

*Обернихин Д.В., аспирант,  
Никулин А.И., канд. техн. наук, доц.*  
Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова

## ПРОЧНОСТЬ И ТРЕЩИНОСТОЙКОСТЬ ИЗГИБАЕМЫХ ЖЕЛЕЗОБЕТОННЫХ ЭЛЕМЕНТОВ ТРАПЕЦИЕВИДНОГО ПОПЕРЕЧНОГО СЕЧЕНИЯ С НИЖНЕЙ ШИРОКОЙ ГРАНЬЮ

**obernikhindmitriy@gmail.com**

*На основе модифицированного варианта нелинейной деформационной модели силового сопротивления железобетона разработана методика для определения прочности и трещиностойкости изгибаемых элементов трапециевидного сечения с нижней широкой гранью. Приведены аналитические зависимости, используемые для описания нелинейных диаграмм состояния бетона и арматуры. Для удобства практического применения предлагаемой методики расчета приведены алгебраические выражения, обеспечивающие определение интегральных геометрических характеристик эпюр напряжений в сжатой и растянутой зонах бетона рассматриваемого трапециевидного сечения. Учитывая, что частным случаем трапециевидного сечения является прямоугольник, то методика расчета может использоваться для теоретического определения прочности и трещиностойкости сечений изгибаемых железобетонных элементов как прямоугольной, так и трапециевидной формы. Для сопоставления расчётных величин изгибающих моментов, соответствующих стадиям трещинообразования и исчерпания прочности железобетонных элементов по нормальному сечению, составлен алгоритм, реализованный в программе расчёта для персонального компьютера. С её помощью были выполнены численные исследования, некоторые результаты которых представлены в статье.*

**Ключевые слова:** прочность, трещиностойкость, деформационная расчетная модель, диаграммы состояния бетона, диаграммы растяжения арматуры, изгибаемый элемент, трапециевидное сечение.

Ранее проведенные авторами исследования [3, 5] показали, что форма поперечного сечения изгибаемого железобетонного элемента существенно влияет на его прочность и трещиностойкость. В частности, на основе деформационной расчетной модели были разработаны соответствующие методики и алгоритмы расчета указанных параметров применительно к балочным конструкциям трапециевидного сечения с *верхней* широкой гранью. Проведенные численные эксперименты [5] позволили выявить отличительные особенности деформирования исследуемых трапециевидных сечений по отношению к традиционным элементам прямоугольной формы. При этом ни авторами, ни другими исследователями не анализировались пока балочные конструкции трапециевидного сечения с *нижней* широкой гранью.

Чтобы восполнить этот пробел, в данной работе приведены особенности построения методик расчета прочности и трещиностойкости изгибаемых железобетонных элементов указанного вида.

Общими элементами для обеих методик являются нелинейные диаграммы деформирования бетона и арматуры [1, 2, 4].

Диаграммы состояния бетона при сжатии и растяжении принимаются без ниспадающих участков [1, 4] и характеризуются следующими

параметрами: начальным модулем упругости  $E_{b2}$ , предельными сопротивлениями сжатию  $R_b$  и растяжению  $R_{bt}$ , а также соответствующими предельными относительными деформациями  $\varepsilon_{bu}$  и  $\varepsilon_{btu}$  (рис. 1, а).

Для аналитического описания диаграмм сжатия и растяжения бетона используем дробно-рациональную функцию следующего вида:

$$\sigma_i = \frac{E_{b2} \varepsilon_i (1 + D_j \varepsilon_i)}{1 + C_j \varepsilon_i}, \quad (1)$$

где  $E_{b2}$  – начальный модуль упругости бетона, общий для неоднородного сжатия (см. кривую 1 на рис. 1, а) и растяжения (см. кривую 2 на рис. 1, а);  $D_j$ ,  $C_j$  – параметры нелинейности деформирования бетона при неоднородном сжатии и растяжении, получаемые путем трансформирования исходных (эталонных) диаграмм на основе использования соответствующих энергетических критериев разрушения бетона ( $j=b2$  – для диаграмм неоднородного сжатия,  $j=bt2$  – то же, растяжения);  $\sigma_i$ ,  $\varepsilon_i$  – текущие значения напряжений и деформаций сжатия ( $i=b$ ) и растяжения ( $i=bt$ ).

Подробная методика определения неизвестных величин ( $E_{b2}$ ,  $D_{b2}$ ,  $C_{b2}$ ,  $D_{bt2}$ ,  $C_{bt2}$ ,  $\varepsilon_{bu}$ ,  $\varepsilon_{btu}$ ) представлена в работе [4].

Диаграмма растяжения арматуры принята с физической площадкой текучести (рис. 1, б). Для её описания применяется кусочная функция, состоящая из одного линейного и двух нелинейных уравнений:

при

$$0 < \varepsilon_s \leq \varepsilon_{el} \quad \sigma_s = E_s \varepsilon_s, \quad (2)$$

при  $\varepsilon_{el} < \varepsilon_s \leq \varepsilon_{yf}$

$$\sigma_s = \sigma_{el} + \frac{E_s (\varepsilon_s - \varepsilon_{el}) [1 + D_{s1} (\varepsilon_s - \varepsilon_{el})]}{1 + C_{s1} (\varepsilon_s - \varepsilon_{el})}, \quad (3)$$

при  $\varepsilon_{yf} < \varepsilon_s \leq \varepsilon_u$

$$\sigma_s = \sigma_y + \frac{E_{s2} (\varepsilon_s - \varepsilon_{yf}) [1 + D_{s2} (\varepsilon_s - \varepsilon_{yf})]}{1 + C_{s2} (\varepsilon_s - \varepsilon_{yf})}, \quad (4)$$

где  $E_{sn}$  – начальный модуль упругости арматуры;  $\sigma_{el}$ ,  $\varepsilon_{el}$  – предел упругости и соответствующая относительная деформация арматуры (см. т. 1 на рис. 1, б);  $\sigma_y$ ,  $\varepsilon_{yf}$  – предел текучести и относительная деформация в конце площадки текучести арматуры (см. т. 2 на рис. 1, б);  $\sigma_u$ ,  $\varepsilon_u$  – временное сопротивление и предельная относительная деформация при разрыве арматуры (см. т. 3 на рис. 1, б);  $C_{s1}$ ,  $D_{s1}$ ,  $C_{s2}$ ,  $D_{s2}$  – параметры нелинейности кусочной функции, описывающей второй и третий участки диаграммы;  $E_{s2}$  – модуль упругости арматуры в начальной точке третьего участка.

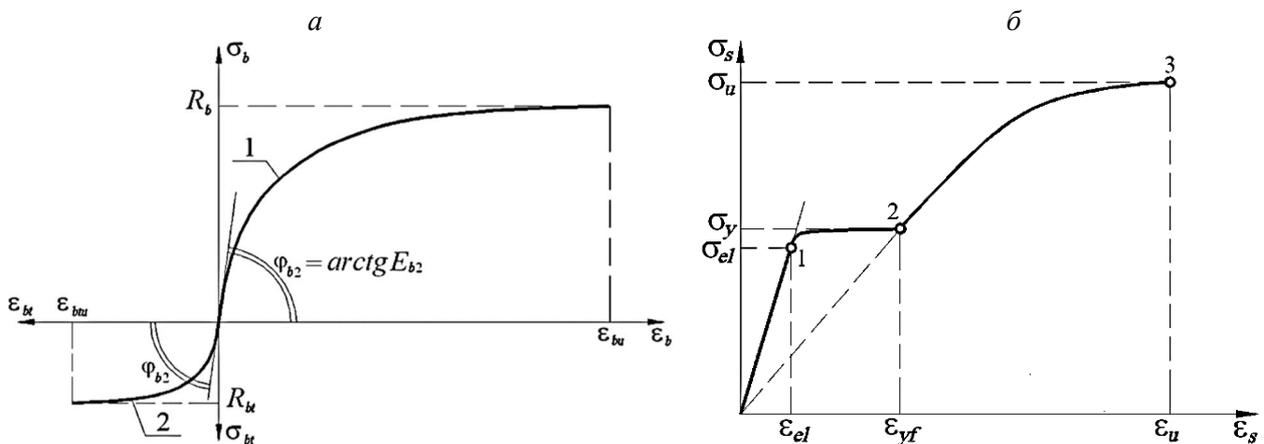


Рис. 1. Диаграммы деформирования бетона (а) и арматуры (б)

Зависимости для определения неизвестных параметров кусочной функции ( $C_{s1}$ ,  $D_{s1}$ ,  $C_{s2}$ ,  $D_{s2}$ ,  $E_{s2}$ ) представлены в работе [2].

При разработке методик расчета прочности и трещиностойкости сечений изгибаемых железобетонных элементов трапециевидной формы с нижней широкой гранью используем: уравнения равновесия, условия линейного распределения

относительных деформаций по сечению, а также нелинейные диаграммы деформирования бетона и арматуры.

Расчетная схема изгибаемого железобетонного элемента рассматриваемого вида на стадии трещинообразования представлена на рис. 2.

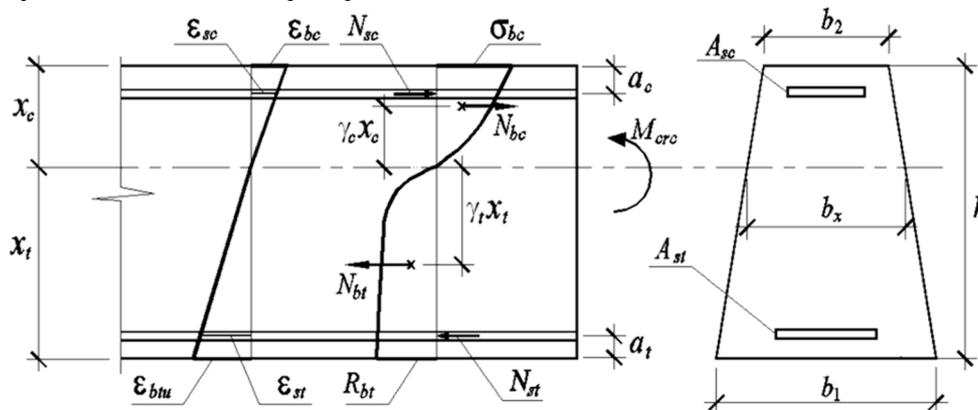


Рис. 2. Схема распределения относительных деформаций, напряжений и усилий в нормальном сечении изгибаемого железобетонного элемента трапециевидной формы на стадии трещинообразования

Уравнения равновесия в традиционной форме их записи имеют вид:

$$0,5(b_2 + b_x)x_c \omega_c \sigma_{bc} + \sigma_{sc} A_{sc} - 0,5(b_1 + b_x)x_t \omega_t R_{bt} - \sigma_{st} A_{st} = 0, \quad (5)$$

$$M_{crc} = 0,5(b_2 + b_x)x_c^2 \omega_c \gamma_c \sigma_{bc} + \sigma_{sc} A_{sc} (x_c - a_c) + 0,5(b_1 + b_x)x_t^2 \omega_t \gamma_t R_{bt} + \sigma_{st} A_{st} (h - x_c - a_t), \quad (6)$$

где  $M_{crc}$  – искомый изгибающий момент, соответствующий началу этапа трещинообразования сечения железобетонного элемента;  $\sigma_{bc}$  – величина фибрового напряжения бетона в сжатой зоне сечения;  $\omega_c, \omega_t, \gamma_c, \gamma_t$  – интегральные геометрические характеристики эпюр напряжений в сжатой и растянутой зонах бетона;  $x_c, x_t$  – высоты сжатой и растянутой зон бетона;  $\sigma_{sc}, \sigma_{st}$  – напряжения в сжатой и растянутой арматуре;  $b_1, b_2$  – ширина, соответственно, нижней и верхней грани трапециевидного сечения элемента;  $h$  – высота сечения элемента;  $A_{sc}, A_{st}$  – площади сжатой и растянутой арматуры;  $a_c, a_t$  – расстояния от верхней и нижней грани сечения до центров тяжести сжатой и растянутой арматуры;  $b_x$  – ширина сечения на уровне нейтральной оси.

Для определения ширины ( $b_x$ ) трапециевидного сечения элемента на уровне его нейтральной оси используется выражение:

$$b_x = b_2 + (b_1 - b_2) \cdot \frac{x_c}{h}. \quad (7)$$

Коэффициенты полноты эпюр напряжений в сжатой и растянутой зонах бетона ( $\omega_c, \omega_t$ ) и относительные расстояния от нейтральной оси до центров тяжести соответствующих эпюр ( $\gamma_c, \gamma_t$ ) находятся с помощью следующих зависимостей, полученных авторами применительно к трапециевидному поперечному сечению изгибаемого железобетонного элемента с нижней широкой гранью:

$$\omega_c = \frac{E_{b2}}{\sigma_{bc} C_{b2} \left( \frac{b_2 h}{x_c} + \frac{b_1 - b_2}{2} \right)} \left\{ \frac{D_{b2} \varepsilon_{bc}}{2} \left( \frac{b_2 h}{x_c} + \frac{b_1 - b_2}{3} \right) + \left( 1 - \frac{D_{b2}}{C_{b2}} \right) \times \right. \\ \left. \times \left[ \left( 1 - \frac{\text{Ln}(1 + C_{b2} \varepsilon_{bc})}{C_{b2} \varepsilon_{bc}} \right) \times \left( \frac{b_2 h}{x_c} + (b_1 - b_2) \cdot \left( 1 + \frac{1}{C_{b2} \varepsilon_{bc}} \right) \right) - \frac{b_1 - b_2}{2} \right] \right\}, \quad (8)$$

$$\gamma_c = \left\{ \frac{D_{b2} \varepsilon_{bc}}{3} \left( \frac{b_2 h}{x_c} + \frac{b_1 - b_2}{4} \right) + \left( 1 - \frac{D_{b2}}{C_{b2}} \right) \times \left[ \left( \frac{b_2 h}{x_c} + (b_1 - b_2) \cdot \left[ 1 + \frac{1}{C_{b2} \varepsilon_{bc}} \right] \right) \times \right. \right. \\ \left. \left. \times \left( \frac{1}{2} - \frac{1}{C_{b2} \varepsilon_{bc}} \left( 1 - \frac{\text{Ln}(1 + C_{b2} \varepsilon_{bc})}{C_{b2} \varepsilon_{bc}} \right) \right) - \frac{b_1 - b_2}{3} \right] \right\} / \left\{ \frac{D_{b2} \varepsilon_{bc}}{2} \left( \frac{b_2 h}{x_c} + \frac{b_1 - b_2}{3} \right) + \right. \\ \left. + \left( 1 - \frac{D_{b2}}{C_{b2}} \right) \times \left[ \left( 1 - \frac{\text{Ln}(1 + C_{b2} \varepsilon_{bc})}{C_{b2} \varepsilon_{bc}} \right) \times \left( \frac{b_2 h}{x_c} + (b_1 - b_2) \cdot \left( 1 + \frac{1}{C_{b2} \varepsilon_{bc}} \right) \right) \right] \right\}, \quad (9)$$

$$\omega_t = \frac{E_{b2}}{R_{bt} C_{bt2} \left( \frac{b_1 h}{x_t} - \frac{b_1 - b_2}{2} \right)} \left\{ \frac{D_{bt2} \varepsilon_{btu}}{2} \left( \frac{b_1 h}{x_t} - \frac{b_1 - b_2}{3} \right) + \left( 1 - \frac{D_{bt2}}{C_{bt2}} \right) \times \right. \\ \left. \times \left[ \left( 1 - \frac{\text{Ln}(1 + C_{bt2} \varepsilon_{btu})}{C_{bt2} \varepsilon_{btu}} \right) \times \left( \frac{b_1 h}{x_t} - (b_1 - b_2) \cdot \left( 1 + \frac{1}{C_{bt2} \varepsilon_{btu}} \right) \right) + \frac{b_1 - b_2}{2} \right] \right\}, \quad (10)$$

$$\gamma_t = \left\{ \frac{D_{bt2} \varepsilon_{btu}}{3} \left( \frac{b_1 h}{x_t} - \frac{b_1 - b_2}{4} \right) + \left( 1 - \frac{D_{bt2}}{C_{bt2}} \right) \times \left[ \frac{b_1 h}{2x_t} - \frac{b_1 - b_2}{2} \left( \frac{1}{3} + \frac{1}{C_{bt2} \varepsilon_{btu}} \right) - \frac{1}{C_{bt2} \varepsilon_{btu}} \times \right. \right. \\ \left. \left. \times \left( 1 - \frac{\text{Ln}(1 + C_{bt2} \varepsilon_{btu})}{C_{bt2} \varepsilon_{btu}} \right) \times \left( \frac{b_1 h}{x_t} - (b_1 - b_2) \cdot \left( 1 + \frac{1}{C_{bt2} \varepsilon_{btu}} \right) \right) \right] \right\} / \left\{ \frac{D_{bt2} \varepsilon_{btu}}{2} \left( \frac{b_1 h}{x_t} - \frac{b_1 - b_2}{3} \right) + \right. \\ \left. + \left( 1 - \frac{D_{bt2}}{C_{bt2}} \right) \times \left[ \frac{b_1 - b_2}{2} + \left( 1 - \frac{\text{Ln}(1 + C_{bt2} \varepsilon_{btu})}{C_{bt2} \varepsilon_{btu}} \right) \times \left( \frac{b_1 h}{x_t} - (b_1 - b_2) \cdot \left( 1 + \frac{1}{C_{bt2} \varepsilon_{btu}} \right) \right) \right] \right\}, \quad (11)$$

где  $\varepsilon_{bc}$ ,  $\varepsilon_{btu}$  – относительные фибровые деформации, соответственно, в сжатой и растянутой зонах сечения изгибаемого железобетонного элемента.

С учетом принятой гипотезы плоских сечений для рассматриваемого железобетонного элемента записываются следующие условия деформаций:

$$\frac{\varepsilon_{btu}}{x_t} = \frac{\varepsilon_{bc}}{x_c}, \quad (12)$$

$$x_t = h - x_c, \quad (13)$$

$$\frac{\varepsilon_{sc}}{\varepsilon_{bc}} = 1 - \frac{a_c}{x_c}, \quad (14)$$

$$\frac{\varepsilon_{st}}{\varepsilon_{bc}} = \frac{h - a_t}{x_c} - 1, \quad (15)$$

где  $\varepsilon_{sc}$ ,  $\varepsilon_{st}$  – относительные деформации сжатой и растянутой арматуры.

Величину фибрового напряжения бетона  $\sigma_{bc}$  получаем с использованием зависимости (1), описывающей диаграмму деформирования бетона при неоднородном сжатии, а неизвестные напряжения в сжатой и растянутой арматуре  $\sigma_{sc}$ ,  $\sigma_{st}$  находятся с помощью универсальной кусочной функции (2)...(4), принятой для описания диаграмм деформирования арматурных сталей с физической площадкой текучести.

Таким образом, получена замкнутая система разрешающих уравнений для определения НДС изгибаемого железобетонного элемента трапециевидного сечения с нижней широкой гранью на стадии его трещинообразования.

Теперь рассмотрим представленную на рис. 3 расчетную схему исследуемого элемента на стадии исчерпания его прочности.

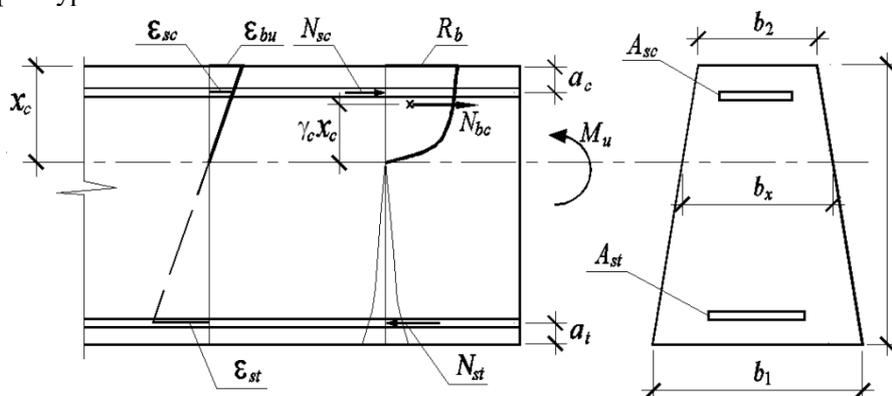


Рис. 3. Схема распределения относительных деформаций, напряжений и усилий в нормальном сечении изгибаемого железобетонного элемента трапециевидной формы на стадии исчерпания его прочности

Ввиду малости своих значений из уравнений равновесия исключаются компоненты, учитывающие растянутую зону бетона, а вместо

величины фибрового напряжения сжатого бетона  $\sigma_{bc}$  принимается его призматическая прочность  $R_b$ :

$$0,5(b_2 + b_x)x_c\omega_c R_b + \sigma_{sc}A_{sc} - \sigma_{st}A_{st} = 0, \quad (16)$$

$$M_u = 0,5(b_2 + b_x)x_c^2\omega_c\gamma_c R_b + \sigma_{sc}A_{sc}(x_c - a_c) + \sigma_{st}A_{st}(h - x_c - a_t), \quad (17)$$

где  $M_u$  – искомый изгибающий момент, соответствующий исчерпанию прочности элемента по нормальному сечению; описание остальных параметров совпадает с приведенным ранее для уравнений (5), (6).

Расчетные зависимости для определения интегральных геометрических характеристик эпюры напряжений в сжатой зоне бетона ( $\omega_c$ ,  $\gamma_c$ ) находятся с помощью формул (8) и (9), в которые вместо фибрового напряжения ( $\sigma_{bc}$ ) и относительной деформации ( $\varepsilon_{bc}$ ) подставлены предельные значения этих величин:  $R_b$  и  $\varepsilon_{btu}$ . Выражение (7) для вычисления ширины сечения элемента на уровне его нейтральной оси ( $b_x$ ) используется без изменений. В качестве условий

линейного распределения относительных деформаций по сечению принимаются зависимости (14) и (15) с учётом подстановки параметра  $\varepsilon_{btu}$  вместо  $\varepsilon_{bc}$ . Осталось только найти неизвестные напряжения в сжатой и растянутой арматуре  $\sigma_{sc}$  и  $\sigma_{st}$ , для вычисления которых используется универсальная кусочная функция, включающая уравнения (2)...(4).

В результате численного решения полученной системы уравнений с использованием одного из итерационных методов определяется искомый изгибающий момент  $M_u$ , соответствующий исчерпанию прочности по нормальному сечению изгибаемого железобетонного элемента

трапециевидной формы с нижней широкой гранью.

Для проведения качественной и количественной оценки результатов, получаемых в рамках предлагаемых методик расчета прочности и трещиностойкости рассматриваемых элементов, были составлены соответствующие алгоритмы и разработаны программы «Izgib\_1Т» и «Izgib\_2Т» для персонального компьютера, с помощью которых проведены численные исследования. Первая из программ предназначена для расчета изгибаемых железобетонных элементов трапециевидной формы с верхней широкой гранью, а вторая – для трапециевидных сечений с нижней широкой гранью.

Принимаем во внимание, что частным случаем трапециевидного сечения является прямоугольник. Поэтому методики, алгоритмы и программы расчета «Izgib\_1Т» и «Izgib\_2Т» могут использоваться для теоретического определения прочности и трещиностойкости сечений изгибаемых железобетонных элементов как прямоугольной, так и трапециевидной формы при любой прочности бетона и различном содержании сжатой и растянутой арматуры.

В качестве исследуемого эталонного образца был принят изгибаемый железобетонный элемент с размерами поперечного сечения прямоугольной формы  $b \times h = 300 \times 450$  мм. Сравни-

ваемые железобетонные элементы трапециевидного сечения имеют такую же высоту ( $h = 450$  мм), но различные размеры нижней ( $b_1$ ) и верхней ( $b_2$ ) граней. Для образцов с верхней более широкой гранью (тип 1) её размер принят совпадающим с шириной сечения прямоугольной формы  $b_2 = 300$  мм, а нижняя грань – в половину меньше  $b_1 = 150$  мм. Альтернативные образцы трапециевидного сечения (см. рис. 2) имеют более широкую нижнюю грань ( $b_1 = 300$  мм) и, соответственно, уменьшенную верхнюю грань  $b_2 = 150$  мм (тип 2). В обоих случаях экономия бетона по сравнению с эталонным прямоугольным элементом достигает 25 %.

В ходе численного эксперимента варьировали следующими исходными данными: классами бетона (В15, В30, В50, В70); процентным содержанием растянутой арматуры класса А400 (0,5 %, 1,0 %, 3,0 %, 5,0 %). В сжатой зоне для всех образцов принята арматура класса А240 с постоянной площадью (0,5 %). В расчетах использовались нормативные характеристики бетона и арматуры с учетом кратковременного нагружения железобетонных элементов статической нагрузкой. В итоге общий объем рассчитываемых образцов составил 48. Основные результаты численных исследований представлены в таблице 1.

Таблица 1

**Расчетные значения прочности и трещиностойкости сечений изгибаемых железобетонных элементов прямоугольной и трапециевидной формы, кН·м**

Класс бетона	Процент армирования, %	Прямоугольное сечение ( $M_{crc,1} / M_{u,1}$ )	Трапециевидное сечение		$\frac{M_{crc,2}}{M_{u,2}} / \frac{M_{u,2}}{M_{u,1}}$ , %	$\frac{M_{crc,3}}{M_{u,3}} / \frac{M_{u,3}}{M_{u,1}}$ , %
			$b_1 = 150$ мм; $b_2 = 300$ мм ( $M_{crc,2} / M_{u,2}$ )	$b_1 = 300$ мм; $b_2 = 150$ мм ( $M_{crc,3} / M_{u,3}$ )		
В15	0,5	29,25 / 127,25	19,00 / 126,58	21,21 / 110,74	65,0 / 99,5	72,5 / 87,0
	1,0	35,09 / 196,33	25,35 / 195,28	25,76 / 171,86	72,2 / 99,5	73,4 / 87,5
	3,0	57,15 / 306,80	48,97 / 278,86	41,96 / 197,60	85,7 / 90,9	73,4 / 64,4
	5,0	77,35 / 319,30	70,20 / 286,70	55,68 / 198,82	90,8 / 89,8	72,0 / 62,3
В30	0,5	43,34 / 140,26	26,79 / 139,99	30,01 / 130,04	61,8 / 99,8	69,2 / 92,7
	1,0	49,86 / 235,28	33,91 / 232,76	34,95 / 194,80	68,0 / 98,9	70,1 / 82,8
	3,0	74,96 / 499,28	60,91 / 470,03	53,09 / 320,41	81,2 / 94,1	70,8 / 64,2
	5,0	98,64 / 547,97	85,99 / 493,29	69,14 / 327,91	87,2 / 90,0	70,1 / 59,8
В50	0,5	58,14 / 148,74	34,96 / 148,53	38,77 / 140,04	60,1 / 99,8	66,7 / 94,2
	1,0	65,44 / 268,97	42,94 / 267,44	44,14 / 227,37	65,6 / 99,4	67,4 / 84,5
	3,0	93,75 / 565,12	73,52 / 559,33	64,10 / 446,66	78,4 / 99,0	68,4 / 79,0
	5,0	120,80 / 801,32	102,31 / 736,35	82,09 / 479,77	84,7 / 91,9	68,0 / 59,9
В70	0,5	69,44 / 154,18	41,11 / 153,99	44,90 / 145,31	59,2 / 99,9	64,7 / 94,2
	1,0	77,32 / 286,54	49,74 / 285,84	50,54 / 250,54	64,3 / 99,8	65,4 / 87,4
	3,0	108,00 / 605,66	82,98 / 592,36	71,60 / 504,05	76,8 / 97,8	66,3 / 83,2
	5,0	137,49 / 891,87	114,45 / 875,11	90,71 / 619,56	83,2 / 98,1	66,0 / 69,5

Анализ полученных результатов, позволил выявить следующие закономерности:

– для небольших процентов армирования (0,5 %, 1,0 %) изгибаемая прочность трапециевид-

ных сечений изгибаемых железобетонных элементов с верхней широкой гранью практически совпадает с соответствующими величинами  $M_u$  для прямоугольных сечений (отклонения от 0,3

% до 1,5 %). При повышенном проценте армирования таких сечений (3,0 %) предельные изгибающие моменты также достаточно близки по величине. При этом для образцов из бетонов В15...В30 отклонения существенно больше (12,3...9,0 %), чем для бетонов повышенной прочности (1,4...2,7 %). Для перearмированных сечений (5,0 %) сохраняется такая же тенденция – с ростом прочности бетона значения отклонений уменьшаются. Наибольшие отклонения (13,7...11,4 %) выявлены для образцов из бетонов В15...В50, а для бетона класса В70 отклонение составило всего 2,7 %;

– для трапециевидных образцов с широкой нижней гранью наблюдается снижение изгибной прочности в диапазоне от 5,8 до 40,2 % по отношению к эталонным образцам прямоугольного сечения. При этом более близкие к минимальному значению диапазона показали малоармированные образцы (0,5 %) для всех классов бетонов, а наибольшие отклонения выявлены для перearмированных образцов (5,0 %). Для наиболее распространённого процента армирования (1,0 %) снижение изгибной прочности сечения укладывается в относительно небольшой диапазон отклонений от 12,5 до 17,2 %. Образцы с повышенным процентом армирования (3,0 %) показали разные по величине диапазоны снижения их изгибной прочности в зависимости от классов бетона. Так, предельные изгибающие моменты  $M_u$  для рассматриваемых трапециевидных элементов из бетонов В15...В30 уменьшилась практически на одинаковую величину 35,6...35,8 %, а для бетонов повышенной прочности В50...В70 снижение оказалось существенно меньше – на 16,8...21,0 %;

– для всех 3-х типов образцов прослеживается устойчивая тенденция повышения изгибной прочности элементов с увеличением процента армирования при одном и том же классе бетона. Максимальный рост значений изгибающих моментов (в 5,78 раза) выявлен у эталонных образцов из высокопрочного бетона В70. У элементов трапециевидного сечения первого типа рост искомых величин  $M_u$  от рассматриваемого фактора происходит в меньшей степени – в 5,68 раза, а для элементов второго типа рост предельных изгибающих моментов  $M_u$  не превышает 4,26 раза;

– с повышением прочности бетона при одном и том же проценте армирования у всех образцов наблюдается рост предельных изгибающих моментов, который для высокопрочного бетона В70 и наибольшего процента армирования (5,0 %) достигает значений 2,79...3,12 раза. Для наиболее распространённого процента армирования (1,0 %) получен одинаковый рост (в

1,46 раза) искомых величин  $M_u$  для всех 3-х исследуемых типов сечений элементов;

– для всех рассмотренных классов бетона и при любом армировании растянутой зоны трещиностойкость элементов трапециевидного сечения обоих типов оказалась на 9,2...40,8 % ниже, чем у эталонных образцов. При этом диапазон отклонений величин  $M_{cr}$  у трапециевидных сечений второго типа оказался несколько меньше и составил от 26,6 до 35,3 %;

– увеличение в заданных пределах процента армирования трапециевидных сечений при неизменной прочности бетона приводит к существенному повышению их трещиностойкости. При этом наибольший рост значений наблюдается у низкопрочного бетона (В15) – в 3,69 раза для образцов первого типа и в 2,63 раза для образцов второго типа. Для высокопрочного бетона (В70) этот рост несколько меньше – в 2,78 раза для элементов первого типа и в 2,02 раза для элементов второго типа. Для прямоугольных сечений указанные соотношения искомых величин несколько ниже и составляют для низкопрочного и высокопрочного бетонов, соответственно, 2,64 и 1,98 раза;

– увеличение прочности бетона для всех рассмотренных элементов приводит к повышению трещиностойкости их сечений в 1,63... 2,37 раза. При этом для малоармированных (0,5 %) образцов параметры роста относительных величин моментов трещинообразования ближе к максимальному значению их общего диапазона – 2,12...2,37 раза, а для перearмированных (5,0 %) сечений аналогичные величины ближе к минимальному значению их общего диапазона – 1,63...1,78 раза.

В заключение следует отметить, что в настоящее время авторы выполняют экспериментальные исследования для оценки влияния формы поперечного сечения на прочность, трещиностойкость и деформативность изгибаемых железобетонных элементов, результаты которых планируется представить в последующих публикациях.

## БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Немировский Ю.В., Болтаев А.И. Диаграммы деформирования бетонов и железобетонов // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. 2015. № 6. С. 125-129.
2. Никулин А.И. Универсальная зависимость для аналитического описания диаграмм растяжения арматурной стали // Вестник Иркутского государственного технического университета. 2015. № 3. С. 157-162.
3. Никулин А.И., Обернихин Д.В., Рубанов В.Г., Свентиков А.А. Трещиностойкость изгиба-

емых железобетонных элементов трапециевидного сечения на основе применения нелинейной деформационной модели // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. 2016. № 2. С. 58-63.

4. Никулин А.И., Фролов Н.В., Никулина Ю.А. Трещиностойкость изгибаемых железобетонных элементов с учетом использования в растянутой зоне различных сочетаний стальной и стеклопластиковой арматуры // Бетон и желе-

зобетон. 2015. № 3. С. 18-22.

5. Обернихин Д.В., Никулина Ю.А. Численные исследования прочности изгибаемых железобетонных элементов трапециевидного и прямоугольного сечений // Безопасность строительного фонда России. Проблемы и решения: материалы международных академических чтений.– Курск: Изд-во Курск. гос. ун-та, 2015.– С. 175-183.

---

**Nikulin A.I., Obernihin D.V.**

**THE STRENGTH AND THE CRACK RESISTANCE OF THE BENT REINFORCED CONCRETE TRAPEZOIDAL CROSS-SECTION ELEMENTS WITH THE WIDE LOWER BOUND**

*Based on a modified version of the nonlinear deformation model of the reinforced concrete power of resistance a method, that is needed to determine the strength, crack resistance of the bent reinforced concrete trapezoidal cross-section elements with the wide lower bound, was developed. Analytical dependences, used to describe nonlinear diagrams of the concrete and reinforcement state, are shown. For the convenience of the proposed calculation method practical application algebraic expressions, ensuring the definition of integrated geometric characteristics diagrams of stresses in the compressed and stretched zones considered concrete of the trapezoidal cross-section elements, are given. Considered that the special case of the trapezoidal cross-section element is a rectangle, the calculation method may be used to determine the theoretical strength and the crack resistance sections of bent concrete rectangular and trapezoidal elements. For comparison of the calculated values of the bending moments, the relevant stages of the cracking and of the reinforced concrete elements strength exhaustion for normal section, the algorithm realized in the calculation program for PC, was composed. With its help numerical researches, some results of which are presented in the article, were performed.*

**Key words:** strength, crack resistance, deformation calculation model, concrete state diagram, tension reinforcement diagram, bent element, a trapezoidal cross-section.

---

**Обернихин Дмитрий Вячеславович**, аспирант кафедры строительства и городского хозяйства.

Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова.

Адрес: Россия, 308012, г. Белгород, ул. Костюкова, д. 46.

E-mail: obernikhindmitriy@gmail.com

**Никулин Александр Иванович**, канд. техн. наук, доцент кафедры строительства и городского хозяйства.

Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова.

Адрес: Россия, 308012, г. Белгород, ул. Костюкова, д. 46.

E-mail: nikulin137@yandex.ru