

5. ACI Committee 318. Building Code Requirements for Structural Concrete (ACI 318-05), American Concrete Institute, Farmington Hills. – Michigan, 2005.
6. AS3600. Concrete Structures Standard. Standards Association of Australia, 1994.
7. BAEL 91 revise 99. Regles techniques de conception et de calcul des ouvrages et constructions en beton arme suivant la methode des etats limites. – Paris, 1999 – 246 p.
8. BS 8110-1: 1997. Structural use of concrete – Part 1: code of practice for design and construction. British Standard Institution. – London, 1997. – 163 p.
9. CEB-FIP Model Code 90. – London, Tomas Telford, 1998. – 462 p.
10. CIRSOC 201. Reglamento Argentino De Estructuras De Hormigon. – INTI, Buenos-Aires, 2005. – 518 p.
11. CSA A23.3-04. Design of concrete structures. – Canadian Standard Association, 2004. – 214 p.
12. DIN 1045-1:2001. Tragwerke aus Beton, Stahlbeton und Spannbeton, Teil 1: Bemessung und Konstruktion. – Berlin, Beuth Verlag GmbH, 2001. – 148 p.
13. EHE. Instruccion de Hormigon Estructural. – Madrid, 1999. – 360 p.
14. ENV 1992-1-1:1992. Eurocode 2: Design of concrete structures. Part 1: General rules and rules for buildings. – CEN, Brussels, 1991. – 176 p.
15. EN 1992-1-1:2004. Design of concrete structures. Part 1: General rules and rules for buildings. – CEN, Brussels, 2004. – 225 p.
16. GB 50010-2002. Code for Design of Concrete Structures. – Beijing, China Architecture & Building Press, 2002. – 204 p.
17. JSCE. Standard specification for concrete structures. – Japan Society of Civil Engineering, 2002.
18. NBR 6118:2003. Projeto de estruturas de concreto – Procedimento (Design of structural concrete – Procedure). – ABNT. – Rio de Janeiro, 2004. – 221 p.
19. STR 2.05.05:2005. Betoninių ir gelžbetoninių konstrukcijų projektavimas. – Vinius, 2005. – 124 p.

УДК 624.012.35:69.057.43

## **ОЦЕНКА НАДЕЖНОСТИ МЕТОДОВ РАСЧЕТА БЕТОННЫХ ЭЛЕМЕНТОВ ПРИ МЕСТНОМ СЖАТИИ ПО ОТЕЧЕСТВЕННЫМ И ЗАРУБЕЖНЫМ НОРМАМ**

**Рак Н.А.**

**Введение.** Железобетонные конструкции являются в настоящее время основным видом несущих конструкций зданий и сооружений по масштабам применения в строительстве Республики Беларусь. Обеспечение надежности и долговечности железобетонных конструкций является неременным условием повышения их эффективности.

Надежность и долговечность конструкций должны быть обеспечены выполнением требований нормативных документов по проектированию, качеством проектирования, качеством изготовления конструкций, качеством возведения (монтажа), выполнением требований по режиму эксплуатации.

В настоящей статье с использованием банка экспериментальных данных (БЭД) оценена точность и надежность методов расчета прочности бетонных элементов при местном сжатии, используемых в нормативных документах различных стран.

**Оценка надежности методов расчета.** Оценка надежности методов расчета прочности бетона при местном сжатии, регламентированных европейскими [1] и отечественными нормами [2], выполнялась согласно приложению D дейст-

вующего в Республике Беларусь базового документа [3] системы строительных Еврокодов.

Общая последовательность оценки надежности методов расчета представлена в таблице и состояла из нескольких этапов.

Таблица 1 – Общая последовательность и основные зависимости для сопоставления надежности методов расчетов норм [1] и [2] в соответствии с положениями [3]

| Этап расчета, параметр   | Нормативный документ   |  |
|--|--|--|
|  | [1]  | [2]  |
| Расчетные зависимости норм   | $F_{cud} = f_{cd} \cdot A_{c0} \cdot \sqrt{\frac{A_{c1}}{A_{c0}}}$   | $F_{cud} = f_{cd} \cdot A_{c0} \left[ 1 + 12,5 \frac{f_{ctm}}{f_c} \left( \sqrt{\frac{A_{c1}}{A_{c0}}} - 1 \right) \right]$                            |
| Этап 1. Расчетная модель в форме функции сопротивления   | $F_{ctm} = f_c \cdot A_{c0} \sqrt{\frac{A_{c1}}{A_{c0}}}$  | $F_{ctm} = f_c \cdot A_{c0} \left[ 1 + 12,5 \frac{\rho(f_c)}{f_c} \left( \sqrt{\frac{A_{c1}}{A_{c0}}} - 1 \right) \right]$                             |
| Этап 3. Поправка среднего значения $b$   | 0,9849   | 0,9790   |
| Этап 4. Коэффициент вариации $V_\delta$ для величины рассеяния $\delta$  | 0,1352   | 0,1420   |
| Этап 6. Коэффициент вариации прочности бетона $V_{f_c}$  | $\frac{\sigma_{f_c}}{f_c}$   | $\frac{\sigma_{f_c}}{f_c} \left[ \frac{1 + \frac{2}{3} \frac{\alpha}{1 - 1,64(\sigma_{f_c}/f_c)}}{1 + \alpha} \right]$                                 |
| Этап 6. Коэффициент вариации площади нагружения $V_{A_0}$  | $\frac{1}{2} \sqrt{\left( \frac{\sigma_{a_0}}{a_0} \right)^2 + \left( \frac{\sigma_{b_0}}{b_0} \right)^2}$ | $\frac{1}{2} \left( 2 - \frac{\beta}{1 + \alpha} \right) \sqrt{\left( \frac{\sigma_{a_0}}{a_0} \right)^2 + \left( \frac{\sigma_{b_0}}{b_0} \right)^2}$ |
| Этап 6. Коэффициент вариации площади распределения $V_{A_1}$   | $\frac{1}{2} \sqrt{\left( \frac{\sigma_{a_1}}{a_1} \right)^2 + \left( \frac{\sigma_{b_1}}{b_1} \right)^2}$ | $\frac{1}{2} \left( \frac{\beta}{1 + \alpha} \right) \sqrt{\left( \frac{\sigma_{a_1}}{a_1} \right)^2 + \left( \frac{\sigma_{b_1}}{b_1} \right)^2}$     |
| Этап 6. Суммарный коэффициент вариации переменных $V_n$  |  | $V_n = \sqrt{V_\delta^2 + V_{f_c}^2 + V_{A_1}^2}$  |
| Этап 6. Суммарный коэффициент вариации функции сопротивления $V_r$   |  | $V_r = \sqrt{V_\delta^2 + V_n^2}$  |
| Параметры для вычисления коэффициентов вариации базисных переменных по [28]  |  |  |
| $\alpha = 12,5 \frac{\rho(f_c)}{f_c} \left( \sqrt{\frac{A_{c1}}{A_{c0}}} - 1 \right), \quad \beta = 12,5 \frac{\rho(f_c)}{f_c} \frac{A_{c1}}{\sqrt{A_{c0}}}$ |  |  |

Этап 1. Формулирование расчетной модели в форме теоретической функции сопротивления  $r_i = g_n(X)$ , которая содержит все определяющие основные базисные переменные  $X$ , оказывающие воздействие на рассматриваемое предельное состояние.

Поскольку базисные переменные должны быть независимы в теоретической функции сопротивления для норм [2], среднее сопротивление бетона осевому растяжению заменено функцией  $\rho(f_c)$  нормативного сопротивления бетона осевому сжатию следующего вида  $\rho(f_c) = 0,3 \cdot (f_c - 1,64 \cdot \sigma_{f_c})^{2/3}$ , где  $f_c$  — средняя прочность бетона осевому сжатию,  $\sigma_{f_c}$  — среднеквадратическое отклонение прочности бетона.

Этап 2. Сравнение экспериментальных и теоретических значений с построением диаграммы, содержащей пары этих значений.

Для сравнения выбраны экспериментальные значения из банка экспериментальных данных [4], использованного при совершенствовании расчетной модели норм [5] в процессе разработки проекта технического кодекса [2]. Поскольку в методиках расчета [1] и [2] введены ограничения по размерам площади распределения, из этой базы были отобраны только те экспериментальные данные, которые отвечают этим ограничениям. Общее число экспериментальных значений составило 564, в том числе 262 из основной выборки и 302 из дополнительной. Полученные диаграммы свидетельствуют о том, что оцениваемые методы расчета прочности бетона при местном сжатии [1] и [2] позволяют получить теоретические значения, удовлетворительно совпадающие с экспериментальными значениями. Обращает на себя внимание, что это характерно для значений, отобранных как из основной, так и из дополнительной выборки банка данных.

Этап 3: Определение поправки среднего значения  $b$ .

Этап 4: Определение коэффициента вариации величины рассеяния  $\delta$ .

Этап 5: Проверка совместимости.

Для сравниваемых методов расчета [1] и [2] полученные значения поправки среднего значения  $b$  (таблица) близки к 1, а значения коэффициента вариации величины рассеяния  $\delta$  не превышает 0,15. При проверке совместимости не выявлено существенных систематических отклонений, исключение которых позволило бы улучшить сходимость и уточнить вид функции сопротивления.

Этап 6: Определение коэффициентов вариации базисных переменных  $V_{X_i}$ .

В качестве базисных переменных  $X$ , оказывающих воздействие на рассматриваемое предельное состояние, приняты следующие переменные:

1) прочность бетона при осевом сжатии  $f_c$ ;

2) площадь приложения нагрузки  $A_{c0} = a_0 \cdot b_0$ , где  $a_0$  и  $b_0$  — размеры площади;

3) условная площадь распределения нагрузки  $A_{c1} = a_1 \cdot b_1$ , где  $a_1$  и  $b_1$  — размеры площади.

Согласно требованиям европейского стандарта [6] при контроле соответствия качества бетона принято, что среднее значение прочности бетона должно превышать гарантируемое изготовителем с обеспеченностью 95 % нормативное значение не менее чем на 5 МПа. Из этого следует, что среднеквадратическое отклонение прочности бетона не должно превышать  $\sigma_{f_c} = 5 / 1,64 \approx 3$  МПа независимо от значения прочности бетона.

Номинальные (принимаемые для расчета) размеры площадей  $a_0$ ,  $b_0$ ,  $a_1$  и  $b_1$  указываются в проектной документации, а предельные отклонения этих размеров устанавливаются техническими условиями на изготовление конструкций. При этом считается, что предельное отклонение от номинального размера соответствует двум среднеквадратическим отклонениям этого размера. С учетом этого, по значениям, установленным отечественным стандартом [7] и европейскими стандартами [8, 9] предельных отклонений, были вычислены отношения среднеквадратического отклонения номинального размера  $\sigma_a$  к значению номинального размера  $a$ .

Зависимости для вычисления значений коэффициентов вариации прочности бетона  $V_f$ , площади нагружения  $V_{A_0}$ , площади распределения  $V_{A_1}$ , а также суммарного коэффициента вариации переменных  $V_r$  приведены в таблице. При дальнейших вычислениях  $V_{A_0}$  принято  $a_0 = b_0 = 100$  мм, а для вычисления  $V_{A_1}$  принято  $a_1 = b_1$  на трех уровнях – 150, 200 и 300 мм.

Результаты вычислений значений суммарного коэффициента вариации  $V_r$  функции сопротивления свидетельствуют о том, что представленный в [2] метод расчета прочности бетонных элементов для бетона классов  $C^{50/60}$  и ниже дает меньшие значения этого коэффициента, чем метод расчета европейских норм [1]. Для бетонов классов выше  $C^{50/60}$  оба метода дают примерно одинаковый результат.

После определения значений суммарного коэффициента вариации  $V_r$  функции сопротивления были определены значения индексов надежности  $\beta$ , обеспечиваемых методами расчета норм [1] и [2].

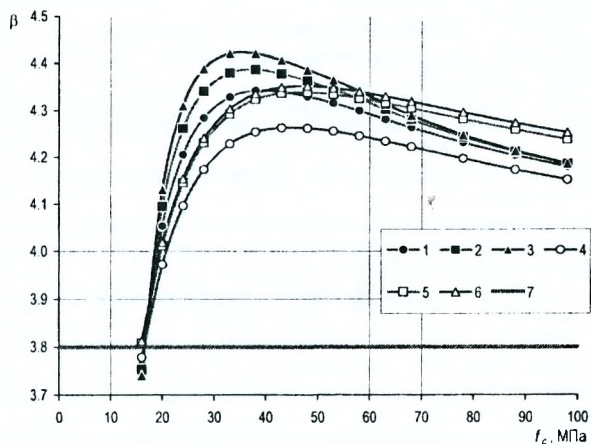
Значения индексов надежности  $\beta$  определялись по формуле:

$$\beta = \frac{g_n(X_m) \cdot g_n(X_d)}{\alpha_R \cdot V_r \cdot g_n(X_m)} - \frac{f_{cm} - f_{cd}}{\alpha_R \cdot V_r \cdot f_{cm}},$$

где  $g_n(X_m)$  – значение функции сопротивления при средних значениях базисных переменных;  $g_n(X_d)$  – то же при расчетных значениях базисных переменных;  $\alpha_R$  – средневзвешенный коэффициент для стороны сопротивления (по методу надежности 1 порядка), принимаемый согласно [3] равным 0,8;  $V_r$  – суммарный коэффициент вариации функции сопротивления;  $f_{cm}$  и  $f_{cd}$  – соответственно среднее и расчетное сопротивление бетона осевому сжатию.

Результаты вычислений представлены на рисунке, на котором дополнительно показана линия, отвечающая значению индекса надежности  $\beta = 3,8$ , которое соответствует классу надежности RC 2 (базовый период службы 50 лет). Анализ приведенных данных свидетельствует о том, что расчет по методу [2] дает, как правило, более высокие значения индекса надежности, чем расчет по [1], а, следовательно, обеспечивает более высокую надежность конструкций.

По характеру изменения значений индексов надежности  $\beta$  можно выделить два диапазона, первый из которых соответствует бетонам класса по прочности на сжатие  $C^{30/37}$  и ниже, а второй – бетонам более высоких классов.



- 1, 2, 3 – расчет по [2] соответственно при  $A_{c1}/A_{c0} = 2,25$ ;  $A_{c1}/A_{c0} = 4$  и  $A_{c1}/A_{c0} = 9$ .  
 4, 5, 6 – расчет по [1] соответственно при  $A_{c1}/A_{c0} = 2,25$ ;  $A_{c1}/A_{c0} = 4$  и  $A_{c1}/A_{c0} = 9$ ;  
 7 – линия, соответствующая значению индекса надежности  $\beta = 3,8$

Рисунок – Зависимость значений индексов надежности  $\beta$  от значений нормативного сопротивления бетона  $f_{ck}$

В первом диапазоне происходит рост значений индекса надежности с 3,7 до 4,25...4,45. При этом полученные по методам расчета [1] и [2] индексы надежности превышают значения индекса надежности  $\beta = 3,8$  только для бетона класса по прочности на сжатие  $C^{12}/_{15}$  и выше. При применении бетона класса по прочности на сжатие  $C^8/_10$  обеспечивается только условие  $\beta > 3,3$ , что соответствует классу надежности RC 1 (базовый период службы не более 25 лет). На основании полученных результатов можно сделать вывод о том, что не следует применять для работающих на местное сжатие конструкций класса надежности RC 2 бетон класса по прочности на сжатие  $C^8/_10$ .

Во втором диапазоне с ростом класса по прочности на сжатие наблюдается некоторое снижение значений индекса надежности с 4,25...4,45 до 4,15...4,25.

Следует отметить, что с увеличением отношения  $A_{c1}/A_{c0}$  увеличиваются и значения индекса надежности как при расчете по методу норм [2], по методу норм [1]. При этом для бетона классов по прочности на сжатие  $C^{30}/_{60}$  и ниже расчет по методу норм [2] всегда дает более высокие значения индекса надежности, чем расчет по методу норм [1]. При бетоне более высоких классов это наблюдается только при условии  $A_{c1}/A_{c0} < 3,0$ .

**Заключение.** Выполненная согласно положениям [3] оценка надежности методов расчета прочности бетона при местном сжатии показала, что представленный в [2] метод расчета, как правило, дает более высокие значения индекса надежности, чем расчет по [1], а, следовательно, обеспечивает более высокую надежность конструкций.

Исходя из обеспечиваемого методами расчета [1] и [2] индексов надежности, не рекомендуется применять для работающих на местное сжатие конструкций класса надежности RC 2 бетон класса по прочности на сжатие  $C^8/_10$ .



### Список цитированных источников

1. EN 1992-1-1:2004. Design of concrete structures. Part 1: General rules and rules for buildings – CEN, Brussels, 2004. – 225 p.
2. ТКП 45-5.03-XX-20XX (02250) Бетонные и железобетонные конструкции: Общие правила проектирования ненапряженных конструкций из тяжелого бетона (первая редакция). – Часть 2. – 227 с.
3. СТБ ЕН 1990-2007 Еврокод. Основы проектирования несущих конструкций. / МАиС РБ – Минск, 2008. – 64 с.
4. Рак, Н.А. Совершенствование методики расчета бетонных элементов при местном сжатии с использованием банка экспериментальных данных / Н.А. Рак // Строительная наука и техника – 2007. – № 5 (14). – С. 84–90.
5. СНБ 5.03.01–02 Конструкции бетонные и железобетонные. / МАиС РБ – Минск, 2003. – 140 с.
6. EN 206-1:2000. Concrete – Part 1: Specification, performance, production and conformity. – CEN, Brussels, 2000. – 72 p.
7. СТБ 1178-99. Колонны железобетонные для зданий и сооружений / МАиС РБ. – Минск, 2000. – 13 с.
8. prEN 13369:2003. Common rules for precast concrete products. – CEN, Brussels, 2003. – 64 p.
9. prEN 13225:2004. Precast concrete products – Linear elements. – CEN, Brussels, 2004. – 31 p.

УДК 624.012.35:69.057.43

## СОПОСТАВЛЕНИЕ МЕТОДОВ РАСЧЕТА БЕТОННЫХ ЭЛЕМЕНТОВ ПРИ МЕСТНОМ СЖАТИИ ПО ОТЕЧЕСТВЕННЫМ И ЗАРУБЕЖНЫМ НОРМАМ

Рак Н.А.

**Введение.** Надежность и долговечность конструкций должны быть при проектировании обеспечены соответствующим выбором начальных показателей качества материалов (бетона и арматуры), назначением соответствующих геометрических параметров конструкции (размеров сечений, количество и расположение арматуры). При выбранных начальных показателях качества материалов определение соответствующих геометрических параметров конструкции выполняется по расчетным зависимостям норм.

Предельное усилие, воспринимаемое конструкцией, определяется по расчетным зависимостям, приведенным в используемых при проектировании нормативных документах. Таким образом, включаемые в нормативные документы методы расчета в значительной степени определяют надежность и долговечность железобетонных конструкций.

В связи с этим включаемые в нормативные документы методы расчета должны удовлетворять ряду требований. В-первых, методы расчета должны основываться на результатах экспериментальных исследований, выполненных при широком варьировании параметров материалов и геометрических параметров конструкций. Во-вторых, расчетные зависимости должны в максимальной степени отражать реальное напряженно-деформированное состояние конструкции и схему разрушения, а также содержать геометрические параметры конструкций и характеристики материалов, поддающиеся контролю. В-третьих, рас-