

Николай Александрович РАК,  
кандидат технических наук,  
доцент кафедры "Железобетонные  
и каменные конструкции"  
Белорусского национального  
технического университета

Сергей Юрьевич ТАМКОВИЧ,  
магистр технических наук,  
аспирант кафедры "Железобетонные  
и каменные конструкции"  
Белорусского национального  
технического университета

## ОЦЕНКА НАДЕЖНОСТИ МЕТОДОВ РАСЧЕТА ЖЕЛЕЗОБЕТОННЫХ ЭЛЕМЕНТОВ С ПОПЕРЕЧНОЙ АРМАТУРОЙ ПРИ ПРОДАВЛИВАНИИ

### ESTIMATION OF RELIABILITY OF METHODS OF CALCULATION OF PUNCHING SHEAR STRENGTH OF REINFORCED CONCRETE ELEMENTS WITH SHEAR REINFORCEMENT

В статье приведены результаты оценки точности различных методов расчета на продавливание железобетонных конструкций с поперечным армированием. Определены значения индексов надежности, обеспечиваемых расчетом по отечественным и европейским нормам, а также по предлагаемой зависимости. Даны предложения по совершенствованию методов расчета на продавливание железобетонных конструкций с поперечным армированием.

This paper presents the accuracy estimation results for various methods of calculation of punching shear strength of reinforced concrete elements with shear reinforcement. The values of the reliability indices calculated by the domestic and European codes as well as on the basis of the proposed dependence have been determined. The suggestions on improving the methods of calculation of punching shear strength of reinforced concrete elements with shear reinforcement are given.

#### ВВЕДЕНИЕ

Важным требованием при разработке технических национальных правовых актов является включение в них, как правило, только тех методов расчета, которые основаны на максимально приближенных к реальным физическим расчетным моделям и отвечают необходимым требованиям надежности и долговечности. При анализе расчетных методов норм [1, 2] было установлено, что для определения прочности железобетонных элементов с поперечной арматурой при продавливании используются три расчетные модели, которые учитывают различные виды разрушения элементов. Каждая расчетная модель содержит

определенное количество базисных переменных, оказывающих влияние на значение предельного усилия, воспринимаемого элементом. Расчетные модели при продавливании железобетонных элементов с поперечной арматурой представлены в таблице 1. При этом для наглядности анализа и упрощения аналитических зависимостей рассмотрен только вариант продавливания центрально сжатой колонной плиты с поперечной арматурой в виде вертикальных хомутов.

Сопоставление показало, что в рассмотренных нормативных документах имеются одинаковые подходы, и они учитывают три возможных вида разрушения железобетонных элементов с поперечной арматурой при

Таблица 1. Расчетные зависимости норм [1, 2] и предлагаемая зависимость

№ пп	Вид разрушения	[1]	[2]	Предлагаемая зависимость
1	Раздавливание бетона сжатой зоны по периметру колонны	$0,5v_{fd} \cdot du_0$	$0,5v_{fd} \cdot du_0$	$0,5v_{fd} \cdot du_0$
2	Продавливание в зоне расположения поперечной арматуры	$V_{Rd,c} + \frac{A_{swi} \cdot f_{ywd} \cdot d}{S_r}$	$0,75V_{Rd,c} + 1,5 \frac{A_{swi} \cdot f_{ywd,eff} \cdot d}{S_r}$	$V_{Rd,c,MOD} + \frac{A_{swi} \cdot f_{ywd} \cdot d}{S_r}$
3	Продавливание по периметру, располагаемому на расстоянии $1,5d$ от крайнего периметра, по которому расположена поперечная арматура	$0,75v_{Rd,c} \cdot du_{out}$	$v_{Rd,c} \cdot du_{out}$	$0,75v_{Rd,c,MOD} \cdot du_{out}$

Примечания:

$$1. V_{Rd,c,MOD} = \frac{0,24}{\gamma_c} \cdot k \cdot (35\rho_r + 0,65) \cdot (f_{ck})^{2/3} \cdot ud.$$

$$2. v_{Rd,c,MOD} = \frac{0,24}{\gamma_c} \cdot k \cdot (35\rho_r + 0,65) \cdot (f_{ck})^{2/3}.$$

3. В приведенных зависимостях сохранены обозначения нормативных документов:

$V_{Rd}$  — усилие, воспринимаемое бетоном плиты при продавливании;

$f_{ywd}, f_{ywd,eff}$  — расчетное сопротивление поперечной арматуры;

$S_r$  — шаг поперечной арматуры;

$A_{swi}$  — площадь поперечной арматуры, расположенной вдоль периметра  $u_i$ ;

$u_0$  — периметр площадки передачи нагрузки;

$u_{out}$  — критический периметр за пределами границы расположения поперечной арматуры;

$d$  — рабочая высота плиты.

продавливании. В примечаниях к таблице 1 представлены предлагаемые для расчета зависимости, более точно по сравнению с зависимостями норм [1, 2] отражающие влияние коэффициента продольного армирования.

Авторами был выполнен расчет при продавливании плит из тяжелого бетона с поперечным армированием при различных значениях следующих исходных параметров: рабочая высота сечения  $d$ , коэффициент продольного армирования  $\rho$ , коэффициент поперечного армирования  $\rho_w$ , размер сечения колонны  $l_c$ , расчетное сопротивление поперечной арматуры  $f_{yw}$  при расстоянии  $l$  от грани колонны до крайнего хомута, равном  $2d$ . Результаты одного из вариантов расчета представлены на рис. 1.

В связи со столь существенными различиями в полученных результатах (см. рис. 1), авторы решили изучить степень соответствия положений по расчету данным экспериментальных исследований. В рамках решения этой задачи на первом этапе был сформирован банк экспериментальных данных, на втором — выполнены расчеты для всех образцов по предлагаемой зависимости и нормам [1, 2].

### ФОРМИРОВАНИЕ БАНКА ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ДАННЫХ

Сформированный по доступным литературным источникам банк экспериментальных данных (БЭД) по испытаниям железобетонных элементов с поперечной арматурой на продавливание содержал восемь групп сведений. Полная выборка экспериментальных данных для центральной схемы приложения нагрузки на опытные образцы с поперечной арматурой, изготовленные из тяжелого трехкомпонентного бетона, составлена по результатам исследований и содержит 278 образцов. Далее полная выборка редактировалась в соответствии со следующими критериями.

На первом этапе формирования выборки из полной выборки были исключены образцы малой высоты (рабочая высота менее 150 мм).

На втором этапе из оставшейся выборки были исключены образцы, изготовленные из бетонов, имеющих прочность стандартных кубов менее 10 МПа или более 70 МПа.

На третьем этапе из оставшейся выборки исключались образцы, имеющие расстояние от внешней грани крайнего ряда поперечной арматуры до свободного края плиты менее  $3d$  ( $d$  — рабочая высота плиты).

Таблица 2. Основная выборка опытных образцов

Автор (год исследования)	Кол-во	$d$ , мм	$l_c$ , мм	$f_c$ , МПа	$\rho$ , %	$\rho_w$ , %	$V_{exp}$ , кН
Gomes (1991, 2000)	8	154~164	200	28,4~41,6	1,23~1,31	0,09~1,81	790~1227
Chana (1992, 1993)	13	188~210	300~400	28,4~41,6	0,79~0,85	0,17~1,3	981~1510
Beutel (1996-2000)	10	190~250	320~400	23,2~46,3	0,59~1,76	0,07~0,49	1055~2349
Samadian (1997)	10	160~244	200~500	21,0~45,8	0,67~1,64	0,13~2,32	850~1440
Trautwein (2006)	10	154~164	200	35,2~44,4	1,20~1,26	0,06~4,50	853~1222
Tolf (1989)	3	195~200	$\varnothing 125-\varnothing 250$	19,7~26,3	0,34~0,86	0,18~1,04	144~851
Regan (1988, 1990)	4	151~259	235~600	27,8~41,8	0,62~1,77	0,15~2,34	617~1800
Yamada (1992)	8	167	300	18,8~22,8	0,99~1,32	0,05~1,29	981~2028
Marti (1977)	1	152	$\varnothing 300$	34,0	1,39	0,08~0,20	875
F. Muller (1984)	3	153,5	$\varnothing 300$	29,6~33,2	1,31	0,14~1,09	800 1040
Broms (1990)	4	150	250	17,2~23,2	0,48~0,84	0,16~0,84	415~878
Kinnunen (1980)	2	669	800	26,3~26,7	0,53	0,11~1,08	8150~8215
M. Ladner (1989)	2	240	300	25,3~26,6	1,23~1,31	0,55~3,84	1650~1800
Maissen (1985)	4	165~245	$\varnothing 250-\varnothing 300$	27,2~28,4	0,95~1,41	0,22~1,08	720~1469
H. Muller (1991)	3	220~280	$\varnothing 300-\varnothing 450$	21,5~30,6	0,30~1,43	0,18~0,89	849~1928

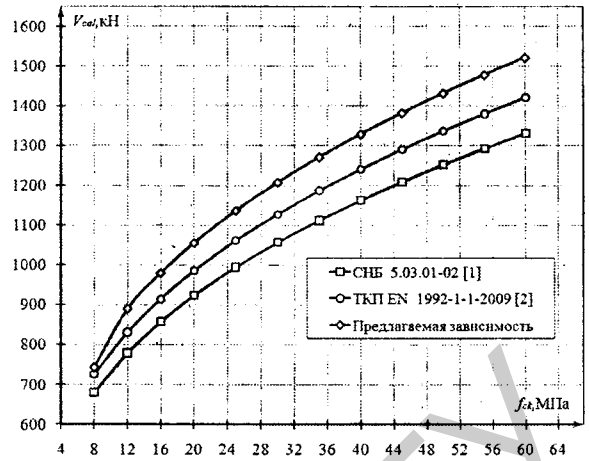


Рис. 1. Изменение предельных усилий при продавливании  $V_{cal}$  в зависимости от прочности бетона  $f_{ck}$  ( $d = 200$  мм,  $\rho = 0,02$ ,  $\rho_w = 0,01$ ,  $l_c = 400$  мм,  $f_{yw} = 290$  МПа) для норм [1, 2] и предлагаемой зависимости

На четвертом этапе были исключены образцы с наклонной поперечной арматурой и отгибами.

Таким образом, после четырех этапов формирования БЭД с поперечной арматурой содержал 85 образцов. Краткие сведения о содержании контрольной выборки приведены в таблице 2.

### ОЦЕНКА ТОЧНОСТИ МЕТОДОВ РАСЧЕТА

Оценка точности методов расчета, регламентированных нормами [1, 2] и предлагаемой зависимостью, выполнялась согласно этапам 1–4 приложения D норм [3].

**Этап 1.** Формулирование расчетных моделей в форме теоретических функций сопротивления, которая содержит все определяющие основные базисные переменные  $X$ , оказывающие воздействие на рассматриваемое предельное состояние.

**Этап 2.** Сравнение экспериментальных и теоретических значений с построением диаграммы, содержащей пары этих значений. Предварительно банк экспериментальных данных был разделен на три группы в зависимости от вида разрушения, в каждой из которых содержалось определенное количество образцов.

Таблица 3. Основные результаты оценки точности методов расчета

Параметры	[1]			[2]			Предлагаемая зависимость		
	1	2	3	1	2	3	1	2	3
Поправка среднего значения $b$	1,075	1,085	1,126	1,090	1,193	1,096	1,057	1,016	1,065
Коэффициент вариации $V_\delta$ величины рассеяния $\delta$	0,152	0,119	0,158	0,157	0,140	0,163	0,146	0,130	0,158

**Этап 3.** Определение поправки среднего значения  $b$ .

**Этап 4.** Определение коэффициента вариации  $V_\delta$  величины рассеяния  $\delta$ .

При всех вычислениях использовались фактические (средние) значения геометрических параметров образцов и прочностных характеристик материалов. Основные результаты оценки точности методов расчета представлены в таблице 3, а также рис. 2–4.

Диаграммы на рис. 2–4 и данные, представленные в таблице 3, свидетельствуют о том, что рассматриваемые методы расчета позволяют получить теоретические значения, удовлетворительно совпадающие с экспериментальными, а средние значения  $b$  и коэффициенты вариации  $V_\delta$  практически не отличаются друг от друга. При этом средние величины  $b$  близки к единице, а коэффициенты вариации находятся в интервале от 0,119 до 0,163.

**Этап 5.** Проверка совместимости.

При проверке совместимости не выявлено существенных систематических отклонений, исключение которых позволило бы улучшить сходимость и уточнить вид функции сопротивления.

**ОЦЕНКА НАДЕЖНОСТИ МЕТОДОВ РАСЧЕТА**

Оценка надежности методов расчета, регламентированных нормами [1, 2] и предлагаемой зависимостью, выполнялась согласно этапам 6–8 приложения D норм [3].

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

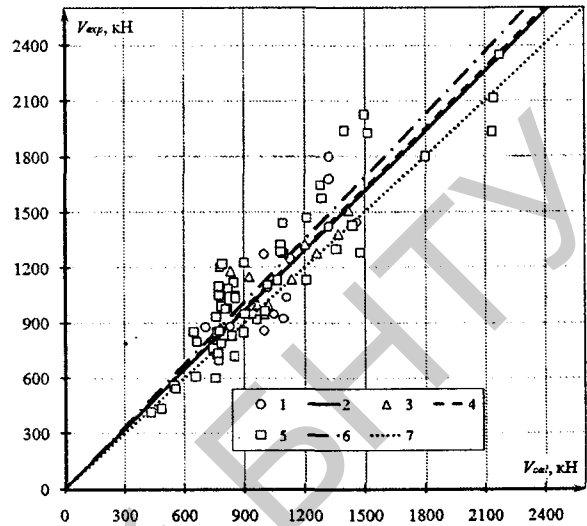
Для выполнения этого этапа были приняты следующие исходные данные:

- рабочая высота сечения  $d = 150, 200, 250$  мм;
- коэффициент продольного армирования  $\rho_l = 0,02$ ;
- коэффициент поперечного армирования  $\rho_w$  – в интервале 0,005–0,020;
- размер сечения колонны  $l_c = 400$  мм;
- прочность продольной арматуры  $f_{yk} = 500$  МПа;
- прочность поперечной арматуры  $f_{wfk} = 320$  МПа;
- расстояние до крайнего хомута от грани колонны  $l = 2d = 400$  мм.

На основании этих данных были выполнены расчеты для каждого вида разрушения для норм [1, 2] и предлагаемой зависимости. В результате анализа полученных результатов было установлено следующее.

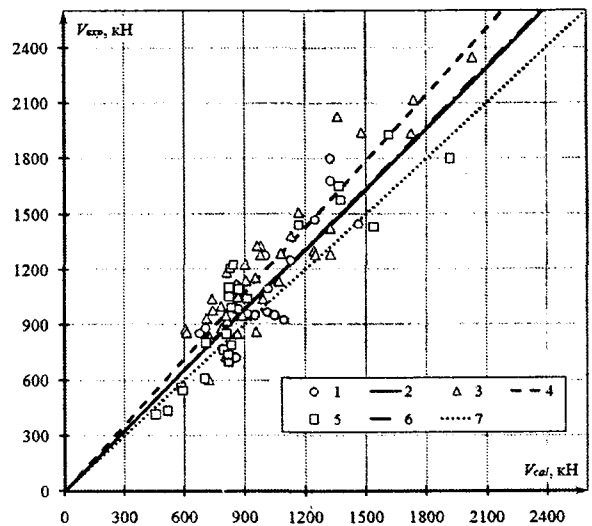
1. При расчете по [1] минимальное предельное усилие получается при третьем виде разрушения для всех классов бетона, кроме бетона класса С8/10. Для этого класса усилие получается при первом виде. При этом коэффициент поперечного армирования на значение предельного усилия влияния не оказывает.

2. При расчете по [2] минимальное предельное усилие при коэффициенте поперечного армирования менее 0,008 получается при втором виде разрушения для всех классов бетона, за исключением С8/10и С12/15. Для этих классов усилие получается при первом виде. При коэффициенте поперечного армирования более 0,008 минимальное предельное усилие получается при



- 1 — выборка базы данных для первого вида разрушения;
- 2 — линия, соответствующая уравнению  $V_{exp} = b \cdot V_{cal1}$ ;
- 3 — выборка базы данных для второго вида разрушения;
- 4 — линия, соответствующая уравнению  $V_{exp} = b \cdot V_{cal2}$ ;
- 5 — выборка базы данных для третьего вида разрушения;
- 6 — линия, соответствующая уравнению  $V_{exp} = b \cdot V_{cal3}$ ;
- 7 — линия, соответствующая равенству  $V_{exp} = V_{cal}$

Рис. 2. Диаграмма сравнения экспериментальных значений предельных усилий для элементов с поперечной арматурой при продавливании  $V_{exp}$  с теоретическими значениями  $V_{cal}$  (по зависимостям [1])

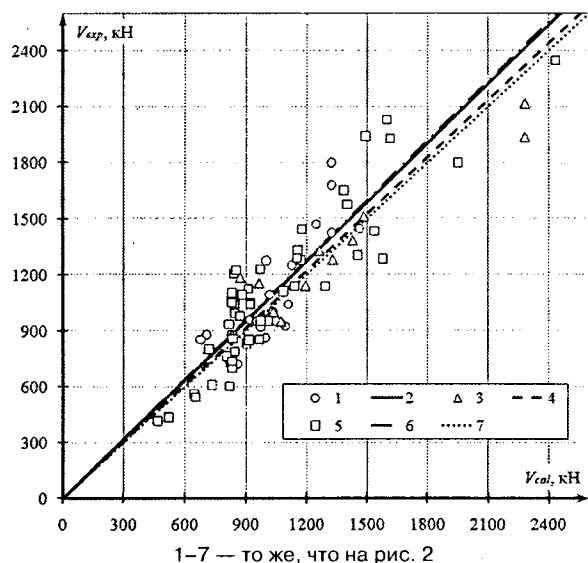


1–7 — то же, что на рис. 2

Рис. 3. Диаграмма сравнения экспериментальных значений предельных усилий для элементов с поперечной арматурой при продавливании  $V_{exp}$  с теоретическими значениями  $V_{cal}$  (по зависимости [2])

третьем виде разрушения для всех классов бетона, кроме бетона класса С8/10. Для этого класса усилие получается при первом виде.

3. При расчете по предлагаемой зависимости минимальное предельное усилие получается при третьем ви-



1–7 — то же, что на рис. 2

**Рис. 4.** Диаграмма сравнения экспериментальных значений предельных усилий для элементов с поперечной арматурой при продавливании  $V_{exp}$  с теоретическими значениями  $V_{cal}$  (по предлагаемой зависимости)

де разрушения для всех классов бетона, кроме бетона класса С8/10. Для этого класса усилие получается при первом виде разрушения. При этом коэффициент поперечного армирования на значение предельного усилия влияния не оказывает.

На основе результатов анализа было принято решение выполнить определение значения коэффициентов надежности, обеспечиваемых при расчете для третьего вида разрушения по [1, 2] и предлагаемой зависимости, а также при расчете для второго вида разрушения по [2].

В связи с этим, значения коэффициентов вариации базисных переменных  $V_{X_i}$  были определены только для указанных выше случаев расчета.

В качестве базисных переменных  $X_i$ , оказывающих воздействие на рассматриваемое предельное состояние, принимались следующие переменные:

- прочность бетона при осевом сжатии  $f_c$ ;
- размер сечения колонны  $l_c$ ;
- погонная площадь арматуры  $A_{s0}$ ;
- рабочая высота сечения  $d$ ;
- погонная площадь поперечной арматуры  $A_{sw0}$ ;
- прочность поперечной арматуры  $f_{yw}$ .

Принятые для расчета коэффициентов вариации базисных переменных  $V_{X_i}$  средние значения переменных и их среднеквадратические отклонения приведены в таблице 4.

**Таблица 4.** Средние значения базисных переменных и их среднеквадратические отклонения

Базисная переменная	Обозначение (размерность)	Среднее значение $X_i$	Среднеквадратическое отклонение $\sigma_i$
$X_1$	$f_c$ (МПа)	16; 20; 24; 28; 33; 38; 43; 48; 53; 58; 63; 68	5 (при расчете по нормам [1, 2] и предлагаемой зависимости)
$X_2$	$d$ (мм)	150; 200; 250	3 (при расчете по нормам [1] и предлагаемой зависимости) 5,5; 6,0; 6,5 (при расчете по нормам [2]) для 150, 200 и 250 соответственно
$X_3$	$l_c$ (мм)	300; 400	3 (при расчете по нормам [1] и предлагаемой зависимости) 6,5; 7,5 (при расчете по нормам [2]) для 300 и 400 соответственно
$X_4$	$A_{s0}$ (мм <sup>2</sup> )	2000	2,5 % среднего значения
$X_5$	$A_{sw0}$ (мм <sup>2</sup> )	При $\rho_w = (0,5-2,0)$ %	2,5 % среднего значения
$X_6$	$f_{yw}$ (МПа)	370	7,0 % среднего значения

При этом среднеквадратические отклонения большинства базисных переменных принимались равными половине предельного отклонения, устанавливаемого соответствующими стандартами на материалы и изготовление конструкций. Среднеквадратическое отклонение прочности бетона на сжатие при расчете по нормам [1, 2] и предлагаемой методике принято, исходя из того, что средняя прочность бетона превышает на 8 МПа гарантируемую с обеспеченностью 95 % прочность независимо от значения средней прочности.

**Этап 7.** Определение суммарного коэффициента вариации.

Суммарный коэффициент вариации базисных переменных  $V_{rt}$  определялся по формуле

$$V_{rt} = \frac{\sqrt{\sum_{i=1}^n \left( \frac{\partial g_{rt}}{\partial X_i} \cdot \sigma_i \right)^2}}{g_{rt}(X_m)}, \quad (1)$$

где  $g_{rt}(X_m)$  — значение функции сопротивления при средних значениях всех базисных переменных;  $\sigma_i$  — среднеквадратическое отклонение базисной переменной  $X_i$ ;  $\partial g_{rt} / \partial X_i$  — производная функции сопротивления по базисной переменной  $X_i$  при средних значениях всех базисных переменных.

Значения производных функции сопротивления из-за громоздкости аналитических выражений определялись численным дифференцированием.

Анализ результатов вычислений суммарного коэффициента вариации базисных переменных  $V_{rt}$  показал, что определяющее влияние на его значение оказывает вариация прочности бетона, а изменчивость остальных параметров (геометрических и арматуры) сказывается несущественно.

Суммарный коэффициент вариации  $V_r$  функции сопротивления определялся по формуле

$$V_r = \sqrt{V_{rt}^2 + V_s^2}. \quad (2)$$

Результаты вычисления суммарного коэффициента вариации  $V_r$  приведены на рис. 5.

Динамика изменения с ростом прочности бетона  $f_{ck}$  значений суммарного коэффициента вариации  $V_r$  существенно не различалась. Это обусловлено тем, что определяющее значение на динамику изменения  $V_r$  оказывает среднеквадратическое отклонение прочности бетона, которое не зависит от прочности бетона и равно 5 МПа. Следует отметить, что на значение коэффициента вариации

ции  $V_r$ , помимо прочности бетона, также влияние оказывали значения коэффициента вариации  $V_\delta$  величины рассеяния  $\delta$ , которые имели различные значения для норм [1, 2] и предлагаемой зависимости. Проведенный анализ показал, что именно величиной  $V_\delta$  обусловлено различие в значениях  $V_r$ . Влияние других базисных переменных, как показал анализ, являлся не столь существенным.

Изменение значений  $V_r$  при третьем виде разрушения при расчете по нормам [1] происходило в диапазоне от 0,192 до 0,164, при расчете по нормам [2] — от 0,217 до 0,169, а для предлагаемой зависимости — от 0,218 до 0,170 и носило нелинейный характер, который определялся среднеквадратическим отклонением прочности бетона. Резкое изменение значений коэффициента вариации  $V_r$  наблюдалось в диапазоне прочности от 12 до 25 МПа, в то время как для прочности более 25 МПа изменение  $V_r$  происходило более плавно с ростом прочности бетона.

При расчете по нормам [2] при втором виде разрушения изменение значений коэффициента вариации  $V_r$  незначительно на всем диапазоне прочности бетона и находится в пределах 0,155–0,161. Как показывает анализ, наиболее существенное влияние на значение коэффициента оказывают коэффициент вариации  $V_\delta$  величины рассеяния  $\delta$ . Влияние остальных параметров является не столь существенным.

**Этап 8.** Определение значений коэффициента надежности.

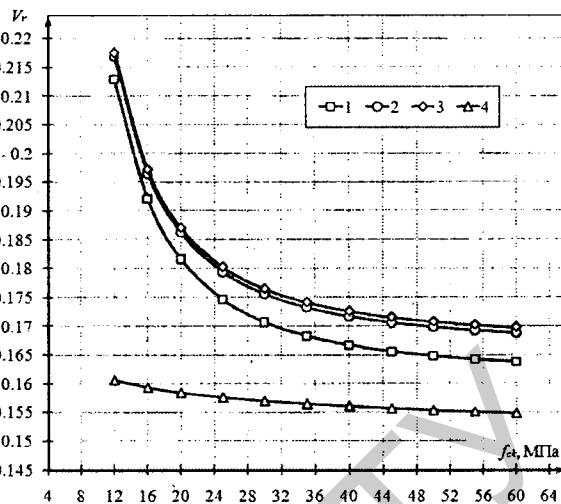
Индекс надежности  $\beta$  определялся по формуле

$$\beta = \frac{1}{\alpha_R \cdot Q} \cdot \left[ \ln \frac{b \cdot g_{rt}(X_m)}{g_{rt}(X_d)} - 0,5Q^2 \right]. \quad (3)$$

Результаты вычисления значений обеспечиваемого индекса надежности  $\beta$  приведены на рис. 6 (для наглядности показаны только варианты вычислений при следующих исходных данных: рабочая высота сечения  $d = 200$  мм, коэффициент продольного армирования  $\rho_l = 0,02$ , коэффициент поперечного армирования  $\rho_w = 0,005$ , размер колонны  $l_c = 400$  мм, прочность поперечной арматуры  $f_{yw} = 320$  МПа).

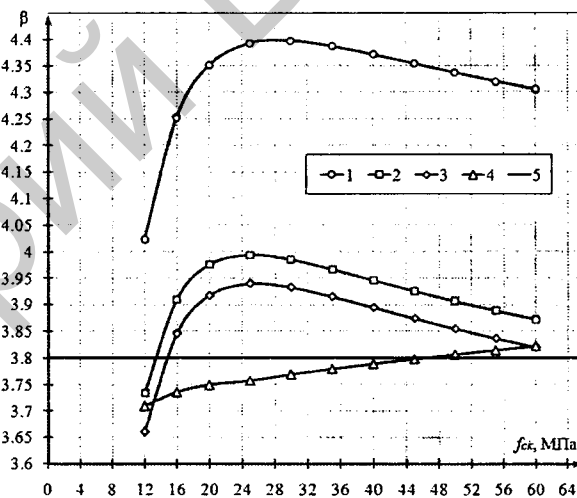
Динамика изменения значений индекса надежности  $\beta$  с ростом прочности бетона  $f_{ck}$  в определяющей степени зависит от динамики изменения значений суммарного коэффициента вариации функции сопротивления  $V_r$ . Изменение значений  $\beta$  происходит нелинейно при расчете по нормам [1] и предлагаемой зависимости при любых коэффициентах поперечного армирования, в то время как при расчете по нормам [2] при коэффициентах поперечного армирования менее 0,008 значения  $\beta$  остаются постоянными и не зависят от прочности бетона.

При расчете по нормам [1, 2] и предлагаемой методике в диапазоне прочности бетона от 12 до 25 МПа наблюдается рост значений индекса надежности  $\beta$ , а для более высокой прочности бетона — плавное снижение значений  $\beta$ . При расчете по методике [1] значения  $\beta$  находятся в пределах 4,00–4,37, что указывает на чрезмерную надежность конструкций и на наличие запасов несущей способности. При расчете по [2] значения  $\beta$  находятся в пределах 3,76–4,00. Значение индекса надежности  $\beta = 3,76$ , которое меньше значения  $\beta = 3,80$ , установленного для конструкций класса надежности RC2, имеет место при прочности бетона 12 МПа. В связи с этим, не рекомендуется применять бетон класса по прочности на сжатие C12/15 для работающих на продавливание конструкций класса надежности RC2.



- 1 — расчет по [1] при третьем виде разрушения;
- 2 — расчет по [2] при третьем виде разрушения ( $\rho_w > 0,008$ );
- 3 — расчет по предлагаемой зависимости при третьем виде разрушения;
- 4 — расчет по [2] при втором виде разрушения ( $\rho_w < 0,008$ )

Рис. 5. Зависимость суммарного коэффициент вариации функции сопротивления  $V_r$  от прочности бетона  $f_{ck}$



- 1 — расчет по [1] при третьем виде разрушения;
- 2 — расчет по [2] при третьем виде разрушения ( $\rho_w > 0,008$ );
- 3 — расчет по предлагаемой зависимости при третьем виде разрушения;
- 4 — расчет по [2] при втором виде разрушения ( $\rho_w < 0,008$ );
- 5 — линия  $\beta = 3,8$

Рис. 6. Зависимость индекса надежности  $\beta$  от прочности бетона  $f_{ck}$

Для предлагаемой зависимости значения индексов надежности  $\beta$  находятся в пределах 3,66–3,94, что несколько ниже, чем при расчете по [2]. Значение индекса надежности  $\beta = 3,66$ , которое меньше значения  $\beta = 3,80$ , установленного для конструкций класса надежности RC2, имеет место при прочности бетона 12 МПа. В связи с этим, не рекомендуется применять бетон класса по прочности на сжатие C12/15 для работающих на продавливание конструкций класса надежности RC2.

При расчете по нормам [2] при коэффициенте поперечного армирования менее 0,008 значения  $\beta$  возрастают в диапазоне от 3,71 до 3,82, и, как видно из рис. 6, для бетона класса C45/50 и ниже значения  $\beta = 3,80$ , что установлено для конструкций класса надежности RC2. В связи с этим, не рекомендуется применять методику [2] для работающих на продавливание конструкций с ко-

эффицентом поперечного армирования менее 0,008 при бетоне класса С45/50 и ниже.

На основании полученных результатов было принято решение произвести корректировку представленного в [1] метода расчета с целью снижения чрезмерной надежности. В качестве корректировки было принято решение изменить значения коэффициента  $C_{Rd,c}$  в нормах [1] с 0,225 на 0,240, и выполнить оценку точности и надежности при этих значениях согласно этапам приложения D норм [3]. В результате проведенной оценки были получены результаты, которые представлены на рис. 7.

Анализ полученных результатов позволяет сделать следующие выводы.

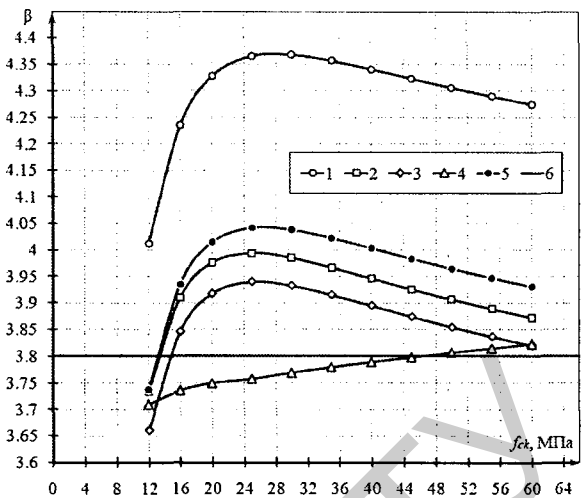
1. С увеличением коэффициента  $C_{Rd,c}$  для норм [1] происходит снижение значений коэффициента надежности  $\beta$ . По мнению авторов, это обусловлено уменьшением поправки среднего значения  $b$ , которое при  $C_{Rd,c} = 0,240$  равно 1,075, а при  $C_{Rd,c} = 0,225$  равно 1,130.

2. При  $C_{Rd,c} = 0,240$  для норм [1] значение индекса надежности для прочности 12 МПа равно приблизительно 3,740, что меньше установленного для конструкций класса надежности RC2 значения  $\beta = 3,80$ , а для прочности более 12 МПа  $\beta$  находится в пределах 3,90–4,05, что указывает на наличие запасов несущей способности. В связи с этим, не рекомендуется применять для работающих на продавливание конструкций с поперечной арматурой класса надежности RC2 бетон класса по прочности на сжатие С12/15.

3. На основании анализа методов расчета прочности при продавливании плит с поперечной арматурой, продавливаемых центрально нагруженной колонной, с целью исключения излишних запасов прочности при бетоне класса С16/20 и выше рекомендуется применить при разработке технических кодексов установившейся практики Республики Беларусь метод расчета, представленный в нормах [1], с коэффициентом  $C_{Rd,c} = 0,240$  вместо 0,225, или предлагаемую зависимость для расчета для бетона класса С16/20 и выше.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

- 1 При анализе методов расчета было установлено, что для определения прочности железобетонных элементов с поперечной арматурой при продавливании используются три расчетные модели, которые учитывают различные виды разрушения элементов. Каждая расчетная модель содержит определенное количество базисных переменных, которые оказывают влияние на предельное состояние элементов железобетонных конструкций с поперечной арматурой.
- 2 Оценка надежности при принятых исходных данных методов расчета прочности при местном срезе плит с поперечной арматурой, продавливаемых центрально нагруженной колонной, показала, что представленный в нормах [1] метод расчета обеспечивает излишние запасы прочности для конструкций класса надеж-



- 1 — расчет по [1] при третьем виде разрушения;  
 2 — расчет по [2] при третьем виде разрушения ( $\rho_w > 0,008$ );  
 3 — расчет по предлагаемой зависимости при третьем виде разрушения;  
 4 — расчет по [2] при втором виде разрушения ( $\rho_w < 0,008$ );  
 5 — расчет по [1] при  $C_{Rd,c} = 0,24$ ;  
 6 — линия  $\beta = 3,8$

Рис. 7. Зависимость индекса надежности  $\beta$  от прочности бетона  $f_{ck}$

ности RC2 независимо от поперечного армирования, а предлагаемая авторами зависимость обеспечивает требуемую надежность без лишних запасов несущей способности и также независимо от коэффициента поперечного армирования.

При расчете по нормам [2] при коэффициентах поперечного армирования менее 0,008 требуемая надежность для бетона класса С45/50 и ниже не обеспечивается. Поэтому не рекомендуется применять данную методику при этих классах бетона и принятых исходных данных.

- 3 Оценка надежности методов расчета прочности при продавливании центрально нагруженной колонной плит с поперечной арматурой показала, что представленные в нормах [1, 2] методы расчета в большинстве случаев обеспечивают излишние запасы прочности для конструкций класса надежности RC2, а предлагаемая авторами зависимость обеспечивает требуемую надежность без лишних запасов несущей способности. С целью снижения запасов прочности была выполнена корректировка методов расчета норм [1] путем изменения значений коэффициента  $C_{Rd,c}$ .
- 4 Исходя из обеспечиваемого нормами [1] индекса надежности, не рекомендуется применять для работающих на продавливание конструкций класса надежности RC2 бетон класса по прочности на сжатие С12/15, а для бетона класса С16/20 и выше рекомендуется при разработке проекта технического кодекса установить метод расчета норм [1] с повышенным значением коэффициента  $C_{Rd,c} = 0,240$  (вместо 0,225) или предлагаемую авторами зависимость.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Бетонные и железобетонные конструкции: СНБ 5.03.01-02. — Минск: Минстройархитектуры, 2003. — 139 с.
2. Еврокод 2. Проектирование железобетонных конструкций. Часть 1-1. Общие правила и правила для зданий: ТКП EN 1992-1-1:2009. — Минск, 2010. — 207 с.
3. Еврокод. Основы проектирования несущих конструкций: СТБ ЕН 1990-2007. — Минск, 2008. — 64 с.

Статья поступила в редакцию 12.12.2011.