

Никулин А.И., канд. техн. наук, доц.,

Обернихин Д.В., аспирант

Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова

## ДЕФОРМАТИВНОСТЬ ИЗГИБАЕМЫХ ЖЕЛЕЗОБЕТОННЫХ ЭЛЕМЕНТОВ ТРАПЕЦИЕВИДНОГО СЕЧЕНИЯ С ТРЕЩИНАМИ В РАСТЯНУТОЙ ЗОНЕ

nikulin137@yandex.ru

На основе модифицированного варианта нелинейной деформационной модели силового сопротивления железобетона разработана методика для определения прогибов изгибаемых элементов трапециевидного сечения. Приведены аналитические зависимости, используемые для вычисления кривизн сечений в зависимости от действующих на них изгибающих моментов. 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 прогибов изгибаемых железобетонных элементов как прямоугольной, так и трапециевидной формы. Для сопоставления расчётных величин прогибов железобетонных элементов составлен алгоритм, реализованный в программе расчёта для персонального компьютера. С её помощью были выполнены численные исследования, некоторые результаты которых представлены в статье.

**Ключевые слова:** прогиб балки, кривизна сечения, трещиностойкость, деформационная расчетная модель, диаграммы состояния бетона и арматуры, изгибаемый элемент, трапециевидное сечение, зависимость момент-кривизна, численный эксперимент.

Проведенные в последние годы исследования железобетонных конструкций позволили включить в новые нормы (СП 63.13330.2012 «СНиП 52-01-2003 Бетонные и железобетонные конструкции. Основные положения») и, соответственно, в практику проектирования деформационную расчетную модель нормальных сечений, которая хорошо отражает фактический характер работы железобетона на всех этапах вплоть до его разрушения [1, 3, 4, 5, 6, 14, 15]. Это позволяет с единых позиций выполнять расчеты железобетонных конструкций по прочности, трещиностойкости и по деформациям.

Ранее авторами [12, 13] на основе деформационной расчетной модели были разработаны соответствующие методики и алгоритмы расчета прочности и трещиностойкости применительно к железобетонным балочным конструкциям трапециевидного сечения.

Ниже приведены особенности построения методики расчета прогибов изгибаемых элементов рассматриваемого вида.

Прогиб железобетонных балочных конструкций можно определять, например, по формуле [4]:

$$f_m = \int_0^L \bar{M}_x (1/r)_x dx, \quad (1)$$

где  $\bar{M}_x$  – изгибающий момент в сечении  $x$  от действия единичной силы, приложенной по направлению искомого перемещения элемента в сечении по длине пролета  $L$ , для которого опре-

деляют прогиб;  $(1/r)_x$  – кривизна балки в сечении  $x$  от нагрузки, при которой определяется прогиб.

В общем случае вычисление прогиба производят путем разбиения пролёта балки на ряд участков, определения кривизны на границах этих участков (с учетом отсутствия или наличия трещин и знака кривизны) и перемножения эпюр моментов  $\bar{M}_x$  и кривизны  $(1/r)_x$  по длине балки при линейном распределении кривизны в пределах каждого участка. Таким образом, для характерных сечений изгибаемой конструкции необходимо получить зависимости “момент-кривизна” [9].

Для определения кривизны на участках железобетонной балки с трещинами в растянутой зоне используется гипотеза плоских сечений в варианте В.И. Мурашева – Я.М. Немировского [7, 8] для некоторого расчётного сечения, в котором деформации бетона и арматуры соответствуют усреднённому состоянию блока между нормальными трещинами. Тогда вычисление кривизны для участка с трещинами производится с помощью известной зависимости [5]

$$\frac{1}{r} = \frac{\psi_b \varepsilon_b + \psi_s \varepsilon_s}{h_0}, \quad (2)$$

где  $\psi_b$  – коэффициент, учитывающий неравномерность распределения деформаций сжатого бетона между трещинами и принимаемый равным 0,9;  $\psi_s$  – коэффициент, учитывающий неравномерность распределения деформаций рас-

тянутой арматуры между трещинами;  $\varepsilon_b$  и  $\varepsilon_s$  – относительные деформации сжатого бетона и крайнего растянутого стержня в сечении элемента с трещиной;  $h_0$  – расстояние между крайним сжатым волокном бетона и растянутым арматурным стержнем.

Значение коэффициента  $\psi_s$  вычисляется по формуле [2]

$$\psi_s = 1 - \frac{\varepsilon_{s,cr}}{\varepsilon_s} \beta, \quad (3)$$

где  $\varepsilon_{s,cr}$  – относительная деформация растянутой арматуры в железобетонном элементе рассматриваемого сечения сразу после образования трещины;  $\beta$  – коэффициент, обеспечивающий неразрывность графика «момент-кривизна» в точке, соответствующей моменту трещинообразования сечения элемента (по рекомендациям [2]  $\beta = 0,8$ ).

Однако практическое применение формулы (3) с постоянным значением  $\beta$  для нахождения кривизн железобетонных элементов с трещинами в растянутой зоне во многих случаях не обеспечивает неразрывности графика «момент – кривизна». В работе [9] предложена методика для вычисления фактических значений коэффициента  $\beta$  применительно к балочным элементам прямоугольного поперечного сечения. Исходя из назначения этого параметра в формуле (3), для его нахождения в работе [9] было предложено следующее выражение

$$\beta = 1 - \frac{h_0/r_{cr} - \psi_b \varepsilon_{b,cr}}{\varepsilon_{s,cr}} \geq 0, \quad (4)$$

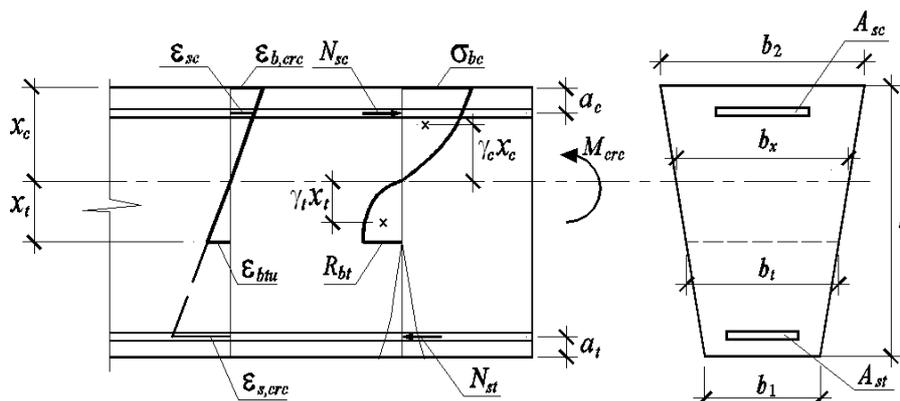


Рис. 1. Схема распределения деформаций, напряжений и усилий в сечении железобетонного элемента трапециевидной формы сразу после образования в нём первой трещины

Аналитическое отображение схемы распределения деформаций, напряжений и усилий в сечении железобетонного элемента рассматри-

где  $r_{cr}$  – радиус кривизны элемента в рассматриваемом сечении непосредственно перед образованием в нём трещины;  $\varepsilon_{b,cr}$  – относительная деформация сжатого бетона сразу после образования трещины.

Чтобы найти количественные значения коэффициента  $\beta$  для трапециевидного сечения, необходимо предварительно определить напряженно-деформированное состояние (НДС) изгибаемого железобетонного элемента указанного вида непосредственно перед образованием в нём первой трещины и сразу после её появления.

Методика определения НДС рассматриваемых балочных конструкций на этапе, непосредственно предшествующем началу их трещинообразования, была подробно представлена в работе [12]. В дополнение к искомой величине момента трещинообразования ( $M_{cr}$ ) необходимо также найти радиус кривизны сечения ( $r_{cr}$ ) непосредственно перед образованием в нём первой трещины с помощью следующей зависимости:

$$\frac{1}{r_{cr}} = \frac{\varepsilon_{bc} + \varepsilon_{st}}{h_0}, \quad (5)$$

где  $\varepsilon_{bc}$  и  $\varepsilon_{st}$  – относительные деформации фибрового волокна сжатого бетона и крайнего растянутого арматурного стержня в сечении изгибаемого элемента непосредственно перед образованием в нём первой трещины.

Для решения второй задачи рассмотрим тот же железобетонный элемент сразу после образования в нём первой трещины (рис. 1).

ваемой формы приводит к следующим группам уравнений.

Уравнения равновесия в традиционной форме их записи имеют вид:

$$0,5(b_2 + b_x)x_c \omega_c \sigma_{bc} + \sigma_{sc} A_{sc} - 0,5(b_t + b_x)x_t \omega_t R_{bt} - \sigma_{st} A_{st} = 0, \quad (6)$$

$$M_{cr} = 0,5(b_2 + b_x)x_c^2 \omega_c \gamma_c \sigma_{bc} + \sigma_{sc} A_{sc} (x_c - a_c) + 0,5(b_t + b_x)x_t^2 \omega_t \gamma_t R_{bt} + \sigma_{st} A_{st} (h - x_c - a_t), \quad (7)$$

где  $M_{crc}$  – 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 граней сечения до центров тяжести сжатой и растянутой арматуры;  $b_x$  – ширина сечения на уровне нейтральной оси;  $b_t$  – ширина сечения на границе распространения первой трещины в растянутой зоне бетона.

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

$$b_x = b_1 + (b_2 - b_1) \cdot \left(1 - \frac{x_c}{h}\right). \quad (8)$$

Ширина сечения на границе распространения первой трещины в растянутой зоне бетона ( $b_t$ ) находится по аналогичному выражению:

$$b_t = b_1 + (b_2 - b_1) \cdot \left(1 - \frac{x_c + x_t}{h}\right). \quad (9)$$

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 ( $\gamma_c, \gamma_t$ ) определяются с помощью следующих зависимостей, полученных применительно к трапециевидному поперечному сечению изгибаемого железобетонного элемента с верхней широкой гранью (см. рис. 1):

$$\omega_c = \frac{E_{b2}}{\sigma_{bc} C_{b2}} \left( \frac{b_2 h}{x_c} - \frac{b_2 - b_1}{2} \right) \left\{ \frac{D_{b2} \varepsilon_{b,crc}}{2} \left( \frac{b_2 h}{x_c} - \frac{b_2 - b_1}{3} \right) + \left(1 - \frac{D_{b2}}{C_{b2}}\right) \times \right. \\ \left. \times \left[ \frac{b_2 - b_1}{2} + \left(1 - \frac{\ln(1 + C_{b2} \varepsilon_{b,crc})}{C_{b2} \varepsilon_{b,crc}}\right) \times \left( \frac{b_2 h}{x_c} - (b_2 - b_1) \cdot \left(1 + \frac{1}{C_{b2} \varepsilon_{b,crc}}\right) \right) \right] \right\}, \quad (10)$$

$$\gamma_c = \left\{ \frac{D_{b2} \varepsilon_{b,crc}}{3} \left( \frac{b_2 h}{x_c} - \frac{b_2 - b_1}{4} \right) + \left(1 - \frac{D_{b2}}{C_{b2}}\right) \times \left[ \frac{b_2 h}{2x_c} - \frac{b_2 - b_1}{2} \left( \frac{1}{3} - \frac{1}{C_{b2} \varepsilon_{b,crc}} \right) - \frac{1}{C_{b2} \varepsilon_{b,crc}} \times \right. \right. \\ \left. \left. \times \left(1 - \frac{\ln(1 + C_{b2} \varepsilon_{b,crc})}{C_{b2} \varepsilon_{b,crc}}\right) \times \left( \frac{b_2 h}{x_c} - (b_2 - b_1) \times \left(1 + \frac{1}{C_{b2} \varepsilon_{b,crc}}\right) \right) \right] \right\} / \left\{ \frac{D_{b2} \varepsilon_{b,crc}}{2} \left( \frac{b_2 h}{x_c} - \frac{b_2 - b_1}{3} \right) + \right. \\ \left. + \left(1 - \frac{D_{b2}}{C_{b2}}\right) \times \left[ \frac{b_2 - b_1}{2} + \left(1 - \frac{\ln(1 + C_{b2} \varepsilon_{b,crc})}{C_{b2} \varepsilon_{b,crc}}\right) \times \left( \frac{b_2 h}{x_c} - (b_2 - b_1) \times \left(1 + \frac{1}{C_{b2} \varepsilon_{b,crc}}\right) \right) \right] \right\}, \quad (11)$$

$$\omega_t = \frac{E_{b2}}{R_{bt} C_{bt2}} \left( \frac{b_t h_{crc}}{x_t} + \frac{b_2 - b_t}{2} \right) \left\{ \frac{D_{bt2} \varepsilon_{btu}}{2} \left( \frac{b_t h_{crc}}{x_t} + \frac{b_2 - b_t}{3} \right) + \left(1 - \frac{D_{bt2}}{C_{bt2}}\right) \times \right. \\ \left. \times \left[ \left(1 - \frac{\ln(1 + C_{bt2} \varepsilon_{btu})}{C_{bt2} \varepsilon_{btu}}\right) \times \left( \frac{b_t h_{crc}}{x_t} + (b_2 - b_t) \cdot \left(1 + \frac{1}{C_{bt2} \varepsilon_{btu}}\right) \right) - \frac{b_2 - b_t}{2} \right] \right\}, \quad (12)$$

$$\gamma_t = \left\{ \frac{D_{bt2} \varepsilon_{btu}}{3} \left( \frac{b_t h_{crc}}{x_t} + \frac{b_2 - b_t}{4} \right) + \left(1 - \frac{D_{bt2}}{C_{bt2}}\right) \times \left[ \left( \frac{1}{2} - \frac{1}{C_{bt2} \varepsilon_{btu}} \right) \left(1 - \frac{\ln(1 + C_{bt2} \varepsilon_{btu})}{C_{bt2} \varepsilon_{btu}}\right) \times \right. \right. \\ \left. \left. \times \left( \frac{b_t h_{crc}}{x_t} + (b_2 - b_t) \cdot \left(1 + \frac{1}{C_{bt2} \varepsilon_{btu}}\right) \right) - \frac{b_2 - b_t}{3} \right] \right\} / \left\{ \frac{D_{bt2} \varepsilon_{btu}}{2} \left( \frac{b_t h_{crc}}{x_t} + \frac{b_2 - b_t}{3} \right) + \right. \\ \left. + \left(1 - \frac{D_{bt2}}{C_{bt2}}\right) \times \left[ \left(1 - \frac{\ln(1 + C_{bt2} \varepsilon_{btu})}{C_{bt2} \varepsilon_{btu}}\right) \times \left( \frac{b_t h_{crc}}{x_t} + (b_2 - b_t) \cdot \left(1 + \frac{1}{C_{bt2} \varepsilon_{btu}}\right) \right) \right] \right\}, \quad (13)$$

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

элемента сразу после образования в нем первой трещины;  $h_{crc}$  – высота нетреснувшей части сече-

ния элемента, которая определяется с помощью выражения:

$$h_{crc} = x_c + x_t. \quad (14)$$

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

$$\frac{\varepsilon_{btu}}{x_t} = \frac{\varepsilon_{b,crc}}{x_c}, \quad (15)$$

$$\frac{\varepsilon_{sc}}{\varepsilon_{bc}} = 1 - \frac{a_c}{x_c}, \quad (16)$$

$$\frac{\varepsilon_{s,crc}}{\varepsilon_{bu}} = \frac{h - a_t}{x_c} - 1, \quad (17)$$

где  $\varepsilon_{sc}$ ,  $\varepsilon_{s,crc}$  – относительные деформации сжатой и растянутой арматуры сразу после образования в нём первой трещины.

Величину фибрового напряжения бетона  $\sigma_{b,crc}$  получаем с использованием зависимости [11], описывающей диаграмму деформирования бетона при неоднородном сжатии:

$$\sigma_{bc} = \frac{E_{b2} \varepsilon_{b,crc} (1 + D_{b2} \varepsilon_{b,crc})}{1 + C_{b2} \varepsilon_{b,crc}}, \quad (18)$$

где  $E_{b2}$ ,  $D_{b2}$ ,  $C_{b2}$  – начальный модуль упругости и параметры нелинейности деформирования бетона при неоднородном сжатии [11].

Неизвестные напряжения в сжатой и растянутой арматуре  $\sigma_{sc}$ ,  $\sigma_{s,crc}$  находятся с помощью универсальной кусочной функции, представленной в работе [10] для описания диаграмм деформирования любых арматурных сталей. Здесь же обозначим искомые два выражения следующими функциональными зависимостями:

$$\sigma_{sc} = f_1(\varepsilon_{sc}), \quad (19)$$

$$\sigma_{st} = f_2(\varepsilon_{s,crc}). \quad (20)$$

Таким образом, получена замкнутая система разрешающих уравнений, в результате решения которой находятся все необходимые параметры НДС изгибаемого железобетонного элемента трапециевидного сечения сразу после образования в нём первой трещины, в том числе искомые величины относительных деформаций  $\varepsilon_{b,crc}$ ,  $\varepsilon_{s,crc}$ .

Теперь с помощью зависимости (4) может быть вычислено фактическое значение коэффициента  $\beta$ , обеспечивающего неразрывность графика “момент-кривизна” в точке, соответствующей моменту трещинообразования трапециевидного сечения изгибаемого железобетонного элемента. Далее этот коэффициент используется

для расчета кривизн от действующих в сечениях железобетонных элементов изгибающих моментов с помощью системы уравнений, практически совпадающей с рассмотренной выше второй задачей. В некоторых уравнениях производится только замена отдельных переменных: вместо  $M_{crc}$  подставляется задаваемая в расчете величина изгибающего момента  $M_i$ , а напряжения и относительные деформации в бетоне и арматуре рассчитываются в качестве текущих параметров ( $\sigma_{bc}$ ,  $\sigma_{st}$ ,  $\varepsilon_{bc}$ ,  $\varepsilon_{st}$ ). При этом расчетные значения кривизн должны определяться по зависимости (2) с учетом вычисления коэффициента  $\psi_s$  по формуле (3).

Для проведения качественной и количественной оценки результатов, получаемых в рамках предлагаемой методики расчета прогибов рассматриваемых элементов, был составлен соответствующий алгоритм и разработана программа «Balka\_1T» для персонального компьютера, с помощью которой проведены численные исследования.

В качестве исследуемого эталонного образца был принят изгибаемый железобетонный элемент с размерами поперечного сечения прямоугольной формы  $b \times h = 300 \times 450$  мм. Сравнимый железобетонный элемент трапециевидного сечения имеет такую же высоту ( $h = 450$  мм) и ширину верхней грани ( $b_2 = 300$  мм). При этом ширина нижней грани ( $b_1$ ) принята 150 мм. В таких образцах экономия бетона по сравнению с эталонным прямоугольным элементом составляет 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 32.

Выполненные расчеты подтвердили предположение о том, что коэффициент  $\beta$  не является константой не только для трапециевидных, но даже для прямоугольных сечений изгибаемых железобетонных элементов, и выявили влияние отдельных факторов на его величину:

- для всех исследуемых классов бетонов и процентов армирования выявлена однозначная тенденция по существенному уменьшению коэффициентов  $\beta$  для трапециевидных сечений по сравнению с прямоугольными;
- увеличение класса бетона от В15 до В70 при одном и том же армировании ( $\mu = 1$  %) при-

водит для прямоугольного сечения к росту коэффициента  $\beta$  от 0,583 до 0,824, а для трапециевидного сечения – от 0 до 0,447;

– повышение количества продольной арматуры в растянутой зоне элемента прямоугольного сечения с 0,5 % до 5 % для одного и того же класса бетона (В30) понижает значение коэффициента  $\beta$  от 0,897 до 0, а для трапециевидного сечения – от 0,677 до 0;

– для обеих рассматриваемых форм сечений изгибаемых железобетонных элементов коэффициенты  $\psi_s$ , учитывающие неравномерность распределения деформаций растянутой арматуры между трещинами, повышаются с увеличением действующих изгибающих моментов. Исключением являются переармированные сечения, для которых указанные коэффициенты равны 1,0 и, соответственно, остаются неизменными при деформировании вплоть до этапа разрушения;

– применительно к прямоугольным сечениям нижние пределы соответствующих диапазонов изменения коэффициентов  $\psi_s$  уменьшаются с ростом прочности бетонов при неизменном армировании. Так, для случая содержания растянутой арматуры 1 % значения коэффициентов  $\psi_s$  уменьшаются от 0,417 до 0,176. При этом верхние пределы рассматриваемых диапазонов очень близки между собой (0,978...0,984);

– аналогичная тенденция прослеживается для изгибаемых железобетонных элементов трапециевидного сечения. Только нижние пределы диапазонов изменения коэффициентов  $\psi_s$  уменьшаются с ростом прочности бетонов от 1,0 до 0,553, а их верхние пределы достигают своих максимально возможных значений (1,0).

В заключение уместно отметить, что поскольку предлагаемая методика построена без привлечения эмпирических зависимостей, то можно говорить о возможности её применения для определения коэффициентов  $\beta$  и  $\psi_s$  при любых формах сечений железобетонных элементов, для различных классов бетона и арматуры. В свою очередь это позволит расчетным путем найти уточненные параметры зависимости “момент – кривизна” и затем с помощью выражения (1) определить прогиб изгибаемого железобетонного элемента с учетом образования трещин в растянутой зоне бетона.

### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Бондаренко В.М., Колчунов В.И. Расчетные модели силового сопротивления железобетона. М.: Изд-во АСВ, 2004. 472 с.
2. Залесов А.С., Мухамедиев Т.А., Чистяков Е.А. Расчет трещиностойкости железобе-

тонных конструкций по новым нормативным документам // Бетон и железобетон. 2002. № 5. С. 15–19.

3. Карпенко Н.И. Общие модели механики железобетона. М.: Стройиздат, 1996. 416 с.

4. Кодыш Э.Н., Никитин И.К., Трекин Н.Н. Расчет железобетонных конструкций из тяжёлого бетона по прочности, трещиностойкости и по деформациям. М.: Изд-во АСВ, 2011. 352 с.

5. Колмогоров А.Г., Плевков В.С. Расчёт железобетонных конструкций по российским и зарубежным нормам. М.: Изд-во АСВ, 2011. 496 с.

6. Митасов В.М., Адищев В.В. Основные положения энергетической теории сопротивления железобетона // Известия вузов. Строительство. 2010. № 6. С. 3–7.

7. Мурашев В.И. Трещиностойкость, жёсткость и прочность железобетона.- М.: Машстройиздат, 1950. 268 с.

8. Немировский Я.М. Исследование напряженного деформированного состояния железобетонных элементов с учетом работы растянутого бетона над трещинами и пересмотр на этой основе теории расчета деформаций и раскрытия трещин // В кн.: Прочность и жесткость железобетонных конструкций / Под ред. А.А. Гвоздева. М.: Стройиздат, 1968. С. 152–173.

9. Никулин А.И. Совершенствование методики расчета кривизны для участков изгибаемых железобетонных элементов с трещинами в растянутой зоне // Известия Орловского государственного технического университета. Серия: Строительство и транспорт. 2005. № 1–2. С. 37–42.

10. Никулин А.И. Универсальная зависимость для аналитического описания диаграмм растяжения арматурной стали // Вестник Иркутского государственного технического университета. 2015. № 3. С. 157–162.

11. Никулин А.И. Энергетический подход к трансформированию эталонных диаграмм сжатия бетона // Бетон и железобетон. 2013. № 5. С. 12–14.

12. Никулин А.И., Обернихин Д.В., Рубанов В.Г., Свентиков А.А. Трещиностойкость изгибаемых железобетонных элементов трапециевидного сечения на основе применения нелинейной деформационной модели // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. 2016. № 2. С. 58–63.

13. 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.

14. Смоляго Г.А., Корсунов Н.И., Крючков А.А., Луценко А.Н. Деформативность стержневых железобетонных изгибаемых элементов // Промышленное и гражданское строительство.

2007. № 8. С. 38–39.

15. Тамразян А.Г. Особенности расчета изгибаемых железобетонных элементов прямоугольного сечения согласно EC2 // Бетон и железобетон. 2012. № 1. С. 19–23.

---

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

**THE DEFORMABILITY OF BENDING REINFORCED CONCRETE TRAPEZOIDAL ELEMENTS WITH CRACKS IN THE TENSION ZONE**

*Based on a modified version of the nonlinear deformation model of the power of reinforced concrete resistance a method for determining the deflection bent trapezoidal elements was developed. Analytical dependences, used to calculate the curvature of sections depending on acting on them bending moments, are shown. For the convenience of the practical application of the proposed method of calculation the algebraic expressions, ensuring the definition of integrated geometric characteristics diagrams of stresses in the compressed and stretched zones of the considered trapezoidal concrete, are given. Given that the special case of trapezoidal cross-section is a rectangle, the method of calculation may be used to determine the theoretical deflections of flexural reinforced concrete elements such as rectangular and trapezoidal form. For comparison the calculated values of the deflections of reinforced concrete elements an algorithm, implemented in the calculation program for PC, was compiled. With its help the numerical studies, some results of which are presented in the article, were performed.*

**Key words:** *deflection of the beam, sectional curvature, crack resistance, deformation calculation model, the state diagram of concrete and reinforcement, bent element, a trapezoidal cross-section, the dependence of the moment-curvature, numerical experiment.*

---

**Никulin Александр Иванович**, кандидат технических 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

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