

Тур Виктор Владимирович, д-р техн. наук, профессор, заведующий кафедрой, Брестский государственный технический университет, г. Брест (Беларусь)

Дереченник Станислав Станиславович, канд. техн. наук, доцент, заведующий кафедрой, Брестский государственный технический университет, г. Брест (Беларусь)

Колевчук Виталий Валерьевич, аспирант, Брестский государственный технический университет, г. Брест (Беларусь)

Viktor Tur, DSc in Engineering Science, Professor, Head of the department, Brest State Technical University, Brest (Belarus)

Stanislav Derechennik, PhD in Engineering Science, Associate Professor, Head of the department, Brest State Technical University, Brest (Belarus)

Vitaly Kolevchuk, post-graduate student, Brest State Technical University, Brest (Belarus)

НОВЫЙ ПОДХОД К ОЦЕНИВАНИЮ ПРОЧНОСТИ БЕТОНА НА СЖАТИЕ В СУЩЕСТВУЮЩИХ КОНСТРУКЦИЯХ

A NEW APPROACH TO IN-SITU CONCRETE COMPRESSIVE STRENGTH ASSESSMENT IN EXISTING STRUCTURES

АННОТАЦИЯ

Оценивание прочности бетона в существующих конструкциях является важной проблемой, которая связана как с обеспечением конструкционной надёжности, так и контролем качества поставляемого бетона. В соответствии с новой концепцией EN13791, одной из главных целей стандарта является не установление класса прочности бетона на сжатие, а оценивание in-situ характеристической прочности, используемой при необходимости в проверочных расчётах конструкций. Действующие в настоящее время на территории Республики Беларусь стандарты (СТБ 2264, ГОСТ 18105)

практически не различают целей проведения испытаний, смешивая требования контроля качества и оценивания существующих конструкций. При этом, с одной стороны, результаты, получаемые при непрямом оценивании даже при использовании градуировочных зависимостей, имеют низкую обеспеченность (50% в случае СТБ 2264) или довольно большие неопределённости для повторного оценивания. Кроме того, применяемые критерии в виде эстиматоров квантилей позаимствованы из СТБ EN206 без соответствующей адаптации к целям решаемой задачи. В связи с этим разработка критериев как для оценивания соответствия *in-situ* прочности бетона на сжатие, так и надёжных эстиматоров квантилей низкого порядка при ограниченном количестве результатов испытаний является очень важной научно-практической проблемой. В ряде случаев для решения данной проблемы традиционные статистические методы являются неприменимыми, т.к. дают расплывчатый результат, содержащий большую долю неопределённости. Предложенный критерий оценивания характеристической *in-situ* прочности бетона базируется на непараметрических доверительных интервалах для квантилей. Критерий верифицирован как с использованием симуляции Монте-Карло, так и на результатах *in-situ* испытаний для существующих конструкций.

ABSTRACT

Evaluation of the concrete compressive strength in existing structures is an important problem, which is associated with structural reliability estimation as well as a quality control procedure. In accordance with a new concept of EN13791 on the main target of the standard is determined not a class, but in-situ characteristic concrete compressive strengths. In general, case the procedure of evaluation of in-situ characteristic compressive strength in structural members includes: (1) preparation of the data inputs for the evaluation, based on results of the direct testing of the cored specimens taken out of structure (reference method) or on the test results of the indirect in-situ tests using non-destructive methods; (2) determination of the relationship between compressive strength of concrete, obtained based on drilled cores (reference specimens) and results of indirect measurement (for example, rebound hammer

number); (3) evaluation of the total uncertainty of data inputs for the evaluation; (4) substantive and formal basic for evaluation including conformity criteria. The last task is very important in case of the small group of the test results. Hereby, proposed criterion for the estimation of the in-situ characteristics concrete compressive strength is based on the non-parametric confidence interval for quantile. This proposed criterion was positively verified by the both Monte Carlo simulation and test results obtained under the real structure.

Ключевые слова: бетон, контроль качества, характеристическая прочность, неразрушающие методы, оценка квантили.

Keywords: concrete, quality control, characteristic strength, non-destructive methods, evaluation of quantile.

ВВЕДЕНИЕ

В последние годы значительно возросла популярность методов оценивания *in-situ* прочности бетона при применении приборов неразрушающего контроля либо комбинаций результатов не прямых испытаний с результатами испытаний выбуриваемых кернов. Это обусловлено, с одной стороны, появлением на рынке большой гаммы электронных и электронно-механических приборов с блоками обработки информации (что якобы позволяет повысить оперативность контроля), а с другой стороны – совершенно необоснованными записями в нормативных документах, введенных на территории Республики Беларусь в качестве межгосударственных стандартов.

Так, межгосударственный стандарт ГОСТ 18105 [1] содержит в п. 4.3 запись, в соответствии с которой только «в исключительных случаях (при невозможности проведения сплошного контроля прочности бетона монолитных конструкций с использованием неразрушающих методов) допускается определять прочность бетона по контрольных образцам, отобраным из конструкций».

Внесение данного требования в ГОСТ 18105 [1] привело к тому, что представители органов технического надзора (равно как и других контролирующих органов) возвели неразрушающий

контроль в ранг процедуры, заменяющей прямое оценивание соответствия прочности бетона по выбуренным кернам, а также по контрольным образцам, изготавливаемым при производстве бетона на строительном объекте, что полностью противоречит требованиям Технического регламента. При этом по результатам неразрушающего контроля прочности бетона пытаются судить о качестве работы предприятий, производящих бетон. Порядок проведения процедуры оценивания соответствия прочности бетона является предметом отдельного анализа и не рассматривается в данной статье. Следует отметить лишь одно замечание, содержащееся в СТБ EN13791 [2]: *«неразрушающие методы контроля прочности не заменяют процедуры испытаний и оценивания соответствия по СТБ EN206 [3]»*.

Согласно [2] непрямые (неразрушающие или квази-неразрушающие) методы испытаний при оценивании прочности бетона в конструкции следует применять 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, в тех случаях, когда существуют сомнения относительно фактической прочности бетона на сжатие в конструкции из-за некачественного выполнения работ, дефектов и повреждения бетона;
- при оценивании текущих значений прочности необходимо выполнять в процессе строительства, что предусматривается разработанной системой контроля качества;
- при выполнении проверок предельных состояний конструктивных элементов в тех случаях, когда изготовителем установлено и декларировано несоответствие прочности бетона при проведении испытаний по СТБ EN206 [3];
- при оценивании 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 на предприятиях сборного железобетона.

Как следует из представленного перечисления, главной целью испытаний, выполняемых на существующей конструкции, является не выявление класса бетона по прочности на сжатие (что уже само по себе бессмысленно в полевых условиях), а установление значения характеристической прочности.

При этом в качестве основного (реферативного) метода оценивания *in-situ* прочности бетона на сжатие являются прямые испытания образцов – кернов, выбуриваемых из конструкции, а неразрушающие (косвенные) методы оценивания рассматриваются в качестве альтернативы.

В Республике Беларусь параллельно действует несколько стандартов, имеющих непосредственное отношение к оцениванию *in-situ* прочности бетона на сжатие в существующих конструкциях: СТБ 2264 [5], СТБ EN13791 [2], ГОСТ 18105 [1]. При этом необходимо отметить, что два из них (СТБ 2264 и СТБ EN13791) в настоящее время находятся в стадии переработки.

Многообразие стандартов, содержащих не только различные, но и в ряде случаев противоречивые требования, вызывает недоумение у практикующих инженеров ввиду неопределённостей, связанных с оцениванием прочности бетона в существующих конструкциях. Так, трудно объяснить, почему, используя одну и ту же выборку данных (или пары данных), но различные стандарты, результаты оценивания как собственно *in-situ* прочности на сжатие, так и характеристической прочности бетона существенно отличаются. При этом совершенно непонятно, какие из полученных результатов следует считать достоверными.

В общем случае процедура оценивания *in-situ* прочности бетона в существующих конструкциях включает следующие основные этапы:

1. **Градуировка** – установление надёжных корреляционных зависимостей между *in-situ* прочностью бетона и косвенной характеристикой применяемого прибора неразрушающего контроля.

Здесь следует оговориться, что одной из наиболее распространённых ошибок при выполнении оценивания *in-situ* прочности бетона с привлечением приборов неразрушающего контроля является применение в качестве градуировочных зависимостей т.н.

универсальных или базовых зависимостей, прописанных в измерительном алгоритме прибора. На данный шаг пользователя подталкивают сам факт наличия такой зависимости в программном обеспечении, заложенном в приборе (что декларируется изготовителем) и связанная с этим иллюзия получения достоверного результата испытаний, т.к. он индицируется в единицах прочности.

Следует отметить, что в версии межгосударственного стандарта ГОСТ 22690 [4], введённого в Республике Беларусь в 2016 году, появилась следующая важная запись: *«показания приборов, градуированных в единицах прочности бетона, следует рассматривать как косвенный показатель прочности бетона. Указанные приборы следует использовать только после установления градуировочной зависимости “показание прибора – прочность бетона” или привязки установленной зависимости в приборе»*.

2. **Подготовка исходных данных** для оценивания, полученных либо прямыми испытаниями кернов, выбуренных из конструктивного элемента, либо косвенными методами неразрушающего контроля с учётом оценённых неопределённостей получения результатов. Следует отметить, что важным вопросом в данном случае является статистическое оценивание выбросов.
3. **Оценивание результатов** испытаний с применением адекватных критериев для проверок, получаемых эстиматоров квантилей, соответствующих характеристической *in-situ* прочности бетона.

В данном случае следует различать две возможные процедуры оценивания:

а) оценивание соответствия прочности поставленного бетона классу бетона по прочности на сжатие указанному в спецификации. В этом случае применимы критерии, разработанные для оценивания соответствия в рамках производственного контроля, как это, например, определено в СТБ EN206 [3];

б) установление характеристической *in-situ* прочности бетона в существующей конструкции как базовой характеристики для проверок предельных состояний конструктивного элемента. Разработка методов оценивания эстиматора квантили является задачей довольно непростой. Особенно когда подобное

оценивание необходимо выполнять, опираясь на ограниченные выборки результатов испытаний, как это имеет место при испытаниях выбуренных кернов.

Учитывая то обстоятельство, что в настоящее время выполняется переработка как европейского EN13791 (CEN TG250/SC2), так и национального СТБ 2264 (ТКС8) стандартов, представляется целесообразным рассмотреть некоторые ключевые положения, касающиеся как процедур получения адекватных результатов испытания *in-situ* прочности, так и методов оценивания характеристической прочности в соответствии с поставленной целью. В данной статье коснёмся только некоторых ключевых моментов оценивания *in-situ* прочности бетона. Так, например, соотношение размеров выбуренных кернов является вопросом, требующим отдельного рассмотрения.

ГРАДУИРОВОЧНЫЕ ЗАВИСИМОСТИ

В отличие от стандарта СТБ 2264 [5] как прежняя, так и новая версия стандарта EN13791 [2] допускает два альтернативных подхода к построению градуировочных зависимостей:

Альтернатива 1: применение регрессионного анализа при наличии не менее 18 пар результатов. Под *парой результатов* понимают среднее значение косвенной характеристики прочности, полученной косвенным измерением (например, метод упругого отскока), и результат прямого испытания контрольного образца (например, выбуренного керна) бетона из одного и того же места.

Альтернатива 2: градуировка с помощью предварительно установленной т.н. *базовой кривой*, включённой в стандарт. В соответствии с новой версией стандарта, данная альтернатива может применяться в тех случаях, когда получено от 6 до 11 пар результатов.

Базовые кривые, внесённые в стандарт, установлены, опираясь на обширные базы данных, полученных для конкретных приборов неразрушающего контроля при испытаниях различных видов бетона с различными заполнителями, содержанием вяжущего, влажность и т.д. [6].

Следует отметить, что при *альтернативе 1* стандарт СТБ EN13791 [2] не даёт подробных и точных указаний относительно принятых (требуемых) доверительных пределов (в частности, нижнего доверительного предела) и обеспеченности $(1-\alpha)$ градуировочной зависимости.

Стандарт СТБ 2264 [5] опирается при построении градуировочных зависимостей исключительно на регрессионный анализ (функция линейной регрессии вида $f_{c,cube,F} = a_0 + a_1 H$ с доверительным интервалом $\pm \sigma$), в то время как EN13791 содержит смещённые оценки.

В общем случае, согласно [5], при выполнении регрессионного анализа, прежде всего необходимо выявить источники изменчивости рассматриваемой переменной (в данном случае *in-situ* прочности бетона на сжатие в конструкции). В зависимости от источников их происхождения могут быть выделены:

а) изменчивости, связанные с условиями проведения испытания и являющиеся результатом технологии выпиливания кернов, различий в размерах кернов (диаметр и длина), отношений диаметра/длины, влажности испытываемого бетона;

б) изменчивости в пределах одного участка испытания, включающие изменчивости, имеющие место в процессе приготовления, укладки бетонной смеси и хранения бетона в пределах анализируемого участка;

с) изменчивости между отдельными участками, на которых производят измерения, обусловленные изменчивостью в свойствах и пропорциях составляющих материалов, технологии приготовления бетонной смеси.

Между тем, существуют и другие источники изменчивости, которые накладываются и искажают устанавливаемую градуировочную зависимость, к ним относят факторы, влияющие, например, на значение коэффициента упругого отскока и отличные собственно от прочности. Например, условия и влажность поверхности, шероховатость и карбонизация поверхностных слоёв бетона, погрешности (неопределённость) соответственно молотка Шмидта (т.н. *error in x*), а также, например, неопределённости принятой регрессионной модели (линейная, степенная и т.д.).

При этом ни один из пересматриваемых стандартов [2, 5] не содержит конкретных указаний относительно перечисленных неопределённостей и методов их учёта при построении регрессионных моделей. Вместе с тем указано, что регрессионный анализ должен обеспечивать получение «наиболее подходящей кривой» (*the best fit line curve*).

Принимая во внимание неопределённости регрессионного анализа, СТБ EN13791 [2] устанавливает, что «градуировочная зависимость должна быть определена на уровне нижнего 10% квантиля прочности», т.е. доверительный предел должен обеспечивать покрытие 90% результатов оценивания прочности с обеспеченностью $(1-\alpha) = 0,95$.

Получение аналитической зависимости для вычисления доверительных пределов при принятых ограничениях является довольно сложной задачей. Поэтому в специальной литературе содержится ограниченное число таких зависимостей [6].

Точное решение содержится, например, в работе De Gruze [7] для простого случая расчёта одностороннего доверительного предела (определённого без учёта ошибки измерительного прибора, т.н. *error in x*) для линейной регрессии:

$$y_{LT}(x) = \hat{y}(x) - t'_{\alpha, n-2, \delta} \cdot \hat{\sigma} \cdot A. \quad (1)$$

После преобразований выражение (1) может быть записано в виде:

$$y_{LT}(x) = \hat{y}(x) - \hat{\sigma} \frac{\Phi^{-1}(p) + A \cdot \Phi^{-1}(1-\alpha) \sqrt{1 + \frac{1}{n-2} \left(\frac{\Phi^{-1}(p)^2}{A^2} - (\Phi^{-1}(1-\alpha))^2 \right)}}{1 - \frac{(\Phi^{-1}(1-\alpha))^2}{2(n-2)}}. \quad (2)$$

Пояснения к переменным, входящим в формулы (1) и (2), приведены в [6]. Разности $(y_i - \hat{y}_i)$ в формулах (1) и (2) являются

независимыми, имеют нормальное распределение и постоянную вариацию для любых y_i .

В случае применения альтернативы 2 используют регрессионный анализ только для оценки одного параметра – смещения Δf базовой кривой.

Для соответствующих методов неразрушающего контроля детальные правила преобразования базовых кривых по результатам прямых испытаний приведены в СТБ EN13791 [2].

Необходимо заметить, что оба стандарта (СТБ 2264, EN13791) содержат методологию преобразования результатов косвенных измерений в *in-situ* прочность для конкретного участка конструкции в соответствии с правилами построения градуировочных зависимостей. Вместе с тем ни один из стандартов не содержит указаний, относящихся к оцениванию характеристической *in-situ* прочности бетона, опираясь на полученные (оценённые) единичные результаты. Вместе с тем процедура дальнейшего использования исходных данных для получения значений характеристической прочности не так проста, как это может показаться на первый взгляд.

Проиллюстрируем это оцениванием, выполненным по трём выборкам пар значений (косвенная характеристика – прочность испытанного образца в прессе), происходящих из бетона одного класса, уложенного в одну конструкцию (всего участвовало 44 пары значений). Была выполнена следующая процедура оценивания. Для нулевой выборки, содержащей 18 пар результатов испытаний, были построены градуировочные зависимости по правилам EN13791 (регрессионный анализ AL1, метод базовой кривой AL2) по СТБ 2264 [5] и с использованием зависимости по формуле (2), учитывающей скедастичность (см. рис. 1). Затем полученные градуировочные зависимости были применены для конвертации результатов косвенных измерений в *in-situ* прочность для последующих выборок 1, 2, 3.

Как видно из рисунка 1, градуировочная зависимость по СТБ 2264 [5] представляет собой уравнение линейной регрессии с доверительным интервалом, равным двойному стандартному отклонению с учётом отбраковки результатов за пределами этого

интервала (выше градуировочной зависимости располагается около 50% всех результатов). Смещённая градуировочная зависимость по EN13791 [2] составлена так, что должна покрывать не менее 90% всех результатов испытаний (при этом обеспеченность не оговаривается). Кривая по формуле (2) обеспечивает 90% покрытие всех результатов испытаний с обеспеченностью 0,95. Безусловно, что оценённые значения *in-situ* средней прочности, полученные с применением градуировочных зависимостей EN13791 и кривой по формуле (2), меньше, чем полученные по СТБ 2264. При этом несмещённые линейные функции, полученные по правилам AL1 EN13791, практически не отличаются от зависимости, установленной по СТБ 2264.

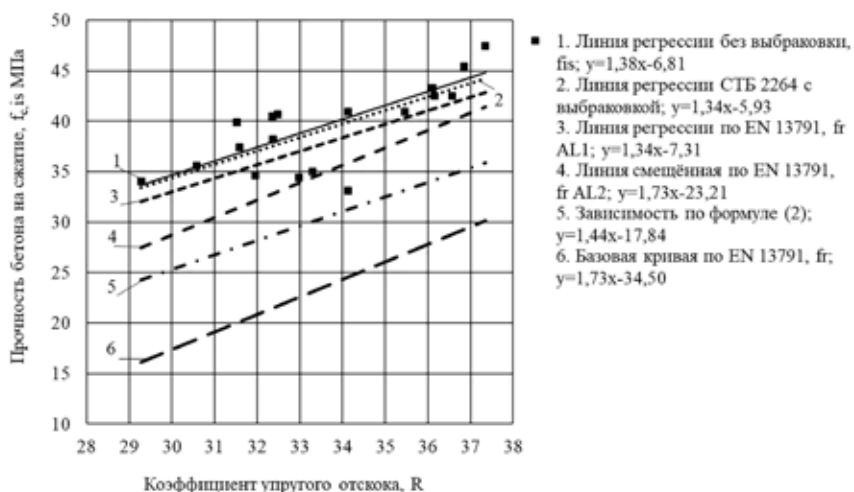


Рисунок 1. К сравнению градуировочных зависимостей, построенных по правилам СТБ EN 13791 и СТБ 2264 прочности бетона на сжатие (по молотку Шмидта)

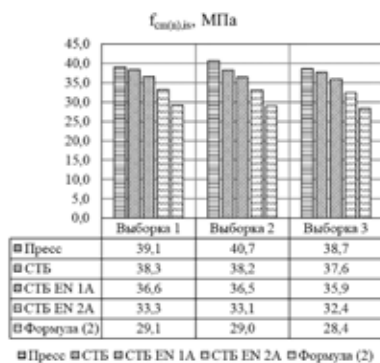
При выполнении градуировок зависимость « $f - R$ » была получена методами регрессионного анализа, основываясь на парах результатов испытаний для «нулевой» выборки. Для последующих выборок (которые получены на других участках в пределах конструкции) результаты *in-situ* прочности устанавливают уже по градуировочной зависимости, полученной на «нулевой» выборке. При

этом каждому единичному измерению косвенной характеристики соответствует только одно значение *in-situ* прочности, конвертированное из градуировочной зависимости. Это, очевидно, должно приводить к снижению стандартного отклонения (дисперсии) оценённых результатов (см. рис. 2) и, как следствие, к завышенным значениям квантилей, соответствующих *in-situ* характеристической прочности и не только по сравнению с результатами прямых испытаний. Наклон градуировочных функций дополнительно свидетельствует о их дискриминационной способности. Так, увеличение угла наклона функции, с одной стороны, ведет к более жесткому оцениванию результатов в области низких значений прочности и более мягкому оцениванию – в области высокой прочности, а с другой – является показателем более высокого значения стандартного отклонения. Как следует из совместного рассмотрения графиков, показанных на рисунках 1 и 2, градуировки по СТБ 2264 имеют наименьший угол наклона (как и несмещённая кривая AL1), соответственно, наименьшее стандартное отклонение и наибольшую оценку характеристической прочности. Смещение градуировочных зависимостей, как это предложено в [2, 6], несколько улучшает ситуацию с точки зрения безопасности, но всё равно не позволяет утверждать, что полученные квантили реалистичны.

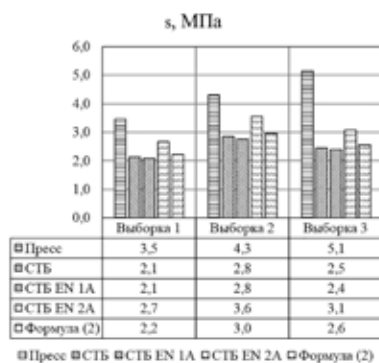
Таким образом, при оценивании характеристических значений *in-situ* прочности результат существенным образом зависит как от величины стандартного отклонения, так и от вида аналитической зависимости, используемой для вычисления эстиматора характеристической прочности. Применяемые в рамках действующих стандартов СТБ 2264 и СТБ EN13791 методы оценивания базируются, главным образом, на положениях СТБ EN206 и имеют все присущие ему недостатки, в частности, при оценивании малых групп результатов, что было показано в наших работах, например, в [8].

Поэтому для обоснованного оценивания результатов как прямых, так и косвенных испытаний *in-situ* прочности бетона на сжатие был разработан новый метод оценивания, опирающийся на непараметрические (порядковые) статистики и не зависящий от вида функции распределения вероятности и её статистических параметров.

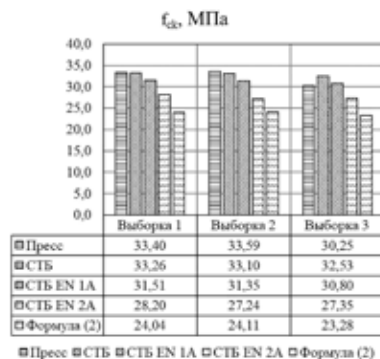
а)



б)



в)



г)

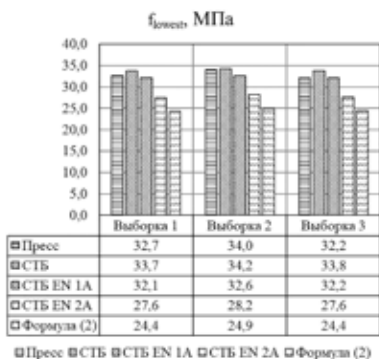


Рисунок 2. Оценочные значения средней (а), стандартного отклонения (б), характеристической прочности (в), минимального значения (г), полученные с использованием различных градуировочных зависимостей (бетон $C^{20}/_{25}$ по спецификации)

НОВЫЙ МЕТОД ОЦЕНИВАНИЯ ПРОЧНОСТИ БЕТОНА В СУЩЕСТВУЮЩИХ КОНСТРУКЦИЯХ ПРИ ОГРАНИЧЕННОЙ ВЫБОРКЕ РЕЗУЛЬТАТОВ ИСПЫТАНИЙ

Обоснование и формулировка нового метода

Был разработан новый метод оценивания характеристической прочности бетона в существующих конструкциях на основе

порядковых (непараметрических) статистик, который может быть применим в случаях ограниченной исходной информации (т.е. при ограниченном числе результатов испытаний).

Исходной предпосылкой нового метода является известный способ интервального оценивания квантилей [8, 9], 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 путём 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. войдёт 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 при оценивании *in-situ* прочности бетона в существующих конструкциях число N результатов испытаний значительно меньше, чем $N = 14$, поэтому истинное характеристическое значение прочности $f_{ck, is}$ практически всегда будет меньше (возможно, даже существенно) минимального значения прочности в исходной выборке.

Была разработана [10] оригинальная процедура получения оценки «снизу» искомой квантили с произвольно задаваемой обеспеченностью. Под обеспеченностью (коэффициентом дове-

рия) 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 в [10].

С применением аналогичного подхода к задаче анализа прочности бетона в существующих конструкциях был сформулирован новый метод вычисления оценки характеристической прочности бетона (т.е. квантили уровня $p = 0,05$) как линейной

комбинации трёх первых порядковых статистик эмпирического ряда измерений:

$$f_{ck, is} = f_{c \min} - \lambda_1 \Delta_{2-1} - \lambda_2 \Delta_{3-2}, \quad (3)$$

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 объёма 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 1.

Таблица 1

Тестовые коэффициенты λ_1 , λ_2 для расчёта оценки характеристической прочности бетона для выборки объёма N при различной обеспеченности оценки

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	0,00	–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

ВЕРИФИКАЦИЯ НОВОГО МЕТОДА ОЦЕНИВАНИЯ IN-SITU ХАРАКТЕРИСТИЧЕСКОЙ ПРОЧНОСТИ БЕТОНА

Для верификации нового метода использовали симуляцию 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 2 000 000 до 5 000 000 случайных выборок – групп $\{f_{c1}, f_{c2}, \dots, f_{cN}\}$ из $N = 3, 4, 5, \dots, 15$ результатов. Каждая полученная группа подвергалась обработке (расчёту оценки $\hat{f}_{ck, is}$ характеристической прочности) с использованием известных способов [2] и [11], 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 (объём N выборок и метод расчета) образовывал некоторое распределение, для которого определялся 95%-й интервал, нижняя и верхняя границы которого соответствовали квантилям полученного распределения с уровнями 0,025 и 0,975. Результаты сравнительной верификации известных и нового методов на примере бетона класса $C^{30}/_{35}$ со среднеквадратическим отклонением прочности $\sigma = 4$ МПа представлены на рисунке 3.

Анализ полученных результатов показал следующее.

Метод [2], основанный на вычислении среднего значения $f_{m(N), is}$ по выборке результатов измерений с учетом фиксированной, для определенного размера группы результатов, поправки k даёт оценку с наименьшим рассеянием, а значит, и наименьшим среднеквадратическим отклонением оценки. Поэтому данная 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 равняется

оцениваемому параметру. В рассматриваемом на рисунке 3 примере такое равенство имеет место для случаев $N = 7, 8, 9$, т.е. при поправке $k = 6 \text{ МПа}$. 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 $\sigma = 3 \text{ МПа}$ у бетона класса $C^{30}/_{35}$) либо не достигаться вовсе (например, для $\sigma = 5 \text{ МПа}$ 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).

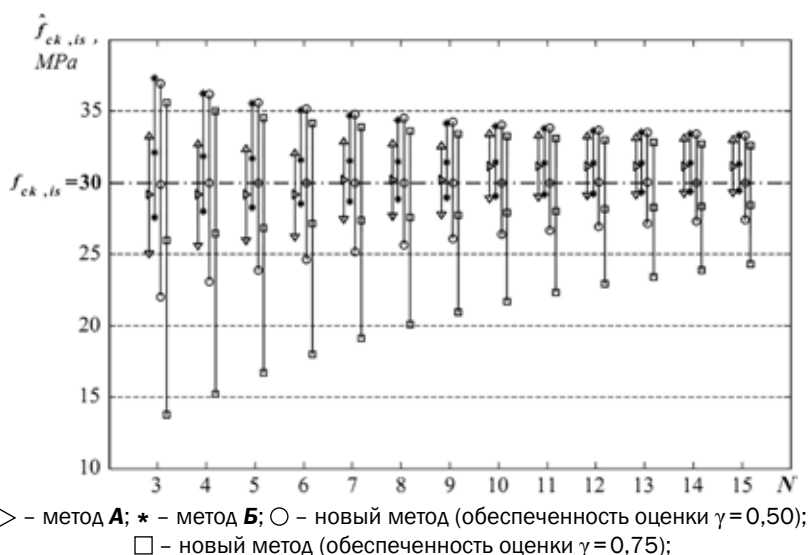


Рисунок 3. Интервалы рассеяния и медианы оценок характеристической прочности бетона класса C30/35 ($\sigma = 4 \text{ МПа}$) для различного объема результатов испытаний

Метод [11], 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 [11] предпочтительнее метода [2]), 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 для $N = 15$, поэтому оценка, очевидно, также не может считаться несмещенной.

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 выборки, 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 [11] (а в некоторых случаях – также и для метода [2]). Этот факт может дополнительно свидетельствовать в пользу корректности нового метода.

Таким образом, новый метод оценивания имеет явные преимущества перед известными методами [2] и [11], так как даёт возможность получить несмещенную и состоятельную оценку характеристической прочности бетона в существующих конструкциях при ограниченном количестве результатов испытаний прочности. Такая оценка к тому же имеет заранее заданную обеспеченность (коэффициент 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 $C^{30}/_{35}$ при $\sigma = 5 \text{ МПа}$ и $N > 10$) в достаточно узкий ввиду формально высокой эффективности оценки интервал ее рассеяния истинное значение характеристической прочности вообще не попадает (!).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проанализированы методические подходы к построению градуировочных зависимостей, применяемых при определении *in-situ* прочности бетона неразрушающими методами или их комбинацией с прямыми испытаниями. Показано, что выбор градуировочной зависимости и её параметрических точек существенно влияет на величину оцениваемой *in-situ* характеристической прочности. Это обусловлено, кроме всего прочего, влиянием стандартного отклонения оцениваемых результатов.

Предложен новый метод оценивания квантилей, соответствующих характеристической прочности, основанный на положениях теории непараметрических порядковых статистик. Новый метод показал положительные результаты верификации на фоне численных исследований с применением симуляции Монте-Карло.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Бетоны. Правила контроля и оценки прочности : ГОСТ 18105-2010. – Введ. 01.11.13. – Минск: Государственный комитет по стандартизации Республики Беларусь, 2013. – 27 с.
2. Оценка прочности на сжатие бетона в конструкциях и сборных элементах конструкций : СТБ EN 13791-2012. – Введ. 01.07.12. – Минск: Государственный комитет по стандартизации Республики Беларусь, 2012. – 26 с.
3. Бетон. Требования, показатели, изготовление и соответствие : СТБ EN 206-2016. – Введ. 01.07.17. – Минск:

Государственный комитет по стандартизации Республики Беларусь, 2017. – 108 с.

4. Определение прочности механическими методами неразрушающего контроля : ГОСТ 22690-2015. – Введ. 01.05.17. – Минск: Государственный комитет по стандартизации Республики Беларусь, 2017. – 27 с.
5. Испытание бетона. Неразрушающий контроль прочности : СТБ 2264-2012. – Введ. 01.01.13. – Минск: Государственный комитет по стандартизации Республики Беларусь, 2013. – 22 с.
6. Monteiro A., Gonsales A. Assessment of characteristic compressive strength in structures by rebound hammer test according to EN 13791:2007-NDTCE'09, Nantes, France, June, 2009.
7. De Gryze D, et., Using the correct intervals for prediction: A tutorial of tolerance intervals for ordinary least-squared regression-Chemometric and intelligent laboratory system. Vol. 87. No. 2, March 2007. pp. 147-154.
8. David H. A. Order statistics, 2nd ed. – John Wiley & Sons, New York, 1981. – 360 p.
9. Кобзарь, А. И. Прикладная математическая статистика. Для инженеров и научных работников / А. И. Кобзарь. – М.: ФИЗМАТЛИТ, 2006. – 816 с.
10. Тур, В.В. Новый критерий для оценивания соответствия прочности бетона в условиях ограниченной выборки результатов испытаний / В. В. Тур, С. С. Дереченник // Строительство и реконструкция. – 2016. – № 6 (68). – С. 71–84.
11. Harrison T. A. Assessment of concrete compressive strength is structure, 42 ERMCO, 2015.

REFERENCES

1. *Betony. Pravila kontrolya i otsenki prochnosti* : GOST 18105-2010. – Vved. 01.11.13. Minsk: Gosudarstvennyy komitet po standartizatsii Respubliki Belarus, 2013. 27 p. (ru)
2. *Otsenka prochnosti na szhatiye betona v konstruktsiyakh i sbornykh elementakh konstruktsiy* : STB EN 13791-2012. Vved.

- 01.07.12. Minsk: Gosudarstvennyy komitet po standartizatsii Respubliki Belarus, 2012. 26 p. (ru)
3. *Beton. Trebovaniya, pokazateli, izgotovleniye i sootvetstviye* : STB EN 206-2016. Vved. 01.07.17. Minsk: Gosudarstvennyy komitet po standartizatsii Respubliki Belarus 2017. 108 p. (ru)
 4. *Opredeleniye prochnosti mekhanicheskimi metodami nerazrushayushchego kontrolya* : GOST 22690-2015. Vved. 01.05.17. Minsk: Gosudarstvennyy komitet po standartizatsii Respubliki Belarus, 2017. 27 p. (ru)
 5. *Ispytaniye betona. Nerazrushayushchiy kontrol prochnosti* : STB 2264-2012. Vved. 01.01.13. Minsk: Gosudarstvennyy komitet po standartizatsii Respubliki Belarus, 2013. 22 p. (ru)
 6. Monteiro A., Gonsales A. Assessment of characteristic compressive strength in structures by rebound hammer test according to EN 13791:2007-NDTCE'09, Nantes, France, June, 2009.
 7. De Gryze D, ect. Using the correct intervals for prediction: A tutorial of tolerance intervals for ordinary least-squared regression-Chemometric and intelligent laboratory system, Vol. 87. No. 2, March 2007. pp. 147-154.
 8. David H.A. Order statistics. 2nd ed. John Wiley & Sons, New York, 1981. 360 p.
 9. Kobzar A. I. Prikladnaya matematicheskaya statistika. Dlya inzhenerov i nauchnykh rabotnikov. Moscow: FIZMATLIT, 2006. 816 p. (ru)
 10. Tur V. V., Derechennik S. S. Stroitelstvo i rekonstruktsiya. 2016. No. 6 (68). pp. 71–84. (ru)
 11. Harrison T.A. Assessment of concrete compressive strength is structure, 42 ERMCO, 2015.

Статья поступила в редколлегию 29.09.2017