

$$\begin{aligned}
M_x &= -D_x \left( \frac{\partial^2 w}{\partial x^2} + \nu_y \frac{\partial^2 w}{\partial y^2} \right), \\
M_y &= -D_y \left( \frac{\partial^2 w}{\partial y^2} + \nu_x \frac{\partial^2 w}{\partial x^2} \right), \\
M_k &= -2D_k \frac{\partial^2 w}{\partial x \partial y}.
\end{aligned} \tag{4}$$

При определении энергии деформации упругого основания на основании закона сохранения энергии ее заменяют работой реактивных давлений в контактной зоне конструкции [2]. Если пренебрегать реактивными касательными усилиями в контактной зоне, то энергия деформации упругого основания для плиты определяется [7]:

$$U = \frac{1}{2} \iint_S p(x, y) w(x, y) dx dy, \tag{5}$$

где  $p(x, y)$  – реактивные давления в контактной зоне конструкции.

Работа внешней нагрузки  $q(x, y)$  для прямоугольной плиты [7]

$$\Pi = -\iint_S q(x, y) w(x, y) dx dy. \tag{6}$$

Построен и реализован алгоритм упругого расчета, составлена программа с использованием компьютерного пакета МАТНЕМАТИСА, проведена апробация.

#### Список литературы

- 1 Александров, А. В. Основы теории упругости и пластичности: учеб. для строит. спец. вузов / А. В. Александров, В. Д. Потапов. – 2-е изд., испр. – М. : Высш. шк., 2002. – 400 с.
- 2 Лехницкий, С. Г. Анизотропные пластинки / С. Г. Лехницкий. – М. : Гос. изд-во технико-теоретической литературы, 1957. – 387 с.
- 3 Тимошенко, С. П. Пластины и оболочки / С. П. Тимошенко, С. Войновский-Кригер. – М. : Фитматгиз, 1963. – 536 с.
- 4 Горбунов-Посадов, М. И. Расчет конструкций на упругом основании / М. И. Горбунов-Посадов, Т. А. Маликова, В. И. Соломин. – 3-е изд., перераб. и доп. – М. : Стройиздат, 1984. – 680 с.
- 5 Кончковский, З. Плиты. Статические расчеты / З. Кончковский ; пер. с пол. М. В. Предтеченского ; под. ред. А. И. Цейтлина. – М. : Стройиздат, 1984. – 480 с.
- 6 Козунова, О. В. Совершенствование методики расчета гибких ортотропных плит на упругом основании. Ч. 1. Теория расчета / О. В. Козунова // Наука и техника. – 2022. – № 21(3). – С. 211–221.
- 7 Босаков, С. В. Метод Ритца в контактных задачах теории упругости : [монография] / С. В. Босаков. – Брест : БрГТУ, 2006. – 107 с.

УДК 624.012.45

## ОПРЕДЕЛЕНИЕ ШИРИНЫ РАСКРЫТИЯ ТРЕЩИН ИЗГИБАЕМЫХ ЖЕЛЕЗОБЕТОННЫХ ЭЛЕМЕНТОВ

*В. В. ТАЛЕЦКИЙ, А. В. ЧЕРНЯК*

*Белорусский государственный университет транспорта, г. Гомель*

Цель работы – сравнить результаты расчета на раскрытие трещин изгибаемого железобетонного элемента по СНБ 5.03.01–2002 [1] и СП 5.03.01–2020 [2].

К расчету принят первый пролет трехпролётной неразрезной балки, как наиболее нагруженный. Величина расчетного пролета 9 м, размеры поперечного сечения балки  $b \times h = 0,4 \times 0,9$  м. Балка выполнена из бетона класса С16/20, принятая арматура класса S400. По результатам расчета на прочность балка в середине пролета в растянутой зоне армирована 4 стержнями Ø36 мм в два ряда: расстояние от крайних растянутых волокон бетона до центра тяжести арматуры  $c = 98,5$  мм, рабочая высота сечения  $d = 0,8015$  м.

Отличительные особенности расчета ширины раскрытия трещин по СНБ 5.03.01–2002 [1] и СП 5.03.01–2020 [2] приведены в таблице 1.

Таблица 1 – Сравнение расчетов ширины раскрытия трещин

СНБ 5.03.01–2002	СП 5.03.01–2020
Определение геометрических характеристик сечения	
<p>Расчет сводится к определению <math>\psi_s</math> – коэффициент, учитывающий неравномерность распределения относительных деформаций арматуры на участке между трещинами</p> $\psi_s = 1 - \beta_1 \beta_2 \left( \frac{M_{cr}}{M_{Ed}} \right)^2 = 0,899;$ $\beta_1 = 1; \beta_2 = 0,5; M_{cr} = 131,29 \text{ кН}\cdot\text{м};$ $M_{Ed} = 292,572 \text{ кН}\cdot\text{м}$	<p>Расчет сводится к определению <math>h_{c,eff}</math> – эффективная высота растянутой зоны сечения</p> $h_{c,eff} = \min \begin{cases} 2,5(h - d) = 0,246 \text{ м}; \\ \frac{h - x}{3} = 0,152 \text{ м}; \\ \frac{h}{2} = 0,450 \text{ м} \end{cases}$
Определение эффективной площади растянутой зоны сечения	
$A_{c,eff} = 2(h - d)b = 2cb = 0,0788 \text{ м}^2$	$A_{c,eff} = h_{c,eff}b = 0,152 \cdot 0,4 = 0,0608 \text{ м}^2$
Стоит отметить, что по СП 5.03.01-2020 эффективная площадь растянутой зоны сечения получается меньше. Это приводит к увеличению эффективного процента армирования $\rho_{p,eff}$ , что влияет на величину максимального расстояния между трещинами	
Определение относительных деформаций	
$\varepsilon_s = \frac{\sigma_s}{E_s} = \frac{112,1}{2 \cdot 10^5} = 0,561 \cdot 10^{-3};$ $\sigma_s = 112,1 \text{ МПа};$ $\varepsilon_{cm} = \varepsilon_s \psi_s = 0,524 \cdot 10^{-3} \cdot 0,915 = 0,479 \cdot 10^{-3}$	$\varepsilon_{sm} - \varepsilon_{cm} = \frac{\sigma_s - k_t \frac{f_{ct,eff}}{\rho_{p,eff}} (1 + \alpha_{ee} \rho_{p,eff})}{E_s} = 0,462 \cdot 10^{-3};$ $\sigma_s = 112,1 \text{ МПа}; k_t = 0,4; f_{ct,eff} = 1,9 \text{ МПа}; \rho_{p,eff} = 0,067;$ $\alpha_{ee} = 7,36;$ $\varepsilon_{sm} - \varepsilon_{cm} = 0,462 \cdot 10^{-3} > 0,6 \cdot \frac{\sigma_s}{E_s} = 0,336 \cdot 10^{-3}$
Максимальное расстояние между трещинами	
$s_{rm} = 50 + 0,25 k_1 k_2 \frac{\varnothing}{\rho_{eff}} = 98,13 \text{ мм};$ $k_1 = 0,8; k_2 = 0,5; \rho_{eff} = 0,0748$	$s_{r,max} = k_{3cr} c + k_{1cr} k_{2cr} k_{4cr} \frac{\varnothing}{\rho_{p,eff}} = 426 \text{ мм};$ $k_{1cr} = 0,8; k_{2cr} = 0,5; k_{3cr} = 3,4; k_{4cr} = 0,425$
$k_1 = k_{1cr}$ – коэффициенты, учитывающие условия сцепления арматуры с бетоном; $k_2 = k_{2cr}$ – коэффициенты, учитывающие вид напряженно-деформированного состояния. Очевидно, что увеличение максимального расстояния между трещинами обусловлено коэффициентом $k_{3cr}$ . Увеличение максимального расстояния между трещинами неизбежно влечет за собой увеличение ширины раскрытия трещин.	
Ширина раскрытия трещин	
$w_k = \beta s_{rm} \varepsilon_{cm} = 1,7 \cdot 98,13 \cdot 0,479 \cdot 10^{-3} = 0,079 \text{ мм}$	$w_k = s_{r,max} (\varepsilon_{sm} - \varepsilon_{cm}) = 426 \cdot 0,000462 = 0,197 \text{ мм}$

В обоих случаях ширина раскрытия трещин не превышает предельно допустимое значение, равное  $w_{k,lim} = 0,4 \text{ мм}$  для железобетонных элементов класса экспозиции X0, XC1 при практически постоянном сочетании воздействий.

Увеличение ширины раскрытия трещин практически в 2 раза при расчете по новым нормам СП 5.03.01–2020 свидетельствует о том, что железобетонные элементы должны проектироваться с большим запасом поперечного сечения для обеспечения трещиностойкости. Это приводит к увеличению срока эксплуатации изгибаемых конструкций, то есть к повышению долговечности.

#### Список литературы

- 1 СНБ 5.03.01–2002. Бетонные и железобетонные конструкции. Нормы проектирования. – Взамен СНиП 2.03.01–84\*; введен 2003–07–01. – Минск: Минстройархитектуры Респ. Беларусь, 2003 – 139 с.
- 2 СП 5.03.01–2020. Конструкции бетонные и железобетонные. Нормы проектирования. – Взамен СНБ 5.03.01–2002; введ. 2020–09–06. – Минск: Минстройархитектуры Респ. Беларусь, 2020. – 237 с.