

**ПОВЫШЕНИЕ КАЧЕСТВА ПОДГОТОВКИ СТУДЕНТОВ  
СПЕЦИАЛЬНОСТИ «ПРОМЫШЛЕННОЕ  
И ГРАЖДАНСКОЕ СТРОИТЕЛЬСТВО»**  
(г. Минск, БНТУ — 24.05.2011)

УДК 624.012:69.328

**МЕТОДИКА ПРИМЕНЕНИЯ РАСЧЕТНОЙ МОДЕЛИ  
ДЛЯ ПРОГНОЗИРОВАНИЯ ПРОЧНОСТИ  
СТАЛЕФИБРОБЕТОННОГО ЭЛЕМЕНТА  
ПРИ РАСЧЕТЕ НА МЕСТНЫЙ СРЕЗ (ПРОДАВЛИВАНИЕ)**

*ЛАТЫШ В.В., РАК Н.А.*

Белорусский национальный технический университет  
Минск, Беларусь

***ВВЕДЕНИЕ***

Применение расчетной модели при разработке технических нормативных правовых актов (ТНПА) должно сопровождаться проведением оценки надежности расчетной модели согласно положениям СТБ ИСО 2394-2007 «Надежность строительных конструкций. Общие принципы» и СТБ ЕН 1990-2007 «Еврокод. Основы проектирования несущих конструкций». Полученная при этой оценке надежность должна быть сопоставлена с надежностью методов расчета других нормативных документов. Последнее особенно важно в связи с переходом Республики Беларусь к проектированию конструкций в соответствии с европейскими нормативными документами.

Разработка методики применения расчетной модели для прогнозирования прочности сталефибробетонного элемента при расчете на местный срез выполнялась в три стадии:

1. Формирование банка экспериментальных данных по исследованиям сталефибробетонных элементов на местный срез;

2. Анализ экспериментальных данных по исследованиям сталефибробетонных элементов на местный срез с определением поправки среднего значения;

3. Оценка надежности предлагаемой и существующих расчетных моделей для прогнозирования прочности сталефибробетонного элемента при расчете на местный срез.

### ***ФОРМИРОВАНИЕ БАНКА ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ДАННЫХ***

Банк экспериментальных данных по исследованиям сталефибробетонных элементов при местном срезе был составлен по результатам более 25 исследований, выполненных с 1982 по 2011 годы в различных странах, и содержал свыше 230 образцов. Однако после редактирования базы в соответствии с критериями формирования количество образцов сократилось до 186 образцов (взяты из 19 исследований, выполненных с 1982 по 2010 гг.). Сформированный по доступным литературным источникам (в основном по оригиналам публикаций) банк экспериментальных данных по испытаниям сталефибробетонных элементов на местный срез (продавливание) содержит 7 групп сведений, таких как общие данные эксперимента, форма и размеры образцов, армирование образцов, данные по методике испытания, прочностные характеристики бетона матрицы и сталефибробетона, экспериментальные данные.

### ***АНАЛИЗ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ДАННЫХ ПО ИССЛЕДОВАНИЯМ СТАЛЕФИБРОБЕТОННЫХ ЭЛЕМЕНТОВ НА МЕСТНЫЙ СРЕЗ***

Особое внимание в проведенных исследованиях уделялось влиянию процента фибрового армирования на рост несущей способности при продавливании, а также жесткости и трещиностойкости образцов. Так по результатам экспериментов установлен рост продавливающей нагрузки с увеличением процента фибрового армирования от 15 до 90%. При этом вариация объемного процента фибрового армирования находилась в пределах 0% - 2%.

Также внимание акцентировалось на изучении влияния фиброво-

го армирования на прочность при продавливании сталефибробетонных элементов выполненных из различных классов бетона. Диапазон призменной прочности применяемых бетонов находился в пределах от 19 до 87 МПа. Некоторое количество исследований посвящено влиянию вида металлической фибры (по форме, по условиям анкеровки) на рост прочности при продавливании.

Касаясь размеров и формы образцов, необходимо отметить, что толщина плиты находилась в пределах  $60 \div 180$  мм. Образцы, как правило, применялись квадратной формы со стороной  $650 \div 2750$  мм. Помимо фибрового армирования в образцах присутствовала стержневая арматура в виде сеток, установленных в растянутой и сжатой зоне бетона. Процент продольного армирования находился в пределах  $0.08 \div 2.14$  %. Приложение нагрузки на плитный образец в большинстве опытов производилось через железобетонный «коротыш» квадратного сечения, эмитирующий часть колонны, либо применялся металлический или железобетонный штамп. Сторона площадки приложения нагрузки находилась в пределах  $63,5 \div 225$  мм.

В процессе проведения испытаний фиксировались следующие экспериментальные данные:

- момент появления первой трещины;
- разрушающее значение нагрузки;
- прогиб на каждой стадии приложения нагрузки;
- напряжения в растянутой и сжатой зоне бетона (не для всех испытаний);
- напряжение в растянутой продольной арматуре (не для всех испытаний).

Важным фактором работы сталефибробетонных элементов при продавливании является зависимость пролета среза  $l_{inc}$  от процента фибрового армирования. Экспериментами зафиксировано, что с увеличением процента фибрового армирования наблюдается уменьшение длины критического периметра, а также периметра пирамиды продавливания в плоскости нижней грани плиты. Происходит также уменьшение угла наклона к вертикали грани пирамиды продавливания в пределах рабочей высоты плиты.

## ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПОПРАВКИ СРЕДНЕГО ЗНАЧЕНИЯ

Определение поправки среднего значения выполнялось поэтапно в следующей последовательности, регламентированной СТБ ЕН 1990-2007 «Еврокод. Основы проектирования несущих конструкций»:

Этап 1. Формулирование расчетной модели в форме теоретической функции сопротивления  $r_t = g_{rt}(X)$ , 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.

Этап 3: Определение поправки среднего значения  $b$ .

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

Теоретическая функция сопротивления была сформулирована для следующих расчетных моделей:

1. Рекомендации по проектированию и изготовлению сталефибробетонных конструкций. [1]

$$F_{Rd} = R_{fbt} \cdot u_m \cdot h, \quad (1)$$

где:  $R_{fbt}$  – расчетное сопротивление растяжению сталефибробетона при продавливании;

$u_m$  – среднеарифметическое значение периметров верхнего и нижнего оснований пирамиды, образующейся при продавливании в пределах рабочей высоты сечения;

$h$  – полная высота сечения элемента.

2. Свод правил по проектированию сталефибробетонных конструкций [2]:

$$F_{Rd} = R_{fbt} \cdot A_{fb}, \quad (2)$$

где:  $R_{fbt}$  – расчетное сопротивление растяжению сталефибробетона;

$A_{fb} = 0.5 \cdot u \cdot h$  – площадь расчетного поперечного сечения, расположенного на расстоянии  $0.5h$  от границы площади приложения сосредоточенной силы;

$u$  – периметр контура расчетного поперечного сечения;

$h$  – рабочая высота сечения.

3. Рекомендации по проектированию и изготовлению строительных сталефибробетонных конструкций с применением фрезерованной фибры [3]:

$$F_{Rd} = 0,7 \cdot f_{fctd} \cdot u_m \cdot d, \quad 3$$

где:  $f_{fctd}$  – расчетное сопротивление растяжению сталефибробетона;  
 $u_m$  – среднеарифметическое значение периметров верхнего и нижнего оснований пирамиды, образующейся при продавливании в пределах полной высоты сечения;

$d$  – полная высота сечения элемента.

4. Предложения К.Holanda [4]:

$$P_u = 0.65(0.08V_f + 0.51) \cdot (f_c)^{1/2} b_{od} \quad 4$$

где:  $f_c$  – прочность бетона матрицы на сжатие;

$V_f$  – объемный процент фибрового армирования;

$b_{od}$  – расчетный периметр, равный  $4b + d$ , где  $b$  – размер площади приложения нагрузки;

$d$  – рабочая высота сечения плиты.

В расчетных моделях (1...4) угол наклона поверхности среза принят  $45^\circ$ .

5. Предложение авторов [5]:

$$V_{sd} = \frac{0,18}{\gamma_c} k (100 \rho_l f_{ck})^{1/3} \cdot \frac{1.5d^2}{l_{inc}} \cdot (4a + 2\pi \cdot l_{inc}) + \quad 5$$

$$+ \sigma_f \cdot \rho_{fv} \cdot K_n^2 \cdot (u_0 \cdot l_{inc} + \pi l_{inc}^2)$$

Обозначения в (5) приняты по работе [5].

В зависимости (5) угол наклона поверхности среза переменный и определяется процентом фибрового армирования.

Затем для каждого образца, включенного в сформированный банк экспериментальных данных, было определено расчетное значение разрушающей нагрузки согласно теоретической функции сопротивления для каждой из перечисленных выше расчетных моделей.

На основании результатов вычислений были определены для каждой расчетных моделей средние значения  $b$  и коэффициенты вариации величины рассеяния  $\delta$ . Основные результаты вычислений приведены в таблице 1.

Полученные результаты свидетельствуют о том, что рассмотренные методики расчета обладают различной точностью – средние значения различаются существенно (в 2,3 раза). В наибольшей степени отвечают экспериментальным результатам методики расчета [2,3] и предложение авторов [5].

Методики рекомендаций [1] значительно завышают несущую способность, в тоже время методика К.Holanda [4] значительно занижает несущую способность. Приемлемым значением коэффициента вариации величины рассеяния обладают зависимости методик [3-5]. Коэффициент вариации расчетных моделей [1,2] превышает 0.25, что позволяет спрогнозировать вывод о недостаточной надежности расчета по данным методикам сталефибробетонных элементов при местном срезе (продавливании).

Таблица 1. Средние значения и коэффициенты вариации

Параметр	Расчетная модель				
	[1]	[2]	[3]	[4]	[5]
Среднее значение $b$	0,728	0,925	1,051	1,655	1,072
Коэффициент вариации $V\delta$	0,338	0,270	0,157	0,010	0,152

### ***ОЦЕНКА НАДЕЖНОСТИ ПРЕДЛАГАЕМОЙ И СУЩЕСТВУЮЩИХ РАСЧЕТНЫХ МОДЕЛЕЙ***

Оценка надежности расчетной модели для прогнозирования прочности сталефибробетонного элемента при расчете на местный срез осуществляется поэтапно в следующей последовательности, регламентированной СТБ ЕН 1990-2007 «Еврокод. Основы проектирования несущих конструкций»:

Этап 1: Проверка совместимости. При проверке совместимости не выявлено существенных систематических отклонений, исключение которых позволило бы улучшить сходимость и уточнить вид функции сопротивления.

Этап 2: Определение коэффициентов вариации базисных переменных  $V_{X_i}$ . В качестве базисных переменных  $X$ , оказывающих воздействие на рассматриваемое предельное состояние, приняты сле-

дующие переменные (для случая концентричного нагружения образца квадратного сечения):

- 1) прочность бетона при осевом сжатии  $f_c$ ;
- 2) прочность фибры  $f_{fv}$ ;
- 3) толщина плиты  $h$ ; размер площади приложения нагрузки  $b$ ;
- 4) размер площади приложения нагрузки  $b$ ; толщина плиты  $h$ ;
- 5) длина фибры  $l_f$ ;
- 6) диаметр фибры  $d_f$ ;
- 7) коэффициент фибрового армирования  $\rho_{fv}$ ;
- 8) коэффициент продольного армирования  $\rho_l$ ;

Принятые для расчета коэффициентов вариации базисных переменных  $V_{Xi}$  средние значения переменных и их среднеквадратические отклонения приведены в таблице 2.

Таблица 2. Средние значения базисных переменных и их среднеквадратические отклонения

Базисная переменная	Обозначение (размерность)	Среднее значение, $\bar{X}_m$	Среднеквадратическое отклонение, $\sigma_i$
X1	$f_c$ , (МПа)	24; 28; 33; 38	5
X2	$h$ (мм)	150; 200	2
X3	$b$ (мм)	300; 400	3
X4	$f_{fv}$	500	20, только для (5)
X5	$l_f$ (мм)	50	1,5
X6	$d_f$ . (мм);	0,8; 0,9; 1,0	0,02
X7	$\rho_{fv}$	0,005; 0,01; 0,015	1% от среднего значения
X8	$\rho_l$	0.01	1% от среднего значения, только для (5)

При этом среднеквадратические отклонения большинства базисных переменных приняты равными половине предельного отклонения, устанавливаемого соответствующими стандартами на материалы и изготовление конструкций.

Этап 3. Определение расчетного значения функции сопротивления  $r_d$  при значении индекса надежности  $\beta$ .

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

$$V_{rt} = \frac{\sqrt{\sum_{i=1}^j \left( \frac{\partial g_{rt}}{\partial X_i} \sigma_i \right)^2}}{g_{rt}(\underline{X}_m)},$$

где  $g_{rt}(\underline{X}_m)$  – значение функции сопротивления при средних значениях всех базисных переменных;

$\sigma_i$  – среднеквадратическое отклонение базисной переменной  $X_i$ ;

$\frac{\partial g_{rt}}{\partial X_i}$  – производная функции сопротивления по базисной пере-

менной  $X_i$  при средних значениях всех базисных переменных.

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

В качестве оцениваемых расчетных моделей приняты расчетные модели [3,5].

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

Суммарный коэффициент вариации  $V_r$  функции сопротивления определялся по формуле:

$$V_r = \sqrt{V_{rt}^2 + V_{\delta}^2}$$

Расчетное значение функции сопротивления  $r_d$  согласно стандартизированному методу оценки при значении индекса надежности  $\beta$  может быть определено по формуле:

$$r_d = b \cdot g_{rt}(\underline{X}_m) \cdot \exp(-\alpha_R \beta Q - 0,5Q^2)$$

где  $b$  – поправка среднего значения;

$g_{rt}(\underline{X}_m)$  – значение функции сопротивления при средних значениях всех базисных переменных;

$\alpha_R$  – средневзвешенный коэффициент для стороны сопротивления (по методу надежности 1 порядка), принимаемый равным 0,8;



$$Q = \sqrt{\ln(V_r^2 + 1)}.$$

С другой стороны проектирование по нормам предполагает, что расчетное значение функции сопротивления определяется прямой подстановкой в нее расчетных значений характеристик свойств материалов и средних (номинальных) значений геометрических размеров, т.е.

$$r_d = g_{rt}(\underline{X}_d)$$

Исходя из равенства получаемых расчетных значений, обеспечиваемый нормами расчета индекс надежности  $\beta$  можно определить по формуле:

$$\beta = \frac{1}{\alpha_R Q} \left[ \ln \frac{b \cdot g_{rt}(\underline{X}_m)}{g_{rt}(\underline{X}_d)} - 0,5Q^2 \right]$$

Результаты вычисления значений обеспечиваемого оцениваемым методом расчета индекса надежности  $\beta$  приведены:

- для зависимости рекомендаций [3] на рисунках 1 и 2
- для зависимости по работе [5] – на рисунках 3 и 4.

Полученные результаты свидетельствуют о том, что в анализируемых расчетных методиках (3) и (5) значения индекса надежности  $\beta$  практически не зависят от значений коэффициента объемного фибрового армирования  $\rho_{fv}$ , а определяются значением средней прочности бетона.

Представленные на рисунке 2 и 4 результаты свидетельствуют о том, что зависимость методики [3] обеспечивает требуемую надежность ( $\beta > 3,8$ ) при средней прочности бетона более 22 МПа, а зависимость, предложенная в работе [5] обеспечивает требуемую надежность ( $\beta > 3,8$ ) при средней прочности бетона до 40 МПа.

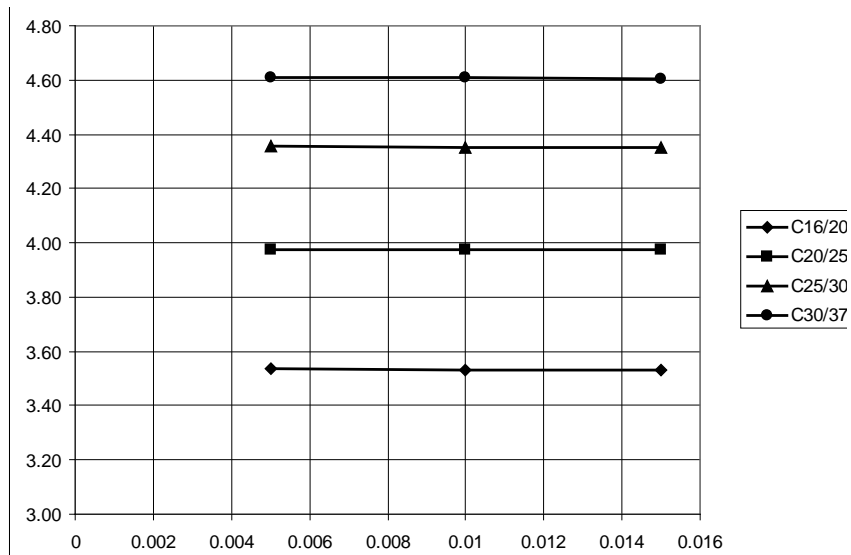


Рис. 1. Зависимость значений индекса надежности  $\beta$ , для методики [2] от значений коэффициента объемного фибрового армирования  $\rho_{fv}$  (при  $h=150$  мм;  $b=300$  мм;  $l_f=50$  мм;  $d_f=1$  мм).

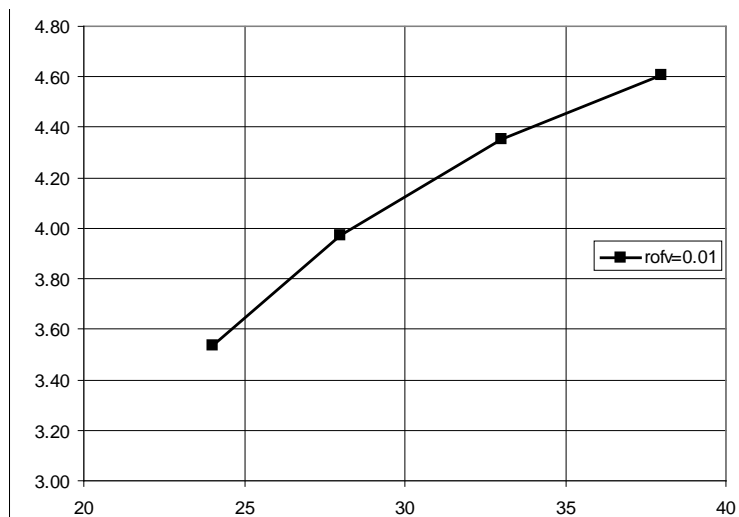


Рис. 2. Для методики P5.03.044.08: зависимость значений индекса надежности  $\beta$  от значений средней прочности бетона при сжатии  $f_c$  (при  $h=150$  мм;  $b=300$  мм;  $l_f=50$  мм;  $d_f=1$  мм)

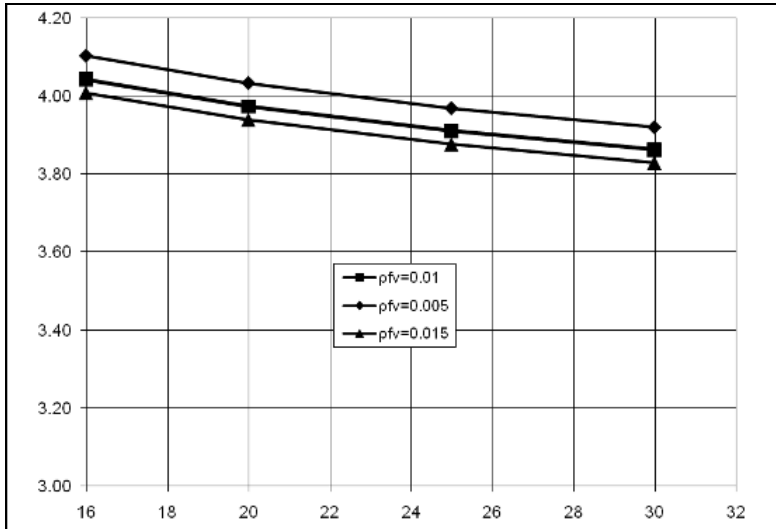


Рис. 3. Зависимость значений индекса надежности  $\beta$  для методики [10] от значений коэффициента объемного фибрового армирования  $\rho_{fv}$  (при  $h=150$  мм;  $b=300$  мм;  $l_f=50$  мм;  $d_f=1$  мм,  $\rho_l=1\%$ ,  $f_{fy}=500$  МПа).

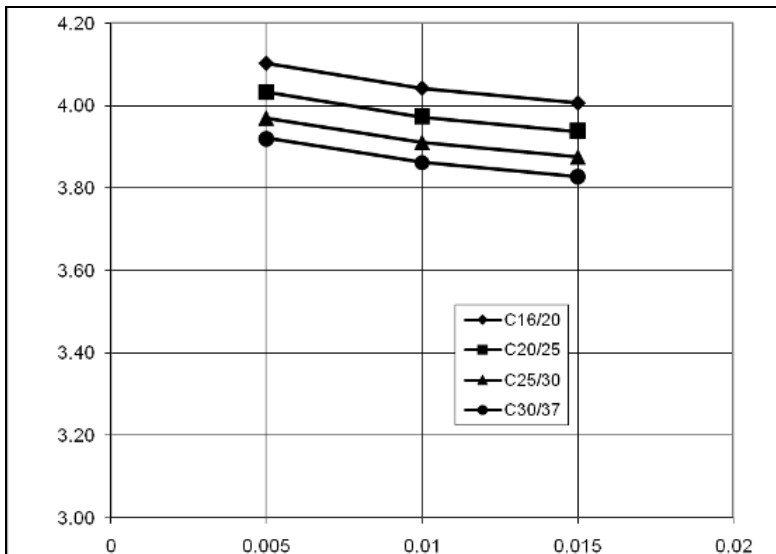


Рис. 4. Зависимость значений индекса надежности  $\beta$  для методики [10] от значений средней прочности бетона при сжатии  $f_c$  (при  $h=150$  мм;  $b=300$  мм;  $l_f=50$  мм;  $d_f=1$  мм,  $\rho_l=1\%$ ,  $f_{fy}=500$  МПа).

## ***ВЫВОДЫ***

Таким образом, можно сделать следующие выводы по применению предлагаемой расчетной модели [5]:

- расчетная методика [5] с достаточной точностью и надежностью прогнозирует прочность сталефибробетонных элементов при местном срезе (продавливании);

- в расчетной методике [5] произведен учет ряда конструктивных факторов, отсутствующих в предшествующих расчетных моделях (продольное армирование), а также закономерностей, подтвержденных экспериментами (уменьшение критического периметра с увеличением процента фибрового армирования).

## ***ЛИТЕРАТУРА***

1. Рекомендации по проектированию и изготовлению сталефибробетонных конструкций. – М., 1987.
2. Сталефибробетонные конструкции: СП 52-104-2006. – М., ФГУП ЦПП, 2007. – 30 с.
3. Рекомендации по проектированию и изготовлению строительных сталефибробетонных конструкций и технологии производства сталефибробетона с применением фрезерованной фибры ЗАО «Курганстальмост» Р5.03.044.08. – Минск: РУП «Институт БелНИИС», 2008. – 88 с.
4. Holanda, K.M.A. Similarities between punching and shear strength of steel fiber reinforced concrete (SFRC) slabs and beams / K.M.A. Holanda, J.B. De Hanai // Ibracon structures and materials journal-2008. vol. 1, No. p.1-16.
5. Латыш В.В., Рак Н.А. Методика расчета сталефибробетонных элементов при местном срезе / В.В. Латыш, Н.А. Рак // Перспективы развития новых технологий в строительстве и подготовке инженерных кадров: сборник научных статей. – Гродно: ГрГУ, 2010. – С. 111–115.