$f_c = \frac{1}{1+\theta} (\theta e^{0,091(E_{d,c}-E)} f_{c,l} + f_{c,US}); \quad (14)$$

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

где f_c — прочность бетона контролируемого участка конструкции, МПа; $f_{c,l}$ и $f_{c,US}$ — соответственно оценки прочности бетона участка контроля методом индентирования и ультразвуковым импульсным методом, МПа; θ — безразмерный коэффициент.

Выводы

1. Несовпадение оценок проч-

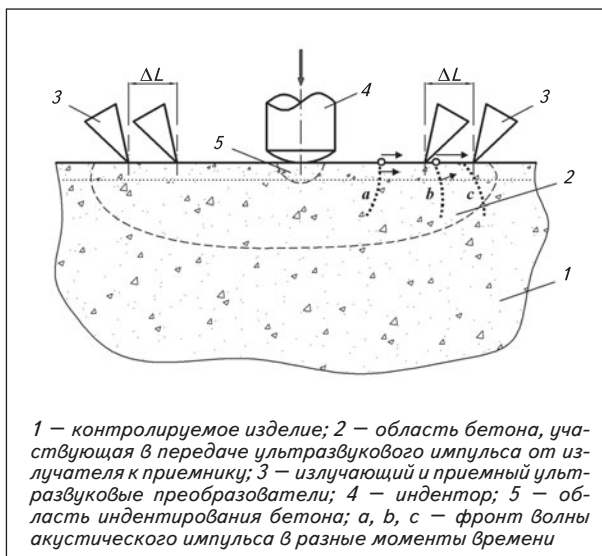


Рис. 5. Схема испытаний экстраполирующим комбинированным методом «индентирование — ультразвуковой импульсный метод»

ности бетона при использовании разных неразрушающих методов испытаний — общеизвестный факт. С формальных позиций, различие результатов можно объяснить 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 технические нормативы правовых актов рекомендуют применять процедуру коррекции градуировочных зависи-

мости 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.

2. Объединение нескольких методов неразрушающих испытаний прочностных показателей бетона, обладающих

свойством комплементарности, позволяет повысить не только точность оценки прочности за счет взаимной компенсации неточностей градуировочных зависимостей используемых методов, но и информативность контроля благодаря расширению перечня контролируемых параметров бетона, в частности его модуля упругости. С позиций метрологии, достигаемое повышение точности контроля прочности бетона обусловлено взаимной компенсацией неисключенных систематических погрешностей комбинируемых по аддитивному алгоритму методов.

3. Натурные испытания показали, что в ряде случаев приемлемую для практики точность контроля прочности бетона проектных классов по прочности С20/25...С35/45 можно получить на основе стандартизованных методов испытаний без использования процедуры коррекции их градуировочных зависимостей.

ЛИТЕРАТУРА / REFERENCES

1. Снежков Д. Ю., Леонович С. Н. Основы мониторинга возводимых и эксплуатируемых железобетонных конструкций неразрушающими методами. Минск: БНТУ, 2016. 330 с.

1. Snezhkov D. U., Leonovich S. N. *Osnovy monitoringa vozvodimyykh i ekspluatiruemyykh zhelezobetonnykh konstruktsiy nerazrushayushchimi metodami* [Basics of monitoring of erected and exploited reinforced conc-

- rete structures by non-destructive methods]. Minsk, BNTU Publ., 2016. 330 p. (In Russian).
2. Leonovich S.N. Snezhkov D.U. Complex method of strength estimation of the monolithic reinforced concrete structures [Комплексный метод оценки прочности монолитных железобетонных конструкций]. *Concrete structures stimulators of development. Proc. of International FIB Conference. Dubrovnik, 2007*, pp. 947–954.
 3. Джонс Р., Фэкзоар И. Неразрушающие методы испытаний бетонов. М. : Стройиздат, 1974. 295 с.
 3. Dzhons R., Fekeoar I. *Nerazrushayushchie metody ispytaniy betonov* [Non-destructive methods for testing concretes]. Moscow, Stroyizdat Publ., 1974. 295 p. (In Russian).
 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* [Комбинированный неразрушающий контроль бетона. Общие рекомендации по определению прочности бетона в натуральных условиях комбинированным неразрушающим методом. Материалы и конструкции], 1993, pp. 43–49.
 5. Pucinotti R. The use of multiple combined non destructive testing in the concrete strenght assessment: applications on laboratory specimens [Использование комбинированного неразрушающего контроля для оценки прочности бетона: применение на лабораторных образцах]. [Electronic resource], 2003. Available at: http://www.ndt.net/article/hsndtct2007/files/Pucinotti_Crisci_etat.pdf. (accessed 02.02.2008).
 6. Runkiewicz L., Runkiewicz M. Application of the ultrasonic and sclerometric Methods for the assessment of the structures made of high-strength concrete (HSC) [Применение ультразвуковых и склерометрических методов для оценки состояния конструкций из высокопрочных бетонов]. [Electronic resource], 2003. Available at: <http://www.ndt.net/article/wcndt00/>. (accessed 24.12.2007).
 7. Matsulevich O. Rudnitsky V., Kren A. Device with advanced facilities for nondestructive testing of mechanical properties of concrete [Прибор с расширенными возможностями для неразрушающего контроля механических свойств бетона]. *Proc. of 10th European Conference on NDT* [Electronic resource]. Moscow, 2010. Available at: http://www.idspektr.ru/10_ECNDT/reports/1_01_38.pdf (accessed 22.02.2010).
 8. Способ определения прочности бетона в конструкциях методом неразрушающего контроля: пат. № 20585 Респ. Беларусь, № а 20130687; заявл. 29.05.2013; опубл. 09.08.2016 // Афіцыйны бюл. нац. центр інтелектуал. Уласнасці. 2016. № 6 (113). С. 111–112.
 8. Sposob opredeleniya prochnosti betona v konstruktsiyakh metodom nerazrushayushchego kontrolya [Method for determining the strength of concrete in structures using the non-destructive testing]: pat. 20585 Resp. Belarus' № а 20130687; yayavl. 29.05.2013; opubl. 09.08.2016. *Afitsiyny byul. Nats. tsentr intelektual. Ulasnastsi*, no. 6 (113), pp. 111–112. (In Russian).
 9. Способ определения твердости и модуля упругости бетона: пат. 16469 Респ. Беларусь, № а 20100971; заявл. 24.06.2010; опубл. 30.10.2012 // Афіцыйны бюл. нац. центр інтелектуал. Уласнасці. 2012. № 5. С. 140.
 9. Sposob opredeleniya tverdosti i modulya uprugosti betona [Method for determining the hardness and modulus of elasticity of concrete]: pat. 16469 Resp. Belarus' № а 20100971; yayavl. 24.06.2010; opubl. 30.10.2012. *Afitsiyny byul. nats. tsentr intelektual. Ulasnastsi*, no. 5, p. 140. (In Russian).

Для цитирования: Снежков Д. Ю., Леонович С. Н. Повышение достоверности контроля прочности бетона неразрушающими методами на основе их комбинирования // Промышленное и гражданское строительство. 2018. № 1. С. 25–32.

For citation: Snezhkov D. U., Leonovich S. N. Improving Reliability of Testing Concrete Strength by Non-Destructive Methods on the Basis of Their Combination. *Promyshlennoe i grazhdanskoe stroitel'stvo* [Industrial and Civil Engineering], 2018, no. 1, pp. 25–32. ■

ЖУРНАЛ «ПРОМЫШЛЕННОЕ И ГРАЖДАНСКОЕ СТРОИТЕЛЬСТВО» ИНДЕКСИРУЮТ:

НАУЧНАЯ ЭЛЕКТРОННАЯ БИБЛИОТЕКА
eLIBRARY.RU

Russian Science Citation
Index (RSCI) на платформе
Web of Science

 **ULRICHSWEB™**
GLOBAL SERIALS DIRECTORY

САЙТ ЖУРНАЛА «ПРОМЫШЛЕННОЕ И ГРАЖДАНСКОЕ СТРОИТЕЛЬСТВО»: **www.pgs1923.ru**