УДК 69.04
doi: 10.33622/0869-7019.2025.08.22-30

Расстояние между трещинами в центрально растянутых железобетонных элементах на основе экспериментов

(В порядке обсуждения)

Дмитрий Анатольевич ПЕКИН, кандидат технических наук, главный конструктор, dpekin@mail.ru
ИНВ-Строй, 142105 Московская обл., г. Подольск, ул. Пионерская, 6-30

Аннотация. *Рассмотрены результаты многочисленных экспериментов и анализа методик расчета по определению расстояния между трещинами в центрально растянутых железобетонных элементах, предложенных разными авторами за последние несколько десятилетий. Подробно описаны недостатки и коллизии различных теоретических подходов, проведенных испытаний и способов определения расстояний между трещинами, базирующихся на использовании множества дополнительных механических характеристик и поправочных коэффициентов, определяемых экспериментально. Предлагается отказаться от использования методов и инструментария теории сцепления для решения задач теории трещиностойкости. Получены важные уточнения для подготовки и проведения новых экспериментов на центрально растянутых железобетонных призмах для определения расстояния между трещинами и предельной растяжимости железобетона.*

Ключевые слова: *растянутые железобетонные элементы, образование трещин, расстояние между трещинами, предельная растяжимость железобетона, эксперимент*

Для цитирования: *Пекин Д. А.* Расстояние между трещинами в центрально растянутых железобетонных элементах на основе экспериментов (В порядке обсуждения) // Промышленное и гражданское строительство. 2025. № 8. С. 22–30. doi: 10.33622/0869-7019.2025.08.22-30

THE DISTANCE BETWEEN CRACKS IN CENTRALLY TENSIONED REINFORCED CONCRETE ELEMENTS BASED ON EXPERIMENTS

(IN THE ORDER OF DISCUSSION)

Dmitrii A. PEKIN, dpekin@mail.ru
INV-Stroy, Pionerskaya ul., 6-30, Podolsk 142105, Russian Federation

Abstract. *The article reviews the results of numerous experiments and existing calculation methods for determining the distance between cracks in centrally tensioned reinforced concrete elements proposed by different authors over the past few decades, and analyzes them. The article describes in detail the shortcomings and conflicts of various theoretical approaches, tests, and methods for determining the distance between cracks based on the use of many additional mechanical characteristics and correction factors determined experimentally. It is proposed to abandon the use of methods and tools of the adhesion theory for solving problems of crack resistance theory. Important clarifications are obtained for preparing and conducting new experiments on centrally tensioned reinforced concrete prisms to determine the distance between cracks and the ultimate tensibility of reinforced concrete.*

Keywords: *tensioned reinforced concrete elements, crack formation, distance between cracks, ultimate tensibility of reinforced concrete, experiment*

For citation: Pekin D. A. The Distance Between Cracks in Centrally Tensioned Reinforced Concrete Elements Based on Experiments *(In the Order of Discussion). Promyshlennoe i grazhdanskoe stroitel'stvo* [Industrial and Civil Engineering], 2025, no. 8, pp. 22–30. (In Russ.). doi: 10.33622/0869-7019.2025.08.22-30

Введение

В продолжение статьи «Расстояние между трещинами – важная экспериментальная характеристика железобетона» [1] важно отметить, что попытки аналитического определения данного параметра с использованием других дополнительных нестандартных экспериментальных характеристик только усложняют методику расчета железобетонных элементов по трещиностойкости и приводят к возникновению неопределенных погрешностей, искажающих результаты и снижающих универсальность ее применения.

Кроме того, аппарат и задачи, рассматриваемые теорией сцепления, заметно отличаются от целей, которые ставит перед собой теория трещиностойкости, особенно в части образования первичных нормальных трещин, когда отсутствуют смещения между арматурой и контактным (околоарматурным) слоем бетона, а возможность использования экспериментальных данных, полученных на образ-

© ПЕКИН Д. А., 2025

цах призматической или цилиндрической формы, либо требует дополнительного обоснования (центрально растянутые образцы), либо не оправданна в принципе (образцы, опертые торцом), как было обосновано в статье [1].

Цель работы — проанализировать результаты проведенных ранее исследований на примере центрально растянутых железобетонных элементов и показать, что аналитическое определение расстояния между нормальными трещинами на основе других нестандартных экспериментальных характеристик не только усложняет методику расчета, но и не гарантирует ее универсальности.

Расчетные предпосылки и методики для определения расстояния между нормальными трещинами в железобетонных элементах с арматурой периодического профиля можно разделить на четыре группы:

1) на основе прочностных характеристик бетона на растяжение и при отсутствии взаимного смещения арматуры и бетона [2, 3 и др.];

2) аналогично, но при учете взаимного смещения арматуры и бетона [4–7 и др.];

3) на основе деформационных характеристик бетона на растяжение и при учете взаимного смещения арматуры и бетона [8–19 и др.];

4) аналогично, но при отсутствии взаимного смещения арматуры и бетона [1, 20–23].

Первые три группы опираются на различные параметры сцепления арматуры с бетоном и в разной степени используют аппарат теории сцепления для решения задач теории трещиностойкости.

В статьях [1, 23] подробно рассмотрены нестыковки между математическим аппаратом, используемым в работах [2, 4], и физическим смыслом решаемой задачи, которые приводят к невозможности использования полученных результатов для построения универсального подхода по определению расстояния между нормальными трещинами на основе предельной растяжимости железобетона и деформационного критерия.

Модели и методы в работе [3] и их анализ

Интересным примером подобных коллизий является предложение проф. О. Я. Берга в статье [3], которое требует отдельного рассмотрения.

Аналитическая зависимость, определяющая расстояние между нормальными трещинами l_s, базируется на основе следующих предпосылок:

• перемещение сечения арматуры без учета влияния бетона v_0 (с заменой отдельных обозначений параметров на общепринятые в настоящее время, например, $l_m = 2l_s$) равно:

$$v_0 = \varepsilon_s x, \qquad (1)$$

где ε_s – относительная деформация арматуры в месте трещины; x – координата положения сечения арматуры, м;

• перемещение сечения арматуры с учетом влияния бетона и допущением о равномерности деформаций v выражается следующим образом:

$$v = v_0 - dv, \qquad (2)$$

где dv – дифференциал перемещения сечения растянутого бетона без арматуры.

Тогда с учетом выражения (2) касательное напряжение τ_x по линии контакта арматуры с бетоном составит:

$$\tau_x = E_\tau\, dv = E_\tau(v_0 - v), \qquad (3)$$

где E_τ – модуль деформаций сцепления, кН/м^3.

Средние растягивающие напряжения в бетоне

$$\sigma_{bt} = \frac{N_{bt}}{A_{br}} = E_{bt}\frac{dv}{dx}, \qquad (4)$$

где N_{bt} – среднее растягивающее усилие в бетоне, кН; A_{br} – площадь бетона в пределах зоны взаимодействия с арматурой, м^2; E_{bt} – модуль упругости бетона при растяжении, кПа; dv/dx – относительная деформация растянутого бетона или производная перемещения сечения растянутого бетона без арматуры.

По аналогии с формулой (7) из статьи [1] на основе равновесия элемента длиной dx следует:

$$\tau_x(\pi d_s)dx = -dN_{bt}. \qquad (5)$$

При подстановке выражения (3) и после дифференцирования правой части (4) в левую и правую части формулы (5) получим:

$$E_\tau(v_0 - v)\pi d_s = -E_{bt}A_{br}\frac{d^2v}{dx^2} \qquad (6)$$

или в окончательном виде с учетом формулы (1) и перестановок:

$$\frac{d^2v}{dx^2} - m^2v = -m^2\varepsilon_s x, \qquad (7)$$

где $m = \sqrt{\frac{E_\tau \pi d_s}{E_{bt}A_{br}}} = \sqrt{\frac{E_\tau \pi}{E_{bt}r_{br}}}$ и $r_{br} = \frac{A_{br}}{d_s}$ – радиус армирования.

Решением дифференциального неоднородного линейного уравнения второго порядка с применением гиперболических синуса и косинуса служит выражение

$$v = \varepsilon_s\left(x - \frac{sh(mx)}{m\,ch(ml_s)}\right). \qquad (8)$$

Растягивающие напряжения в бетоне для сечения в начале координат ($x = 0$) определяются по формуле (4)

$$\sigma_{bt} = E_{bt}\varepsilon_s\left(1 - \frac{1}{ch(ml_s)}\right). \qquad (9)$$

Трещина в центрально растянутом элементе с одиночной арматурой образуется по центру при достижении предела прочности бетона на растяжение R_{bt}, т. е. на основе выражения (9) при $\sigma_{bt} = R_{bt}$:

$$l_s = \frac{1}{m} arch \frac{E_{bt}\varepsilon_s}{E_{bt}\varepsilon_s - R_{bt}} = \sqrt{r_{br}} \sqrt{\frac{E_{bt}}{E_\tau \pi}} arch \frac{E_{bt}\varepsilon_s}{E_{bt}\varepsilon_s - R_{bt}}, \quad (10)$$

откуда следует, что при заданных классе бетона и профиле арматуры расстояние между нормальными трещинами зависит от относительных деформаций в арматуре ε_s и площади зоны растянутого бетона к диаметру арматуры r_{br} (радиус армирования).

По результатам анализа предложенной методики и других аспектов работы [3] можно отметить следующие нестыковки.

1. При вычислении перемещения сечения арматуры с учетом влияния бетона v по формуле (2) используется разность между конечной величиной v_0 и бесконечно малой величиной dv, что вызывает противоречие, которое будет показано на примере центрально растянутой призмы сечением 100×100 мм и длиной 1,4 м из бетона класса В25 с одиночной арматурой ∅12 мм класса А500 (начало координат расположено посередине образца, перемещения сечения арматуры или бетона, вычисленные ниже, относятся к концам образца):

• усилие трещинообразования в призме:

$$N_{crc} = R_{bt,ser} A_{red} = R_{bt,ser} (A_b + \alpha A_s) = 16{,}5 \text{ кН}, \quad (11)$$

где $R_{bt,ser}$ = 1,55 МПа; A_s = 113 мм^2; A_b = 100 · 100 − 113 = = 9887 мм^2, $\alpha = E_s/E_{bt}$ = 6,7; A_{red} = (9887 + 6,7 · 113) = = 10644 мм^2;

• перемещение сечения арматуры без учета бетона при усилии N_{crc}:

$$v_0 = \varepsilon_s l_s = 0{,}00073 \cdot 700 = 0{,}511 \text{ мм}, \quad (12)$$

где $\varepsilon_s = \sigma_s/E_s$ = 146/200 000 = 0,00073, $\sigma_s = N_{crc}/A_s$ = = 16500/113 = 146 МПа; l_s = 1400/2 = 700 мм;

• перемещение сечения бетона без учета арматуры при усилии N_{crc}:

$$dv = \varepsilon_{bt} l_s = 0{,}000056 \cdot 700 = 0{,}039 \text{ мм}, \quad (13)$$

где $\varepsilon_{bt} = \sigma_{bt}/E_{bt}$ = 1,67/30000 = 0,000056, $\sigma_{bt} = N_{crc}/A_{bt}$ = = 16500/9887 = 1,67 МПа;

• перемещение сечения бетона с арматурой при усилии N_{crc}:

$$v = \varepsilon_{bt,red} l_s = 0{,}000052 \cdot 700 = 0{,}036 \text{ мм}, \quad (14)$$

где $\varepsilon_{bt,red} = \sigma_{bt,red}/E_{bt}$ = 1,55/30000 = 0,000052, σ_{bt} = = N_{crc}/A_{red} = 16500/10644 = 1,55 МПа.

Таким образом, при сделанном допущении о равномерности деформаций и вычислении перемещений концов образца получим несоответствие при сравнении результатов вычислений для выражений (2) и (14):

$$v_{(2)} = v_0 - dv = 0{,}511 - 0{,}039 = 0{,}472 \text{ мм} >> v_{(14)} = 0{,}036 \text{ мм}. \quad (15)$$

Кроме того, видно, что перемещения сечений бетона без учета арматуры, хотя и меньше на порядок перемещений сечений арматуры без учета бетона, не являются бесконечно малыми.

2. Модуль деформаций сцепления E_τ в выражении (3) имеет размерность кН/м^3 и численно принимается равным модулю сдвига бетона при растяжении с размерностью кПа:

$$E_\tau = G = \frac{E_{bt}}{2(1+\mu)} = 0{,}425 E_{bt}, \quad (16)$$

где μ = 0,175 – коэффициент Пуассона,

что продиктовано необходимостью вычисления напряжений сцепления через дифференциал перемещений сечения бетона без учета арматуры, и очевидно вызывает сомнения.

3. В формуле (4) отсутствуют критерии по определению площади бетона в пределах зоны взаимодействия с арматурой, далее в тексте статьи [3] предлагается эмпирически учитывать зону с радиусом, равным 12 диаметрам арматуры.

4. После анализа экспериментальных данных появления первичных нормальных трещин в балках предлагается использовать простую эмпирическую зависимость вместо полученного аналитического выражения (10):

$$l_s = \kappa_r \sqrt{r_{br}}, \quad (17)$$

где κ_r = (1,3...1,5) см$^{1/2}$ при напряжениях в арматуре σ_s = (100...150) МПа.

5. В переармированных элементах требуется увеличивать радиус армирования r_{br} на величину отношения расчетных напряжений в арматуре к действительным.

6. Не приводятся схема и результаты испытаний железобетонных призм с параметрами сечений, близко повторяющими растянутую зону балок, скорее всего, в связи с противоречиями относительно предложенной аналитической методики и/или результатов испытаний балок.

Тем не менее по результатам проведенной работы следует отметить ряд важных обстоятельств и наблюдений автора:

• описываются первичная (большой высоты) и вторичная (малой высоты) системы трещин при напряжениях в арматуре 80—100 и 250—350 МПа соответственно;

• для первой ступени напряжений предлагается эмпирическая зависимость (17) при напряжениях в арматуре 100–150 МПа в виде верхней ветви параболы, направленной вдоль оси абсцисс;
• описываются и анализируются экспериментальные исследования призм с четырьмя стержнями и тавровых балок с аналогичным расположением арматуры в растянутой зоне стенки, как в призмах;
• отмечается, что при повторном приложении нагрузки возникает дополнительное раскрытие трещин на 19–25 % от первоначального;
• указывается на заметные различия в фактических расстояниях между нормальными трещинами при использовании арматуры периодического профиля и гладкой.

Модели и методы в работах [5–7] и их анализ

Продолжив анализ работ [5, 6] М. М. Холмянского, автора технической теории сцепления (ТТС), в части применения ее к задачам трещиностойкости, выполненный в статье [1], проанализируем более раннюю статью [7], в которой рассматривается процесс трещинообразования центрально растянутых призматических железобетонных элементов с одиночной арматурой, и отметим следующие дополнительные противоречия.

1. На рис. 1 [7] показаны графики изменения напряжений сцепления в зависимости от положения сечения по длине элемента при увеличении нагрузки, но правый конец любого графика соответствует нулевым значениям напряжений сцепления, что не соответствует действительности, как было доказано ранее в статьях [1, 23].

2. В экспликациях к формулам (2, 3) и отсылке к рис. 1 [7] отсутствует описание для параметра t, входящего под знак натурального логарифма, и по которому ведется интегрирование в интервалах от αg до αg_0 в формуле (2) и от 0 до αg_0 в формуле (3), и его физический смысл. Пределы интегрирования являются произведением жесткости сцепления α на взаимное смещение g и выражают усилия в арматуре, а подынтегральное выражение является отношением единицы к квадратному корню из некоторого силового фактора, который после интегрирования выражается уже квадратным корнем усилия. Кроме того, непонятно, где находится начало отсчета для параметра t: на оси симметрии, судя по пределам интегрирования, или на левом конце элемента, как показано на рис. 1.

3. Отсутствует физическое описание процесса взаимного смещения арматуры и бетона, на какой стадии напряженно-деформированного состояния (НДС) контактного (околоарматурного) слоя бетона или напряжений в арматуре возникает данный эффект, относится ли депланация сечения бетона, связанная с разностью относительных деформаций в контактном слое и на поверхности образца, к данному случаю.

4. При выводе формулы (5) принимается, что на оси симметрии образца в середине элемента взаимные смещения g равны нулю, на основе чего с учетом формулы (3) выводится формула (6), определяющая минимальное расстояние между трещинами. Но, если допустить, что на стадии образования трещин при постоянном напряжении сцепления в некоторой средней части по длине элемента взаимные смещения g также отсутствуют, то формула (6) не имеет физического смысла и искажает реальную картину трещинообразования.

Кроме того, в центрально растянутом элементе с меньшей длиной, чем полученное аналитически минимальное расстояние между трещинами (при наличии сцепления арматуры с бетоном, возможного их взаимного смещения и несущей способностью арматуры существенно большей, чем у бетона), очевидно и неизбежно образуется трещина в середине образца на определенном этапе нагружения, соответствующем пределу текучести в арматуре, заметно раньше разрыва арматуры, что никак не связано с отсутствием или наличием смещений между ними и поэтому обесценивает значимость предложенных формул.

5. Отмечается, что раскрытие трещин является результатом взаимных смещений бетона и арматуры и складывается из начального раскрытия и раскрытия после появления трещины, в связи с чем эти явления имеют разную природу и должны рассматриваться отдельно.

Важно отметить, что образование трещин не является результатом взаимных смещений арматуры и бетона: самым наглядным подтверждением этого могут служить центрально растянутые элементы с гладкой арматурой, в которых есть взаимное смещение, а трещины, к моменту достижения усилия трещинообразования и даже при разрыве арматуры, могут не образоваться вовсе. Возможно, именно поэтому в обобщающей многолетний труд автора по разработке ТСС монографии [5] была исключена из рассмотрения гладкая арматура.

6. Утверждается, что среднее по длине растягиваемого железобетонного элемента начальное раскрытие трещин может быть получено как удвоенное взаимное смещение на загруженном торце призмы удвоенной длины при выдергивании из нее арматуры усилием, равным усилию трещинообразования.

Как отмечалось и обосновывалось ранее в статье [1], образцы, опертые торцом, существенно искажают характер взаимодействия арматуры с бето-

ном и не могут служить основой для определения первичных трещин.

7. В разделе «Характер трещинообразования» отсутствует физическое описание процесса трещинообразования, все выводы строятся на аналитических предположениях и допущениях, которые во многом не соответствуют действительности.

8. В разделе «Развитие трещин» для определения ширины раскрытия трещин используется новое допущение: раскрытие трещин (дополнительное к начальному) есть результат взаимных смещений между арматурой и бетоном на торце элемента переменной длины, равной удвоенному среднему расстоянию между трещинами. Кроме того, для приближения результатов расчетов к экспериментальным данным вводится новый эмпирический коэффициент λ, зависящий от R^*.

9. Экспериментальная проверка зависимостей выполнялась на образцах двух серий: а) размером 5×7×200(*l*) см, прочностью бетона при сжатии 28,5 МПа, рифленой проволокой диаметром 3 и 4 мм; б) размером 10×10×302-534(*l*) см, прочностью бетона при сжатии 8,5—23 МПа, арматурой периодического профиля ∅14 мм.

По результатам можно отметить:

• эксперимент с несколькими проволоками может заметно исказить результаты;

• единицы измерения параметров a и k, указанные в таблицах, не соответствуют единицам измерения, указанным в экспликациях к формулам (1—4);

• разброс расстояний между трещинами от 11 до 40 см в образцах с проволокой может свидетельствовать о проскальзывании;

• не проводилось измерение прочности бетона при растяжении;

• разброс расстояний между трещинами уменьшался от 100 до 15 см в образцах с арматурой периодического профиля по мере увеличения внешней нагрузки.

Резюмируя и дополняя [1], можно подчеркнуть, что количество новых физических констант и поправочных коэффициентов, требуемых в дополнение к основным и необходимых для сближения аналитических и экспериментальных результатов, подтверждает непригодность предложенной методики расчета расстояний между нормальными трещинами для задач трещиностойкости.

Модели и методы в работах [8—19] и их анализ

Далее рассмотрим предпосылки и методику расчета из третьей группы изложенных в относительно современных работах [8—19] авторов из Республики Беларусь — проф. В. В. Тура и его ученика канд. техн. наук А. В. Драгана, рассматривавших процесс образования трещин в центрально растянутых железобетонных элементах. Обобщающие материалы авторов по этой тематике опубликованы в статье [16], а электронные версии статей можно найти в репозитории Брестского государственного технического университета по ссылке: https://rep.bstu.by.

Основные комментарии к предпосылкам, методике и результатам статьи [16] следующие.

1. Для определения расстояния между трещинами, возможно впервые, предлагается использовать предельную растяжимость бетона и деформационный критерий на ее основе. Но при этом игнорируются различия в предельной растяжимости бетона и железобетона, как двух существенно различающихся строительных материалов, описанные в статьях [1, 23].

2. Отдельно подчеркивается разделение нормальными трещинами растянутых и изгибаемых железобетонных элементов на связанные между собой блоки, но без конкретных предложений по созданию соответствующей расчетной модели конструкции и выработке методики ее расчета в отличие от работ [21, 22].

Необходимо отметить, что разделение железобетонных балок на характерные блоки предлагалось ранее проф. В. Н. Байковым в статье [24], но не нашло дальнейшего распространения, а также многократно использовалось другими специалистами при решении задач методом предельного равновесия.

3. Предложена методика для определения расстояния между трещинами и ширины их раскрытия на примере центрально растянутых железобетонных элементов.

Обоснование возможности использования полученных результатов при переходе от центрально растянутых элементов к изгибаемым и внецентренно нагруженным отсутствует.

4. Допускается ограничение длин блоков между трещинами в диапазоне от одной до двух длин зоны перераспределения напряжений с арматуры на бетон.

Подобные ограничения крайне сложно перенести на другие типы элементов в связи с принципиально другим характером деформирования — во всех железобетонных конструкциях собственный вес и внешние нагрузки передаются на бетон и далее на арматуру, но никак не наоборот, в отличие от задач, которые рассматривает теория сцепления, например, по анкеровке стержней, длине перепуска и т. п.

5. Утверждается, что после образования первичных трещин относительные деформации в бетоне на их границе существенно меньше, чем относительные деформации в момент их образования, что вызывает множество вопросов:

• почему относительные деформации бетона на границах новых трещин обнуляются после их появления (что противоречит истории нагружения и свидетельствует о нарушении сцепления арматуры с бетоном)?
• почему относительные деформации бетона посередине блоков между новыми трещинами снижаются и становятся меньше предельных, при которых эти трещины возникли?
• почему после образования первичных трещин и предполагаемого снижения относительных деформаций бетона отсутствует их дальнейший рост при увеличении нагрузки?

6. Предполагается, что с ростом растягивающего усилия деление каждого из образованных блоков будет продолжаться до тех пор, пока не будет выделен такой блок, для которого усилие, требуемое для образования очередной трещины, превысит усилие, которое способен воспринять железобетонный элемент.

Образование вторичных трещин или дальнейшее разделение на блоки совсем не гарантировано, поскольку по мере увеличения нагрузки может нарушаться сцепление арматуры с бетоном и возникать проскальзывание, характерное для III стадии НДС контактного (околоарматурного) слоя бетона, описанной в статье [1], что исключает появление новых трещин также, как для подобных образцов с арматурой гладкого профиля, в которых трещины не возникают вовсе (см. п. 13 ниже).

7. Приводится интегральное выражение (8) для определения средней ширины раскрытия трещин по аналогии с известной формулой проф. Я. В. Столярова [4, с. 394]; описывается итерационный алгоритм для определения длины зоны перераспределения напряжений с арматуры на бетон и перечисляются его основные предпосылки.

В выражении (10) и на рис. 6б [16] нормальные продольные напряжения в бетоне приняты равномерно распределенными по поперечному сечению, что не может соответствовать действительности в зоне перераспределения нагрузки с арматуры на бетон и противоречит теории сцепления, предложенной в статье [25], в которой учитывается депланация сечения бетона.

Как отмечалось ранее в [1], предельная растяжимость железобетона и расстояние между трещинами являются экспериментальными характеристиками, зависящими от множества факторов, так же, как предельная сжимаемость бетона или начальный модуль упругости, в связи с чем они не могут быть определены аналитически.

8. Приводятся аналитические выражения (12, 13) для относительных деформаций в арматуре и бетоне на основании регрессионного анализа данных.

В проведенных экспериментах, по сути, не измерялись относительные деформации бетона (измерения на базе с длиной 500 мм, сопоставимой с длиной образцов, не позволяют получить зависимость в зоне перераспределения), в связи с чем предложенное аналитическое выражение для бетона вызывает сомнения.

9. Приводятся аналитические выражения (15—17) для определения средней ширины между трещинами и длины зоны перераспределения. Отсутствуют указания, каким образом вычисляется среднее расстояние между трещинами. Определение длины зоны перераспределения в формуле (16) с учетом выражения (17) для эмпирического коэффициента, являющегося множителем и содержащим другие эмпирические коэффициенты, как и применение данного параметра, не имеющего отношения к действительности (см. комментарий к п. 14 ниже), также вызывают сомнения.

10. Предлагается в инженерной методике приравнять среднее расстояние между трещинами и длину зоны перераспределения напряжений с арматуры на бетон, и на основе этого допущения формулы (15, 16) переписываются в формулы (18, 19).

Допущение принято произвольно и бездоказательно, с таким же успехом можно было принять половину длины зоны перераспределения для определения среднего расстояния между трещинами. Кроме того, допущение противоречит и опровергается результатами самого эксперимента, в образцах которого появилась только одна трещина в середине элемента, а вовсе не на конце зон перераспределения.

11. Для I (упругой) стадии работы контактного (околоарматурного) слоя бетона предлагается учитывать взаимные смещения арматуры и бетона на основе закона сцепления, т. е. до образования первой трещины в зоне перераспределения напряжений нарушается совместная работа арматуры и бетона, но не указывается, в какой именно момент или при каких напряжениях в арматуре начинает происходить такое нарушение.

12. Приводится краткое описание экспериментальных образцов из бетонных цилиндров диаметром 200 мм и длиной 1 м с центрально расположенной арматурой диаметром 20, 25, 36 мм, которая разделяется на две половины по длине для размещения тензорезисторов в устраиваемой в центре сечения квадратной полости.

Не приводится количество испытанных образов в каждой серии и каких диаметров в каждой марке бетона, что не позволяет проследить экспериментальные зависимости.

13. На рис. 9 [16] приводятся графики с результа-

тами измерений относительных деформаций арматуры для образца ∅20 А400 (μ_s = 0,01, R_{bt} = 2,7 МПа) в зависимости от нагрузки, при которых образуется одна трещина в середине образца при нагрузке 105 кН и максимальной нагрузке 120 кН.

В статье [13] приводится аналогичный график для образца ∅20 А400 (μ_s = 0,01) без указания прочности бетона при растяжении, но не более R_{bt} = 2,7 МПа, поскольку в табл. 2 данной статьи она является максимальной. Но при этом нагрузка, при которой возникает трещина, составляет уже 125 кН (на 20 кН больше), максимальная нагрузка — 130 кН, что не может не вызывать вопросов.

Дополнительные замечания к экспериментальной методике в статье [13]:

• при испытаниях, по сути, не варьировались коэффициент армирования, классы бетона, вид профиля арматуры;

• напряжения в арматуре ограничивались пределом пропорциональности и не оценивалось трещинообразование в пластической стадии работы стали;

• не проводилось измерение деформаций на поверхности бетона как в зонах перераспределения, так и в зоне между ними, что не позволяет получить полную картину НДС;

• сечение бетона и усилие трещинообразования практически соответствуют пределу пропорциональности стали, что не позволяет перенести данные результаты на широкий круг железобетонных конструкций;

• отсутствует информация о предельной растяжимости бетона в зависимости от его прочности и процента армирования;

• для арматуры класса А240 возникновение трещин не зафиксировано в связи с проскальзыванием арматуры.

14. Регистрация относительных деформаций бетона выполнялась индикаторами часового типа с ценой деления 0,01 мм, установленными на базе 500 мм.

Использованный способ не позволяет оценить изменение деформаций в зоне перераспределения и подтвердить характер кривых на представленных графиках.

На основе изложенных замечаний можно сделать следующие выводы:

• выражения получились громоздкими с множеством эмпирических коэффициентов и не содержащими такой важный параметр, как предельная растяжимость железобетона или бетона;

• сечение бетона, площадь арматуры и длина образцов должны быть подобраны таким образом, чтобы усилие в арматуре, соответствующее пределу текучести стали, было кратно большим усилия трещинообразования, как это и бывает в большинстве случаев для изгибаемых железобетонных конструкций для получения картины первичных и вторичных трещин, соответствующих разному уровню напряжений в арматуре;

• построение аналитических зависимостей на основе испытаний нескольких центрально растянутых образцов с минимальным количеством варьируемых параметров не оправданно для широкого круга железобетонных конструкций;

• результаты эксперимента не позволяют решать задачи трещиностойкости и не являются масштабируемыми.

Выводы

1. По результатам анализа работ [2—19] получены дополнительные аргументы, подтверждающие необходимость рассмотрения расстояния между трещинами и предельной растяжимости железобетона в качестве новых механических характеристик, которые возможно получить только экспериментально.

2. С учетом проведенных ранее испытаний центрально растянутых железобетонных элементов в работах [2—19] получен ряд важных уточнений для проведения эксперимента, предложенного в статье [23], и дополнительных различий между задачами, рассматриваемыми теориями сцепления и трещиностойкости.

3. Проведение новых экспериментальных исследований для определения расстояния между трещинами и предельной растяжимости железобетона является важной и актуальной задачей для развития деформационного критерия [23] и механики железобетонных балок с нормальными трещинами [22].

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. *Пекин Д. А.* Расстояние между трещинами – важная экспериментальная характеристика железобетона // Промышленное и гражданское строительство. 2025. № 7. С. 18–25. doi: 10.33622/0869-7019.2025.07.18-25
2. *Мурашев В. И.* Трещиноустойчивость, жесткость и прочность железобетона (Основы сопротивления железобетона). М., 1950. 268 с.
3. *Берг О. Я.* Исследование процесса трещинообразования в железобетонных элементах с арматурой периодического профиля. М., 1954. Вып. № 44. 24 с.
4. *Столяров Я. В.* Введение в теорию железобетона. М., Л.: Госстройиздат, 1941. 447 с.
5. *Холмянский М. М.* Контакт арматуры с бетоном. М. : Стройиздат, 1981. 184 с.

6. *Холмянский М. М.* Техническая теория сцепления арматуры с бетоном и ее применение // Бетон и железобетон. 1968. № 12. С. 10–13.
7. *Холмянский М. М.* Трещинообразование в центрально армированных призматических элементах при осевом растяжении // Труды ВНИИЖелезобетона. М. : Госстройиздат, 1961. Вып. 5. С. 15–24.
8. *Драган А. В.* Экспериментально-теоретическое изучение напряжений сцепления арматуры серповидного профиля при статическом нагружении // Сб. конкурсных работ студентов и аспирантов. Брест : БрГТУ, 2005. С. 133–136.
9. *Драган А. В.* Методика экспериментального определения напряжений сцепления для арматуры серповидного профиля при статическом нагружении. Там же. С. 136–140.
10. *Драган А. В.* Экспериментальное исследование анкерующей способности ненапрягаемой арматуры серповидного профиля при статическом нагружении // Вестник Брестского государственного технического университета. Серия: Строительство и архитектура. 2006. № 1. С. 64–69.
11. *Драган А. В.* О выборе методики исследования сцепления стальной арматуры с бетоном // Вестник Брестского государственного технического университета. Серия: Строительство и архитектура. 2007. № 1. С. 12–17.
12. *Драган А. В.* Аналитическая модель трещинообразования растянутых железобетонных элементов // Вестник Брестского государственного технического университета. Серия: Строительство и архитектура. 2008. № 1. С. 29–35.
13. *Драган А. В.* Методика экспериментального исследования трещинообразования железобетонных элементов. Там же. С. 35–38.
14. *Тур В. В., Драган А. В.* Деформационный расчет ширины раскрытия трещин в центрально растянутых железобетонных элементах // Сборник тр. XV междунар. науч.-методич. семинара. Новополоцк : ПГУ, 2008. С. 21–26.
15. *Тур В. В., Драган А. В.* Методы оценки ширины раскрытия трещин, нормальных к продольной оси железобетонного элемента // Перспективы развития новых технологий в строительстве и подготовке инженерных кадров Республики Беларусь : сб. тр. Брест : БрГТУ, 2009. Ч. 1. С. 16–21.
16. *Тур В. В., Драган А. В.* К расчету ширины раскрытия трещин в железобетонных элементах при осевых растягивающих усилиях // Строительная наука и техника. 2009. № 1(22). С. 40–53.
17. *Тур В. В., Драган А. В.* Методика расчета трещиностойкости железобетонных элементов на основании теории «bond-slip» // Budownictwo o zoptymalizowanym potencjale energetycznym : praca zbiorowa. Częstochowa : Wydawnictwo Politechniki Częstochowskiej, 2010. С. 336–345.
18. *Драган А. В.* К вопросу определения параметров трещиностойкости железобетонных элементов // Вестник Брестского государственного технического университета. Серия: Строительство и архитектура. 2010. № 1. С. 90–95.
19. *Драган А. В., Тур В. В.* Моделирование сопротивления железобетонного элемента действию растягивающей нагрузки // Вестник Брестского государственного технического университета. Серия: Строительство и архитектура. 2012. № 1. С. 51–58.
20. *Пекин Д. А.* Совершенствование методики расчета базового расстояния между нормальными трещинами в изгибаемых железобетонных элементах // Промышленное и гражданское строительство. 2022. № 12. С. 10–15. doi: 10.33622/0869-7019.2022.12.10-15
21. *Пекин Д. А.* Стадии напряженно-деформированного состояния железобетонных балок с нормальными трещинами при плоском изгибе // Промышленное и гражданское строительство. 2024. № 9. С. 59–67. doi: 10.33622/0869-7019.2024.09.59-67
22. *Пекин Д. А.* Механика железобетонных балок с нормальными трещинами при плоском изгибе // Промышленное и гражданское строительство. 2024. № 10. С. 12–23. doi: 10.33622/0869-7019.2024.10.12-23
23. *Пекин Д. А.* Деформационный критерий образования нормальных трещин в железобетонных балках при плоском изгибе // Железобетонные конструкции. 2024. Т. 8. № 4. С. 33–43.
24. *Байков В. Н.* Сцепление арматуры с бетоном в конструкциях // Бетон и железобетон. 1968. № 12. С. 13–16.
25. *Оатул А. А.* Предложения к построению теории сцепления арматуры с бетоном // Бетон и железобетон, 1968. № 12. С. 8–10.

REFERENCES

1. Pekin D. A. The distance between normal cracks – important experimental characteristic of reinforced concrete. *Promyshlennoe i grazhdanskoe stroitel'stvo*, 2025, no. 7, pp. 18–25. (In Russ.). doi: 10.33622/0869-7019.2025.07.18-25
2. Murashev V. I. *Treshchinoustojchivost', zhestkost' i prochnost' zhelezobetona (Osnovy soprotivleniya zhelezobetona)* [Crack resistance, rigidity and strength of reinforced concrete (Fundamentals of resistance of reinforced concrete)]. Moscow, 1950. 268 p. (In Russ.).
3. Berg O. Ya. *Issledovanie processa treshchinoobrazovaniya v zhelezobetonnyh elementah s armaturoj periodicheskogo profilya* [Investigation of the cracking process in reinforced concrete elements with reinforcement of a periodic profile]. Moscow, 1954, iss. 44. 24 p. (In Russ.).
4. Stolyarov Ya. V. *Vvedenie v teoriyu zhelezobetona* [Introduction to the theory of reinforced concrete]. Moscow, Leningrad, Gosstrojizdat Publ., 1941. 447 p. (In Russ.).
5. Holmyanskij M. M. *Kontakt armatury s betonom* [Rebar contact with concrete]. Moscow, Strojizdat Publ., 1981. 184 p. (In Russ.).

6. Holmyanskij M. M. The technical theory of reinforcement bonding to concrete and its application. *Beton i zhelezobeton*, 1968, no. 12, pp. 10–13. (In Russ.).
7. Holmyanskij M. M. Cracking in centrally reinforced prismatic elements under axial tension. *Trudy VNIIZHelezobetona* [Proc. of VNIIZhelezobeton]. Moscow, Gosstrojizdat Publ., 1961, iss. 5, pp. 15–24. (In Russ.).
8. Dragan A. V. Experimental and theoretical study of coupling stresses of crescent-shaped reinforcement under static loading. *Sb. konkursnyh rabot studentov i aspirantov* [Collection of competitive works of students and postgraduates]. Brest, BrGTU Publ., 2005, pp. 133–136. (In Russ).
9. Dragan A. V. Method of experimental determination of coupling stresses for crescent-shaped reinforcement under static loading. *Ibid*, pp. 136–140. (In Russ.).
10. Dragan A. V. Experimental study of the anchoring ability of non-stressed crescent-shaped reinforcement under static loading. *Vestnik Brestskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. Seriya: Stroitel'stvo i arhitektura*, 2006, no. 1, pp. 64–69. (In Russ.).
11. Dragan A. V. On the choice of a method for studying the adhesion of steel reinforcement to concrete. *Vestnik Brestskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. Seriya: Stroitel'stvo i arhitektura*, 2007, no. 1, pp. 12–17. (In Russ.).
12. Dragan A. V. Analytical model of cracking of stretched reinforced concrete elements. *Vestnik Brestskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. Seriya: Stroitel'stvo i arhitektura*, 2008, no. 1, pp. 29–35. (In Russ.).
13. Dragan A. V. The method of experimental investigation of cracking of reinforced concrete elements. *Ibid*, pp. 35–38. (In Russ.).
14. Tur V. V., Dragan A. V. Deformation calculation of the crack opening width in centrally stretched reinforced concrete elements. *Sbornik tr. XV mezhdunarodnogo nauchno-metodicheskogo seminara* [Proc. of the XV International Scientific and Methodological seminar]. Novopolock, PGU Publ., 2008, pp. 21–26. (In Russ.).
15. Tur V. V., Dragan A. V. Methods for estimating the crack opening width normal to the longitudinal axis of a reinforced concrete element. *Perspektivy razvitiya novyh tekhnologij v stroitel'stve i podgotovke inzhenernyh kadrov Respubliki Belarus'. Sb. tr.* [Prospects for the development of new technologies in construction and training of engineering personnel of the Republic of Belarus. Collection of works]. Brest, BrGTU Publ., 2009, vol. 1, pp. 16–21. (In Russ.).
16. Tur V. V., Dragan A. V. To calculate the opening width of cracks in reinforced concrete elements under axial tensile forces. *Stroitel'naya nauka i tekhnika*, 2009, no. 1(22), pp. 40–53. (In Russ.).
17. Tur V. V., Dragan A. V. The method of calculating the crack resistance of reinforced concrete elements based on the theory of "bond-slip". *Budownictwo o zoptymalizowanym potencjale energetycznym. Praca zbiorowa*. Częstochowa, Wydawnictwo Politechniki Częstochowskiej, 2010, pp. 336–345. (In Russ.).
18. Dragan A. V. On the issue of determining the parameters of crack resistance of reinforced concrete elements. *Vestnik Brestskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. Seriya: Stroitel'stvo i arhitektura*, 2010, no. 1, pp. 90–95. (In Russ.).
19. Dragan A. V., Tur V. V. Modeling of the resistance of a reinforced concrete element to the action of a tensile load. *Vestnik Brestskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. Seriya: Stroitel'stvo i arhitektura*, 2012, no. 1, pp. 51–58. (In Russ.).
20. Pekin D. A. Improving the methodology for calculating the base distance between normal cracks in bent reinforced concrete elements. *Promyshlennoe i grazhdanskoe stroitel'stvo*, 2022, no. 12, pp. 10–15. (In Russ.). doi: 10.33622/0869-7019.2022.12.10-15
21. Pekin D. A. Stages of stress-strain state of reinforced concrete beams with normal cracks during flat bending. *Promyshlennoe i grazhdanskoe stroitel'stvo*, 2024, no. 9, pp. 59–67. (In Russ.). doi: 10.33622/0869-7019.2024.09.59-67
22. Pekin D. A. Mechanics of reinforced concrete beams with normal cracks during flat bending. *Promyshlennoe i grazhdanskoe stroitel'stvo*, 2024, no. 10, pp. 12–23. (In Russ.). doi: 10.33622/0869-7019.2024.10.12-23
23. Pekin D. A. Deformation criterion for the formation of normal cracks in reinforced concrete beams during flat bending. *Zhelezobetonnye konstrukcii*, 2024, vol. 8, no. 4, pp. 33–43. (In Russ.).
24. Bajkov V. N. Reinforcement bonding to concrete in structures. *Beton i zhelezobeton*, 1968, no. 12, pp. 13–16. (In Russ.).
25. Oatul A. A. Proposals for the construction of a theory of reinforcement bonding to concrete. *Beton i zhelezobeton*, 1968, no. 12, pp. 8–10. (In Russ.).

ЖУРНАЛ «ПРОМЫШЛЕННОЕ И ГРАЖДАНСКОЕ СТРОИТЕЛЬСТВО» ИНДЕКСИРУЮТ:

НАУЧНАЯ ЭЛЕКТРОННАЯ БИБЛИОТЕКА eLIBRARY.RU

Russian Science Citation Index (RSCI) на платформе Web of Science

ULRICHSWEB™ GLOBAL SERIALS DIRECTORY

САЙТ ЖУРНАЛА «ПРОМЫШЛЕННОЕ И ГРАЖДАНСКОЕ СТРОИТЕЛЬСТВО»: **www.pgs1923.ru**