

ВЛ.И. КОЛЧУНОВ^{1,2}, С.С. ФЕДОРОВ¹¹Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет,
Москва, Россия²НИИСФ РААСН, Москва, Россия

ОПРЕДЕЛЕНИЕ УРОВНЕВОГО РАССТОЯНИЯ МЕЖДУ ТРЕЩИНАМИ В ЖЕЛЕЗОБЕТОННЫХ КОНСТРУКЦИЯХ

Аннотация. Приведена расчетная модель для определения уровневого расстояния между трещинами в железобетонных конструкциях. Модель построена на обобщении известной в теории трещин в железобетоне гипотезы Томаса Ф.Г. и ее обобщении Вл.И. Колчуновым применительно к усовершенствованной теории деформирования железобетона с трещинами. Суть предложенного обобщения состоит в том, что напряженное состояние в бетоне и арматуре в окрестности трещины и на участке между трещинами определяется с учетом деформационного эффекта, заключающегося в том, что при хрупком разрушении растянутой бетонной матрицы деформация берегов трещины сдерживаются реакцией арматурного стержня, а профиль трещины нелинейно искривляется. В результате относительные взаимные смещения бетона и арматуры и уровневое расстояние между трещинами определяются интегрированием эпюр распределения деформаций бетона и арматуры на различных участках в блоке двумя смежными трещинами. С использованием полученных аналитических зависимостей для расчета уровневого расстояния между трещинами проведены численные исследования по определению расстояния между трещинами и ширины раскрытия трещин. Полученные результаты сопоставлены с имеющимися результатами испытаний железобетонных конструкций, а также с результатами расчета по методикам российских и зарубежных норм. Показано, что расчетные зависимости предлагаемой модели полностью отражают полученную экспериментально качественную картину многоуровневого процесса образования трещин, когда при дискретном уменьшении расстояния между трещинами обратно пропорциональном изменению изгибающих моментов происходит увеличение ширины раскрытия трещин.

Ключевые слова: железобетон, уровневое расстояние между трещинами, деформации, раскрытие трещин, депланация, деформационный эффект.

VL.I. KOLCHUNOV^{1,2}, S.S. FEDOROV¹¹National Research Moscow State University of Civil Engineering, Moscow, Russia²NIISF RAASN, Moscow, Russia

DEFINITION LEVEL DISTANCE BETWEEN CRACKS IN REINFORCED CONCRETE STRUCTURES

Abstract. A calculation model for determining level distance between cracks in reinforced concrete structures. The model is based on the generalization of the known in the F.G. Thomas hypothesis known in the theory of cracks in reinforced concrete and its generalization by V.I. Kolchunov in relation to the improved theory of deformation of reinforced concrete with cracks. The essence of the proposed generalization is that the stress state in concrete and reinforcement in the vicinity of the crack and in the area between the cracks is determined taking into account the deformation effect, which consists in the fact that at brittle fracture of the stretched concrete matrix the deformation of the crack banks is restrained by the reaction of the reinforcement bar, and the crack profile is nonlinearly curved. As a result, the relative mutual displacements of concrete and reinforcement and the level distance between cracks are determined by integrating the distribution diagrams of concrete and reinforcement strains at different locations in the block by two adjacent cracks.

Using the obtained analytical relationships for the calculation of the level distance between cracks, numerical investigations are carried out to determine the distance between cracks and the crack opening width. The obtained results are compared with the available test results of reinforced concrete structures, as well as with the results of calculation according to the methods of Russian and foreign standards. It is shown that the calculation dependences of the proposed model fully reflect the qualitative picture of the multilevel crack formation process obtained experimentally, when at discrete decrease of the crack spacing inversely proportional to the change of bending moments there is an increase in the crack opening width.

Keywords: reinforced concrete, level distance between cracks, deformations, crack opening, deplanation, deformation effect

1. Введение

Несмотря на то, что параметр предельных состояний второй группы – ширина раскрытия трещин является одним из важнейших при оценке эксплуатационной пригодности и надежности железобетонных конструкций качество расчетного прогноза этого параметра в российских и зарубежных нормативных документах остается недостаточно строгим. На количественную величину этого параметра решающее значение оказывает используемый в расчетных моделях в нормах многих стран весьма условный расчетный параметр - среднее расстояние между трещинами [1-4] или, как он назван, в российских нормах - базовое расстояние между трещинами [5,6]. В этих нормативных документах принято, что процессом образования и раскрытия трещин можно управлять, используя функцию среднего напряжения сцепления арматуры с бетоном на участке между трещинами и ограничится только одним - двумя уровнями трещинообразования при фиксированном расстоянии между трещинами. Расчетные положения нормативных документов, как и модели, приведенные во многих публикациях, основываются на том, что в процессе трещинообразования изменения расстояния между трещинами в пределах эксплуатационных нагрузок затухает достаточно быстро и этот расчетный параметр можно принять постоянным. Анализируя публикации по этой тематике, не сложно видеть, что при моделировании раскрытия трещин значение расстояния между трещинами принимается как постоянная величина, называя его «базовым» [6] или средним [3,4,7,8]. При этом полагается, что процессом образования трещин в железобетонных элементах можно относительно легко управлять, используя функцию среднего напряжения сцепления арматуры с бетоном. Реальный же физический процесс образования и раскрытия трещин в железобетонных элементах, согласно экспериментальным результатам последнего десятилетия, с использованием более совершенной приборной базы, см. например [9,10] показал, что ширина раскрытия трещин возрастает с увеличением уровня нагружения несмотря на то, что с увеличением напряжений в арматуре происходит одновременное уменьшение расстояния между трещинами. При учете многоуровневого процесса образования трещин можно было ожидать уменьшение ширины раскрытия трещин, так как, несмотря на увеличение уровня нагружения и роста напряжений в арматуре, этот процесс носит противоположный характер. Однако в опытах этого не происходит. Полученные в опытах к настоящему времени данные для конструкций из обычного бетона [10,11], высокопрочного бетона [12,13] и легкого бетона [14] результаты ставят весьма конкретное требование к предлагаемым расчетным модели: расчет хотя бы качественно должен подтвердить эту закономерность, замеченную в опытах.

Можно предположить, что использование нелинейных функций изменения напряжений сцепления арматуры с бетоном на участках между трещинами, учета результатов экспериментальных исследований исследования автора и его учеников [15,16,23-25] и сформулированных ими фундаментальных принципов силового сопротивления железобетона [18-21] при различных напряженных состояниях, позволит более строго определить важнейшие параметры теории железобетона – расстояния между трещинами, раскрытия

трещин и другие параметры предельных состояний железобетонных конструкций адекватно отражающие суть физических явлений при силовом сопротивлении железобетона.

В этой статье предлагается методика для расчета уровневых расстояния между трещинами в железобетонных конструкциях при различных видах напряженного состояния основанная на обобщении известной в теории трещин в железобетоне гипотезы Томаса Ф.Г.-Вл.И. Колчунова [21,29] и использовании отмеченных новых принципов теории железобетона.

2. Модели и Методы

В основу расчетной модели при решении рассматриваемой задачи положены следующие исходные предпосылки:

- раскрытие трещины в железобетонном элементе определяется как величина относительных смещений бетона и арматуры на длине зоны анкеровки определяемой из условия равновесия блока, расположенного между сечением с трещиной и сечением, в котором эти смещения равны нулю, с учетом нагельного эффекта в арматуре и сдвига вдоль трещины;

- напряженное состояние в бетоне и арматуре в окрестности трещины определяется с учетом деформационного эффекта [19-21] состоящего в том, что при хрупком разрушении растянутой бетонной матрицы берега трещины, сдерживаемые реакцией арматурного стержня депланируют, а профиль трещины нелинейно искривляется. Процесс деформирования растянутой зоны окрестности трещины и изменения профиля ее берегов моделируется с помощью специального двухконсольного элемента [27];

- образование трещин на соответствующем уровне нагружения конструкции происходит после достижения крайними растянутыми волокнами бетона предельных деформаций. При этом расстояния между трещинами последующего уровня меньше либо равно половине расстояния между трещинами предыдущего уровня;

- эпюры распределения деформаций в продольной и поперечной арматуре и бетоне на участке между смежными трещинами принимаются в соответствии со схемой показанной на рисунке 1, а связь между касательными напряжениями сцепления τ и относительными взаимными смещениями бетона и арматуры $\varepsilon_g(x)$ в межсредовой зоне их контакта принимается в соответствии со схемой рисунка 2).

В соответствии с принятыми гипотезами для взаимных относительных смещений арматуры и бетона можно записать:

$$\varepsilon_g(x) = \varepsilon_s(x) - \varepsilon_{bt}(x), \quad (1)$$

где $\varepsilon_s(x)$ – относительные деформации арматуры (см. рисунок 2); $\varepsilon_{bt}(x)$ – относительные деформации бетона в сечении x .

Деформации арматуры продольной арматуры в произвольном сечении x растянутой зоны на участке между трещинами, с учетом гипотезы о сдерживаемой реакции арматурного стержня у берегов трещины можно определить из условия сцепления (рисунки 2 и 3):

$$\varepsilon_s(x) = \varepsilon_s + \frac{\Delta T}{E_s A_s} - \frac{S_s}{A_s E_s} \int_0^x \tau(x) dx, \quad (2)$$

где S_s – периметр поперечного сечения арматуры; ε_s – деформации арматуры в трещине; ΔT – результирующая условных касательных напряжений в местной зоне (локальной зоне), прилегающей берега к трещине; $\tau(x)$ – условные касательные напряжения в межсредовой зоне контакта и G – условный модуль деформации связи между арматурой и бетоном, который принимается равным $G = 0,25E_b$.

а)

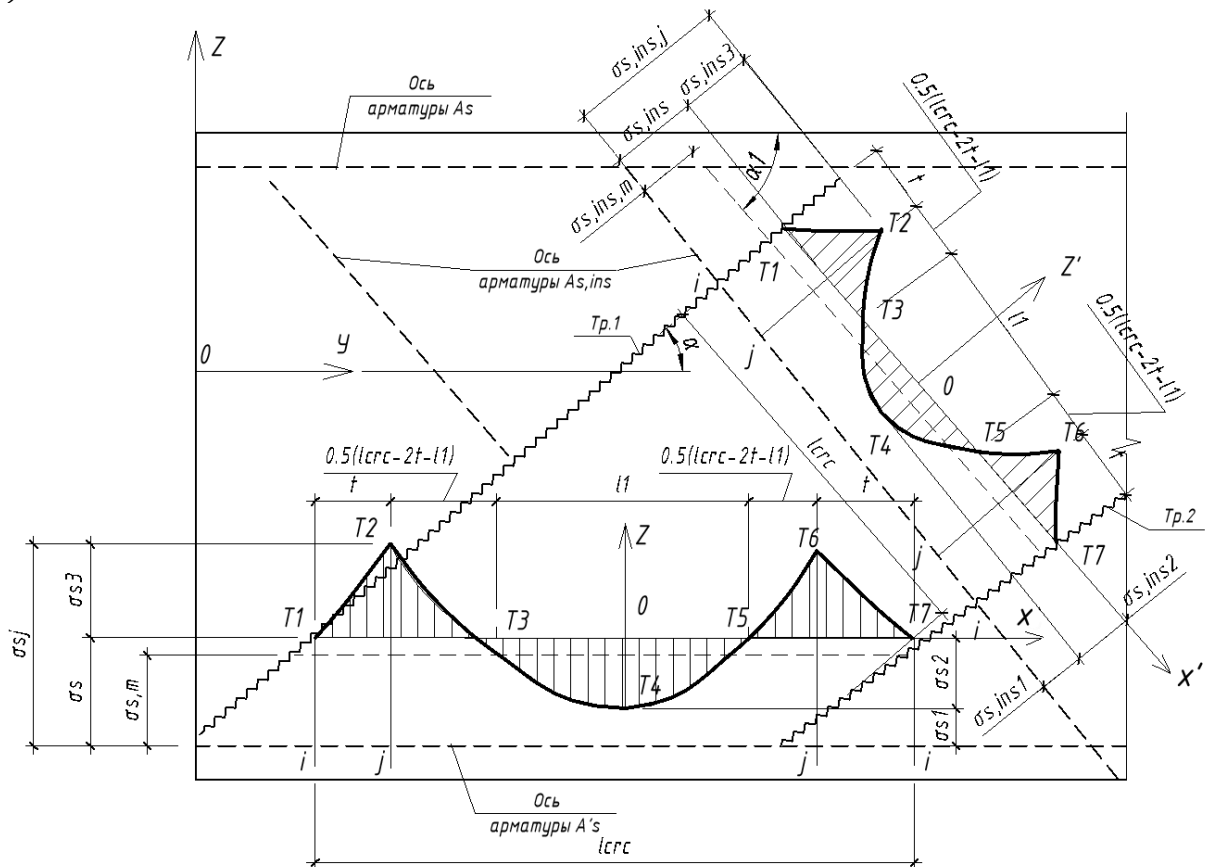


Рисунок 1 – Характерные опытные эпюры напряжений в продольных и наклонных арматурных стержнях и бетоне на участках между смежными трещинами

Полученный в опытах многих авторов экспериментальный аналитический [12,13,15,16,23,24] и численный [25,28,33] характер эпюры $\varepsilon_{bt}(x)$, показывает, что, в отличие от традиционно используемой эпюры деформационной теории В.И. Мурашева [34], при определенном уровне нагружения конструкции деформации растянутого бетона на участках примыкающих к трещине начинают уменьшаться и даже меняют знак. Деформации же в средней зоне между трещинами продолжают увеличиваться до тех пор, пока не достигнут предельных значений и в этом месте не появится новая трещина. В связи с таким характером распределения деформаций бетона на участке между двумя смежными трещинами деформации бетона $\varepsilon_{bt}(x)$ в изгибаемом железобетонном элементе можно определить из условия равновесия блока, расположенного между сечением с трещиной и сечением, проходящим на расстоянии $t + x$ от трещины (рисунки 2 и 3):

$$\varepsilon_{bt}(x) = (1 - K) \cdot B_3 \cdot f_* \cdot (1 - e^{-B \cdot x}) - \frac{\sigma_{crc, bt, c}}{\nu_c \cdot E_c}. \quad (3)$$

Здесь f_* - функция для учета полноты эпюры напряжений в поперечном сечении x из диаграммы деформирования; ν_c - коэффициент упругости бетона; $\sigma_{crc, bt, c}$ - сжимающее напряжение в бетоне вблизи арматуры, примыкающей к трещине; $B_3 = \varepsilon_s + \frac{\Delta T}{E_s \cdot A_s} - \frac{\sigma_{ct, c}}{\nu_c \cdot E_c} - B_2$; B_2, B - параметры, учитывающие влияние нарушения сплошности бетона, геометрические характеристики сечения, а также сцепление арматуры с бетоном.

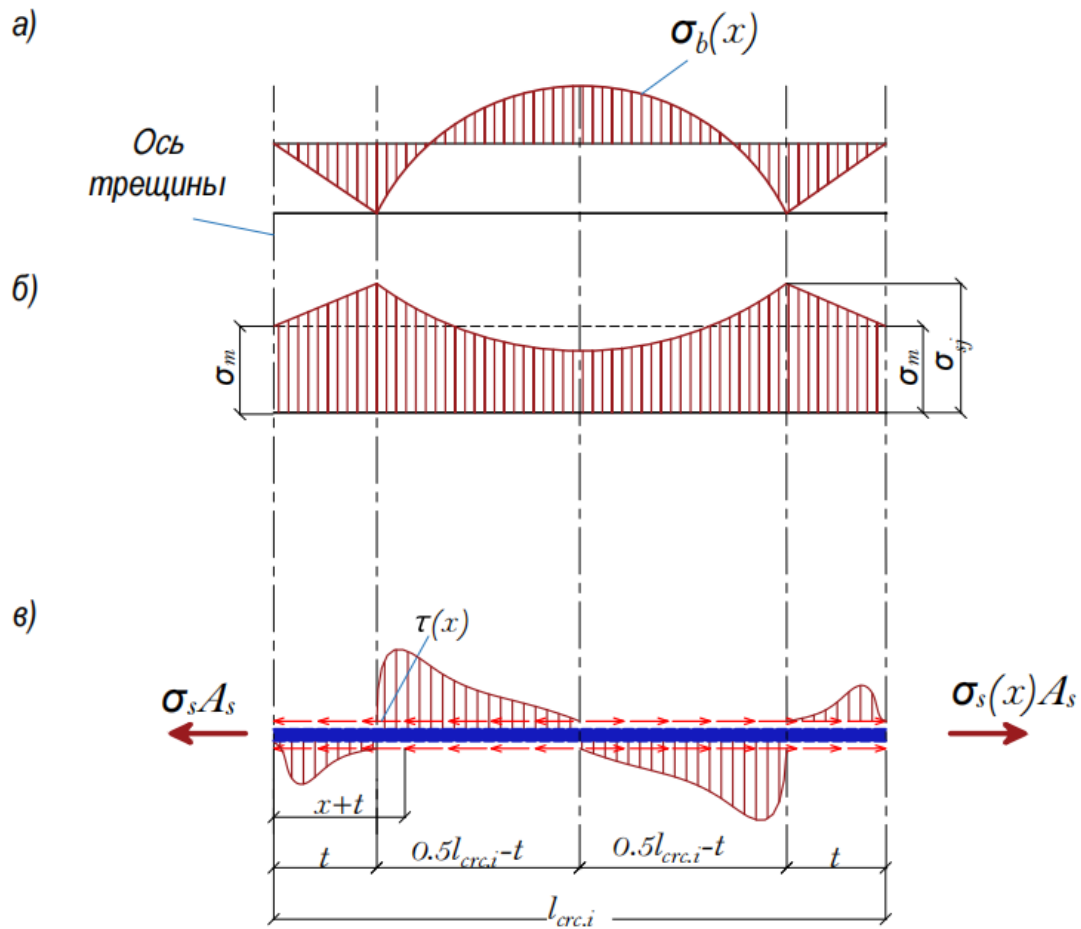


Рисунок 2 – К определению относительных деформаций (напряжений) у берегов трещины а): деформации в бетоне между трещинами, б) тоже арматуры; в) эпюры распределения касательных деформаций (напряжений) и скачок на участках между смежными трещинами

Подставляя значения деформаций бетона (3) и деформаций арматуры (2) в уравнение (1), после соответствующих преобразований, получим:

$$\frac{d\varepsilon_g(x)}{dx} + B \cdot \varepsilon_g(x) = 0, \quad (4)$$

Решение дифференциального уравнения (4) выглядит следующим образом:

$$\varepsilon_g(x) = C \cdot e^{-B \cdot x}. \quad (5)$$

Константа интегрирования C в (5) определяется из граничного условия по формуле (6):

$$C = \frac{B_{3,Q}}{B} + \frac{1}{B \cdot (1-K)} \cdot \left(-\frac{\sigma_{ct,c}}{\nu_c \cdot E_c} \right). \quad (6)$$

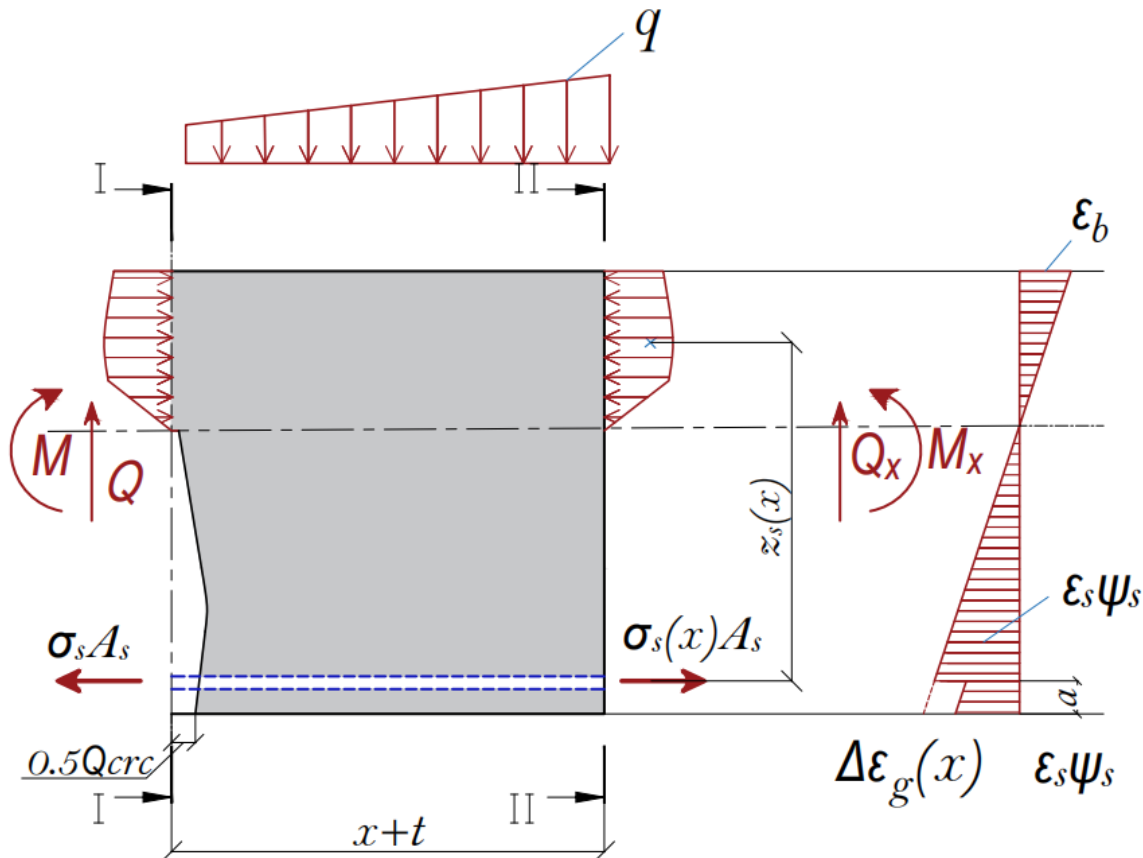


Рисунок 3 – Схема распределения усилий и деформаций в сечении I-I с трещиной и в сечении II-II на расстоянии x между трещин в настоящей модели обобщенной линейной гипотезы в железобетоне из дополнительные скачки в арматуры и депланаций

В формуле (6) параметры, учитывающие граничные растягивающие деформации бетона, влияние нарушения сплошности бетона, геометрические характеристики сечения, а также сцепление арматуры с бетоном (B_3) определяются следующим образом:

$$B = \frac{S_s \cdot G}{K \cdot A_s \cdot E_s}; \quad (7)$$

$$B_{2,Q} = \frac{\delta \cdot \frac{1}{G \cdot \nu_c \cdot A_c} \cdot Q}{t_* \cdot B}; \quad (8)$$

$$B_{3,Q} = \varepsilon_s + \frac{\Delta T}{E_s \cdot A_s} - \frac{\sigma_{ct,c}}{\nu_c \cdot E_c} - B_{2,Q}; \quad (9)$$

В этих формулах (5) и (6) $\omega_{bt}(x)$ и $\nu_{bt}(x)$ – соответственно, коэффициент полноты эпюры деформаций (рис. 3) и коэффициент упругости растянутого бетона в сечении x , на участке между трещинами, произведение $\omega_{bt}(x) \cdot \nu_{bt}(x)$ близко к 0.5; $A_{bt}(x)$ – растянутая площадь сечения бетона в сечении x ; Q – действующая поперечная сила в поперечной сечении; δ – коэффициент, учитывающий расположение растянутой арматуры по высоте сечения, $\delta = \frac{1-\xi}{\gamma-\xi}$, и $\xi = \frac{x_k}{h_0}$ – относительная высота сжатого бетона в поперечном сечении x ; $\gamma = \frac{h_0}{h}$ – отношение эффективной высоты сечения к полной высоте; t – расстояние вдоль оси балки от грани трещины до точки, в которой касательные напряжения в бетоне принимают нулевые

значения, как показано на рис. 2.

В этой формуле (7) обобщенный параметр K :

$$\frac{1}{K} = 1 + \frac{E_s \cdot A_s}{D_{1j}} \quad (10)$$

Здесь K - обобщенный параметр расчетного элемента; D_{1j} - параметры выражающиеся в виде функций от деформаций и усилий в сечениях, которые определяют некоторый «представительный объем» (см. рис. 1 - 3), с характеристиками бетона, армирования, сцепления, геометрическими и физико-механическими и другими характеристиками в поперечных сечениях элемента между трещинами.

Деформации от деформации берегов трещины бетона достаточно строго можно учитывать с помощью модели так называемого двухконсольного элемента ДКЭ [19,20,21,27]. В практических расчетах деформацию бетона можно учитывать в зависимости от расстояния от поверхности арматуры до поверхности бетона путем умножения на коэффициент k_r по формуле (11):

$$k_r = -0.088533 \left(\frac{r}{d_s} \right)^2 + 0.522666 \left(\frac{r}{d_s} \right) + 0.308801, \quad (11)$$

где d_s - диаметр арматуры, r - радиус пограничного слоя.

Для продольной арматуры в произвольном сечении x с учётом уровневое расстояние между трещинами l_{crc} определяется, в соответствии с предпосылкой о том, что образование трещин на соответствующем уровне нагружения конструкции происходит после достижения крайними растянутыми волокнами бетона предельных деформаций

$$\varepsilon_{bt}(x) = \varepsilon_{bt,u}. \quad (12)$$

Из формулы (1-5) для взаимных относительных смещений бетона и арматуры деформаций продольной арматуры в произвольном сечении x в формуле (12) и после алгебраических преобразований в формуле (10), получаем следующее соотношение:

$$e^{-B \cdot (0.5 \cdot s_{cr} - t_*)} = 1 + \varepsilon_{ct,u} + \frac{\sigma_{ct,c}}{\nu_c \cdot E_c \cdot B_3 \cdot (K - 1)}, \quad (13)$$

где ν_c - коэффициент упругости бетона при сжатии, принимающий значение $\nu_c = 0,45$ для предельного второго состояния.

Решив уравнение (13) относительно параметра расстояния между трещинами при рассматриваемом уровне напряжений в конструкции, получили:

$$l_{crc} = \frac{2 \cdot (\ln B_4 - B \cdot t_*)}{-B}, \quad (14)$$

где параметр B_4 определяется следующим образом:

$$B_4 = 1 + \frac{\sigma_{ct,c}}{(K - 1) \cdot B_3 \cdot \nu_c \cdot E_c} + \varepsilon_{ct,u}. \quad (15)$$

Анализируя параметры в формуле (14), можно видеть, что увеличение деформаций в арматуре с ростом нагрузки на конструкцию вызывает уменьшение расстояния между трещинами. Это полностью отражает физический смысл рассматриваемого явления, установленный испытаниями железобетонных конструкций.

Трещинообразование конструкции продолжается до стабилизации расстояния между трещинами при определенном уровне нагрузки. Для бетона трещинообразование продолжается до разрушения конструкции. При этом в соответствии с рассматриваемой расчетной моделью выделяется не один, а несколько уровней трещинообразования:

$$\begin{cases} l_{crc} > l_{crc,1} - \text{трещины первого уровня;} \\ l_{crc,1} \geq l_{crc} > l_{crc,2} - \text{трещины второго уровня;} \\ l_{crc,2} \geq l_{crc} > l_{crc,3} - \text{трещины третьего уровня;} \\ \dots \\ l_{crc} \geq 6 \cdot d - \text{трещины последнего уровня.} \end{cases} \quad (16)$$

Сравнивая текущее значение расстояния между трещинами $l_{cr,i}$ можно определить возможность образования последующих уровней трещин.

Если известны уровни трещинообразования вдоль продольной и поперечной арматуры, то теоретически можно составить полную схему различных типов трещин в железобетонной конструкции.

Появление нового уровня трещинообразования соответствует уровню нагрузки, при котором выполняется следующее неравенство:

$$l_{crc,i} \leq l_{crc,i-1} - \eta_{crc} \cdot l_{crc,i-1} \cdot \eta_{lef}, \quad (17)$$

или

$$l_{crc,i} \leq l_{crc,i-1} - (1 - \eta_{crc}) \cdot l_{i-1,crc}. \quad (18)$$

Здесь $l_{crc,i}$ - расстояние между соседними трещинами на i -м уровне трещинообразования (см. рис. 1); $l_{crc,i-1}$ - то же самое на $(i-1)$ -м уровне трещинообразования; $(1 - \eta_{crc}) \cdot l_{i-1,crc}$ - расстояния между трещиной, появившейся на $(i-1)$ -м уровне и новой трещиной, появившейся на i -м уровне трещинообразования с правой и левой стороны, соответственно.

При переходе конструкции на следующий уровень трещинообразования необходимо учитывать коэффициент уменьшения расстояния между соседними трещинами η_{crc} , который определяется как отношение:

$$\eta_{crc} = \frac{l_{crc,i-1}}{l_{crc,i}}. \quad (19)$$

3. Результаты исследования и их анализ

С использованием полученных аналитических зависимостей для расчета уровня расстояния между трещинами были проведены численные исследования по определению расстояния между трещинами и ширины раскрытия трещин. Расчет выполнен для железобетонной балки (испытанного в работе [35] опытного образца Б-1-1 пролетом $l = 1450$ мм, прямоугольного сечения $b \times h = 120 \times 220$ мм (Рисунок 4).

Бетон конструкции тяжелый класса В28,1, с характеристиками: $R_b = 20,58$ МПа, $R_{bt} = 1,69$ МПа, $E_b = 31200$ МПа, $G = 1404$ Мпа. Армирование балки выполнено двумя стержнями диаметром 8 мм класса А500С (А IIIв) с характеристиками: $A_s = 100,6 \cdot 10^2$ мм²; $S_s = 502,6$ мм²; $R_s = 550$ МПа, $E_s = 180000$ МПа.

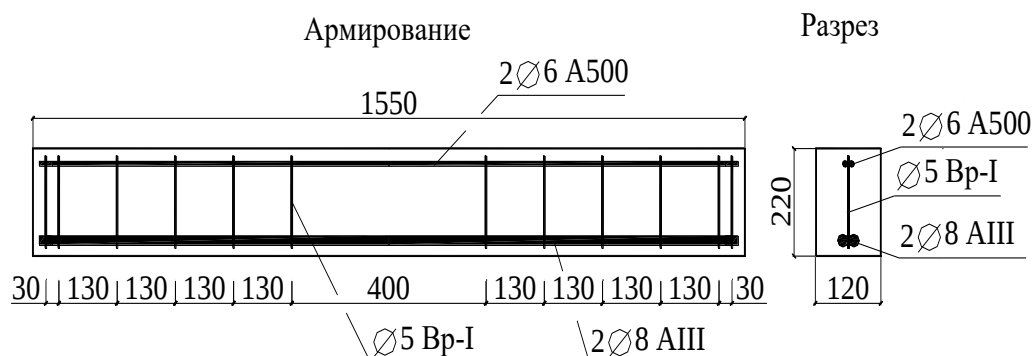
Полученная в испытаниях [35] опытная картина трещин для конструкции балки Б -1 -1 (рисунок 4) показывает, что стабилизация параметра уровня ширины раскрытия трещин $l_{crc,i}$ в опытных конструкции балки Б-1-1 наступила при среднем значении $l_{crc} = 17,50$ см, в конструкции балки-близнеца Б-1-2 при среднем значении $l_{crc} = 14,13$ см.

С использованием Mat Lab были выполнены вычисления параметра расстояния между трещинами и ширины раскрытия трещин по методике Еврокод 2, российским нормам СП 63.13330.2018 и по предлагаемой методике. Сопоставление полученных результатов расчета с результатами испытаний конструкции балки Б -1 -1 приведены на рисунках 5 и 6.

Анализ графиков, приведенных на рисунках, позволяет отметить следующие. Предложенные расчетные зависимости для определения уровня расстояния между трещинами полностью отражают полученную экспериментально качественную картину

многоуровневого процесса образования трещин, когда при дискретном уменьшении расстояния между трещинами обратном пропорциональном изменению изгибающих моментов происходит увеличение ширины раскрытия трещин. Изменение расстояния между трещинами количественно значительно влияет на ширину раскрытия трещин. Расчет по методикам действующих российских и зарубежных нормативных документов, с фиксированными значениями расстояния между трещинами, качественно не отражает эту закономерность, установленную в опытах многими авторами. Расчет параметров расстояния между трещинами l_{crc} и ширины раскрытия трещин a_{crc} по предложенной методике позволяет более строго и более близко к экспериментальным значениям определять эти параметры.

а)



б)



в)

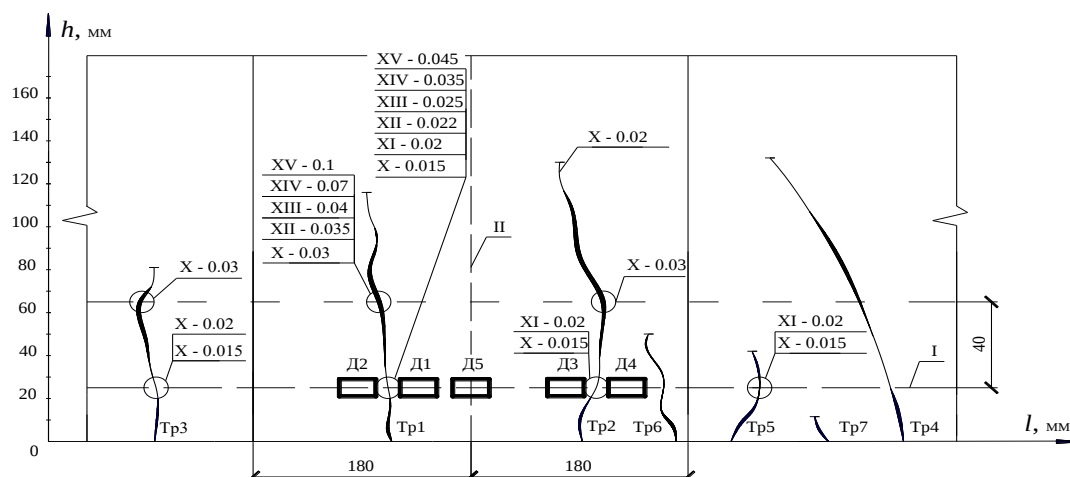


Рисунок 4 – Схема армирования (а) и опытная картина трещин (б, в) на разных уровнях нагружения конструкции балки Б-1-1; I – ось арматуры, II – ось симметрии

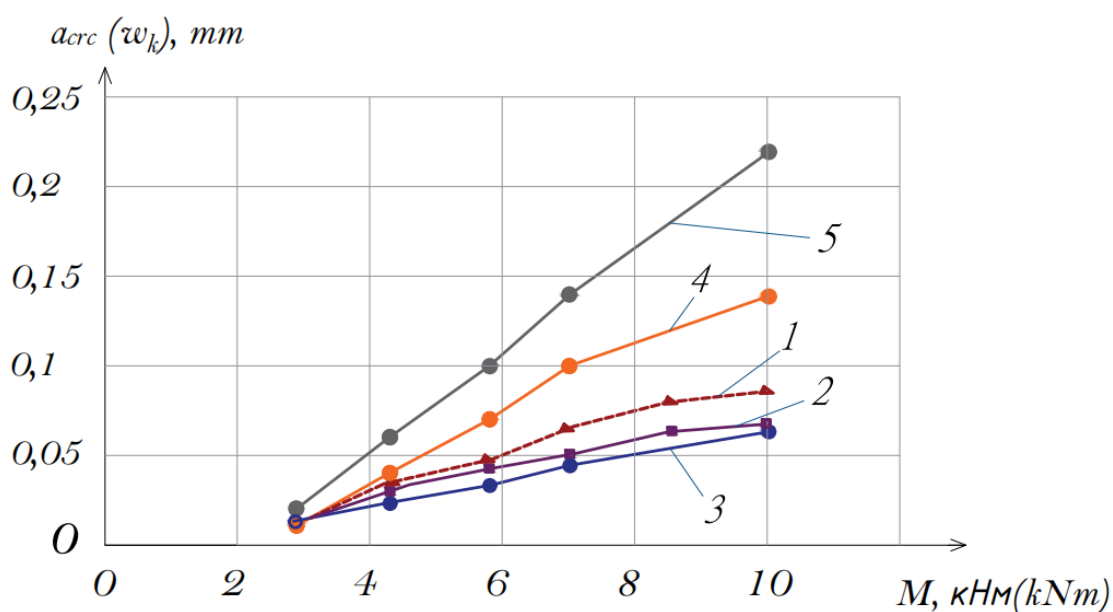


Рисунок 5. – Зависимость ширины раскрытия трещин a_{crc} , мм (а) от значения изгибающего момента (кН*м) для балки Б -1 -1: 1-экспериментальные значения на расстоянии 40 мм от оси арматурного стрежня; 2- то же на уровне оси арматуры; 3- расчет по предложенной методике; 4 – расчет по СП 63.13330.2018; 4 - расчет по Еврокоду-2

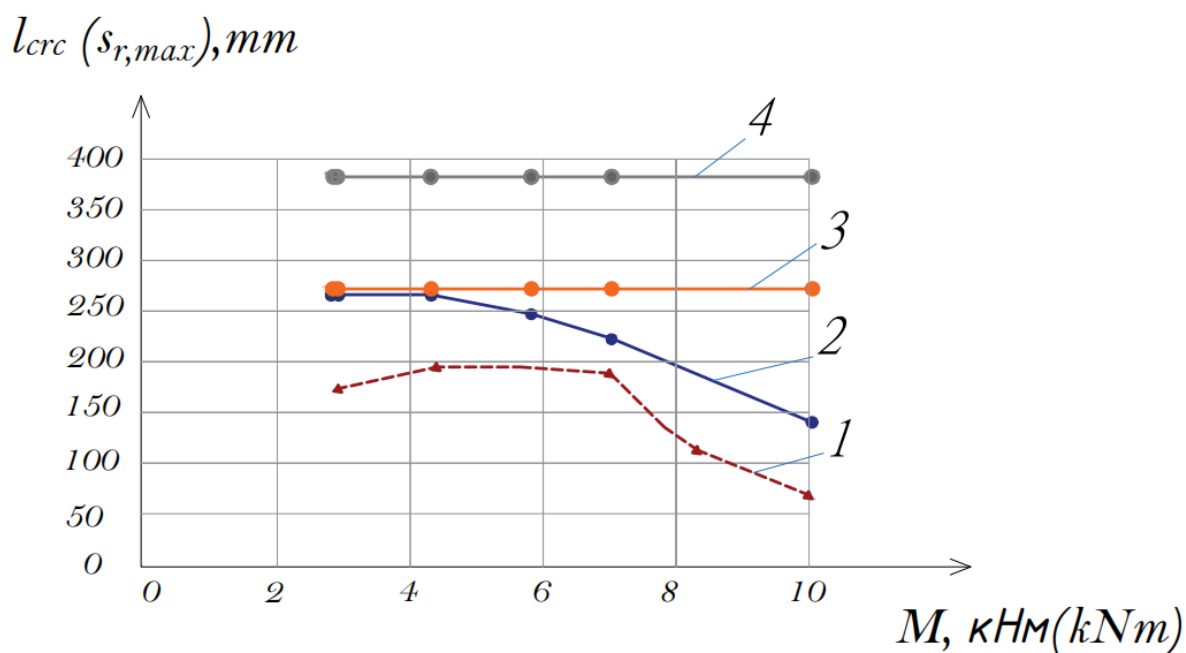


Рисунок 6 – Зависимость расстояния между трещинам l_s , мм (б) от значения изгибающего момента (кН*м) для балки Б -1 -1: 1-экспериментальные значения; 2 – расчет по предложенной методике; 3 – расчет по СП 63.13330.2018; 4 – расчет по Еврокоду-2

4. Выводы

1. Предложена расчетная модель и методика расчета уровневого расстояния между трещинами в железобетонных конструкциях позволяет учитывать деформационного эффект в момент образования трещины, заключающийся в том, что при хрупком разрушении растянутой бетонной матрицы деформации берегов трещины сдерживаются реакцией арматурного стержня и депланируют, а профиль трещины нелинейно искривляется.

2. Учет влияния нарушения сплошности бетона и других рассмотренных в статье физических особенностей сопротивления железобетонного элемента раскрытию трещин выполнено введением в расчетную модель установленных экспериментально физических принципов деформирования бетонной матрицы у берегов трещины и модели сцепления арматуры на участке между смежными трещинами качественно изменяющей распределение результирующих условных касательных напряжений в локальной зоне вблизи берегов трещины.

3. Проведенное сопоставление расчетных параметров расстояния между трещинами и ширины раскрытия трещин вычисленных с результатами испытаний конструкций железобетонных балок, а также с результатами расчета по методикам российских и зарубежных норм показано, что расчетные зависимости предлагаемой модели адекватно отражают полученную экспериментально качественную картину многоуровневого процесса образования трещин когда при дискретном уменьшение уровневого расстояния между трещинами обратно пропорциональном изменению изгибающих моментов происходит увеличение ширины раскрытия трещин.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- 1 ACI Committee 318. Building Code Requirements for Structural Concrete and Commentary. Farmington Hills, Mich: American Concrete Institute. 2014.
2. CEN (Comité Européen de Normalisation). Eurocode 2: Design of Concrete Structures – Part 1: General Rules and Rules for Buildings, EN 1992-1-1:2004. CEN, Brussels, 2004
3. CEB (Comité Euro-International du Béton). CEB-FIP Model Code 2010: Model Code for concrete structures. Ernst & Sohn, Wiley, Berlin, Germany, 2013. 434 p.
4. СП 5.03.01-2020. Бетонные и железобетонные конструкции. Бетонные и железобетонные конструкции. Минск. 2020, 236с.
5. СП 63.13330.2018 «Бетонные и железобетонные конструкции. Основные положения». (С Изм. №1 и Изм. №2). М.: ФГБУ "ПСТ", 2022.
6. СП 311.1325800.2017 «Бетонные и железобетонные конструкции из высокопрочных бетонов. Правила проектирования». (С Изм. №1). М.: ФГБУ "ПСТ", 2023.
7. Romashko V., Romashko-Maistrak O. Level formation and disclosure of normal cracks in reinforced concrete elements and structures // Procedia Structural Integrity. 2022. 36. Pp. 159–165.
8. Frosch R.J. Another look at cracking and crack control in reinforced concrete // ACI Structural Journal. 1999. 96(3). Pp 437–442
9. Dey A., Valiukas D., Jakubovskis R., Sokolov A., Kaklauskas G. Experimental and Numerical Investigation of Bond-Slip Behavior of High-Strength Reinforced Concrete at Service Load // Materials. 2022. 15. 293. <https://doi.org/10.3390/ma15010293>.
10. Bado M. F., Casas J. R., Kaklauskas G. Distributed Sensing (DOFS) in Reinforced Concrete members for reinforcement strain monitoring, crack detection and bond-slip calculation // Engineering Structures. 2021. 226. 111385. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2020.111385>
11. Schmidt M., Schmidt P., Wanka S., Classen M. Shear Response of Members without Shear Reinforcement—Experiments and Analysis Using Shear Crack Propagation Theory (SCPT) // Appl. Sci. 2021. 11. 3078. <https://doi.org/10.3390/app11073078>
12. Травуш В.И., Карпенко Н.И., Колчунов В.И., Каприелов С.С., Демьянов А.И., Конорев А.В. Основные результаты экспериментальных исследований железобетонных конструкций из высокопрочного бетона В100 круглого и кольцевого сечений при кручении с изгибом // Строительная механика инженерных конструкций и сооружений. 2019. №1. С. 51–61.
13. Травуш В.И., Конин Д.В., Крылов А.С. Прочность железобетонных балок из высокопрочных бетонов и фибробетонов // Инженерно-строительный журнал. 2018. № 1(77). С. 90–100.

14. Alhashimi O.I.M. Experimental Studies of Strength Inclined Sections Bent Elements from Autoclaved Aerated Concrete // IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering. 2021. Vol. 1079. № 022062.
15. Kolchunov V.I. The Effect of Reinforced Concrete for Crack Resistance and Rigidity Based on Mechanics of Fracture Under Bending // Lecture Notes in Civil Engineering. 2023. Volume 287. Pp. 79 -97. https://doi.org/10.1007/978-3-031-12703-8_9.
16. Kolchunov V.I. Modeling of Reinforced Concrete in the “LIRA” Intelligence for the Problem of Crack Opening // Lecture Notes in Civil Engineering. 2024. Volume 372. Pp. 291 – 313. https://doi.org/10.1007/978-3-031-36723-6_29.
17. Demyanov A., Kolchunov V.I. The dynamic loading in longitudinal and transverse reinforcement at instant emergence of the spatial crack in reinforced concrete element under the action of a torsion with bending // Journal of Applied Engineering Science. 2017. Vol. 15. Issue 3. article 456. Pp. 375–380. doi:10.5937/jaes15-14663.
18. Iakovenko I., Kolchunov V.I. (2017). The development of fracture mechanics hypotheses applicable to the calculation of reinforced concrete structures for the second group of limit states // Journal of Applied Engineering Science. 2017. Vol. 15. Iss. 3. article 455. Pp. 366–375. doi:10.5937/jaes15-14662
19. Kolchunov V.I. Generalized Deplanation Hypotheses for Linear and Angular Deformations in Reinforced Concrete Structures under Combined Torsion and Bending // Russian Journal of Building Construction and Architecture. 2023. (1(59)). Pp. 9-26. <https://doi.org/10.36622/VSTU.2023.69.1.001>.
20. Колчунов В. И. Некоторые проблемные задачи современной теории железобетона и их решения // Сборник научных трудов РААСН. Российская академия архитектуры и строительных наук. – Москва: Издательство АСВ, 2022. – С. 130-141.
21. Колчунов В. И. Метод расчетных моделей сопротивления для железобетона // Строительная механика инженерных конструкций и сооружений. 2023. т.19, №3. С.261-275. <https://doi.org/10.22363/1815-5235/>
22. Колчунов В. И., Карпенко С. Н. Жесткость железобетонных конструкций при сложном сопротивлении // Научный журнал строительство и архитектуры. 2022. №1(65). С. 11–24. <https://doi.org/10.36622/VSTU.2022.65.1.001>.
23. Колчунов В.И., Масуд Нур Эддин. Анализ деформаций бетона на берегах трещины вдоль оси растянутой арматуры железобетонных элементов // Вестник центрального регионального отделения РААСН. – 2006. – №5. – С. 69–72.
24. Фам Фук Тунг. Методика определения расстояния между трещинами центрально растянутых железобетонных конструкций // Известия Орловского государственного технического университета. 2006. №3. С. 55 – 64.
25. Колчунов В.И., Никулин А.И., Обернихин Д.В. Ширина раскрытия трещин железобетонных конструкций трапециевидного поперечного сечения с учетом новых эффектов сопротивления // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. – 2018. – № 10. – С. 64-73.
26. Ключева Н.В., Яковенко И.А., Усенко Н.В. К расчету ширины раскрытия наклонных трещин третьего типа в составных железобетонных конструкциях // Промышленное и гражданское строительство. – 2014. – №1. – С. 37–40.
27. Dem'yanov, A.I., Yakovenko, I.A., Kolchunov, V.I. The development of universal short dual-console element for resistance of reinforced concrete structures under the action torsion with bending // Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii, Seriya Tekhnologiya Tekstil'noi Promyshlennost'is. 2017. 370(4). Pp. 246–251.
29. Thomas F. G. Cracking in reinforced concrete // *The Structural Engineer*. 1936. 14. С.298–320.
30. Бондаренко В.М., Колчунов В.И. Расчетные модели силового сопротивления железобетона. М.: Изд-во АСВ, 2004. 472 с.
31. Гольшев А.Б., Колчунов В.И. Сопротивление железобетона. Киев: Основа, 2009.
32. Adishchev V.V., Maltsev V.V. "Investigation of stress-strain state in the beam with preformed cracks // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 2018. Vol. 456. No. 1.
33. Федоров В.С., Фам Фук Тунг, Колчунов В.И. Расчет ширины раскрытия трещин в железобетонных конструкциях при центральном растяжении с учетом эффекта нарушения сплошности. // Известия Орловского государственного технического университета. Серия: Строительство и транспорт. 2007. № 1(13). С.29-33.
34. Мурашев В.И. Трещиноустойчивость, жесткость и прочность железобетона [Текст]: (основы сопротивления железобетона). Москва : Изд-во М-ва стр-ва предприятий машиностроения, 1950. – 267 с.
35. Колчунов В.И., Пимочкин В. Н. Методика экспериментальных исследований сопротивления растянутого бетона между трещинами в железобетонных конструкциях для уточнения параметра // Известия Орловского государственного технического университета. Серия: Строительство и транспорт. 2007. №. 2-14. С. 56-60.

REFERENCES

- 1 ACI Committee 318. (2014). Building Code Requirements for Structural Concrete and Commentary. Farmington Hills, Mich: American Concrete Institute.

2. CEN (Comité Européen de Normalisation). Eurocode 2: Design of Concrete Structures – Part 1: General Rules and Rules for Buildings, EN 1992-1-1:2004. CEN, Brussels, 2004
3. CEB (Comité Euro-International du Béton). CEB-FIP Model Code 2010: Model Code for concrete structures. Ernst & Sohn, Wiley, Berlin, Germany, 2013. 434 p.
4. SP 5.03.01-2020. Concrete and reinforced concrete structures. Concrete and reinforced concrete structures. Minsk. 2020, 236 pp. (in Russ.)
5. SP 63.13330.2018 “Concrete and reinforced concrete structures. Basic provisions”. (With change No.1 and Change No.2). M.: FGBU “RST”, 2022. (in Russ.)
6. SP 311.1325800.2017 “Concrete and reinforced concrete structures of high-strength concrete. Design rules”. (With Modification No.1). M.: FGBU “RST”, 2023.
7. Romashko V., Romashko-Maistruk O. Level formation and disclosure of normal cracks in reinforced concrete elements and structures. *Procedia Structural Integrity*. 2022. 36. Pp. 159–165.
8. Frosch R. J. Another look at cracking and crack control in reinforced concrete. *ACI Structural Journal*. 1999. 96(3). Pp. 437–442.
9. Dey A., Valiukas D., Jakubovskis R., Sokolov A., Kaklauskas G. Experimental and Numerical Investigation of Bond-Slip Behavior of High-Strength Reinforced Concrete at Service Load. *Materials*. 2022. 15. 293. <https://doi.org/10.3390/ma15010293>
10. Bado M. F., Casas J. R., Kaklauskas G. Distributed Sensing (DOFS) in Reinforced Concrete members for reinforcement strain monitoring, crack detection and bond-slip calculation. *Engineering Structures*. 2021. 226. 111385. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2020.111385>
11. Schmidt M., Schmidt P., Wanka S., Classen M. Shear Response of Members without Shear Reinforcement—Experiments and Analysis Using Shear Crack Propagation Theory (SCPT). *Appl. Sci*. 2021. 11. 3078. <https://doi.org/10.3390/app11073078>.
12. Travush V.I., Karpenko N.I., Kolchunov V.I., Kaprielov S.S., Demyanov A.I., Konorev A.V. Main results of experimental studies of reinforced concrete structures made of high-strength concrete B100 of circular and circular cross-sections under torsion with bending. *Stroitel'naya mekhanika of engineering structures and constructions*. 2019. No. 1. Pp. 51-61. (in Russ.)
13. Travush V.I., Konin D.V., Krylov A.S. Strength of reinforced concrete beams made of high-strength concrete and fiber concrete. *Magazine of civil engineering*. 2018. No. 1(77). Pp. 90-100.
14. Alhashimi Omar Ismael Mohammed. Experimental Studies of Strength Inclined Sections Bent Elements from Autoclaved Aerated Concrete. *IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering*. 2021. Vol. 1079. 022062.
15. Kolchunov V.I. The Effect of Reinforced Concrete for Crack Resistance and Rigidity Based on Mechanics of Fracture Under Bending. *Lecture Notes in Civil Engineering*. 2023. Volume 287. Pp. 79 -97. https://doi.org/10.1007/978-3-031-12703-8_9
16. Kolchunov V.I. Modeling of Reinforced Concrete in the “LIRA” Intelligence for the Problem of Crack Opening. *Lecture Notes in Civil Engineering*. 2024. Volume 372. Pp. 291 – 313. https://doi.org/10.1007/978-3-031-36723-6_29.
17. Demyanov A., Kolchunov V.I. The dynamic loading in longitudinal and transverse reinforcement at instant emergence of the spatial crack in reinforced concrete element under the action of a torsion with bending. *Journal of Applied Engineering Science*. 2017. Vol. 15. Issue 3. article 456. Pp. 375–380. doi:10.5937/jaes15-14663.
18. Iakovenko I., Kolchunov V.I. (2017). The development of fracture mechanics hypotheses applicable to the calculation of reinforced concrete structures for the second group of limit states. *Journal of Applied Engineering Science*. 2017. Vol. 15. Iss. 3. article 455. Pp. 366–375. doi:10.5937/jaes15-14662
19. Kolchunov V.I. Generalized Deplanation Hypotheses for Linear and Angular Deformations in Reinforced Concrete Structures under Combined Torsion and Bending. *Russian Journal of Building Construction and Architecture*. 2023. (1(59)). Pp. 9-26. <https://doi.org/10.36622/VSTU.2023.69.1.001>.
20. Kolchunov V. I. Some problem tasks of the modern theory of reinforced concrete and their solutions. Collection of scientific papers of RAASN. Russian Academy of Architecture and Building Sciences. - Moscow: ASV Publishing House, 2022. - Pp. 130-141. (in Russ.)
21. Kolchunov V. I. Method of Resistance Design Models for Reinforced Concrete. *Stroitel'naya Mekhanika Engineering Designs and Structures*. 2023. Vol. 19. No. 3. Pp. 261-275. <https://doi.org/10.22363/1815-5235>. (in Russ.)
22. Kolchunov V. I.; Karpenko S. N. Stiffness of reinforced concrete structures under complex resistance / V. I. Kolchunov, S. N. Karpenko. *Russian Journal of Building Construction and Architecture*. 2022. No. 1(65). Pp. 11-24. <https://doi.org/10.36622/VSTU.2022.65.1.001>. (in Russ.)
23. Kolchunov V.I., Masud Nur Eddin. Analysis of Concrete Deformations at Crack Shores along the Axis of Stretched Armature of Reinforced Concrete Elements. *Bulletin of the Central Regional Branch of RAASN*. 2006. No. 5. Pp. 69-72. (in Russ.)

24. Pham Phuc Tung. Methodology of determination of distance between cracks of centrally stretched reinforced concrete structures. *Izvestiya Orelskogo Gosudarstvennogo Tekhnicheskogo Universiteta*. 2006. No. 3. Pp. 55 - 64. (in Russ.)
25. Kolchunov V.I., Nikulin A.I., Obernikhin D.V. Crack Opening Width of Reinforced Concrete Structures of Trapezoidal Cross-Section Taking into Account New Resistance Effects. *Vestnik of V.G. Shukhov State Technical University* - 2018.- No. 10.- P. 64-73. (in Russ.)
26. Klyueva N.V., Yakovenko I.A., Usenko N.V. To calculation of the opening width of inclined cracks of the third type in composite reinforced concrete structures. *Industrial and Civil Engineering*. 2014. No. 1. Pp. 37-40. (in Russ.)
27. Dem'yanov, A.I., Yakovenko, I.A., Kolchunov, V.I. The development of universal short dual-console element for resistance of reinforced concrete structures under the action torsion with bending. *Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii, Seriya Tekhnologiya Tekstil'noi Promyshlennost'is*. 2017. 370(4). Pp. 246–251.
29. Thomas F. G. Cracking in reinforced concrete. *The Structural Engineer*. 1936. 14. Pp.298–320.
30. Bondarenko V.M., Kolchunov V.I. Calculation Models of Force Resistance of Reinforced Concrete. Moscow: ASV Publishing House, 2004. 472 p. (in Russ.)
31. Golyshev A.B., Kolchunov V.I. Resistance of reinforced concrete. Kiev: Osnova, 2009. (in Russ.)
32. Adishchev V.V., Maltsev V.V. Investigation of stress-strain state in the beam with preformed cracks. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2018. Vol. 456. No. 1.
33. Fedorov V.S., Pham Phuc Tung, Kolchunov V.I. Calculation of Crack Opening Width in Reinforced Concrete Structures under Central Tension with Account of Continuity Violation Effect. *Izvestiya Orelskogo Gosudarstvennogo Tekhnicheskogo Universiteta. Series: Construction and transportation*. 2017. No. 1(13). Pp.29-33. (in Russ.)
- 34 Murashev V.I. Crack resistance, rigidity and strength of reinforced concrete [Text]: (basics of resistance of reinforced concrete). - Moscow : Publ. Ministry of construction f machine-building enterprises, 1950. - 267 p. (in Russ.)
35. Kolchunov V. I., Pimochkin V.N. Methodology of experimental studies of the resistance of stretched concrete between cracks in reinforced concrete structures to clarify the parameter. *Izvestiya Orelskogo Gosudarstvennogo Tekhnicheskogo Universiteta. Series: Construction and transportation*. - 2007. No. 2-14. Pp. 56-60. (in Russ.)

Информация об авторах

Колчунов Владимир Иванович

Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет (НИУ МГСУ), г. Москва, Россия,

Член-корреспондент РААСН, доктор технических наук, профессор, профессор кафедры инженерной графики и компьютерного моделирования.

Федеральное государственное бюджетное учреждение «Научно-исследовательский институт строительной физики Российской академии архитектуры и строительных наук», г. Москва, Россия

Главный научный сотрудник

E-mail: vlik52@mail.ru

Федоров Сергей Сергеевич

Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет (НИУ МГСУ), г. Москва, Россия

Кандидат технических наук, доцент, зав. кафедрой инженерной графики и компьютерного моделирования

E-mail: fedorovss@mgsu.ru

Information about authors

Kolchunov Vladimir Iv.

Moscow State University of Civil Engineering (NRU MGSU), Moscow, Russia,

Corresponding Member of the Russian Academy of Architecture and Construction Sciences, doctor of technical sciences, professor, professor of the Department of Engineering Graphics and Computer Modeling.

Federal State Budgetary Institution "Research Institute of Construction Physics of the Russian Academy of Architecture and Construction Sciences", Moscow, Russia,

chief researcher

E-mail: vlik52@mail.ru

Fedorov Sergey S.

Moscow State University of Civil Engineering (NRU MGSU), Moscow, Russia,

candidate of technical sciences, head of the Department of Engineering Graphics and Computer Modeling.

E-mail: fedorovss@mgsu.ru