

НОВЫЕ ЗАВИСИМОСТИ ДЛЯ ОЦЕНКИ СОПРОТИВЛЕНИЯ РАСТЯНУТОГО БЕТОНА МЕЖДУ ТРЕЩИНАМИ СОСТАВНЫХ ВНЕЦЕНТРЕННО СЖАТЫХ ЖЕЛЕЗОБЕТОННЫХ КОНСТРУКЦИЙ

В статье выполнен анализ истинных причин расхождения опытных значений основного параметра сопротивления растянутого бетона между трещинами с теорией В. И. Мурашева и выведены новые зависимости для оценки сопротивления растянутого бетона между трещинами в составных внецентренно сжатых железобетонных конструкциях при учете эффекта нарушения сплошности.

Ключевые слова: сопротивление растянутого бетона, расстояния между трещинами, составные внецентренно сжатые железобетонные конструкции.

При внецентренном сжатии, как и при изгибе составного железобетонного элемента его растянутая зона разделяется трещинами на участки длиной l_{crc} , и в сечениях с трещинами, как только они появились, растягивающие усилия воспринимаются продольной арматурой. В середине по длине составного железобетонного стержня трещины располагаются на приблизительно равных расстояниях. В стадии II деформации сжатой и растянутой зон сечения и высота сжатой зоны по длине элемента переменны, а нейтральная ось волнообразная.

Для средних сечений, расположенными на участках между трещинами и испытывающих симметричные воздействия слева и справа, может быть принята гипотеза плоских сечений только в пределах одного из стержней, образующих составной стержень [1]. При этом в составном стержне в местах швов необходимо учитывать условные сосредоточенные сдвиги.

В теории железобетона, предложенной В. И. Мурашевым [2], а в дальнейшем и большинством исследователей, напряжения в сечении с трещиной, выраженные через деформации, принимают вид (рис.1).

$$\sigma_s = \varepsilon_s E_s = \frac{\varepsilon_{sm} E_s}{\psi_s} = \varepsilon_{sm} E_{sm}, \quad (1)$$

$$\sigma_b = \varepsilon_{bm} \frac{E'_b}{\psi_b} = \varepsilon_{bm} \frac{\nu E_b}{\psi_b} = \frac{x_m \varepsilon_{sm} \nu E_b}{(h_0 - x_m) \psi_b} = \frac{\psi_s x_m \nu \sigma_s}{\alpha \psi_b (h_0 - x_m)}, \quad (2)$$

$$\sigma'_s = \frac{x_m - a'}{h_0 - x_m} \psi_s \sigma_s, \quad (3)$$

где σ_s , σ'_s – напряжения в растянутой и сжатой арматуре, соответственно, а σ_b – напряжения в бетоне у сжатой грани; ψ_s –

коэффициент, учитывающий неравномерность распределения деформаций растянутой арматуры между смежными трещинами, равный отношению средних деформаций арматуры к деформациям в сечении с трещиной; ψ_b – коэффициент, учитывающий неравномерность распределения деформаций бетона сжатой зоны на участке между трещинами, равный отношению средних деформаций бетона к деформациям в сечении с трещиной.

Исследования, проведенные в последние годы показали, что значение этого коэффициента близко к 0,9 – 1. Если же рассматривать сопротивление некоторого представительного объема бетона, соизмеримого с расстоянием между трещинами, то анализ механизмов деформирования и разрушения позволяет принять значение этого коэффициента равным единице.

При любой симметричной форме сечения высота сжатой зоны над трещиной находится из условия равновесия (равенства растягивающих и сжимающих усилий):

$$\sigma_s A_s = \sigma'_s A'_s + \omega \sigma_b A_b, \quad (4)$$

где ω – коэффициент полноты объема криволинейной эпюры напряжений бетона сжатой зоны (для прямоугольного сечения ω изменяется от 0,5 при треугольной эпюре до 1 при прямоугольной); с развитием пластических деформаций бетона сжатой зоны величина ω стремится к единице.

После подстановки в уравнение (4) напряжений по формулам (2) и (3), сокращения на σ_s и алгебраических преобразований, получим уравнение:

$$A_s - \psi_s A'_s \frac{x_m - a'}{h_0 - x_m} - \omega \omega_b \frac{\psi_s v x_m}{\alpha \psi_b (h_0 - x_m)} = 0. \quad (5)$$

В стадии II изгибающий момент в сечении с трещиной может быть выражен, как момент внутренних усилий относительно центра тяжести сечения растянутой арматуры:

$$\begin{aligned} M &= \omega \sigma_b A_b z_b + \frac{x_m - a'}{x_m} \cdot \frac{\alpha}{v} \sigma_b A'_s (h_0 - a') = \\ &= \sigma_b \left[\omega A_b z_b + \frac{x_m - a'}{x_m} \cdot \frac{\alpha}{v} A'_s (h_0 - a') \right] = \sigma_b W_m, \end{aligned} \quad (6)$$

или как момент внутренних усилий относительно центра тяжести эпюры сжатия в бетоне:

$$\begin{aligned} M &= \sigma_s A_s z_b + \frac{x_m - a'}{h_0 - x_m} \cdot \psi_s \sigma_s A'_s z'_b = \\ &= \sigma_s \left[A_s z_b + \frac{x_m - a'}{h_0 - x_m} \cdot \psi_s A'_s z'_b \right] = \sigma_s W_s, \end{aligned} \quad (7)$$

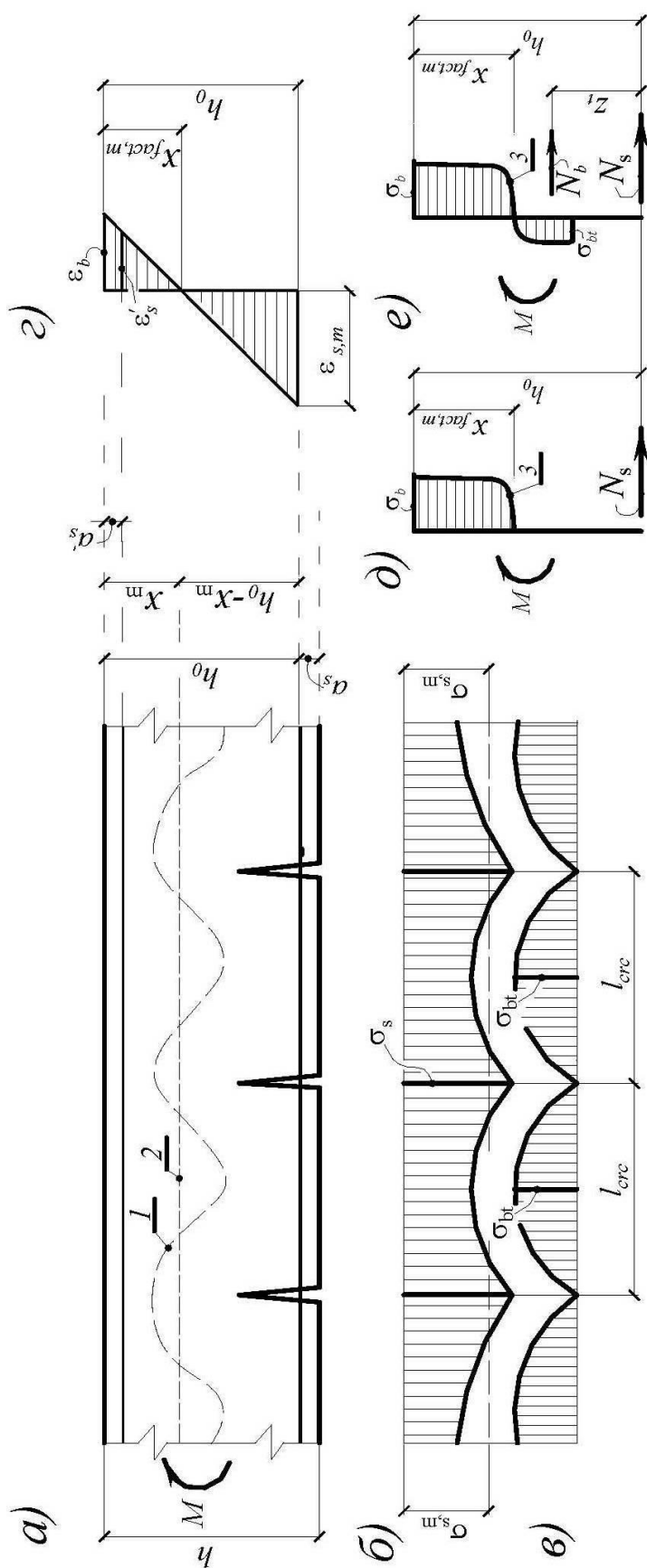


Рис. 1. Типичные картины деформирования бетона и арматуры в железобетонном элементе с трещинами по теории В. И. Мурашева и Я. М. Немировского: а – схема образования трещин; б, в – эпюры напряжений в растянутой арматуре и растянутом бетоне; г – гипотеза плоских сечений; д – внутренние усилия в сечении с трещиной по теории В. И. Мурашева; е – внутренние усилия в сечении с трещиной по теории Я. М. Немировского с учетом работы растянутого бетона над трещиной

где W_s , W_m – упруго-пластические моменты сопротивления железобетонного сечения в стадии II соответственно по растянутой и сжатой зонам.

Моменты сопротивления железобетонных сечений не являются только геометрическими понятиями (как в сопротивлении упругих материалов), они находятся в зависимости и от упруго-пластических характеристик составляющих материалов, но их размерность (M^3) и в этом случае чисто геометрическая.

Как следует из вышеприведенных формул, напряжения и внутренние усилия в железобетоне в значительной степени зависят от параметра Ψ_s .

Таким образом, железобетон относится к материалам в которых при сопротивлении силовым и деформационным воздействиям образуются макротрещины. В инженерных расчётах наиболее удачно наличие трещин и сопротивление растянутого бетона между ними учитывается с помощью параметра Ψ_s , введённого в теорию железобетона В. И. Мурашёвым [2]. Тем не менее в усреднённом напряжённо деформативном состоянии не учитываются эффекты, связанные с *нарушением сплошности материала*.

Анализ экспериментов позволил Я. М. Немировскому [3] выявить заметное расхождение внешних и внутренних усилий в поперечном сечении стержневого железобетонного элемента, рассчитываемого по теории В. И. Мурашёва. Причиной этого Я. М. Немировский считал *неучёт работы растянутого бетона над трещиной* (рис. 1, д).

Однако, как показали дальнейшие исследования, в ряде случаев, отмеченное расхождение усилий было настолько существенным, что уравновесить их учётом работы растянутого бетона над трещиной не представлялось возможным. Поэтому вполне естественным было обратить внимание на *деформационный эффект, который проявляется в железобетонном элементе при нарушении сплошности бетона* [4]. Даже качественный характер профиля трещины железобетонном элементе (с уменьшением раскрытия на уровне оси арматуры подтверждает наличие такого эффекта. Характер эпюр $\varepsilon_{bt}(z)$, полученных в опытах с разнообразными тензорезисторами [4], показывает, что в зонах, прилегающих к трещине, деформации удлинения бетона переходят к деформации укорочения, касательные напряжения сцепления тоже изменяют знак. Лавинообразное раскрытие трещин (которое после нарушения сплошности материала можно рассматривать, как концентрированное деформационное воздействие) по треугольному профилю, характерному для бетонного элемента, в железобетоне сдерживается арматурой.

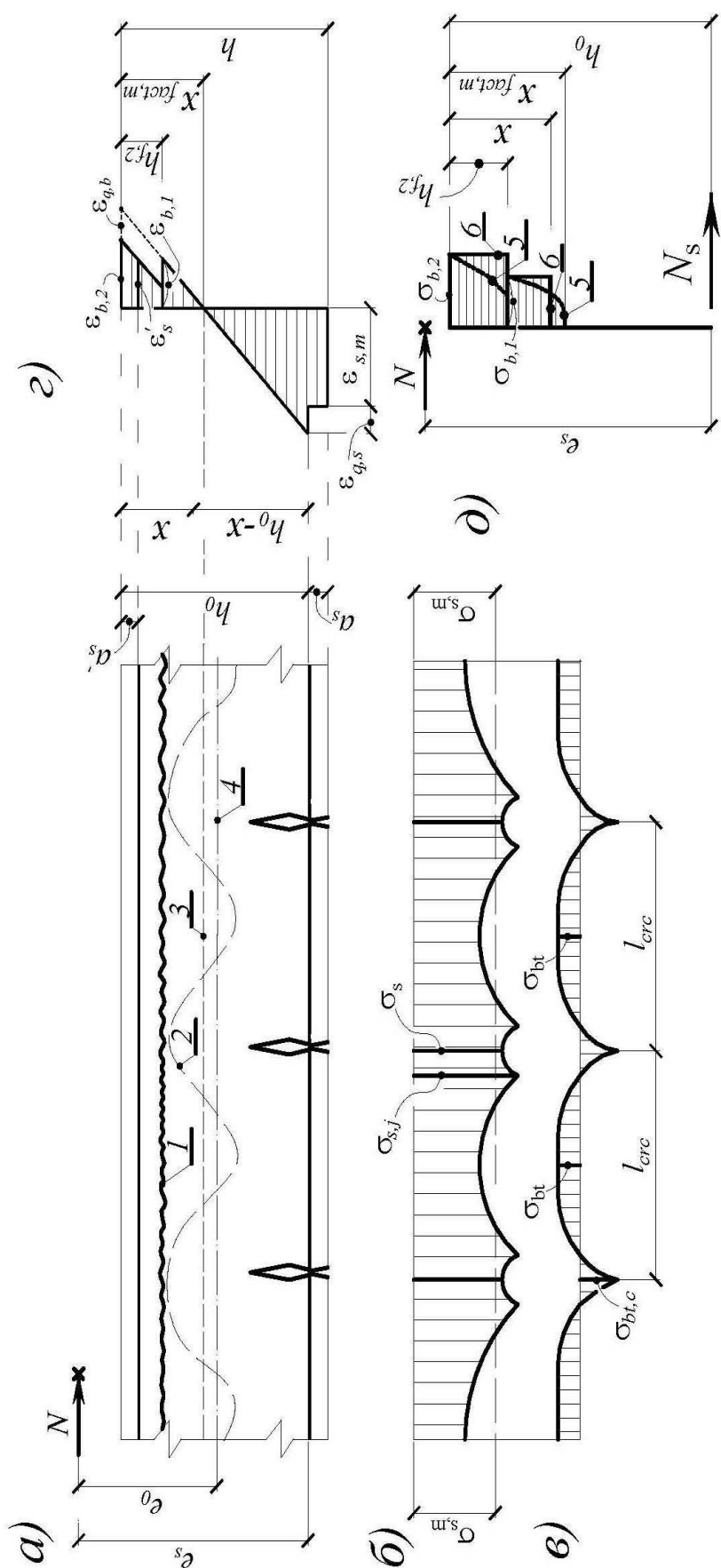


Рис. 2. Типичные картины деформирования бетона и арматуры в железобетонном внецентренно сжатом элементе с трещинами при учете эффекта, связанного с нарушением сплошности бетона и условного сосредоточенного сдвига между бетонами и между арматурой и бетоном: а – схема образования трещин; б, в – эпюры напряжений в растянутой арматуре и растянутом бетоне; г – гипотеза средних деформаций в поперечном сечении составного железобетонного элемента; д – внутренние усилия в сечении с трещиной; 1 – шов между бетонами; 2, 3 и 4 – физическая, средняя и геометрическая нейтральные оси, соответственно; 5 – действительные эпюры напряжений сжатия в первом и втором бетоне составного стержня; 6 – то же, принятые для расчета

В результате в системе, состоящей из бетонных блоков и арматуры, в окрестности трещин возникают реакции по контакту бетона и арматуры, вызванные указанным воздействием – *деформационный эффект*, названный при дальнейшем изложении *эффектом нарушения сплошности бетона*.

Анализ опытных данных позволяет выявить характерные опытные эпюры деформаций (напряжений) арматуры и бетона на участке между трещинами (рис. 4), включающие влияние этого эффекта.

Выявленный эффект безусловно оказывает влияние на основной параметр железобетона ψ_s . Сразу после появления трещин в результате эффекта нарушения сплошности бетона максимум растягивающих напряжений в арматуре несколько смещается от сечения i с трещиной к сечению j (см. рис. 4). В результате отношение средних напряжений в арматуре (σ_{sm}) к напряжениям арматуры в трещине (σ_s), т.е. параметр ψ_s становится близким к единице, что и подтверждается опытами Я. М. Немировского [3]. По теории В. И. Мурашёва [2] ψ_s после образования трещин минимальный, значение его достигает порядка 0,3. Здесь также сказывается и учет условного сосредоточенного сдвиг между арматурой и бетоном. Таким образом расхождение между значениями ψ_s , определенного по теории В. И. Мурашёва и опытными значениями, в ряде случаев, может достигать двух и более раз.

Теперь, располагая новыми эпюрами распределения деформаций и напряжений в поперечном сечении и в растянутой арматуре (рис. 4) и бетоне попытаемся внести исправления в расчетные формулы.

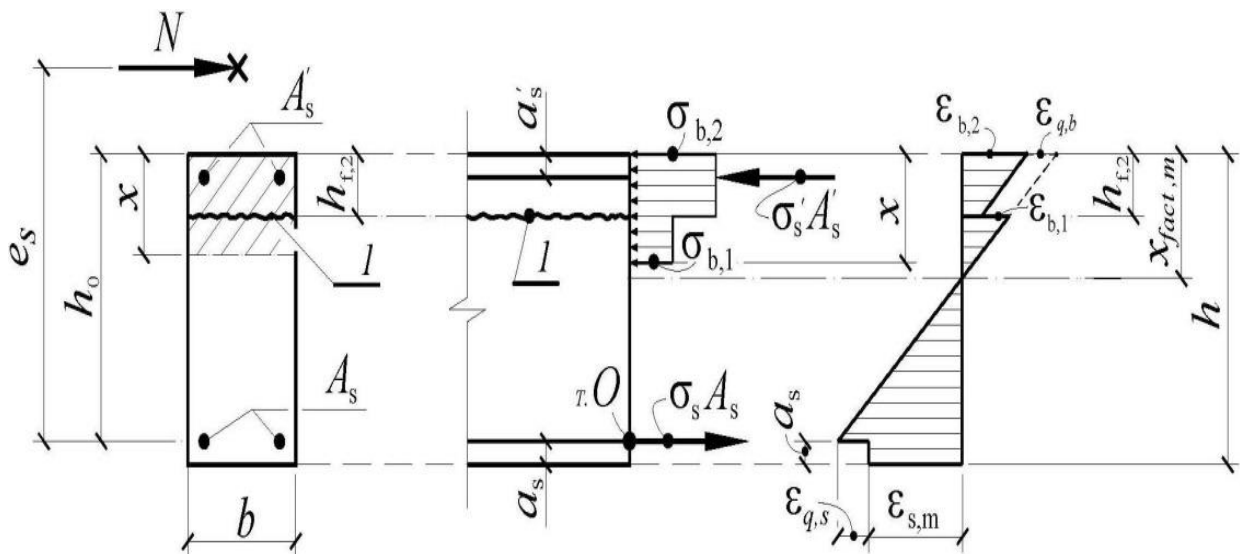


Рис. 3. К определению x , σ_s , σ_b в составных внецентренно сжатых железобетонных конструкциях

Неизвестные x ; σ_{b2} ; σ_{b1} ; σ_s ; σ'_s определяются из следующих уравнений.

Высота сжатой зоны бетона x определяется из уравнений равновесия суммы проекций всех сил на ось x ($\sum X = 0$):

$$\sigma_{b2} \cdot b \cdot h_{f,2} + \sigma_{b1} \cdot b \cdot (x - h_{f,2}) + \sigma'_s \cdot A'_s - \sigma_s A_s - N = 0;$$

$$x = \frac{N + \sigma_s \cdot A_s - \sigma'_s \cdot A'_s - b \cdot h_{f,2} \cdot (\sigma_{b2} - \sigma_{b1})}{\sigma_{b1} \cdot b}. \quad (8)$$

Напряжение в бетоне сжатой зоны определяется из моментного уравнения равновесия моментов всех сил, действующих в поперечном сечении (рис. 3) относительно точки О ($\sum M_o = 0$): при этом действительная эпюра напряжений в сжатом бетоне заменяется прямоугольной с учетом упрощений, принятых в нормах [5],

$$\sigma_{b,2} \cdot b \cdot h_{f,2} \cdot (h_0 - 0,5 \cdot h_{f,2}) + \sigma'_s \cdot A'_s \cdot (h_0 - a'_s) - N \cdot e +$$

$$+ \sigma_{b,1} \cdot b \cdot (x - h_{f,2}) \cdot [h_0 - h_{f,2} - 0,5 \cdot (x - h_{f,2})] = 0;$$

$$\sigma_{b,2} = \frac{N \cdot e - \sigma'_s \cdot A'_s \cdot (h_0 - a'_s) - \sigma_{b,1} \cdot b \cdot (x - h_{f,2}) [h_0 - h_{f,2} - 0,5 \cdot (x - h_{f,2})]}{b \cdot h_{f,2} \cdot (h_0 - 0,5 \cdot h_{f,2})}. \quad (9)$$

Из гипотезы плоских сечений, принятой для средних деформаций в пределах каждого стержня, входящего в составной стержень (рабочая арматура рассматривается как отдельный стержень, – рис 3) отыскиваются напряжения в старом бетоне $\sigma_{b,1}$, растянутой арматуре σ_s и сжатой арматуре σ'_s :

$$\frac{\varepsilon_{b,2} + \varepsilon_{q,b}}{\varepsilon_{b,1}} = \frac{x_{fact,m}}{x_{fact,m} - h_{f,2}}; \quad (10)$$

$$\frac{\varepsilon_{b,2} + \varepsilon_{q,b}}{\varepsilon_{s,m} + \varepsilon_{q,sm}} = \frac{x_{fact,m}}{h_0 - x_{fact,m}}; \quad (11)$$

$$\frac{\varepsilon_{b,2} + \varepsilon_{q,b}}{\varepsilon'_s + \varepsilon_{q,b}} = \frac{x_{fact,m}}{x_{fact,m} - a'_s}. \quad (12)$$

Здесь

$$\nu_{b,1} = \nu_{b,2} = 0,45; \quad \alpha_b = \frac{E_{b,1}}{E_{b,2}}; \quad \alpha_{s2} = \frac{E_s}{E_{b,2}}.$$

После алгебраических преобразований, получим:

$$\sigma_s = \frac{(\sigma_{b,2} + \varepsilon_{q,b} \cdot E_{b,2} \cdot \nu_{b,2}) \cdot (h_0 - x_{fact,m}) \cdot \alpha_{s2} - \varepsilon_{q,s} \cdot \psi_q \cdot E_s \cdot \nu_{b,2} \cdot x_{fact,m}}{\nu_{b,2} \cdot x_{fact,m} \cdot \psi_s} + \sigma_0 \psi_s \leq R_s; \quad (13)$$

$$\sigma_{b,1} = (\sigma_{b,2} + \varepsilon_{q,b} \cdot E_{b,2} \cdot \nu_{b,2}) \cdot \alpha_b \cdot \frac{\nu_{b,1}}{\nu_{b,2}} \cdot \left(\frac{x_{fact,m} - h_{f,2}}{x_{fact,m}} \right);$$

(14)

$$\sigma'_s = \frac{(\sigma_{b,2} + \varepsilon_{q,b} \cdot E_{b,2} \cdot \nu_{b,2}) \cdot \alpha'_{s,2} \cdot (x_{fact,m} - a'_s) - \varepsilon_{q,b} \cdot E'_s \cdot x_{fact,m} \cdot \nu_{b,2}}{\nu_{b,2} \cdot x_{fact,m}} \leq R_{sc}. \quad (15)$$

Подставляя полученные выражения (13) – (15) в выражение (9) получим:

$$\sigma_{b,2} = \frac{k_4 \cdot x_{fact} + k_5 \cdot (k_6 \cdot x_{fact} + k_7) - k_8 \cdot (x_{fact} - h_{f,2})(x - h_{f,2})(h_0 - 0,5h_{f,2} - 0,5x)}{[k_1 \cdot x_{fact} + k_2 \cdot (x_{fact} - a'_s) + k_3 \cdot (x_{fact} - h_{f,2})(x - h_{f,2})(h_0 - 0,5h_{f,2} - 0,5x)]}. \quad (16)$$

Здесь,

$$\begin{aligned} k_1 &= \nu_{b,2} \cdot b \cdot h_{f,2} \cdot (h_0 - 0,5 \cdot h_{f,2}); & k_2 &= A'_s \alpha'_{s,2} (h_0 - a'_s); \\ k_3 &= \alpha_b \cdot \nu_{b,1} \cdot b; & k_4 &= N \cdot e \cdot \nu_{b,2}; & k_5 &= A'_s \cdot \varepsilon_{q,b} \cdot \nu_{b,2} \cdot (h_0 - a'_s); \\ k_6 &= E'_s - \alpha'_{s,2} \cdot E_{b,2}; & k_7 &= \alpha'_{s,2} a'_s \cdot E_{b,2}; & k_8 &= \alpha_b \cdot \nu_{b,1} \cdot b \cdot \varepsilon_{q,b} \cdot E_{b,2} \cdot \nu_{b,2}. \end{aligned}$$

Алгоритм расчета сводится к следующему: на первом шаге принимаем $x_{fact,m} = 0,5h_0$ и по формуле (16) находим $\sigma_{b,2}$; затем по формуле (13) определяется σ_s с учетом соответствующего ограничения; после этого по формуле (14) находим $\sigma_{b,1}$, а по формуле (15), – σ'_s с учетом соответствующего ограничения; в результате располагаем всеми параметрами для определения высоты сжатой зоны x по формуле (8); в итоге предоставляется возможным сравнить заданное и вычисленное значение x и с учетом этих сравнений перейти к следующему шагу итераций; таким образом, итерационный процесс продолжается до требуемой точности вычислений.

Из рис. 4 следует, что

$$\psi_s = \frac{1}{\sigma_s l_{crc}} \cdot [(\sigma_{s,j}(1 - \omega_1) + \omega_1(\sigma_s - \sigma_{s2})) \cdot (l_{crc} - 2t_*) + (\sigma_{s,j} + \sigma_s) t_*]. \quad (17)$$

Здесь $\sigma_{s,j}$ – определяются из зависимостей механики разрушения, полученных применительно к железобетону [4]; t_* – в первом приближении (принимая во внимание принцип Сен-Венана) принимаются равными $1,5d$, где d – диаметр рабочей растянутой арматуры. При этом, если $d < 10\text{мм}$, то для тяжелого бетона из щебня фракции 5–10мм параметр t_* принимается равным $1,5 \cdot 10 = 15\text{мм}$. Для бетона из щебня фракции 10–20мм при $d < 20\text{мм}$, параметр t_* принимается равным $1,5 \cdot 20 = 30\text{мм}$.

Расстояние l_1 находится из условия, в соответствии с которым, изменение напряжений в растянутой арматуре между точками 2–4 наиболее удачно описывается гиперболической зависимостью:

$$y = A \cdot e^{-\lambda \cdot x} - B, \quad (18)$$

существенно уточнена формула для определения основного параметра Ψ_s , учитывающего сопротивление бетона между трещинами.

Список использованных источников

1. Колчунов В. И. Об использовании гипотезы плоских сечений в железобетоне / В. И. Колчунов, И. А. Яковенко // Строительство и реконструкция. – Орел: ОрелГТУ, 2011. – №4. – С. 21–27.
2. Мурашев В. И. Трещиностойкость, жесткость и прочность железобетона / Василий Иванович Мурашев. – М.: Машстройиздат, 1950. – 286 с.
3. Немировский Я. М., Кочетков О. И. Влияние работы растянутой и сжатой зон бетона на деформации обычных изгибаемых железобетонных элементов после возникновения в них трещин // Особенности деформации бетона и железобетона и использование ЭВМ для оценки их влияния на поведение конструкций / Под ред. А. А. Гвоздева, С. М. Крылова. – М.: Стройиздат, 1969. – С. 106–156.
4. Бондаренко В. М. Расчетные модели силового сопротивления железобетона: монография / В. М. Бондаренко, В. И. Колчунов. – М.: АСВ, 2004. – 472 с.
5. Бетонные и железобетонные конструкции: СНиП 2.03.01–84*. – [Введены в действие с 1986-01-01]. – М.: ЦТИП Госстроя СССР, 1989. – 88 с. – (Строительные нормы и правила).

Анотація

У статті виконаний аналіз істинних причин розходження дослідних даних основного параметру опору розтягнутого бетону між тріщинами з теорією В. І. Мурашова та виведені нові залежності для оцінки опору розтягнутого бетону між тріщинами у складених позацентрово стиснутих залізобетонних конструкціях при врахуванні ефекту порушення суцільності.

Ключові слова: сопроптевлення розтягнутого бетону, відстані між тріщинами, складені внецентренно стислі залізобетонні конструкції.

Annotation

In the article the executed analysis of veritable reasons of divergence of experimental information of basic a parameter resistance of the stretched concrete between cracks with the theory of V. I. Murashova and new dependences are shown out for the estimation of resistance of the stretched concrete between cracks in made off-center the compressed reinforce-concrete constructions at the account of effect of violation of wholeness.

Key words: soprotevleniya of the stretched concrete, distances between cracks, component eccentric the compressed reinforce-concrete constructions.