

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. / МАНС 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. / МАНС 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 / МАНС 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-

четные зависимости должны обладать математической простотой, достигаемой, однако, при обязательном обеспечении необходимой точности и надежности. В-четвертых, структура расчетных зависимостей должна позволять путем введения дополнительных коэффициентов учитывать при необходимости особенности работы, вид бетона конструкций, изготовленных из бетонов различных видов (тяжелого трехкомпонентного бетона, тяжелого мелкозернистого бетона, легкого бетона и т.д.).

Классификация расчетных зависимостей норм. Выполнен анализ расчетных зависимостей, представленных в нормативных документах СССР, Республики Беларусь, Российской Федерации и других стран (всего 28 документов). Следует отметить, что в большинстве нормативных документов из большего многообразия возможных схем приложения нагрузки на нагружаемой плоскости конструкции представлена только концентричная схема. Это обусловлено тем, что она наиболее часто встречается в расчетах конструкций, а также тем, что именно по этой схеме выполнено большинство экспериментальных исследований, т.е. имеется наиболее представительная выборка экспериментальных данных. Другие схемы приложения представлены только в нормах СССР (СНиП 2.03-01-84), Республики Беларусь (СНБ 5.03.01-02), Российской Федерации (СП 52-101-2003), Польши (PN-76/B-03264 и PN-B-03264:2002), Литвы (STR 2.05.05:2005). Дальнейшее сопоставление расчетных зависимостей выполнялось только для концентричной схемы нагружения.

Анализ расчетных зависимостей, представленных в нормативных документах различных стран, показал, что все зависимости можно условно разделить на две группы.

Первая группа (таблица 1) содержит зависимости 22 нормативных документов, приведенные к общему виду

$$f_{cud} = k \cdot f_{cd} \cdot \sqrt[n]{\frac{A_{c1}}{A_{c0}}} \leq \omega_{u,max} \cdot f_{cd}, \quad (1)$$

где f_{cud} – прочность бетона при местном действии сжимающей нагрузки; f_{cd} – расчетное сопротивление бетона осевому сжатию; k – коэффициент, характеризующий повышение прочности бетона при расчете на местное сжатие; A_{c0} – площадь бетона, на которую приложена местная сжимающая нагрузка; A_{c1} – условная площадь бетона, на которую распределяются напряжения при местном действии сжимающей нагрузки; n – константа, характеризующая степень повышения прочности бетона при местном сжатии при возрастании условной площади распределения напряжений; $\omega_{u,max}$ – предельное значение коэффициента, характеризующего повышение прочности бетона при местном сжатии.

Следует отметить, что расчетная зависимость (1) получила широкое распространение, математически проста, при необходимости может быть учтен вид бетона конструкции путем корректировки значений константы n и предельного значения коэффициента $\omega_{u,max}$. Однако по своему смысловому содержанию зависимость является чисто эмпирической, т.е. обеспечивающей удовлетворительное численное совпадение экспериментальных и расчетных значений. В то же время реальное напряженно-деформированное состояние конструкций при местном сжатии и схему их разрушения зависимость (1) не отражает.

Таблица 1 – Расчетные зависимости для определения прочности бетона при местном сжатии (группа I)

Нормативный документ		K	n	$\gamma_{\text{бет}}$	
СНиП 2.03-01-84	при классе бетона ниже В25 $\frac{0,9 R_{bn}}{\gamma_b} = \frac{0,9 R_{bn}}{1,3} \approx 0,69 R_{bn}$	1,0	3	2,5	
	при классе бетона В25 и выше $\frac{13,5 \cdot 0,9 \cdot R_{bmn}}{\gamma_b} = \frac{13,5 \cdot 0,9 \cdot R_{bmn}}{1,5} = 8,1 R_{bmn}$	1,0	3	2,5	
СНиП 2.05.03-84	$\frac{13,5 \cdot 0,9 \cdot R_{bmn}}{\gamma_b} = \frac{13,5 \cdot 0,9 \cdot R_{bmn}}{1,5} = 8,1 R_{bmn}$	1,0	3	2	
СП 52-101-2003	$\frac{0,9 R_{bn}}{\gamma_b} = \frac{0,9 R_{bn}}{1,3} \approx 0,69 \cdot R_{bn}$	0,8	2	2,5	
СЕВ FIP 1978	$\frac{f_{ck}}{\gamma_c} = \frac{f_{ck}}{1,5} \approx 0,67 \cdot f_c$	$\rho_c > 2400$	1,0	2	3,3
		$\rho_c < 2400$	1,0	3	3,3
ENV1992-1-1, EHE	$\frac{f_{ck}}{\gamma_c} = \frac{f_{ck}}{1,8} \approx 0,56 f_{ck}$	1,0	2	3,3	
NBR 6118:2003	$\frac{0,85 \cdot f_{ck}}{\gamma_c} = \frac{0,85 \cdot f_{ck}}{1,4} \approx 0,61 \cdot f_{ck}$	1,0	2	3,3	
B4	$\frac{f_{ck}}{\gamma_c} = \frac{f_{ck}}{2,3} \approx 0,43 f_{ck}$	$\rho_c > 2400 \text{ кг/м}^3$	1,0	2	3
		$1800 < \rho_c < 2400$	1,0	2,5	2,5
		$\rho_c < 1800$	1,0	3	2
DIN 1045-1:2001	$\frac{f_{ck} - f_{ct}}{\gamma_c} = \frac{f_{ck} - f_{ct}}{1,8} \approx 0,56 \cdot f_{ck}$	$\rho_c \geq 2400$	1,0	2	3
		$\rho_c < 2400$	1,0	3	3
EN 1992-1-1:2004 ВБК 04	$\frac{f_{ck}}{\gamma_c} = \frac{f_{ck}}{1,8} \approx 0,56 \cdot f_{ck}$	$\rho_c \geq 2200$	1,0	2	3
		$\rho_c < 2200$	1,0	3	3
PN-B-03264:2002	$\frac{f_{ck} - f_{ct}}{\gamma_c} = \frac{f_{ck} - f_{ct}}{1,8} \approx 0,56 f_{ck}$	1,0	2	2,5	
СЕВ FIP 1990	$\frac{0,85 \cdot f_{ck}}{\gamma_c} = \frac{0,85 \cdot f_{ck}}{1,5} \approx 0,57 f_{ck}$	1,0	2	4	
GB 50010-2002	$\frac{f_{ck}}{1,2 \gamma_c} = \frac{f_{ck}}{1,2 \cdot 1,4} = 0,60 \cdot f_{ck}$	1,35	2	Нет	
Code 1/87 IBC IS 456:2000	$0,45 \cdot f_{cu} \approx \frac{0,45 \cdot f_{ck}}{0,8} \approx 0,56 \cdot f_{ck}$	1,0	2	2	
ACI 318-02, CIRSOC 201, DZ 3101.1, SBK 304	$0,65 \cdot 0,85 f_c \approx 0,55 \cdot (f_{ck} + 1,5)$	1,0	2	2	
CSA A23.3-04	$0,65 \cdot f_c \approx 0,65 \cdot (f_{ck} + 1,5)$	1,0	2	2	
AS3600	$0,6 \cdot 0,9 f_c \approx 0,54 \cdot (f_{ck} + 1,5)$	1,0	2	2	

В приведенных зависимостях сохранены обозначения соответствующих нормативных документов. R_{bn} , R_{bmn} , γ_b – соответственно нормативное (призмное) сопротивление бетона осевому сжатию, нормативное сопротивление осевому растяжению, определенные с обеспеченностью 0,95; коэффициент надежности по бетону; f_{ck} , γ_c – соответственно нормативное (цилиндрическое) сопротивление бетона осевому сжатию, определенное с обеспеченностью 0,95; коэффициент безопасности по бетону; f_{cu} – нормативное (кубиковое) сопротивление бетона осевому сжатию, определенное с обеспеченностью 0,95; f_c – нормативное (цилиндрическое) сопротивление бетона осевому сжатию, определенное с обеспеченностью 0,90; ρ_c – средняя плотность бетона (кг/м³).

Вторая группа (табл. 2) содержит зависимости 6 нормативных документов, отличающиеся от расчетной зависимости (1). Зависимости норм Польши (PN-76/B-03264) и Франции (BAEL 83 и BAEL 91) фактически основаны на одинаковом подходе к оценке динамики повышения прочности бетона при местном сжатии при возрастании условной площади распределения напряжений. Однако зависимости этих норм являются чисто эмпирическими, так же как и расчетная зависимость (1) они не отражают реальное напряженно-деформированное состояние конструкций при местном сжатии и схему их разрушения.

Таблица 2 – Расчетные зависимости для определения прочности бетона при местном сжатии (группа 2)

Нормативный документ	Зависимость
PN-76/B-03264	$\bar{R}_d = R_b \left(4 - 5 \sqrt{\frac{F_r}{F_r} + 2 \frac{F_d}{F_r}} \right) \leq 2,0$
BAEL 83	$R_{bloc} = \frac{0,85 \cdot f_{c28}}{\gamma_b} K, \text{ где } K = 4 - 5 \sqrt{\frac{B_0}{B} + 2 \frac{B_0}{B}} < 4,0;$
BAEL 91	$R_{bloc} = \frac{0,85 \cdot f_{c28}}{\gamma_b} K, \text{ где } K = 4 - \frac{4}{3} \sqrt{\frac{B_0}{B} + \frac{4}{3} \frac{B_0}{B}} < 3,3$
СНБ 5.03.01-02; STR 2.05.05:2005	$f_{cud} = f_{cd} \left[1 + k_u \frac{f_{cm}}{f_{cd}} \left(\sqrt{\frac{A_{c1}}{A_{c0}}} - 1 \right) \right] \leq 2,5(3,0) f_{cd},$ где $k_u = 0,8 \frac{f_{cd}}{f_{cm}} > 14,0$. $f_{cd} = \frac{f_{ck}}{\gamma_c} = \frac{f_{ck}}{1,8} \approx 0,56 f_{ck}$
ТКІІ 45.5.03 (проект)	$f_{cud} = f_{cd} (1 + 12,5 \psi_c) \leq 3 f_{cd}, \text{ где } \psi_c = \frac{f_{cm}}{f_{cm}} \left(\sqrt{\frac{A_{c1}}{A_{c0}}} - 1 \right),$ $\frac{f_{cm}}{f_{cm}} \geq 0,07, f_{cd} = \frac{\alpha_{sc} f_{ck}}{\gamma_c} = \frac{5/6 \cdot f_{ck}}{1,5} \approx 0,56 f_{ck}$

В приведенных зависимостях сохранены обозначения соответствующих нормативных документов:

R_d, R_{bloc}, f_{cud} – прочность бетона при местном действии сжимающей нагрузки; R_b, f_{cd} – цилиндрическое или призматическое расчетное сопротивление бетона осевому сжатию; f_{c28} – нормативное (цилиндрическое) сопротивление бетона осевому сжатию; γ_b – коэффициент безопасности по бетону; f_{cd} – расчетное сопротивление бетона осевому растяжению; f_{ck} – нормативное сопротивление бетона осевому сжатию; f_{cm}, f_{cm} – соответственно среднее сопротивление бетона осевому сжатию и осевому растяжению F_d, B_0, A_{c0} – площадь бетона, на которую приложена местная сжимающая нагрузка; F_r, B, A_{c1} – условная площадь бетона, на которую распределяются напряжения при местном действии сжимающей нагрузки; ψ_c – коэффициент относительного бокового давления.

В то же время в нормах Республики Беларусь (СНБ 5.03.01-02), использованных в дальнейшем без изменений в нормах Литвы (STR 2.05.05:2005), приведены расчетные зависимости, отражающие реальное напряженно-деформированное состояние бетона как многоосного сжатия, создаваемого приложенной нагрузкой и возникающим при этом боковым давлением бетона, расположенного по периметру площади нагружения. Как известно, в условиях многоосного сжатия прочность бетона значительно возрастает, а прирост прочности примерно пропорционален величине бокового давления.

В разработанном в развитие СНБ 5.03.01-02 проекте технического кодекса установившейся практики (ТКП 45.5.03) сохранены все подходы СНБ 5.03.01-02. Однако для более полного отражения физической сущности повышения прочности бетона при местном сжатии введено понятие коэффициента относительного бокового давления, равного отношению бокового давления, определенному при среднем сопротивлении бетона осевому растяжению, к среднему сопротивлению бетона осевому сжатию.

На рисунке представлены результаты вычислений прочности бетона при местном сжатии по зависимостям различных нормативных документов при различных соотношениях площади распределения A_{c1} к площади бетона, на которую приложена местная сжимающая нагрузка. Анализ результатов вычислений показал, что рассчитанные по отечественным нормам значения практически совпадают со значениями, полученными по европейским нормам. Расчеты по нормам Китая (GB 50010-2002) дают существенно завышенные значения прочности, а по нормам СССР (СНиП 2.03-01-84), Польши (PN-76/B-03264) и Франции (BAEL 91), наоборот, существенно заниженные значения. Изменения, внесенные в нормы Российской Федерации (СП 52-101-2003), несколько уменьшили степень занижения получаемых по нормам СССР (СНиП 2.03-01-84) результатов, но дают занижение на 10...15% по сравнению с отечественными нормами.

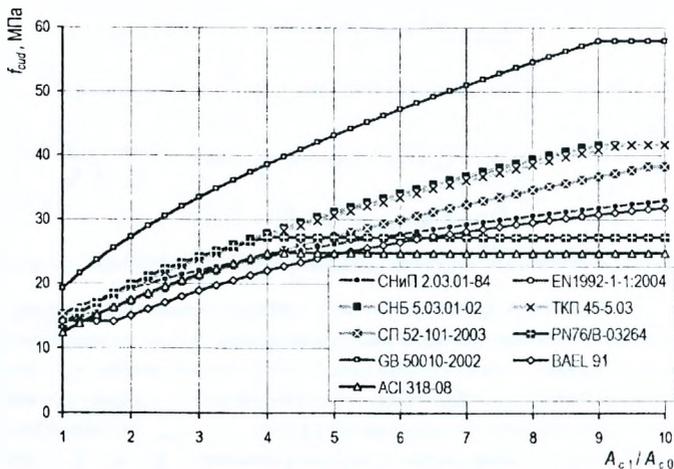


Рисунок 1 – Изменение значений прочности бетона при местном сжатии f_{cud} в зависимости от отношения площади распределения A_{c1} к площади бетона, на которую приложена местная сжимающая нагрузка A_{c0} , по различным нормативным документам (для бетона класса $C^{25}/_{30}$)

Закключение. Представленный в проекте технического кодекса (ТКП 45.5.03) метод расчета прочности бетонных элементов при местном сжатии в отличие от методов расчета европейских норм (EN 1992-1-1:2004) основан на расчетных зависимостях, отражающих реальное напряженно деформированное состояние бетона, а именно неравномерное многоосное сжатие, создаваемое приложенной нагрузкой и возникающим при этом боковым давлением бетона, расположенного по периметру площади нагружения.