

АНАЛИЗ МЕТОДИК НЕРАЗРУШАЮЩИХ ИСПЫТАНИЙ БЕТОНА КОНСТРУКЦИЙ ПО ДЕЙСТВУЮЩИМ ГОСУДАРСТВЕННЫМ СТАНДАРТАМ И НОРМАМ ЕВРОСОЮЗА

Канд. техн. наук СНЕЖКОВ Д. Ю., докт. техн. наук, проф. ЛЕОНОВИЧ С. Н., инж. ВОЗНИЩИК А. В.

Белорусский национальный технический университет

Одной из распространенных ошибок при неразрушающих испытаниях бетона является использование в качестве градуировочных зависимостей метода так называемых универсальных или базовых зависимостей, закладываемых в измерительный алгоритм большинства современных приборов контроля. В известной степени на это подталкивают пользователя сам факт наличия такой зависимости в приборе и возникающая иллюзия достоверности результата, поскольку он индицируется в единицах прочности бетона.

Проблема заключается в том, что измерительные процессы известных неразрушающих методов испытания прочности бетона не являются адекватными по напряженно-деформированному состоянию бетона в зоне контроля ни друг другу, ни процессу прессового испытания бетонного образца на одноосное сжатие по ГОСТ 10180–90 [1]. Проявляется это в том, что косвенные параметры неразрушающих методов испытаний в разной степени подвержены влиянию изменений физико-механических свойств контролируемого бетона. Это значит, что оценки прочности неразрушающими методами будут зависеть не только от прочности бетона (определяемой прессовыми испытаниями образцов), но и от других характеристик: модуля упругости, динамической вязкости, структурной неоднородности и др. Безусловно, вариации физико-механических свойств бетона оказывают влияние и на результаты метода прессовых испытаний. Но поскольку этот метод принят в качестве эталонного, то его результат рассматривается как «истинная» оценка прочности бетона, а все остальные методы должны

на нее «равняться». Равенство результатов достигается подбором градуировочных зависимостей под конкретные условия испытаний. Универсальными такие зависимости могут рассматриваться лишь для достаточно узкого диапазона влияющих факторов.

Нормирование неразрушающих методов испытаний бетона не претерпело за последние 20–25 лет каких-либо радикальных изменений; нормативы тех лет [2, 3] действуют и сейчас. Более существенными явились изменения критериев в оценке нормативных прочностных показателей бетона в конструкциях в связи с использованием вероятностно-статистических подходов в оценке свойств конструкционных материалов, в том числе бетона. В настоящее время в Республике Беларусь действуют два основных документа, регламентирующих процедуру оценки класса по прочности бетона в конструкциях по данным неразрушающих методов испытаний: СНБ 5.03.01–02 (п. 13.2.1) [4] и СТБ EN 13791–2009 [5], действующий с 1 января 2010 г., а также стандарты [2, 3], регламентирующие методики испытаний.

Основным объектом анализа выбран СТБ EN 13791–2009, поскольку он по ряду пунктов существенно отличается от остальных нормативов. К сожалению, перевод документа нельзя признать качественным, даже перевод названия оригинального стандарта DIN EN 13791–2009 [6] – «Оценка прочности на сжатие конструкций и элементов сборного бетона в реальных условиях» – весьма вольный и неудачный. Название оригинала *Bewertung der Druckfestigkeit von Beton in Bauwerken oder in Bauwerksteilen* дословно переводится «Оценка прочности на

сжатие бетона в конструкциях или в элементах конструкций», тем самым охватывая бетон любой технологии изготовления. Используемый же в официальном переводе термин «сборный» применяют, как правило, для бетона заводского изготовления, что неизбежно вызывает вопрос о правомерности использования этого норматива в монолитном строительстве.

Существенным отличием евростандарта DIN EN 13791–2009 и соответственно СТБ EN 13791–2009 от других действующих в республике нормативов является иной критерий соответствия бетона конструкций классу по прочности: евростандарт допускает снижение характеристической прочности бетона конструкций и сборных элементов на 15 % относительно класса (по СТБ EN 206-1–2009 [7]) используемого бетона.

СНБ 5.03.01–02 (п. 13.2.1) [4] не допускает снижения прочностных показателей бетона в конструкции, несмотря на то, что различия условий формирования структуры бетона малоразмерного испытательного образца и массивной армированной конструкции очевидны. Такой подход к оценке способствует возникновению конфликтности отношений между проектировщиком, производителем бетонных работ и заказчиком, поскольку по результатам испытаний, если они проводятся, производитель работ уже заранее обречен быть в невыгодном положении.

Сопоставить рассмотренные критерии соответствия позволяет приведенная ниже статистика испытаний бетона ряда объектов монолитного строительства в г. Минске. На рис. 1

приведены данные испытаний монолитных колонн высотного здания из бетона проектного класса по прочности С30/37.

У колонн на отметках +6,300, +9,300, +18,300 м характеристическая прочность оказалась ниже 37 МПа, что по действующему СНБ [4] не позволяет отнести бетон к классу С30/37. В то же время по [5] указанные колонны подтверждают проектный класс бетона, поскольку нормативное значение характеристической прочности составляет 31 МПа.

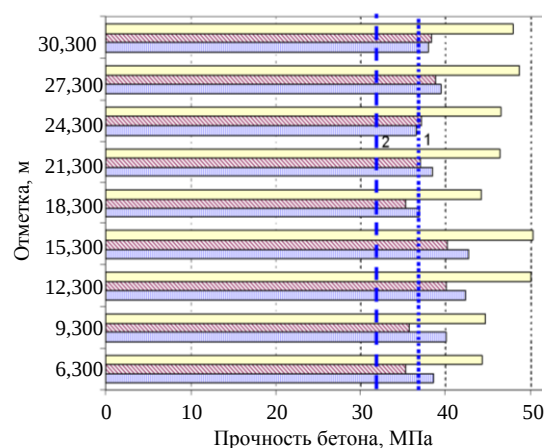


Рис. 1. Распределение по отметкам оценок прочности бетона монолитных колонн: 1 – линия нормативного значения гарантированной прочности бетона по СНБ 5.03.01–02 (37 МПа); 2 – то же по СТБ EN 13791–2009 (31 МПа); $\square$ – среднее значение оценки прочности колонн f_{cm} ; $\square$ – оценка гарантированной прочности бетона колонн по СНБ 5.03.01–02; $\square$ – то же по СТБ EN 13791–2009

На рис. 2 приведены гистограммы, построенные по данным испытаний на однотипных объектах более 110 монолитных колонн из бетона проектных классов С25/30, С30/37 каждого.

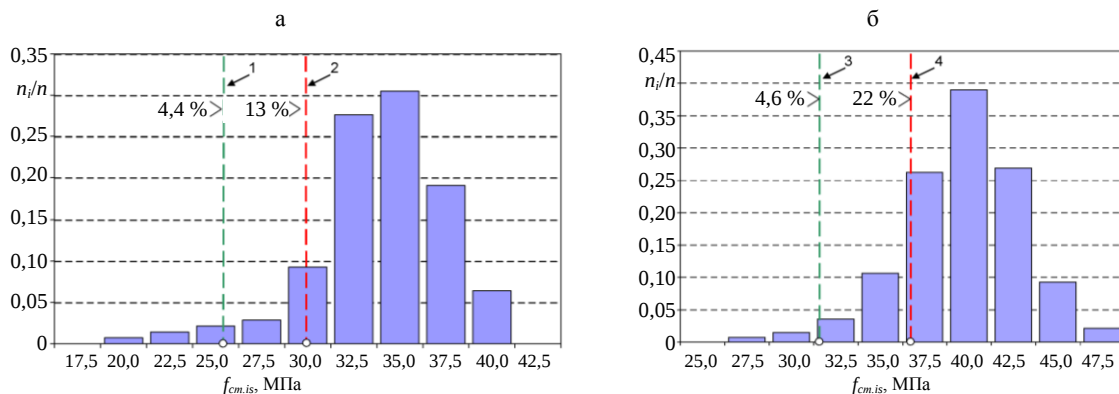


Рис. 2. Гистограммы средних значений оценок прочности бетона проектных классов С25/30 (а) и С30/37 (б) неразрушающими методами: n_i/n – относительная частота оценок; 1 – линия гарантированного значения прочности по [5] (26 МПа); 2 – то же по [4] (30 МПа); 3 – то же по [5] (31 МПа); 4 – то же по [4] (37 МПа)

Установленные СТБ EN 13791–2009 значения характеристической прочности бетона обеспечивают устойчивое подтверждение проектного класса бетона для 95 % конструкций. По назначенной же действующим СНБ 5.03.01–02 гарантированной прочности выбраковке подлежат 22 % конструкций из бетона класса С30/37 и 13 % – класса С25/30. Рост процента несоответствия проектному показателю по прочности закономерно наблюдался с повышением класса используемых бетонов – от С25/30 до С35/45 включительно.

Различия в методиках построения градуировочных зависимостей и расчета характеристической прочности также имеют место, хотя и являются менее значимыми. В соответствии с СТБ EN 13791–2009 градуировочная зависимость может применяться только для бетона и условий, для которых данная зависимость составлена. При оценке характеристической (гарантированной) прочности на сжатие бетона в конструкции действуют следующие условия:

- оценка каждой области испытаний должна базироваться минимум на 15 местах измерений;
- стандартное отклонение должно соответствовать расчетной величине или 3 Н/мм^2 . При этом действительно наибольшее значение. Оцененная характеристическая прочность на сжатие области испытаний является наименьшей из двух следующих величин:

$$f_{ck,is} = f_{m(n),is} - 1,48s \quad (1)$$

или

$$f_{ck,is} = f_{is, \min} + 4, \quad (2)$$

где s – стандартное отклонение результатов испытаний; $f_{ck,is}$ – характеристическая (гарантированная) прочность на сжатие бетона в конструкции; $f_{m(n),is}$ – среднее значение n результатов испытаний бетона на прочность на сжатие.

Статистическая обеспеченность гарантированной прочности по формуле (1) составляет 93 %.

В соответствии с СНБ 5.03.01–02 (п. 13.2), если расчеты выполняются по данным, полученным при натурном обследовании конструкций, значение гарантированной прочности бетона $f_{c, \text{cube}}^G$ следует принимать равным 80 % от средней прочности бетона (в МПа), определенной ускоренными методами, либо равным значению гарантированной с обеспеченностью 0,95 прочности бетона (в МПа), определенной по результатам статистической оценки. Для промежуточ-

ных значений условного класса бетона по прочности на сжатие расчетные характеристики допускается определять линейной интерполяцией.

Для низких классов бетона условия соответствия прочности бетона нормативному значению более жесткие по СТБ EN 13791 [5], чем по СНБ 5.03.01–02 [4]; разница минимальных средних значений прочности для бетона класса С8/10 достигает 5 МПа.

В DIN EN 13791–2009 (СТБ EN 13791–2009) введен термин «базовая градуировочная зависимость». В качестве таковой берется зависимость для соответствующего неразрушающего метода, полученная при достаточно высокой статистической обеспеченности процедуры ее построения. В СТБ EN 13791–2009 приведены варианты базовых градуировочных зависимостей, которые можно сопоставить с зависимостями, построенными по рекомендациям ГОСТ 17624–87 и ГОСТ 22690–88, а также с зависимостями, полученными авторами по результатам натурных испытаний объектов строительства.

На рис. 3 приведен ряд градуировочных зависимостей для ультразвукового импульсного метода.

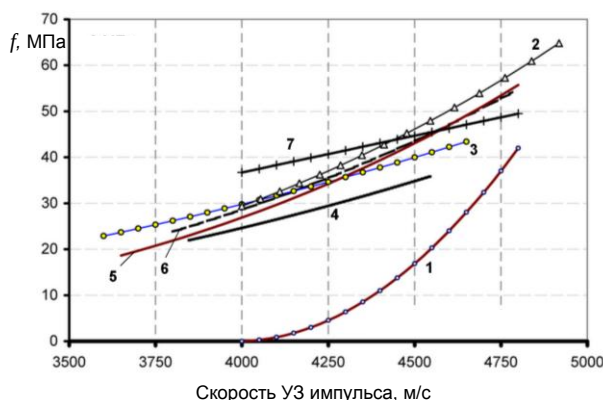


Рис. 3. Градуировочные зависимости ультразвукового импульсного метода: 1 – базовая кривая по [5]; 2 – состав № 2 (табл. 1): проектный класс – С35/45, возраст – 28 сут.; 3 – состав № 1 (табл. 1): С25/30, 28 сут.; 4 – состав № 2 (табл. 1): С35/45, 2 сут.; 5 – AV^4 ; 6 – $MV^{3.53}$, состав № 3 (табл. 1): С30/37, 28 сут.; 7 – базовая кривая УК1401

Зависимости 2 и 3 на рис. 3 получены авторами по данным испытаний конструкций и образцов из бетона на объектах монолитного строительства «Минск-Арена» и ОЦ «Столица» в 2004–2009 гг. Составы приведены в табл. 1: кривая 2 соответствует составу № 2 (С35/45), кривая 3 – составу № 1 (С25/30).

Таблица 1

Составы бетона и градуировочные зависимости

Номер и характеристики состава	Расход				Градуировочная зависимость ультразвукового метода	
	песка		щебня		цемент, кг	В проектном возрасте (28 сут.)
	кг	м ³	кг	м ³		
№ 1*; C25/30; F100; W6	750	0,50	1100	0,79	445	$f_c = 3 \cdot 10^{-8} V^{2,498}$, МПа
№ 2**; C35/45; F100	710	0,47	1000	0,71	600	$f_c = 0,47 \cdot 10^{-12} V^{3,83}$, МПа
№ 3**; C30/37	730	0,49	1050	0,75	540	$f_c = 4,3 \cdot 10^{-12} V^{3,56}$, МПа

* Дозирование воды на осадку конуса 13–15 см (марка по удобоукладываемости ПЗ).

** Дозирование воды на осадку конуса 16–18 см (П4).

Кривая 4 получена для бетона состава № 2, но в возрасте 2 сут. Кривая 5 – рекомендуемая ГОСТ 17624–87 зависимость вида $f_c = AV^4$ при оценке прочности бетона в конструкциях. Кривая 6 может рассматриваться в качестве базовой для семейства бетонов по табл. 1. Кривая 7 соответствует градуировочной зависимости прибора УК1401. Заметно сильное отличие базовой кривой 1 по СТБ EN 13791–2009 от всех остальных. Кроме того, для указанной зависимости оговаривается диапазон косвенного параметра – скорости ультразвукового импульса – 4000–4800 м·с⁻¹, что, по мнению авторов, выглядит несколько странным, так как диапазон значений скорости ультразвукового импульса 3500–4000 м·с⁻¹ выпадает из рассмотрения. Именно этот диапазон скоростей составляет область наиболее эффективной работы метода, а вот значения скорости ультразвука более 4600 м·с⁻¹, напротив, – область пониженной достоверности оценок данного метода. Заметим, что в [7] не предписывается использование только указанной зависимости, также не оговариваются ограничения на иные кривые.

Подобная ситуация наблюдается и с градуировочными зависимостями метода упругого отскока и отрыва со скалыванием. Базовые зависимости этих методов по СТБ EN 13791–2009 приведены на рис. 4 и 5.

Следует обратить внимание на значительное расхождение градуировочных зависимостей метода упругого отскока, составляющее около 20 МПа для всего диапазона. В отличие от ультразвукового метода косвенный параметр метода упругого отскока зависит не только от физико-механических свойств бетона, но и от параметров самого склерометра. Поэтому имеющееся отличие зависимостей можно объяснить проявлением указанного фактора.

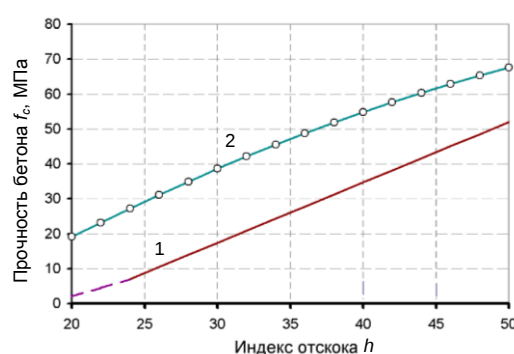


Рис. 4. Градуировочные зависимости метода упругого отскока: 1 – базовая кривая по СТБ EN 13791–2009; для $20 < h < 24$

$$f_c = 1,25h - 23;$$

для $24 < h < 50$

$$f_c = 1,73h - 34,5;$$

2 – зависимость по данным натурных испытаний:

$$f_c = 156,6e^{42/h}$$

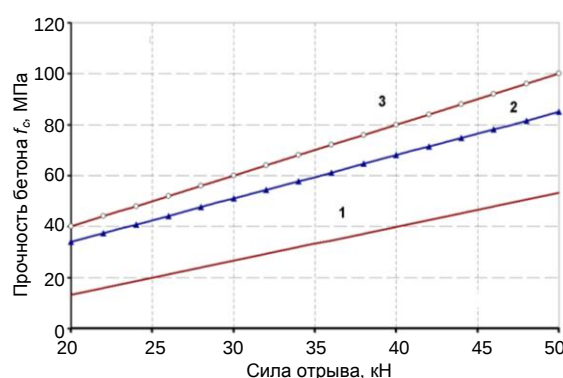


Рис. 5. Градуировочные зависимости метода отрыва со скалыванием: 1 – базовая кривая по СТБ EN 13791–2009; для $20 \text{ кН} < F < 60 \text{ кН}$

$$f_c = 1,33(F - 10); \quad (3)$$

2 и 3 – зависимости по ГОСТ 22690–88:

$$f_c = m_1 m_2 F, \quad (4)$$

где $m_1 = 1,0$; $m_2 = 1,7; 2,0$

Расчетные параметры для метода отрыва со скалыванием также зависят от характеристик прибора: диаметра анкера, его заглубления в массив бетона, скорости приложения нагрузки, крупности заполнителя. Поэтому непосредственное сопоставление зависимостей без учета указанных выше характеристик имеет смысл лишь в плане сравнения использованных аппроксимирующих функций, которые и в одном и в другом случаях являются линейными.

В СТБ EN 13791–2009 регламентируется процедура коррекции базовой градуировочной зависимости путем ее смещения на величину Δf параллельно оси прочности f_c . Расчет смещения производится на основе дополнительных данных (девять пар отсчетов) совместных испытаний конкретной железобетонной конструкции неразрушающим методом и методом испытания выбуренных кернов. Методика относится ко всем рассмотренным методам испытаний, включая и метод отрыва со скалыванием.

Для каждого места измерений определяется разница между значением прочности на сжатие для бурового керна f_{is} и значением из базовой кривой f для соответствующего метода испытаний

$$\delta f = f_{is} - f. \quad (5)$$

Рассчитываются среднее значение для $\delta f_{m(n)}$ для n результатов испытаний и стандартное отклонение s . Значение смещения базовой кривой Δf определяется по уравнению

$$\Delta f = \delta f_{m(n)} - k_1 s, \quad (6)$$

где k_1 – коэффициент, выбирается по табл. 2.

Таблица 2

Коэффициент k_1

Количество пар результатов испытаний	k_1
9	1,67
10	1,62
11	1,58
12	1,55
13	1,52
14	1,50
≥ 15	1,48

Процедура коррекции градуировочной зависимости по ГОСТ 22690–88 содержит менее жесткие требования:

- в качестве экспертного метода может использоваться метод отрыва со скалыванием, что позволяет включать в сферу применения данной методики также конструкции с относительно малыми размерами сечения;

- количество испытаний может быть снижено до трех;

- значение прочности бетона, определенное с использованием градуировочной зависимости, установленной для бетона, отличающегося от испытываемого, умножают на коэффициент K_c , значение которого определяют по формуле

$$K_c = \frac{\sum_{i=1}^n R_i}{\sum_{y=1}^n R_y}, \quad (7)$$

где R_i – прочность бетона в участке, определяемая методами отрыва со скалыванием, скалывания ребра или испытанием кернов по ГОСТ 10180 [1]; R_y – то же методами упругого отскока, ударного импульса или пластической деформации; n – принимается не менее трех.

Величина прочности бетона не должна отличаться от среднего значения по градуировочной зависимости более чем на ± 30 %. Процедура коррекции градуировочной зависимости для ультразвукового метода по ГОСТ 17624–87 не предусмотрена, но оговариваются условия, для которых зависимость требуется построить заново.

Следует заметить, что методики построения и коррекции градуировочных зависимостей по ГОСТ 22690 [3] и ГОСТ 17624 [2] радикально отличаются от методики построения и коррекции градуировочной зависимости по СТБ EN 13791–2009. Оценка прочности бетона по градуировочной зависимости евростандарта будет на величину $k_1 s$ ниже, чем по градуировке ГОСТов. Приведенные в табл. 2 значения коэффициента k_1 соответствуют 7%-му квантилю массива данных градуировочных испытаний. Это, с одной стороны, якобы повышает надежность контроля, снижая вероятность завышения прочности, но с другой – способствует утрате доверия к неразрушающим испытаниям, поскольку их оценка в большинстве случаев будет ниже нормативного значения, даже для качественного бетона с заданными прочностными показателями.

Что касается алгоритмов коррекции либо путем сдвига на величину Δf (6), либо поворотом относительно нулевой точки координатных осей (7), то явное предпочтение нельзя отдать ни одному из них. По мнению авторов, характер эволюций градуировочных зависимостей того или иного неразрушающего метода испытаний зависит от причин, вызвавших эти эволюции. Для примера обратимся к рис. 3. Градуировочные зависимости 2 и 4 для бетона одного состава, но в разном возрасте, не позволяют их совместить путем параллельных сдвигов по координатной плоскости. В то же время для кривых 3 и 4 – бетонов одного семейства – такая процедура вполне приемлема. То же наблюдается и для графиков на рис. 4 и 5. Зависимости (3) и (4) явно указывают способ их идеального совмещения – путем сдвига по горизонтали с поворотом относительно начала координат.

Использование базовой зависимости и механизма ее коррекции в более широком смысле есть попытка сохранить информацию накопленного опыта прошлых испытаний бетона и способ уберечь пользователя от слишком резких «виражей» при построении градуировочных зависимостей. В этом плане евронормы никаких радикальных новшеств не содержат, поскольку опираются на традиционные методики.

Полезную информацию рассмотренный евростандарт содержит по вопросу учета неоднородности бетона в конструкциях. Отмечаются следующие моменты. Измеренная прочность на сжатие буровых кернов и бетона в конструкциях обычно меньше прочности на сжатие стандартных испытательных образцов, которые отобраны из той же партии бетона. Это является следствием ряда факторов, например отличием степени уплотнения и условий выдерживания бетона в условиях строительной площадки, а также расположением зоны контроля в строительной конструкции. Испытания бетона в конструкции показывают следующее:

1) прочность на сжатие бетона в одной конструкции может колебаться как случайно, так зачастую и регулярным образом;

2) величина колебаний может значительно отличаться в различных строительных конструкциях;

3) с увеличением высоты бетонирования прочность на сжатие бетона в конструкциях уменьшается по высоте в направлении бетонирования; это распространяется также на плиты: прочность верхнего слоя может быть на 25 % ниже прочности центральных областей сечения. Бетон меньшей прочности зачастую локализуется или в верхних 300 мм, или до 20 % глубины, в зависимости от того, какая область является меньшей.

На рис. 6 приведены характерные результаты определения прочности монолитной плиты перекрытия толщиной 25 см, полученные авторами, которые подтверждают приведенные в пункте 3 оценки.

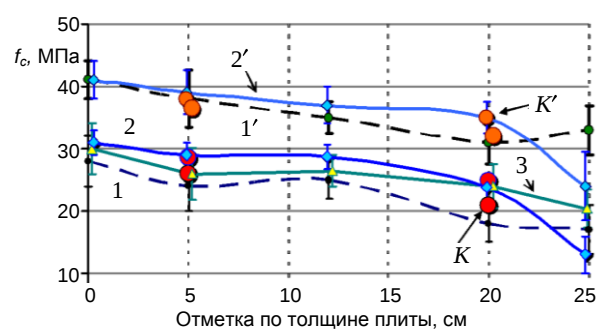


Рис. 6. Распределение прочности бетона монолитной плиты перекрытия толщиной 25 см по ее толщине: отметка 0 см соответствует нижней части плиты, отметка 25 см – верхней; 1, 1' – данные ультразвуковых испытаний в возрасте бетона 5 и 28 сут.; 2, 2' – данные испытаний склерометром ОМШ-1; K, K' – данные испытаний кернов в возрасте бетона 5 и 28 сут.; 3 – данные ультразвуковых испытаний кернов в возрасте бетона 5 сут. (класс бетона C25/30)

Весьма важным для практики неразрушающих испытаний бетона, по мнению авторов, является вопрос оценки степени неопределенности результата каждого из используемых методов. Этот показатель важен не только как характеристика надежности полученного соответствующим методом результата испытаний. С показателем неопределенности отдельного метода испытаний связан вопрос методики объединения результатов нескольких методов испытаний. Показатель неопределенности может быть использован в качестве весового коэффициента при усреднении результатов нескольких методов. Эти моменты обойдены вниманием и в рассмотренном СТБ EN 13791–2009, и в действующих отечественных нормативах. В качестве

показателя неопределенности для результатов испытаний неразрушающими методами предлагаем использовать величину остаточной дисперсии или остаточного среднего квадратического отклонения S_T , определяемую при градуировочных испытаниях по формуле

$$S_T = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n f_{is,i} - f_{is,H,i}^2}{n-2}}, \quad (8)$$

где $f_{is,i}$ – i -й результат оценки прочности бетона в конструкции экспертным методом (отрыв со скалыванием или испытание образцов-кернов); $f_{is,H,i}$ – то же неразрушающим методом (по градуировочной зависимости); n – число испытаний.

ВЫВОДЫ

Бетон следует рассматривать как материал с колеблющимися характеристиками по случайному принципу, результаты испытаний которого подчиняются нормальному распределению. Разница между прочностью на сжатие бетона в конструкции и прочностью стандартных испытательных образцов неизбежна. СТБ EN 13791–2009 допускает снижение прочности бетона в конструкциях: критериальный порог – гарантированная (характеристическая) прочность – снижен на 15 %. Этот пункт радикально отличает данный евростандарт от действующих сегодня стандартов Беларуси и России. Представленная статистика данных испытаний бетона монолитных конструкций ряда объектов строительства в Республике Беларусь подтверждает правомерность выбранного критерия и позволяет рекомендовать его к использованию.

В то же время методика построения и коррекции градуировочных зависимостей неразрушающих методов определения прочности бетона в конструкциях по СТБ EN 13791–2009 содержит спорные моменты. В основу методики положено использование 10 % квантиля массива данных градуировочных испытаний. Очевидно, цель указанной процедуры – приблизить надежность оценки прочности бетона неразрушающими методами к надежности ее оценки прессовыми испытаниями образцов. Но обратной стороной указанной методики явится су-

щественное занижение оценки нормативного показателя прочности бетона в конструкции, что неизбежно повлечет за собой отказ от использования неразрушающих методов в практике строительства.

Методики ГОСТ 22690–88 и ГОСТ 17624–87 не приводят к занижению (в среднем) оценок прочности бетона, но делают оценки прочности разными неразрушающими методами равноценными, что не соответствует действительности: степень надежности оценок будет разной. Указанные нормативы об этом умалчивают. Вопрос определения надежности оценок прочности бетона неразрушающими методами обойден вниманием и в евро нормах. Вариантом решения проблемы, по мнению авторов, может служить введение в практику контроля бетона неразрушающими методами дополнительной характеристики – неопределенности оценки его прочности тем или иным методом. Такой подход позволит получать сопоставимые результаты контроля бетона разными методами, а характеристика неопределенности результатов будет объективно соответствовать их надежности для того или иного метода.

Таким образом, введение в действие СТБ EN 13791–2009 не закрывает многие накопившиеся вопросы в области неразрушающего контроля бетона конструкций, хотя сам документ и содержит ряд прогрессивных новшеств. Кроме того, некоторые положения этого норматива не согласовываются с ГОСТ 17624–87 и СНБ 5.03.01–02.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Бетоны.** Методы определения прочности по контрольным образцам: ГОСТ 10180–90. – Введ. 01.01.91. – М., 1991. – 16 с.
2. **Бетоны.** Ультразвуковой метод определения прочности: ГОСТ 17624–87. – Введ. 01.01.88. – М., 1988. – 12 с.
3. **Бетоны.** Определение прочности механическими методами неразрушающего контроля: ГОСТ 22690–88. – Введ. 01.01.91. – М., 1991. – 22 с.
4. **Бетонные и железобетонные конструкции:** СНБ 5.03.01–02. – Минск: Минстройархитектуры, 2003. – 139 с.
5. **Оценка** прочности на сжатие конструкций и элементов сборного бетона в реальных условиях: СТБ EN 13791–2009. – Минск: РУП «Стройтехнорм», 2010.
6. **Bewertung** der Druckfestigkeit von Beton in Bauwerken oder in Bauwerksteilen: DIN EN 13791–2009.
7. **Бетон.** Ч. 1: Требования, показатели, изготовление и соответствие: СТБ EN 206–1–2009.

Поступила 06.06.2012