

О ПРАВИЛАХ ПОСТРОЕНИЯ ГРАДУИРОВОЧНЫХ ЗАВИСИМОСТЕЙ ПРИ ОЦЕНИВАНИИ ПРОЧНОСТИ БЕТОНА НА СЖАТИЕ ПО СТБ EN 13791 И СТБ 2264 (часть 1)

Тур В.В., д-р техн. наук, профессор,
Дереченник С.С., канд. техн. наук, доцент, **Колевчук В.В.**, магистрант
(Брестский государственный технический университет)

Аннотация. В статье рассмотрены и проанализированы теоретические основы и правила построения градуировочных зависимостей, применяемых для оценивания прочности бетона на сжатие в конструкциях по стандартам, действующим в Республике Беларусь. Показано, что стандарты имеют различные подходы к построению градуировочных зависимостей и различные уровни обеспеченности результатов, которые следует учитывать при оценивании прочности бетона неразрушающими методами.

Введение

В последние годы популярность и доступность различных неразрушающих методов оценивания прочности бетона на сжатие, в существующих конструкциях, резко возросла. Это связано с выходом на рынок Республики Беларусь электронных приборов, с наличием блока обработки информации, что позволяет заметно повысить оперативность контроля.

Кроме того, имеет место и ещё одна причина повышенного внимания к оцениванию прочности бетона неразрушающими методами. Межгосударственный стандарт, ГОСТ 18105 [3] 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 контрольным образцам, отобраным их конструкций»

Внесение данного требования в ГОСТ 18105 [3] привело к тому, что представители органов технического надзора, как равно и другие контролирующие органы, возвели проведение неразрушающего контроля в ранг процедуры, заменяющей оценивание соответствия прочности бетона по контрольным образцам. При этом, по результатам неразрушающего определения 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 EN 13791 [1]: «неразрушающие методы контроля прочности, не заменяют процедуры испытаний и оценивания соответствия по СТБ EN 206 [4]».

Однако одной из распространённых ошибок при выполнении неразрушающих испытаний прочности бетона на сжатие является использование в качестве градуировочных зависимостей так называемых универсальных или

базовых зависимостей, закладываемых в измерительный алгоритм. На этот шаг пользователя подталкивает сам факт наличия такой зависимости в приборе и возникающая иллюзия достоверности результата испытаний, поскольку он индицируется в единицах прочности.

В настоящее время в Республике Беларусь действует следующий широкий ряд основных документов, содержащих как различные правила построения и проверок градуировочных зависимостей. Так и различные критерии, регламентирующие процедуру оценки класса бетона по прочности бетона в конструкциях по данным неразрушающих методов испытаний. В настоящее время действуют следующие документы, относящиеся к оцениванию прочности бетона в конструкции:

- СТБ EN 13791 [1];
- СТБ 2264 [2];
- ГОСТ 18105 [3].

Такое многообразие стандартов, содержащих не только различные, но и противоречивые требования вызывает неудовлетворение у практикующих инженеров ввиду неопределённостей, связанных с оцениванием прочности.

В настоящей статье выполнен анализ градуировочных зависимостей и правил их построения по действующим стандартам на фоне опытных данных полученных при испытаниях прочности 37 серий контрольных кубов молотком Шмидта и нагружением в прессе.

Построение градуировочных зависимостей по правилам СТБ EN 13791

В соответствии с СТБ EN 13791 [1] применение непрямых (неразрушающих) методов 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 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 [4];
- для оценивания соответствия прочности бетона на сжатие в конструкции (монолитного бетона), если это установлено требованиями спецификации или действующего стандарта;

При этом, если выполняется оценивание прочности бетона в «старых» конструкциях норма [3] требует вводить понижающие коэффициенты, учи-

тывающие карбонизацию поверхностных слоёв бетона, значения которых устанавливают в каждом случае.

Новый европейский стандарт СТБ EN 13791 [1], действующий на территории Республики Беларусь содержит методы оценивания прочности бетона на сжатие в конструкциях на основании результатов, полученных при проведении прямых (разрушающие испытания отобранных из конструкций кернов) и косвенных (неразрушающих) испытаний.

Косвенные (неразрушающие) методы испытаний следует применять после установления градуировочных зависимостей между косвенной характеристикой по прибору (например, в случае применения молотка Шмидта – коэффициент упругого отскока) и прочностью на сжатие, полученной прямым испытанием образцов бетона (кернов, выпиленных и з конструкции, цилиндров, кубов) в прессе.

В СТБ EN 13791 [1] допускается два подхода (альтернативные) для построения градуировочных зависимостей:

- подход 1 (альтернатива 1): с применением регрессионного анализа для которого используют, как минимум 18 пар результатов;
- подход 2 (альтернатива 2): градуировка с помощью предварительно установленной базовой кривой, для которой требуется как минимум 9 пар результатов.

В рассматриваемом случае пара результатов – это «косвенная характеристика – единичный результат прочности, полученной при испытании в прессе отобранных образцов бетона».

Базовые кривые установленные, опираясь на обширные базы данных, полученные при испытаниях различных видов бетона, с различными заполнителями, содержанием вяжущего, влажностью и т.д. [5]

Следует отметить, что при подходе 1, стандарт СТБ EN 13791 [1] не даёт подробных и точных указаний относительно принятых (требуемых) доверительных пределов (в частности нижнего доверительного предела) и обеспеченности $(1-\alpha)$ градуировочной зависимости.

Подход 1. Регрессионный анализ:

При выполнении регрессивного анализа, прежде всего, необходимо выявить источники изменчивости рассматриваемой переменной (в данном случае прочности бетона на сжатие в конструкции).

В общем случае в зависимости от источников их происхождения могут быть определены следующие изменчивости:

- изменчивости, связанные с условиями проведения испытания и являющиеся результатом выпиливания кернов, различий в размерах кернов (диаметр и длина), отношений диаметра/длина, влажности испытываемого бетона;
- изменчивости в пределах одного участка испытания, включающие изменчивости, имеющие место в процессе приготовления, укладки бетонной смеси и хранения бетона в пределах анализируемого участка;
- изменчивости между отдельными участками, на которых производят измерения, обусловленные изменчивостью в свойствах и пропорциях состав-

ляющих материалов, технологии приготовления и укладки бетонной смеси, условиях хранения бетона на отдельных участках.

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

При этом СТБ EN 13791 [1] не содержит никаких указаний относительно перечисленных неопределённостей и методов их учёта при построении регрессионной модели. Вместе с тем, указано, что регрессионный анализ должен обеспечивать получение «наиболее подходящей кривой» (*the best fit line curve*).

Принимая в расчёт неопределённости регрессионного анализа, СТБ EN 13791 [1] 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 зависимости для вычисления доверительных пределов является довольно сложной задачей. Поэтому в специальной литературе содержится довольно ограниченное число таких зависимостей [5].

Точное решение содержится в работе De Gruze [6] для простого случая расчёта одностороннего доверительного предела (определённого без учёта ошибки молотка, т.н. *error in x*) для линейной регрессии:

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

где $\hat{y}(x) = \hat{\beta}_0 + \hat{\beta}_1 \cdot x$ - оценённое среднее зависимой переменной, коэффициенты $\hat{\beta}_0$ и $\hat{\beta}_1$ определяют простым методом наименьших квадратов;

x - фактическое значение независимой переменной;

n - число пар результатов испытаний (x_i, y_i) ;

$t'_{\alpha, n-2, \delta}$ - не центральное t распределение с $n - 2$ степенями свободы и центральным параметром $\delta = -\Phi^{-1}(p) / A$;

$1 - \alpha$ - обеспеченность принимаемая 0,95;

p - пропорция y' ой популяции, покрываемая доверительным интервалом ($p = 0,9$)

$$\hat{\sigma}^2 = \frac{\sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2}{n - 2} \quad - \text{эстиматор изменчивости } y;$$

$$A = \sqrt{\left[\frac{1}{n} + \frac{(x_i - \bar{x})^2}{S_{xx}} \right]}$$

$$S_{xx} = \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2 \quad - \text{здесь } \bar{x} \text{ среднее из всех значений } x_i, \text{ используемое в уравнении регрессии.}$$

Окончательно после преобразований, выражение (1) может быть записано

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

В соответствии с выражениями (1) и (2) для любых \hat{y} , разность $y_i - \hat{y}_i$ являются независимыми, имеют нормальное распределение и постоянную вариацию.

Подход 2. Градуировка методом базовой кривой:

В рамках этого подхода также применяют регрессионный анализ, но только для оценки одного параметра – перемещения (смещения) Δf базовой кривой. Согласно СТБ EN 13791 [1] зависимость определена следующим образом:

$$f_{R,(is)} = 1,25R - 23 + \Delta f$$

$$20 \leq R \leq 24; \quad (3)$$

$$f_{R(is)} = 1,73R - 34,5 + \Delta f$$

$$24 \leq R \leq 50, \quad (4)$$

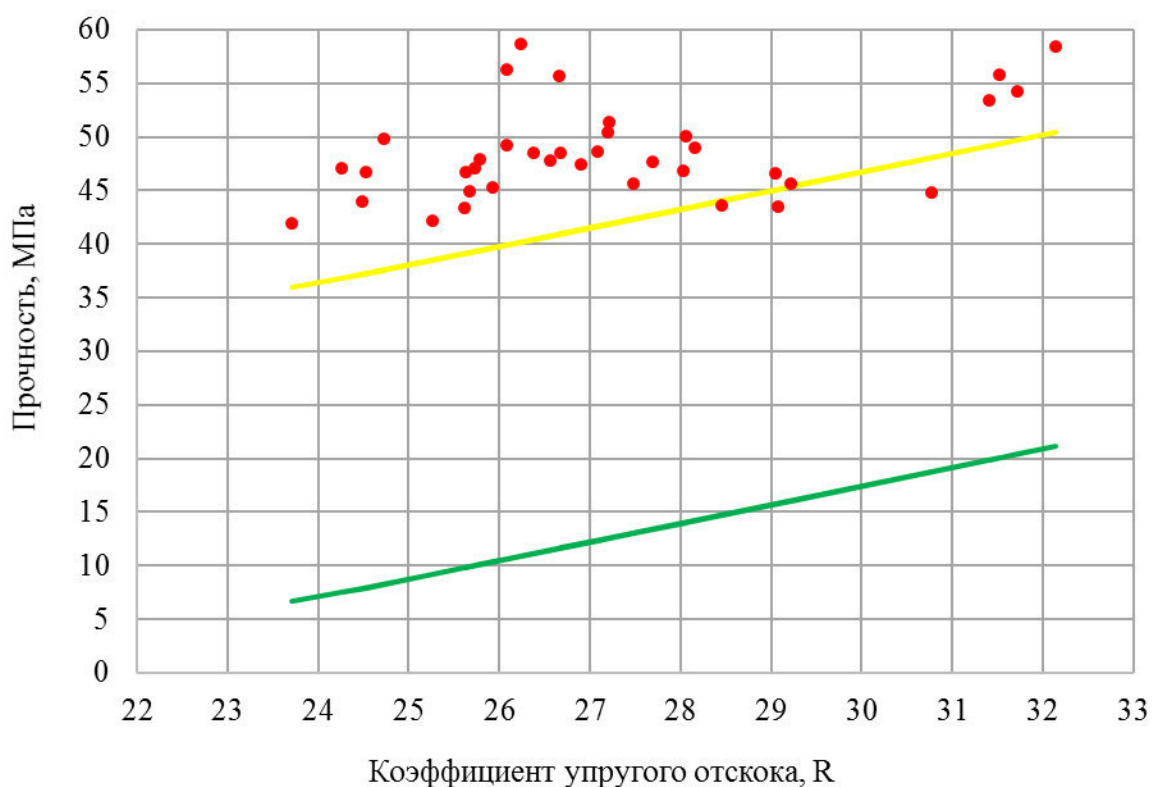
где f_R - прочность бетона на анализируемом участке;

R - косвенная характеристика – коэффициент упругого отскока для молотка Шмидта;

$$\Delta f = \delta f_{m(n)} - k_1 s, \quad (5)$$

где $\delta f_{m(n)}$, s - соответственно среднее значение прочности на сжатие бетона для n результатов испытаний и стандартное отклонение для разности $\delta f_i = f_{is} - f_{R,(is)}$;

k_1 - коэффициент, зависящий от количества пар результатов испытаний, (принимается $k_1 = 1,48$);



- Прочность образца на сжатие
- Базовая кривая $y = 1,7276x - 34,43$
- Смещённая базовая кривая $y = 1,7276x - 5,1287$

Рисунок 1 – К построению градуировочной зависимости по СТБ EN 13791 (молоток Шмидта)

Литература. 1. СТБ EN 13791 «Оценка прочности на сжатие бетона в конструкциях и сборных элементах конструкций». 2. СТБ 2264 «Испытание бетона. Неразрушающий контроль прочности». 3. ГОСТ 18105 «Бетоны. Правила контроля и оценки прочности». 4. СТБ EN 206 «Бетон. Требования, показатели, изготовление и соответствие». 5. Monteiro.,A., Goncalves.,A., Assessment of characteristic compressive strength in structures by rebound hammer test according to EN 13791:2007-NDTCE'09, Nantes, France, june, 2009. 6. 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.,#2, March 2007, p.p. 147-154.