

Рисунок 9 – Зависимость “связевое усилие - прогиб” для связи поперечного направления. Работа связи на стадии 2

СПИСОК ЦИТИРОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Тур, А.В. Сопротивление изгибаемых железобетонных элементов при внезапном приложении нагрузки: дисс. канд. техн. наук: 05.23.01 / А.В. Тур; Брест, 2012. – 228 с.
2. General Actions – Accidental Actions (ТКП ЕН 1991-1-7 – Общие воздействия. Часть 7. – Особые воздействия): EN 1991-1-7.
3. Structural Use of Concrete, Part 1. Code of Practice for Design and Constructions: BS 8110-1:1997. – London: British Standards Institution, 1998. – 172 p.
4. Unified Facilities Criteria – Design of Building to Resist Progressive Collapse: UFC 4-023-03. – January, 2010.

Материал поступил в редакцию 10.05.2018

TUR A.V., PETSOLD T.M., TSIMBAREVICH T.A. Experimental research of the robustness of disk of overlapping from the hollow core slabs with removing the carrier element

At present, constructive solutions of buildings with discs of overlap, made of prestressed hollow core slabs, are becoming more widespread. It should be noted that in these constructive solutions, ensuring survivability in special design situations is a special task, not only from the point of view of directly calculating the bonds themselves, but also from the point of view of their placement in the overlapping disk.

УДК 624.012:[519.248:519.234.7]

Дереченник С.С., Тур В.В.

НОВЫЙ ПОДХОД К ОЦЕНИВАНИЮ *IN-SITU* ХАРАКТЕРИСТИЧЕСКОЙ ПРОЧНОСТИ БЕТОНА В СУЩЕСТВУЮЩИХ ЖЕЛЕЗОБЕТОННЫХ КОНСТРУКЦИЯХ ПРИ ОГРАНИЧЕННОМ КОЛИЧЕСТВЕ РЕЗУЛЬТАТОВ ПОЛЕВЫХ ИСПЫТАНИЙ

Введение. В настоящее время реализуется план разработки международных норм по проектированию железобетонных конструкций определенных, например TC250, как разработка Еврокодов нового поколения (G2). Этот период совпадает по времени с переработкой ряда национальных норм по железобетону, в частности СНБ 5.03.01 [1], и Национальных приложений к Еврокоду-2 (EC2).

Следует подчеркнуть, что в отличие от действующих норм проектирования, вновь разрабатываемые Еврокоды, а следом и Национальные приложения к ним, предполагают внесение специальных разделов, содержащих требования и адекватные расчетные модели для проверок предельных состояний существующих конструкций. Как оказалось, в отличие от национальной практики, в которой оценивание технического состояния существующих конструкций всегда уделяли достаточно пристальное внимание, в европейской практике этот вопрос оказался довольно новым, особенно применительно к зданиям и сооружениям. Традиционно этому вопросу достаточно много внимания уделялось при оценивании технического состояния мостов. Поэтому

для разработки разделов, относящихся к оцениванию существующих конструкций, в рамках рабочей группы комитета TC250/SD2/WG1 была создана специальная тематическая группа TG3 (Assessment of existing structures – Оценивание существующих конструкций).

Естественно, что при разработке моделей сопротивления, применяемых для проверок предельных состояний существующих конструкций, одним из ключевых вопросов является адекватное определение свойств материалов, в частности *in-situ* прочности. При применении метода частных коэффициентов для проверок предельных состояний железобетонных конструкций основным параметром, описывающим физико-механические свойства бетона, является *in-situ* характеристическая прочность.

В соответствии с предложениями, сформулированными рабочей группой TC250/WG1, в качестве основного расчетного метода при проверках предельных состояний существующих конструкций рекомендуется применять нелинейный анализ. Для получения адекватного решения в диаграммах деформирования для материалов реко-

Дереченник Станислав Станиславович, к.т.н., доцент, заведующий кафедрой электронных вычислительных машин и систем Брестского государственного технического университета.

Тур Виктор Владимирович, д.т.н., профессор, заведующий кафедрой технологии бетона и строительных материалов Брестского государственного технического университета.

Беларусь, БрГТУ, 224017, г. Брест, ул. Московская, 267.

мендовано применять средние значения прочности. Однако, даже в этом случае для установления глобального коэффициента сопротивления γ_{GS} для обеспечения требуемого формата безопасности, не обойтись без характеристического значения прочности, в частности бетона для железобетонных конструкций.

Согласно [2] получение единичных результатов прочности бетона может осуществляться как прямыми методами испытаний выбуренных образцов-кернов, так и непрямыми (косвенными, неразрушающими) методами с применением специальных приборов и оборудования в следующих случаях:

- при внесении изменений в план эксплуатации и перепроектировании существующих конструкций зданий и сооружений;
- для получения исходных данных, необходимых при выполнении проверок предельных состояний конструктивных элементов системы в тех случаях, когда существуют сомнения относительно фактической прочности бетона на сжатие в конструкции из-за некачественного выполнения работ, дефектов и повреждений бетона в результате пожара или по другим причинам;
- когда оценивание текущих значений прочности необходимо выполнять в процессе строительства;
- для выполнения проверок предельных состояний конструктивных элементов системы в тех случаях, когда уставлено несоответствие прочности бетона изготовителем при проведении испытаний по СТБ EN 206 [3];
- для оценивания соответствия прочности бетона на сжатие в конструкции (монолитного бетона), если это установлено требованиями спецификации или действующего стандарта, а также для выполнения производственного контроля при изготовлении изделий сборного железобетона.

При этом, если выполняется оценивание прочности бетона в «старых» существующих конструкциях, норма [2] требует вводить понижающие коэффициенты, учитывающие карбонизацию поверхностных слоёв бетона, значения которых устанавливаются в каждом случае.

В общем случае процедура оценивания *in-situ* прочности бетона включает два этапа:

1. **Подготовка исходных данных для оценивания**, получаемых либо по результатам прямых испытаний выбуренных кернов в прессе, либо косвенными методами неразрушающего контроля с учетом оцененных неопределенностей получения результатов. Следует отметить, что важным вопросом в данном случае является оценивание выбросов; этот вопрос достаточно подробно рассмотрен, например, в [4].
2. **Собственно оценивание полученных результатов испытаний** с применением адекватных зависимостей для вычисления эstimаторов квантилей прочности, т. е. характеристической *in-situ* прочности бетона. При этом следует различать две возможные процедуры оценивания *in-situ* характеристической прочности бетона:

а) оценивание соответствия прочности поставленного бетона указанному в спецификации классу по прочности на сжатие. В этом случае применимы критерии, разработанные для оценивания соответствия в рамках производственного контроля, как это, например, определено в СТБ EN 206 [3];

б) установление характеристической *in-situ* прочности бетона в существующей конструкции, как базовой характеристики для проверок предельных состояний конструктивного элемента. В данном случае основной целью испытаний следует считать не установление класса прочности бетона на сжатие (который, как известно, является величиной, получаемой прямым испытанием на образцах, хранившихся в стандартных условиях), а именно получение характеристики, необходимой, например, при выполнении проверочных расчетов. Разработка методов расчета эstimатора соответствующей квантили вероятностного распределения прочности является задачей довольно непростой. Особенно, когда подобное оценивание необходимо выполнять, опираясь на ограниченные выборки результатов испытаний (как правило, $3 \leq N \leq 6$), как это имеет место при испытаниях выбуренных кернов.

Учитывая то обстоятельство, что в настоящее время выполняется переработка как европейского EN 13791 (CEN TG250/SG2), так и национального СТБ 2264 (ТКС8) стандартов, представляется целесообразным рассмотреть некоторые ключевые положения, касающиеся критериев оценивания характеристической *in-situ* прочности в соответствии с поставленной целью. Необходимо отметить, что в рамках EN 13791 испытание кернов является основным методом получения исходных данных для оценивания, а применение методов неразрушающего контроля рассматривается как альтернатива.

1. Оценивание *in-situ* характеристической прочности бетона на сжатие по результатам полевых испытаний согласно требованиям Евростандартов

1.1 Актуальная версия EN 13791 (2006)

В соответствии с действующим стандартом [2] характеристическую *in-situ* прочность бетона на сжатие следует определять, пользуясь двумя методами (подходами) в зависимости от количества полученных единичных результатов испытаний:

- подход А (доступно для анализа как минимум 15 единичных результатов испытаний). В данном случае эstimатор квантили $\hat{f}_{p,\gamma}$ *in-situ* прочности бетона имеет вид двойного критерия, опирающегося на работы R.Caspeele и L.Taerwe [5]:

$$\min \begin{cases} f_{ck, is} = f_{cm(n), is} - k_2 \cdot S, \\ f_{ck, is} = f_{is, lowest} + 4, \end{cases} \quad (1)$$

где S – стандартное отклонение для выборки результатов испытаний согласно [2]; если рассчитанное значение стандартного отклонения меньше 2 МПа , следует принять $S = 2,0 \text{ МПа}$;

k_2 – коэффициент, принимаемый равным 1,48 при отсутствии дополнительных указаний;

- подход В (доступно для анализа от 3 до 14 единичных результатов испытаний):

$$\min \begin{cases} f_{ck, is} = f_{cm(n), is} - k, \\ f_{ck, is} = f_{is, lowest} + 4, \end{cases} \quad (2)$$

где k – коэффициент, зависящий от количества единичных результатов испытаний, принимаемый по Таблице 1 (таблица 2 EN 13791 [2]).

Таблица 1 – Значения коэффициента k согласно [2]

N	k , МПа
10–14	5
7–9	6
3–6	7

Как видно, двойной критерий (2) является некоторой модификацией нестатистического критерия, принятого в EN 206 [3] для оценивания соответствия на стадии начального производства (метод А по EN 206). Несмотря на то, что в отличие от критерия, принятого в EN 206, значение коэффициента в критерии (2) зависит от количества результатов испытаний, в работе [6] показано, что данный критерий разработан без ясного статистического обоснования. Из выполненного в этой работе анализа видно, что обеспеченность эstimатора квантили $\hat{f}_{p,\gamma}$ зависит от вида функции распределения прочности в популяции произведенного бетона и стандартного отклонения. Оценка с использованием критерия (2) может давать в ряде случаев непредсказуемый результат.

1.2 Проект новой версии EN 13791 (2016)

Новый подход к определению характеристической *in-situ* прочности бетона по результатам испытаний образцов, отобранных в полевых условиях, предложил Т.А. Harrison [7]. В соответствии с этим подходом используются методы оценивания, изложенные в приложении D к EN 1990 [8], опирающиеся на нормальную версию уравнения:

$$f_{ck, is} = \hat{f}_{p, \gamma} = f_{cm(n), is} - t_{0,05} \cdot s_n \cdot \sqrt{1 + (1/n)}, \quad (3)$$

где s_n – стандартное отклонение (минимальное значение установлено равным 3 МПа, независимо от средней прочности).

Следует отметить, что при ближайшем рассмотрении зависимостей (1)...(3), применяемых в приведенных стандартах [2] для вычисления эstimаторов *in-situ* прочности, возникают закономерные вопросы, на которые инженер, производящий оценивание бетона, не обращает должного внимания:

1. Какова обеспеченность единичной оценки *in-situ* характеристической прочности, полученной с использованием эstimаторов $\hat{f}_{ck, is}$, содержащихся как в действующих, так и в разрабатываемых Евростандартах? Остается ли эта обеспеченность постоянной, либо изменяется в процессе оценивания различных групп результатов, происходящих из испытаний одной партии?
2. Какой показатель может быть принят в качестве базы сравнения для оценки эффективности предлагаемого эstimатора *in-situ* характеристической прочности?

Необходимо понимать, что оценка *in-situ* характеристической прочности для ограниченной выборки результатов испытаний прочности (как правило, не более 6 результатов испытаний выбуренных кернов для некоторой группы конструктивных элементов) базируется на единичном значении эstimатора $\hat{f}_{ck, is}$, полученного по зависимостям, содержащимся в стандарте. Следует отметить, что обеспеченность γ оценки характеристической прочности $\hat{f}_{ck, is} = \hat{f}_{p, \gamma}$ в этом случае является неизвестной. Несмотря на то, что все результаты полевых испытаний прочности будут отобраны из конструкции, изготовленной из одной партии оцениваемого бетона, другая партия результатов испытаний даст другое значение эstimатора $\hat{f}_{ck, is}$, соответствующее другой обеспеченности в функции распределения эstimатора.

2. Новый метод оценивания прочности бетона в существующих конструкциях при ограниченной выборке результатов испытаний

2.1 Обоснование и формулировка нового метода

Нами был разработан новый метод оценивания характеристической прочности бетона в существующих конструкциях (без оценивания соответствия его какому-либо классу прочности) на основе порядковых (непараметрических) статистик, который может быть применен в случаях ограниченной исходной информации (т. е. при ограниченном числе результатов испытаний).

Исходной предпосылкой нового метода является известный способ интервального оценивания квантилей [9, 10], в котором с использованием биномиального распределения вычисляется вероятность принадлежности квантили f_p заданного уровня p любому непараметрическому интервалу $[f_{c(r)}, f_{c(s)}]$ вариационного ряда $f_{c(1)} \leq f_{c(2)} \leq \dots \leq f_{c(r)} \leq \dots \leq f_{c(N)}$, получаемого путем ранжирования исходного ряда единичных результатов испытаний (выборки измерений) $f_{c1}, f_{c2}, \dots, f_{cN}$.

Непосредственное применение данного способа вызывает существенные проблемы в случае анализа положения квантили невысокого уровня (например, оцениванию характеристического значения прочности материала f_{ck} соответствует уровень $p = 0,05$). Поскольку квантиль f_p с вероятностью не менее 0,5 покрывается размахом исходного ряда (т. е. войдет в диапазон $[f_{c(1)}, f_{c(N)}]$) лишь при выполнении условия $N \geq \log 0,5 / \log(1-p)$, для типового значения $p = 0,05$ имеем: $N \geq 14$. В подавляющем большинстве случаев анализа прочности бетона в существующих

конструкциях число N результатов испытаний значительно меньше, поэтому истинное характеристическое значение прочности $f_{ck, is}$ практически всегда будет меньше (возможно, даже существенно) минимального значения прочности в исходной выборке.

Ранее нами была разработана оригинальная процедура получения оценки «снизу» искомой квантили с произвольно задаваемой обеспеченностью. Под обеспеченностью (коэффициентом доверия)

γ оценки $\hat{f}_{p, \gamma}$ квантили уровня p понимается вероятность того, что оценка не превысит истинного значения квантили. Такая процедура позволила создать новый критерий статистического оценивания соответствия прочности бетона, и описана нами ранее [11].

Применяя аналогичный подход к задаче анализа прочности бетона в существующих конструкциях, сформулируем новый метод вычисления оценки характеристической прочности бетона (т. е. квантили уровня $p = 0,05$) как линейной комбинации трех первых порядковых статистик эмпирического ряда измерений:

$$f_{ck, is} = \hat{f}_{p, \gamma} = f_{c \min} - \lambda_1 \Delta_{2-1} - \lambda_2 \Delta_{3-2}, \quad (4)$$

где $f_{c \min} = \min_i f_{ci} = f_{c(1)}$ – наименьшее значение в группе из N последовательных единичных результатов f_{ci} испытаний ($3 \leq N \leq 15$);

$\Delta_{2-1} = f_{c(2)} - f_{c(1)}$ и $\Delta_{3-2} = f_{c(3)} - f_{c(2)}$ – неотрицательные разности;

$f_{c(1)}, f_{c(2)}$ и $f_{c(3)}$ – соответственно, первая, вторая и третья порядковые статистики, т. е. первый, второй и третий члены вариационного ряда, составленного по возрастанию единичных результатов f_{ci} испытаний;

λ_1, λ_2 – безразмерные тестовые коэффициенты, которые зависят от объема N выборки результатов испытаний и от заданной обеспеченности γ оценки.

Значения тестовых коэффициентов, найденные для нескольких уровней обеспеченности искомой квантили и округленные до сотых долей, приведены в Таблице 2 [12].

2.2 Верификация нового метода оценивания прочности бетона. Сравнение с известными методами

Для верификации нового метода использовались симуляции Монте-Карло с некоторым вероятностным законом распределения параметра прочности (в качестве базового принималось нормальное распределение, усеченное квантилями уровней 0,01 и 0,98). Параметр масштаба (среднеквадратическое отклонение) распределения варьировался в пределах $\sigma = 2 \dots 5$ МПа, а математическое ожидание вычислялось из условия постоянства некоторой характеристической прочности (выбранного класса бетона). Из заданной таким образом совокупности с известной характеристической прочностью $f_{ck, is}$ генерировалось от 2000000 до 10000000 случайных выборок – групп $\{f_{c1}, f_{c2}, \dots, f_{cN}\}$ из $N = 3, 4, 5, \dots, 15$ результатов. Каждая полученная группа подвергалась обработке (расчету оценки $\hat{f}_{ck, is}$ характеристической прочности) с использованием известных способов А (EN 13791:2006 [2]) и Б (проект EN 13791:2016 [7]), а также новым методом для двух уровней обеспеченности вычисленной оценки ($\gamma = 0,5$ и $\gamma = 0,75$).

Набор результатов $\hat{f}_{ck, is}$ в каждом варианте (объем N выборок и метод расчета) образовывал некоторое распределение. Для примера, на рисунке 1 представлены графики плотности вероятности оценки $\hat{f}_{ck, is}$ для бетона класса С 30/35 со среднеквадратическим отклонением прочности $\sigma = 5$ МПа, получаемой новым методом.

Таблица 2 – Тестовые коэффициенты λ_1, λ_2 для расчета оценки характеристической прочности бетона для выборки объема N при различной обеспеченности оценки [12]

N	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
Обеспеченность $\gamma = 0,50$													
λ_1	0,38	0,38	0,34	0,28	0,23	0,17	0,11	0,05	0,0	-0,05	-0,10	-0,14	-0,19
λ_2	0,68	0,66	0,62	0,56	0,50	0,44	0,39	0,34	0,29	0,24	0,20	0,15	0,12
Обеспеченность $\gamma = 0,75$													
λ_1	1,06	1,16	1,15	1,10	1,03	0,96	0,88	0,805	0,73	0,66	0,59	0,52	0,46
λ_2	1,32	1,39	1,37	1,32	1,26	1,18	1,11	1,04	0,97	0,90	0,84	0,78	0,72
Обеспеченность $\gamma = 0,90$													
λ_1	2,27	2,57	2,63	2,60	2,52	2,42	2,31	2,21	2,09	1,98	1,88	1,77	1,67
λ_2	2,48	2,73	2,77	2,73	2,65	2,56	2,45	2,35	2,24	2,14	2,04	1,94	1,85

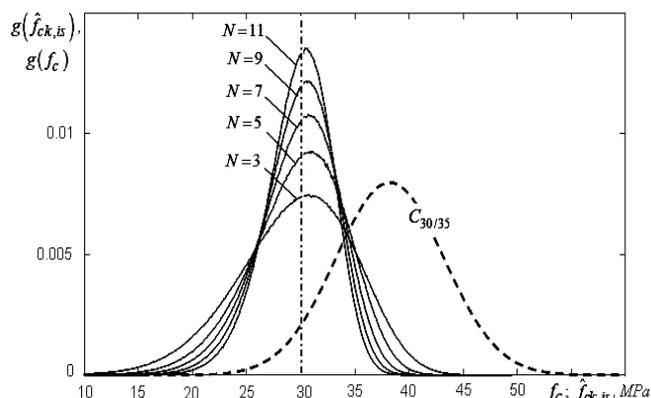


Рисунок 1 – Плотности вероятности прочности f_c бетона класса С 30/35 (штриховая линия) и оценок $\hat{f}_{ck, is}$ характеристической прочности бетона (сплошные линии) для различного объема выборки результатов испытаний

Для каждого полученного распределения определялся 95%-й интервал, нижняя и верхняя границы которого соответствовали квантилям этого распределения с уровнями 0,025 и 0,975. Результаты сравнительной верификации известных и нового методов на примере бетона класса С 30/35 со среднеквадратическим отклонением прочности $\sigma = 4$ МПа представлены на рисунке 2 [12].

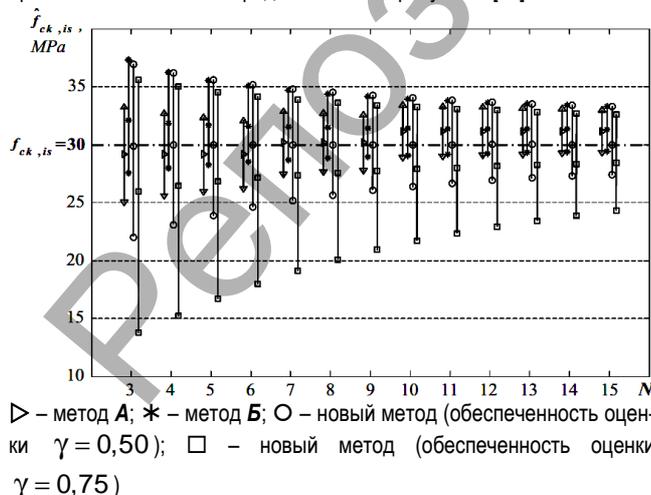


Рисунок 2 – Интервалы рассеяния и медианы оценок характеристической прочности бетона класса С 30/35 ($\sigma = 4$ МПа) для различного объема результатов испытаний [12]

Анализ полученных результатов показал следующее. Метод **A** (EN 13791:2006 [2]), основанный на вычислении среднего значения $\hat{f}_{cm(n), is}$ по выборке результатов измерений с учетом фиксированной, для определенного размера n группы результатов, поправки K , дает оценку с наименьшим среднеквадратическим отклонением (рассеянием), поэтому такая оценка $\hat{f}_{ck, is}$ формально является эффективной (в сравнении с другими рассматриваемыми методами). Эта оценка, однако, не может быть признана несмещенной, поскольку ее медиана (ввиду явной симметричности распределения оценки для данного метода она практически совпадает со средним значением) лишь иногда примерно равна оцениваемому параметру. В рассматриваемом на рис. 2 примере такое равенство имеет место для случаев $N = 7 \dots 9$, т. е. при поправке $k = 6$ МПа. При этом для других среднеквадратических отклонений прочности или для бетонов других классов равенство может иметь место при иных объемах выборки (например, при $N = 10 \dots 15$ для $\sigma = 3$ МПа у бетона класса С 30/35), либо не достигаться вовсе (например, для $\sigma = 5$ МПа у бетона того же класса). Кроме того, оценка не является состоятельной, так как с увеличением объема выборки она может не приближаться, а, наоборот, удаляться от истинного значения (как и в рассматриваемом примере).

Метод **B** (проект EN 13791:2016 [7]), основанный на максимально правдоподобном оценивании с учетом вычисления среднеквадратического отклонения прочности в выборке результатов, дает почти такую же эффективную, как и в предыдущем методе, оценку $\hat{f}_{ck, is}$. Эта оценка обладает заметно большей состоятельностью (с этой точки зрения метод **B** предпочтительнее метода **A**), однако расхождение ее медианы (и среднего значения, т.к. ее распределение по-прежнему почти симметрично) с истинным значением квантили распределения прочности в рассматриваемом примере остается существенным даже при $N = 15$, поэтому оценка, очевидно, также не может считаться несмещенной.

При данном анализе с применением результатов, смоделированных из генеральной совокупности, эффективность оценок, получаемых новым методом, заметно ниже (особенно при высоком уровне обеспеченности $\gamma = 0,75$). Важно отметить практически полное совпадение медианы распределения оценки (при обеспеченности $\gamma = 0,5$) с истинным значением квантили для всех $N = 3, 4, 5, \dots, 15$. Поэтому эта оценка является почти абсолютно несмещенной. При других уровнях обеспеченности данного свойства оценки формально и нельзя ожидать, поскольку тогда совпадать с истинным значением характеристической прочности будет не медиана, а другая (например, 75%-я при $\gamma = 0,75$) квантиль распределения оценки. Новая оценка также определенно состоятельна, т. к. ее эффективность явно возрастает с увеличением объема вы-

борки, при этом даже при обеспеченности, не равной $\gamma = 0,5$, медиана распределения приближается к истинному значению.

Следует также особо отметить, что верхние границы интервалов рассеяния оценок, получаемых новым методом для различных уровней обеспеченности γ , почти идентичны верхним границам таких интервалов, полученных для метода **Б** (а в некоторых случаях – также и для метода **А**). Этот факт может дополнительно свидетельствовать в пользу корректности нового метода

Таким образом, новый метод оценивания имеет явные преимущества перед известными методами **А** и **Б**, так как дает возможность получить несмещенную и состоятельную оценку характеристической прочности бетона в существующих конструкциях при ограниченном количестве результатов испытаний прочности. Помимо этого, такой метод позволяет получать оценку с заранее заданной обеспеченностью (коэффициентом доверия).

Известные методы имеют более высокую эффективность, однако данное преимущество выглядит сомнительным с точки зрения обеспечения надежности (безопасности) конструкций по следующим соображениям:

во-первых, уровень обеспеченности этих оценок, установленный в результате выполненной симуляции, колеблется в широких пределах, а априори (при практическом применении известных методов) вообще неизвестен;

во-вторых, в некоторых случаях (например, для бетона класса С 30/35 при $\sigma = 5$ МПа и $N > 10$) в достаточно узкий, ввиду формально высокой эффективности оценки, интервал ее рассеяния истинное значение характеристической прочности вообще не попадает (!).

Кроме того, необходимо особо отметить, что представленные выше свойства оценок относятся ко всей популяции произведенного бетона. В реальной ситуации, когда оценивается отдельная партия бетона, ситуация несколько иная.

Как уже указывалось выше (например, в табл. 1), новый метод оценивания допускает выполнение оценивания при произвольном задании уровня обеспеченности γ . Нами были найдены значения безразмерных тестовых коэффициентов λ_1, λ_2 критерия в широком диапазоне значений γ (для случая $N = 3$ приведены на рисунке 3), что дает возможность вычислять значения оценки характеристической прочности, соответствующие различным процентилям (например, децилям) вероятностного распределения.

В свою очередь, это позволяет, с заданной точностью, численным методом восстановить эмпирическое распределение вероятности оценки квантили для конкретной выборки результатов измерений прочности. На рисунке 4 представлены примеры восстановленных распределений эстиматора квантили – для случая минимального объема выборки ($N = 3$) – в диапазоне параметра $\gamma = 0,05 \dots 0,95$ с шагом, равным 0,05 (уменьшая шаг, можно получать почти гладкие функции).

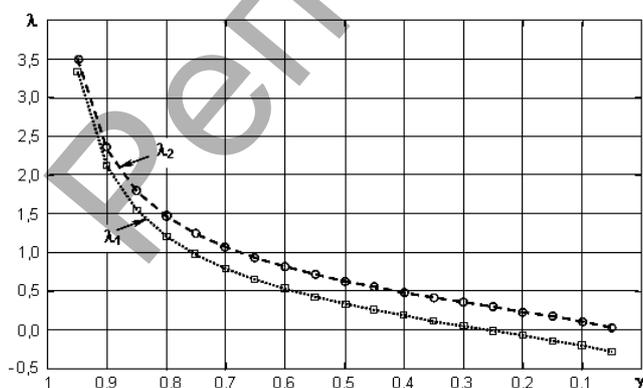


Рисунок 3 – Значения тестовых коэффициентов критерия для расчета оценок характеристической прочности бетона с различной обеспеченностью (объем выборки $N = 3$)

Обратим внимание, что большое влияние на результаты оценивания оказывает размах эмпирической выборки (изменчивость результатов внутри эмпирического теста). Формально более высоким результатам прочности в выборке $\{36,1; 36,5; 42,6$ МПа}, ввиду значительной изменчивости, соответствует распределение (показано на рисунке точечной линией), в котором вероятность того, что оценка характеристической прочности окажется ниже указанной в классе (30 МПа), достигает 0,35. Выборка $\{33,5; 34,4; 35,6$ МПа}, напротив, состоит из очевидно более низких результатов, но имеет и меньшую изменчивость, поэтому вероятность недостаточной (относительно указанной в классе) оценки характеристической прочности не превышает 0,15. Отметим при этом, что как первая, так и вторая выборки принадлежат одному и тому же классу бетона С 30/35.

Восстановленное вероятностное распределение 5%-квантили прочности бетона дает возможность получить оценку характеристической прочности с любым заданным (в диапазоне 0,05...0,95) уровнем обеспеченности, но при этом важнейшим становится вопрос назначения этого уровня. Например, вряд ли уровень обеспеченности $\gamma = 0,50$ может считаться достаточным для целей практического оценивания прочности бетона в существующих конструкциях. Ведь в этом случае результат оценивания по конкретной выборке результатов с вероятностью 0,5 может оказаться завышенным относительно фактической характеристической прочности (так называемое «переоценивание»), но и с такой же вероятностью $1 - \gamma = 0,5$ – заниженным («недооценивание»).

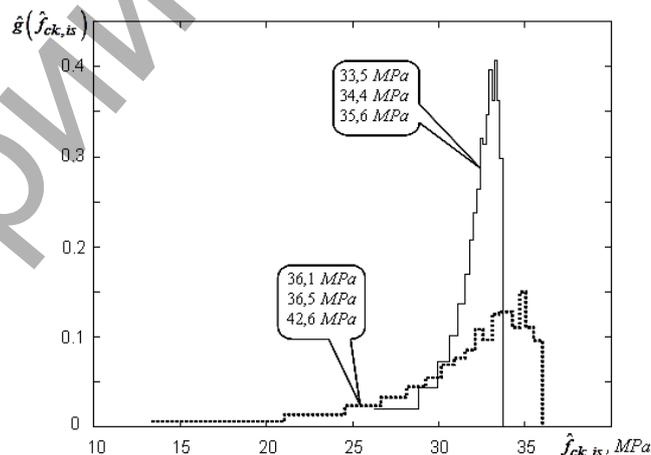


Рисунок 4 – Примеры вероятностных распределений характеристической прочности бетона класса С 30/35, полученных по ограниченным выборкам с использованием нового метода оценивания (в выносках приведены численные значения результатов испытаний прочности)

Полезным, в задачах практического оценивания, может оказаться тот факт, что новый метод, будучи основан на порядковых статистиках, не зависит от стандартного отклонения результатов испытания прочности (точнее, он не требует знания этого параметра, но автоматически его учитывает). Стандартное отклонение (изменчивость эмпирических результатов) внутри одного теста из 3...6 испытаний, как правило, существенно ниже, чем этот же параметр для некоторого класса бетона (в определенном смысле – для генеральной выборки), либо для результатов испытаний, сгруппированных по многим партиям (тестам). Представляется, что новый метод в этом случае может иметь преимущества перед существующими методами оценивания, которые либо никак не учитывают стандартное отклонение (метод **А** – для малых групп результатов, при $N < 15$), либо ограничивают величину стандартного отклонения снизу величиной 3 МПа (метод **Б**).

Таблица 3 – Сравнительный анализ методов оценивания характеристической прочности по эмпирическим результатам испытаний для нескольких групп бетонов

Номер группы	Описательные статистические параметры				Число / доля результатов оценивания (тестов), лежащих ниже 5%-квантили		
	количество тестов (единичных результатов)	среднее значение, МПа	стандартное отклонение, МПа	5%-квантиль, МПа	для метода А (EN 13791)	для метода Б (проект EN 13791)	для нового метода ($\gamma = 0,50$)
I	61 (183)	43,8	5,1	35,5	21 / 34%	19 / 31%	14 / 23%
II	72 (216)	39,8	4,0	33,3	40 / 56%	32 / 44%	13 / 18%
III	89 (267)	38,8	5,0	30,5	36 / 40%	31 / 36%	16 / 18%
IV	74 (222)	48,4	4,7	40,7	40 / 54%	28 / 38%	9 / 12%

Нами была выполнена проверка возможностей всех сравниваемых методов оценивания характеристической прочности на эмпирических результатах испытаний, полученных в полевых условиях для четырех групп бетонов с характеристической прочностью в диапазоне 30...41 МПа. Объем группы – от 61 до 89 тестов, или от 183 до 267 единичных результатов (все тесты состояли из трех результатов). Для каждого теста вычисляли оценки *in-situ* характеристической прочности: известными методами А и Б, а также новым методом с уровнем обеспеченности $\gamma = 0,50$. Сравнение полученных оценок с характеристическим значением (5%-квантилью для данной группы бетона) приведено в таблице 3.

Приведенные в таблице 3 результаты показывают, что оценки характеристической прочности по отдельным тестам (группам из трех результатов) существенно занижены по отношению к фактической 5%-квантили. При идеальном оценивании доля оценок, лежащих ниже 5%-квантили, также должна составлять 5%, поэтому с формальной точки зрения метод А дает около 30...50% ошибок 1-го рода, метод Б – 25...40%, а новый метод – 7...18% таких ошибок. Более того, в отдельных случаях (3 теста для бетона группы I, т. е. около 5%) метод А дает, относительно результатов нового метода, даже ошибки 2-го рода.

Как и предполагалось, новый метод оказывается предпочтительным в условиях малой изменчивости результатов внутри одного теста (этот параметр, как правило, лежал в диапазоне 1...2,5 МПа). В дальнейшем исследовании для каждого из тестовых результатов всех групп бетона выполнялось восстановление, с использованием нового метода, эмпирических вероятностных распределений 5%-квантили прочности, которые использовали как шаблоны – для определения, какому именно уровню обеспеченности, относительно шаблона (нового метода), соответствует каждая конкретная оценка, вычисленная методом А (EN 13791:2006 [2]) и методом Б (проект EN 13791:2016 [7]). Полученные гистограммы для всех групп бетона имели сходный вид, поэтому они были сведены в общий полигон относительных частот $w_i = W(\gamma_i)$, представленный на рисунке 5.

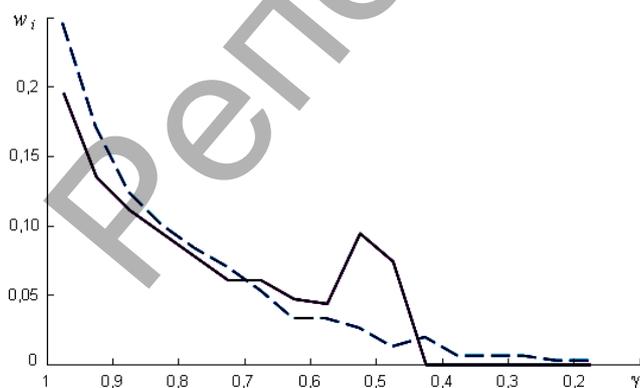


Рисунок 5 – Полигоны относительных частот уровня обеспеченности оценки характеристической прочности бетона, получаемой методом А (пунктирная линия) и методом Б (сплошная линия)

Приведенные на рис. 5 результаты подтверждают, что оценка по методу Б (проект EN 13791:2016 [7]), по сравнению с методом А (EN 13791:2006 [2]), более адекватна, поскольку практически исключает «переоценивание» прочности (т. е. получение оценок с малой обеспеченностью) и несколько снижает частоту «недооценивания» (оценок с обеспеченностью $\gamma = 0,70$ и выше). Тем не менее, оба эти метода склонны к завышению обеспеченности, вплоть до уровня $\gamma = 0,90$ и более, поэтому являются, скорее, «консервативными». Данное обстоятельство может казаться оправданным при практическом оценивании прочности бетона в существующих конструкциях, так как почти полностью исключает опасные, с точки зрения обеспечения надежности конструкций, ошибки 2-го рода. Однако мы считаем, что при этом надежность конструкций будет оценена некорректно – в сторону ее существенного занижения, что может привести к ложному выводу о необходимости выполнения усиления либо демонтажа пригодных конструкций. Поэтому наиболее целесообразным представляется анализ надежности конструкции на основе вероятностных распределений 5%-квантили прочности, численно восстанавливаемых новым методом по конкретной эмпирической выборке результатов испытаний. При установленном распределении эстиматора обеспеченность оценивания должна назначаться исходя из требуемого уровня надежности.

Заключение

1. Как действующие в настоящее время, так и разрабатываемые Европейские стандарты (EN 13791:2006/2016) предлагают методы оценивания *in-situ* характеристической прочности бетона с некоторым неизвестным и непостоянным уровнем обеспеченности γ , что в некоторых случаях может приводить не только к недооценке, но даже к переоценке надежности существующих конструкций. Более надежный результат оценивания дает эстиматор (3), включенный в новую версию EN 13791.
2. Предложен новый эстиматор $\hat{f}_{p,\gamma}$ оценивания характеристической *in-situ* прочности, основанный на положениях теории порядковых статистик. В рамках предложенного подхода существует возможность рассчитать значения коэффициентов λ_1 и λ_2 , входящих в аналитическое описание эстиматора $\hat{f}_{p,\gamma}$, для различных уровней γ вероятностной обеспеченности оценки. Это в свою очередь дает возможность выполнить численное восстановление функции распределения эстиматора по каждой конкретной выборке результатов испытаний ограниченного объема N , начиная с $N = 3$ (!).
3. Предложенный подход к восстановлению распределения эстиматора по ограниченной выборке результатов позволяет получить «шаблон» для анализа эстиматоров другого типа. Анализ, проведенный на фоне данных, полученных в полевых испытаниях, показал, что обеспеченность оценок, получаемых известными методами, может изменяться в широких пределах – от 0,20 до 0,99 для метода А (EN 13791:2006 [2]), и от 0,45 до 0,99 для метода Б (проект EN 13791:2016 [7]). В обоих этих методах наблюдается общая тенденция к завышению обеспеченности

оценки, а тем самым – к занижению, по отношению к фактической характеристической прочности бетона, самой оценки, а значит и надежности оцениваемой конструкции.

- Предложенный метод, позволяющий восстановить функцию распределения эstimатора $\hat{f}_{p,\gamma}$, должен также изменить и общий подход к оцениванию прочности бетона в существующих конструкциях, а именно: по конкретным результатам испытаний (начиная с $N = 3$) численно восстанавливают функцию распределения $\hat{f}_{p,\gamma}$, а затем из нее принимают значение *in-situ* характеристической прочности для некоторого установленного уровня обеспеченности. Основным вопросом при этом является именно нахождение требуемого значения γ (или нескольких таких значений), которое (которые) может быть принято только в результате совместного рассмотрения функции распределения эstimатора и показателей надежности конструкций.

СПИСОК ЦИТИРОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

- Бетонные и железобетонные конструкции: СНБ 5.03.01-02. – Введ. 20.06.02. – Минск: Минстройархитектуры, 2003. – 177 с.
- Оценка прочности на сжатие бетона в конструкциях и сборных элементах конструкций: СТБ EN 13791:2006 – 2012. – Введ. 10.02.12. – Минск: Госстандарт, 2012. – 26 с.
- Бетон. Требования, показатели, изготовление и соответствие: СТБ EN 206:2014 - 2016. – Введ. 01.07.17. – Минск: Госстандарт, 2017. – 108 с.
- Тур, В.В. Новый подход к оцениванию прочности бетона на сжатие в существующих конструкциях / В.В. Тур, С.С. Дереченник, В.В. Колевчук // Проблемы современного бетона и железобето-

на: сборник науч. трудов. – Вып. 9. – Минск: Колорград, 2017. – С. 455–475.

- Caspeele, R. Numerical Bayesian updating of prior distributions for concrete strength properties considering conformity control / R. Caspeele, L.Taerwe // Advances in concrete construction. – 2013. – Vol. 1, No.1 – P. 85–102.
- Holicky, M. Fractile estimation and sampling inspection in Building / M.Holicky, M.Vorlcek // Acta polytechnic CVUT. – 1992. – No. 1. – P. 87–96.
- Harrison, T.A. Assessment of concrete compressive strength in structures / T.A.Harrison // XVII. ERMCO Congress Proceedings, Istanbul, Turkey, 4-5 June, 2015. – Turkish Ready Mixed Concrete Association, 2015. – P. 336–344.
- Основы проектирования строительных конструкций: СТБ EN 1990:2004 - 2014. – Минск: Госстандарт, 2014. – 116 с.
- Dawid, H.A. Order Statistics / H.A. Dawid. – NY: John Wiley & Sons, 1981. – 360 p.
- Кобзарь, А.И. Прикладная математическая статистика. Для инженеров и научных работников / А.И. Кобзарь. – Москва: ФИЗМАТЛИТ, 2006. – 816 с.
- Tur, V.V. An Innovation Conformity Criterion for Assessment of the Concrete Strength Under Uncertainty Conditions / V.V. Tur, S.S. Derechennik // High Tech Concrete: Where Technology and Engineering Meet: Proceedings of the 2017 fib Symposium, held in Maastricht, The Netherlands, June 12–14, 2017 / D.A.Hordijk and M.Luković (eds.) – Springer International Publishing AG 2018. – P. 1628–1635.
- Tur, V. Assessment of the concrete compressive strength in existing structures based on core test results / V.Tur, S.Derechennik // 24. Betonářské dny 2017: Sborník ke konferenci, Litomyšl, Česká republika, 22. a 23. listopadu 2017. – Česká betonářská společnost ČSSI, 2017. – P. 1–6.

Материал поступил в редакцию 15.05.2018

DERECHENNIK S.S., TUR V.V. A new approach to assessment of the concrete *in-situ* characteristic compressive strength in existing RC-structures based on limited test data

In recent years a new generation of the European standards is developed. In contrast to existing Eurocode a new version of the standard EN 1992 includes of the special chapter, which consists of requirements for existing structures assessment. In this case one of the main problems is connected with *in-situ* concrete characteristic strength assessment. It was shown, that proposed quantile estimators in Eurostandards are estimated *in-situ* characteristic strength with unknown confidence level. A new approach to estimation of the *in-situ* characteristic strength based on order statistics is proposed and verified.

УДК 693.977

Черноиван В.Н., Черноиван Н.В., Хоровец В.В., Черноиван А.В.

ВОЗВЕДЕНИЕ И РЕКОНСТРУКЦИЯ ЖИЛЫХ ЗДАНИЙ С ПРИМЕНЕНИЕМ ЛЕГКИХ СТАЛЬНЫХ ТОНКОСТЕННЫХ КОНСТРУКЦИЙ (ЛСТК)

Введение. Как показала практика, применение металлических конструкций, выполненных из стальных гнутых профилей, при возведении несущего каркаса зданий и сооружений промышленного назначения позволяет существенно снизить трудоемкость производства работ. Основными преимуществами технологии возведения зданий и сооружений из металлических конструкций являются:

- отсутствие мокрых процессов, что позволяет выполнять строительство круглогодично;

- отказ от применения тяжелой строительной техники;
- высокая технологичность соединений элементов несущего каркаса.

Однако низкие теплотехнические характеристики стали ($\lambda=58$ Вт/(м \times °С)) и достаточно высокая стоимость стального проката, несмотря на все вышеперечисленные достоинства металлических конструкций, позволяют рекомендовать их для массового возведения нежилых зданий и сооружений.

Черноиван Вячеслав Николаевич, к.т.н., профессор, профессор кафедры технологии строительного производства Брестского государственного технического университета

Черноиван Николай Вячеславович, к.т.н., доцент, доцент кафедры прикладной механики Брестского государственного технического университета.

Хоровец Владислав Вячеславович, магистрант кафедры технологии строительного производства Брестского государственного технического университета.

Черноиван Анна Вячеславовна, к.т.н., доцент, доцент кафедры экономики и организации строительства Брестского государственного технического университета.

Беларусь, БрГТУ, 224017, г. Брест, ул. Московская 267.