



УДК 691

DOI: 10.22227/2949-1622.2023.4.20-31

НАУЧНАЯ СТАТЬЯ/ RESEARCH ARTICLE

Развитие метода расчета железобетонных конструкций по образованию и раскрытию нормальных трещин

Н.Н. Трекин^{1*}, Э.Н. Кодыш², С.Г. Парфенов³, К.Р. Андриян²

¹ Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет, Москва, Российская Федерация

² АО «Центральный научно-исследовательский и проектно-экспериментальный институт промышленных зданий и сооружений – ЦНИИПромзданий», Москва, Российская Федерация

³ Брянский государственный инженерно-технологический университет, Брянск, Российская Федерация

*otks@narod.ru

Ключевые слова: нормальные трещины, трещиностойкость, ширина раскрытия трещин, железобетон, арматура

История статьи

Поступила в редакцию: 20.07.2023

Доработана: 30.07.2023

Принята к публикации: 02.08.2023

Аннотация. В настоящей работе представлена история развития метода расчета трещиностойкости железобетонных элементов по советским и современным нормам проектирования, в основу которого легли работы советских и зарубежных ученых, таких как: А.Ф. Лолейт, В.И. Мурашев, А.А. Гвоздев, С.А. Дмитриев, А. Clark, J. Monier и др. Также, в статье рассмотрены актуализированные на сегодняшний день методы расчета по образованию и раскрытию нормальных трещин по отечественным и зарубежным нормам.

Для цитирования

Трекин Н.Н., Кодыш Э.Н., Парфенов С.Г., Андриян К.Р. Развитие метода расчета железобетонных конструкций по образованию и раскрытию нормальных трещин // Железобетонные конструкции. 2023. Т. 4. № 4. С. 20–31.

Development of the Method for Calculation of Reinforced Concrete Structures on the Formation and Opening of Normal Cracks

Nikolay N. Trekin^{1*}, Emil N. Kodysh², Sergey G. Parfenov³, Konstantin R. Andrian²

¹ Moscow State University of Civil Engineering (National Research University) (MGSU), Moscow, Russian Federation

² JSC Central Research and Design Experimental Institute (JSC Tsniipromzdaniy), Moscow, Russian Federation

³ Bryansk State Engineering and Technology University, Bryansk, Russian Federation

*otks@narod.ru

Николай Николаевич Трекин, доктор технических наук, профессор кафедры «Железобетонные и каменные конструкции», Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет (НИУ МГСУ), 129337, г. Москва, Ярославское шоссе, д. 26; eLIBRARY SPIN-код: 4721-2525, Scopus: 6507199486, ResearcherID: AFY-8097-2022, ORCID: 0000-0002-3007-9499, E-mail: otks@yandex.ru.

Эмиль Наумович Кодыш, доктор технических наук, профессор, главный научный сотрудник, АО «Центральный научно-исследовательский и проектно-экспериментальный институт промышленных зданий и сооружений – ЦНИИПромзданий», 127238 Москва, Дмитровское шоссе, д.46, корп. 2; eLIBRARY SPIN-код: 1559-5834, Scopus: 6506549600, ORCID: 0000-0002-9087-1250, E-mail: otks@yandex.ru.

Сергей Григорьевич Парфенов, кандидат технических наук, профессор, ФГБОУ ВО «Брянский государственный инженерно-технологический университет», 241037, г. Брянск, пр. Станке Димитрова, д. 3, eLIBRARY SPIN-код: 8401-0045, Scopus: 57205214215, E-mail: mail@bgita.ru

Андриян Константин Рашидович, инженер, Акционерное общество «Центральный научно-исследовательский и проектно-экспериментальный институт (АО ЦНИИПромзданий)», 127238, г. Москва, Дмитровское шоссе, д. 46/2, E-mail: andryankr@mail.ru.

© Трекин Н.Н., Кодыш Э.Н., Парфенов С.Г., Андриян К.Р., 2023



This work is licensed under a [Creative Commons Attribution 4.0 International License](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/)
<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>

Keywords: normal cracks, crack resistance, crack width, reinforced concrete, reinforcement.

Article history

Received: 20.07.2023

Revised: 30.07.2023

Accepted: 02.08.2023

For citation

Trekin N.N., Kodysh E.N., Parfenov S.G., Andrian K.R. Development of the Method for Calculation of Reinforced Concrete Structures on the Formation and Opening of Normal Cracks. *Reinforced concrete structures*. 2023;4(4):20–31.

Abstract. This paper presents the history of the development of the method for calculating the crack resistance of reinforced concrete elements according to Soviet and modern design standards, which was based on the work of the Soviet and foreign scientists, such as: A.F. Loleit, V.I. Murashev, A.A. Gvozdev, S.A. Dmitriev, A. Clark, J. Monier and others. Also, the article discusses the currently updated calculation methods for the formation and opening of normal cracks according to domestic and foreign standards.

ВВЕДЕНИЕ

Основные этапы развития нормативной базы в строительстве относятся к советскому периоду нашей истории. В 1927 – 1930 годах был издан нормативный сборник - «Свод производственных строительных норм». Дальнейшее совершенствование этого нормативного документа было осуществлено введением в 1931 г. Единых норм выработки и расценок на строительные работы, содержащие нормативные требования, соответствующие уровню развития строительного производства того времени.

С 1930 по 1940 гг. создавались ведомственные, достаточно разрозненные нормативы по проектированию железобетонных конструкций и только в послевоенное время активизировалась деятельность по созданию отечественного единого нормативного документа.

В 1932 году так называемый «классический» метод расчета железобетонных конструкций в упругой постановке был подвергнут острой критике проф. Лолейтом А.Ф., а взамен предложен новый метод, базирующийся на стадии предельной по несущей способности – стадии разрушения. Исследования, проведенные под руководством Гвоздева А.А., позволили в 1938 году разработать метод расчета по разрушающим усилиям и принять его в качестве основы в документе «Нормы и технические условия проектирования железобетонных конструкций» (ОСТ 9003-38).

МЕТОДЫ

Расчет по образованию и раскрытию трещин внедрили в нормативные документы после 40-х годов. Методика расчета базировалась на работах Мурашева В.И. [1]. Впоследствии, в 1955 году были выпущены «Нормы и технические условия проектирования бетонных и железобетонных конструкций (НиТУ 123-55)» [2], в котором добавлены указания о необходимости проверки железобетонной конструкции на образование и раскрытие трещин.

Расчет по образованию трещин растянутых элементов по [2] разрешается производить по формуле (1):

$$N^H \leq mR_p F_\sigma \left(1 + 2n_1 \frac{F_a}{F_\sigma} \right), \quad (1)$$

Nikolay N. Trekin, Doctor of Technical Sciences, Professor, National Research Moscow State University of Civil Engineering "NRU MGSU", Yaroslavskoe Highway house 26, Moscow, 129337, e-mail: nik-trekin@yandex.ru, eLIBRARY SPIN-код: 4721-2525, Scopus: 6507199486, ResearcherID: AFY-8097-2022, ORCID: 0000-0002-3007-9499, E-mail: otks@yandex.ru.

Emil N. Kodysh, Doctor of Technical Sciences, Professor, Joint Stock Company «Central Research and Design Experimental Institute (JSC Tsnipromzdaniy)», Dmitrovskoe sh., 46/2, Moscow, 127238, e-mail: otks@yandex.ru, eLIBRARY SPIN-код: 1559-5834, Scopus: 6506549600, ORCID: 0000-0002-9087-1250, E-mail: otks@yandex.ru.

Sergey G. Parfenov, Candidate of Technical Sciences, Professor, Bryansk State Engineering and Technology University, 241037, Bryansk, Stanke Dimitrova Ave., 3, e-mail: mail@bgita.ru, eLIBRARY SPIN-код: 8401-0045, Scopus: 57205214215, E-mail: mail@bgita.ru.

Konstantin R. Andrian, Engineer, Joint Stock Company «Central Research and Design Experimental Institute (JSC Tsnipromzdaniy)», Dmitrovskoe sh., 46/2, Moscow, 127238, E-mail: andryankr@mail.ru.

где F_b – площадь сечения бетона; F_a – площадь сечения продольной арматуры; R_p – расчетный предел прочности бетона при растяжении; m – коэффициент условий работы; N^H – продольная сила от нормативной нагрузки; n_1 – коэффициент, определяется по формуле (2):

$$n_1 = \frac{E_a}{E_b}, \quad (2)$$

где E_a и E_b – расчетный модуль упругости арматуры и бетона соответственно.

В этом документе появилось и значение максимально допустимой ширины раскрытия трещин — 0,2 мм. Формула (3) для расчета ширины раскрытия трещин a_t на уровне центра тяжести наиболее растянутой арматуры в центрально растянутых и изгибаемых элементах прямоугольного сечения в этом нормативном документе:

$$a_t \leq \psi_a (\sigma_a / E_a) l_t, \quad (3)$$

где ψ_a — коэффициент, учитывающий работу растянутого бетона между трещинами, принимаемый не более 1; σ_a — напряжение в растянутой арматуре, равное: при растяжении N_H/F_a ; при изгибе M_H/W ; l_t — расстояние между трещинами.

Общий метод расчета по образованию трещин в дальнейшем был значительно усовершенствован А.А. Гвоздевым и С.А. Дмитриевым [3], предложившими брать момент внутренних растягивающих усилий в сечениях, соответствующих моменту появления трещин, не относительно точки приложения равнодействующих усилий в сжатой зоне, а использовать ядровую точку, наиболее удаленную от растянутой зоны, устанавливаемую как для упругих материалов в соответствии со схемой, показанной на рисунке 1.

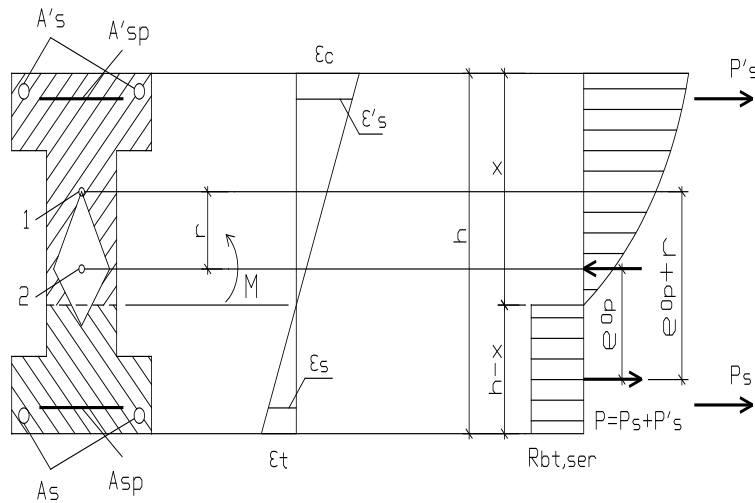


Рисунок 1 – Расчетная схема для двутаврового сечения с предварительным напряжением арматуры для определения M_{crc} по методу ядровых моментов: 1 – верхняя ядровая точка; 2 – центр тяжести сечения

Figure 1 – Calculation scheme for an I-section with prestressing reinforcement to determine M_{crc} using the method of core moments: 1 - top core point; 2 - the center of gravity of the section

В СНиП II-B.1-62 [4] общая формула расчета ширины раскрытия трещин нормальных к продольной оси элемента не изменилась, однако теперь эта формула могла использоваться не только для центрально растянутых и изгибаемых элементов, но и для внецентренно растянутых при $e_0 > 0,8h_0$ и внецентренно сжатых элементов. Для новых видов напряженных состояний были добавлены формулы для расчета коэффициента ψ_a , напряжений в арматуре σ_a и расстояния между трещинами l_t . В этот нормативный документ также добавили указания для

расчета ширины раскрытия трещин при многократно повторяющейся нагрузке и для предварительно напряженных элементов.

Многочисленные эксперименты, проведенные после выхода СНиП II- В.1-62 [4], выявили большой разброс ширины раскрытия трещин, зависящий от многих факторов. В 1970 году был создан новый нормативный документ для расчета и проектирования бетонных и железобетонных конструкций СНиП II-21-75 «Бетонные и железобетонные конструкции. Нормы проектирования» [5]. Этот документ явился результатом работ многочисленных исследований и дальнейшего совершенствования методики расчета и проектирования железобетонных конструкций, появления новых видов бетона и арматуры.

Расчет изгибаемых, внецентренно-сжатых, а также внецентренно-растянутых элементов по образованию трещин производится из условия (4):

$$M_{\epsilon}^{\text{я}} \leq M_{\text{т}}, \quad (4)$$

где $M_{\text{в}}^{\text{я}}$ – момент внешних сил, расположенных по одну сторону от рассматриваемого сечения, относительно оси, параллельной нулевой линии и проходящей через ядровую точку, наиболее удаленную от растянутой зоны, трещинообразование которой проверяется;

$M_{\text{т}}$ – момент, воспринимаемый сечением, нормальным к продольной оси элемента, при образовании трещин и определяемый по формуле (5):

$$M_{\text{т}} = R_{\text{пл}} W_{\text{т}} \pm M_{\text{об}}^{\text{я}}, \quad (5)$$

где $M_{\text{об}}^{\text{я}}$ – момент усилия N_0 относительно той же оси, что и для определения $M_{\text{в}}^{\text{я}}$; $R_{\text{пл}}$ – расчетное сопротивление бетона осевому растяжению для предельных состояний второй группы; $W_{\text{т}}$ – момент сопротивления приведенного сечения для крайнего растянутого волокна с учетом неупругих деформаций растянутого бетона. Определяется в предположении отсутствия продольной силы N и усилия предварительного обжатия N_0 по формуле (6):

$$W_{\text{т}} = \frac{2(I_{\text{б.о}} + nI_{\text{а.о}} + nI'_{\text{а.о}})}{h - x} + S_{\text{б.р.}}, \quad (6)$$

где $I_{\text{б.о}}$ – момент инерции площади сечения сжатой зоны бетона относительно нулевой линии; $I_{\text{а.о}}$ и $I'_{\text{а.о}}$ – моменты инерции площадей сечения соответственно растянутой и сжатой арматуры относительно нулевой линии; $S_{\text{б.р.}}$ – статический момент площади сечения растянутой зоны бетона относительно нулевой линии; h – высота сечения; x – высота сжатой зоны бетона.

В вышедшем СНиП II-21-75 [5], при расчете ширины раскрытия трещин вместо используемой ранее была добавлена новая эмпирическая формула, которая учитывала такие факторы как: вид напряженного состояния элемента (изгиб, сжатие или растяжение), длительность действия нагрузки, вид продольной арматуры и растягивающее напряжение в ней, коэффициент армирования, отнесенный к прямоугольной части сечения и диаметр арматуры. Кроме того, приведены дополнительные коэффициенты, используемые для определения ширины раскрытия трещин при расположении арматуры в несколько рядов по высоте сечения.

Формула (7) для определения средней ширины раскрытия трещин, нормальных к продольной оси элемента, на уровне центра тяжести наиболее растянутой арматуры, по СНиП II-21-75 [5]:

$$a_{\text{т}} = k \cdot k_{\text{с}} \cdot c_{\text{д}} \cdot \eta \cdot (\sigma_{\text{а}} / E_{\text{а}}) \cdot 20 \cdot (3,5 - 100\mu) \cdot d^{1/3} \quad (7)$$

где k — коэффициент, учитывающий возрастание изменчивости ширины раскрытия трещин при растяжении, в отличие от изгиба или сжатия. При изгибе и сжатии он равен — 1, при растяжении — 1,2;

k_c — коэффициент, учитывающий влияние толщины защитного слоя бетона со стороны арматуры;

c_d — коэффициент, учитывающий длительность действия нагрузки и принимаемый равным: при кратковременном действии нагрузки — 1; при длительном действии нагрузки, а также при действии многократно повторяющейся нагрузки (для конструкций, подлежащих расчету на выносливость) — 1,5. Было принято среднее значение из полученных в экспериментах (1,2...1,8);

η — коэффициент, зависящий от вида продольной растянутой арматуры. По результатам многочисленных экспериментов было установлено, что применение арматуры периодического профиля позволяет уменьшить ширину раскрытия трещин в 1,2...1,5 раза по сравнению с гладкой арматурой;

σ_a — напряжение в стержнях крайнего ряда растянутой арматуры;

μ — коэффициент армирования сечения, принимаемый равным отношению площади растянутой арматуры к полезной площади сечения бетона без учета сжатых свесов полков ($\mu = F_a/bh_0$), но не более 0,02;

d — диаметр растянутой арматуры, мм.

СНиП II-21-75 просуществовал не более 10 лет и ускорение темпов развития прогресса в строительстве стали причиной его дальнейшего совершенствования, которое воплотилось в СНиП 2.03.01-84* [6]. В связи с развитием международных связей возникла необходимость перехода к международным единицам измерений физических величин, а также единым буквенным обозначениям. Накопленный огромный опыт в производстве бетона потребовал введения повышенных требований к контролю прочности бетона, а именно замене марки бетона на его класс, с обеспеченностью 0,95.

Расчет изгибаемых, внецентренно-сжатых, а также внецентренно-растянутых железобетонных элементов по образованию нормальных трещин по [6] производится из условия (8):

$$M_r \leq M_{crc}, \quad (8)$$

где M_r — момент внешних сил, расположенных по одну сторону от рассматриваемого сечения, относительно оси, параллельной нулевой линии и проходящей через ядровую точку, наиболее удаленную от растянутой зоны, трещинообразование которой проверяется; M_{crc} — момент, воспринимаемый сечением, нормальным к продольной оси элемента при образовании трещин, определяется по формуле (9).

$$M_{crc} = R_{bt,ser} W_{pl} \pm M_{rp}, \quad (9)$$

где $R_{bt,ser}$ — расчетное сопротивление бетона осевому растяжению для предельного состояния второй группы; M_{rp} — момент усилия P относительно той же оси, что и для определения M_r .

Момент сопротивления приведенного сечения для крайнего растянутого волокна W_{pl} (с учетом неупругих деформаций растянутого бетона) при известном значении W_{red} допускается определять по формуле (10) как:

$$W_{pl} = \gamma W_{red}, \quad (10)$$

где γ — коэффициент, учитывающий неупругие деформации бетона растянутой зоны, определяется в зависимости от типа сечения; W_{red} — момент сопротивления приведенного сечения элемента для крайнего растянутого волокна, определяемый как для упругого материала.

Ширину раскрытия трещин, нормальных к продольной оси элемента, a_{crc} , следует определять по формуле (11):

$$a_{crc} = \delta \varphi_1 \eta \frac{\sigma_s}{E_s} 20(3,5 - 100\mu)^{\sqrt[3]{d}}, \quad (11)$$

где δ – коэффициент, учитывающий напряженное состояние; φ_1 – коэффициент, учитывающий характер нагружения; E_s – модуль упругости стали; σ_s – напряжение в стержнях крайнего ряда растянутой арматуры; μ и d как в формуле (7).

В течение 20 лет научная и инженерная общественность при проектировании железобетонных конструкций пользовалась СНиП 2.03.01-84* [6], но требования гармонизации норм проектирования с зарубежными государствами, например, Еврокодом [7], вызвало необходимость дальнейшего совершенствования методики проектирования железобетонных конструкций.

В 2003 году вышел в свет нормативный документ СНиП 52-01-2003 «Бетонные и железобетонные конструкции. Основные положения» [8], который был детализирован в СП 52-101-2003 «Бетонные и железобетонные конструкции без предварительного напряжения арматуры» и СП 52-102-2003 «Предварительно напряженные железобетонные конструкции», а в 2012 г. [9] и в 2018г. – СП 63.13330.2018 «Бетонные и железобетонные конструкции. Основные положения» [10], в которых расчет по нормальным сечениям для двух групп предельных состояний выполнялся на основе диаграмм $\sigma - \varepsilon$ и гипотезы плоских сечений.

В этих документах формула расчета по образованию трещин (определении момента трещинообразования) не претерпела изменений по сравнению с первыми изданиями нормативных документов, предназначенных для проектирования железобетонных конструкций. Однако значение коэффициента γ при определении W_{pl} стало единым для различных типов сечений железобетонных элементов и составляет 1,3.

Окончательный вид формулы расчета ширины раскрытия трещин (12), нормальных к продольной оси элемента, выглядит следующим образом:

$$a_{crc} = \varphi_1 \varphi_2 \varphi_3 \psi_s \frac{\sigma_s}{E_s} l_s, \quad (12)$$

где l_s – базовое (без учета влияния вида поверхности арматуры) расстояние между смежными нормальными трещинами; ψ_s – коэффициент, учитывающий неравномерное распределение относительных деформаций растянутой арматуры между трещинами; допускается принимать $\psi_s = 1$; φ_1 – коэффициент, учитывающий продолжительность действия нагрузки и принимаемый равным: 1,0 – при непродолжительном действии нагрузки; 1,4 – при продолжительном действии нагрузки; φ_2 – коэффициент, учитывающий профиль продольной арматуры и принимаемый равным: 0,5 – для арматуры периодического профиля (классов А400, А500, В500); 0,8 – для гладкой арматуры (класса А240); φ_3 – коэффициент, учитывающий характер нагружения и принимаемый равным: 1,0 – для изгибаемых и внецентренно сжатых элементов; 1,2 – для растянутых элементов.

Определение напряжения в арматуре производят на основе нелинейной деформационной модели при двухлинейной диаграмме для сжатого бетона, учитывая непродолжительность действия нагрузок и нормативное сопротивление бетона сжатию. При этом сопротивление бетона растянутой зоны не учитывается.

Еврокод 2 [7] устанавливает основные правила проектирования железобетонных конструкций, выполненных из бетона на тяжелом и легком заполнителях, и, дополнительно, — особые правила для зданий.

В Eurocode-2 [7] образование трещин определяется конструктивно из условия (13)

$$A_{s,min} \sigma_s = k_c k_{f,ct,eff} A_{ct}, \quad (13)$$

где $A_{s,min}$ – площадь растянутой арматуры; A_{ct} – площадь растянутой зоны бетона; σ_s – максимальные напряжения в арматуре в момент образования трещины; $f_{ct,eff}$ – прочность бетона на растяжение в стадии образования первой трещины; k – коэффициент стеснения, который зависит от геометрии исследуемых участков сечения; k_c – коэффициент распределения напряжений в сечении непосредственно перед образованием трещин и уровень армирования.

Раскрытие трещин w_k определяется по формуле (14):

$$w_k = S_{r,max} (\varepsilon_{sm} - \varepsilon_{cm}), \quad (14)$$

где $S_{r,max}$ – расстояние между трещинами; ε_{sm} – средняя деформация в растянутой арматуре на рассматриваемом участке; ε_{cm} – средняя деформация в бетоне на участке между трещинами; ε_{sm} – средние относительные деформации арматуры при определяющем сочетании воздействий.

$$\varepsilon_{sm} - \varepsilon_{cm} = \frac{\sigma_s - k_t \cdot \frac{f_{ct,eff}}{\rho_{p,eff}} (1 + \alpha_e \rho_{p,eff})}{E_s} \geq 0,6 \cdot \frac{\sigma_s}{E_s}, \quad (15)$$

где k_t – коэффициент, зависящий от длительности действия нагрузки; $\rho_{p,eff}$ – коэффициент, определяемый по формуле (16):

$$\rho_{p,eff} = \frac{A_s + \xi_1^2 A'_p}{A_{c,eff}}, \quad (16)$$

где $A_{c,eff}$ – эффективная площадь растянутого бетона, окружающего арматуру или напрягающие элементы, принимается как меньшее значение из $2,5(h-d)$; $(h-x)/3$; $h/2$;

A'_p – площадь сечения предварительно напрягаемых арматурных стержней; ξ'_1 – поправочный коэффициент прочности сцепления, учитывающий различные диаметры напрягаемой и арматурной стали.

В Кодекс-образец СЕВ/FIP [11] в основу образования трещин положена первая стадия напряженно-деформированного состояния. Этот расчет должен показать, что растяжение в сечении не возникает.

Ширина раскрытия трещин определяется по выражению:

$$w_k = 1,7 w_m, \quad (17)$$

где w_m – средняя ширина раскрытия трещин, определяемая при среднем удлинении арматуры ε_{sm} на участке длиной, равной среднему расстоянию между трещинами S_{rm} , определяемая как:

$$w_m = \varepsilon_{sm} S_{rm}, \quad (18)$$

Значение S_{rm} зависит от процента армирования сечения, толщины защитного слоя, расстояния между стержнями, диаметра арматуры, сцепления арматуры с бетоном.

$$S_{rm} = 2(C + S/10) + k_1 k_2 \varnothing / p_r, \quad (19)$$

где C – толщина защитного слоя бетона; S – расстояние между стержнями; $\varnothing$ – диаметр арматуры; k_1 – коэффициент, характеризующий качество сцепления арматуры с бетоном ($k_1 = 0,4$ для стержней периодического профиля; $0,8$ – для гладких стержней); k_2 – коэффициент, учи-

тывающий влияние формы эпюры напряжений ($k_2 = 0,125$ при изгибе; $k_2 = 0,25$ при центральном растяжении); p_r – коэффициент, определяемый по формуле (16).

Деформации ε_{sm} зависят от длительности приложения нагрузок и их повторяемости, характера сцепления арматуры с бетоном, работы бетона между трещинами.

$$\varepsilon_{sm} = \frac{\sigma_s}{E_s} \left[1 - \beta_1 \beta_2 \left(\frac{\sigma_{sr}}{\sigma_s} \right)^2 \right] \leq 0,4 \frac{\sigma_s}{E_s}, \quad (20)$$

где σ_{sr} – напряжение в растянутой арматуре, соответствующее моменту, когда напряжение в бетоне достигает предельного значения; β_1 – коэффициент, характеризующий качество сцепления арматуры с бетоном ($\beta_1 = 1/2,5k_1$); β_2 – коэффициент, отражающий влияние длительности или повторности приложения нагрузок ($\beta_2 = 1$ при первом загрузении; $\beta_2 = 0,5$ при длительном действии нагрузок).

До перехода к общеевропейским нормам существовали национальные нормативы. Так, например, в Германии первые нормы расчета железобетонных конструкций (основанные на допускаемых напряжениях) появились в 1904 г., затем в 1907 и 1916 гг. они были усовершенствованы и стали базой для создания норм DIN в 1925 г., которые подвергались переработке в течение 1932-1978 гг. семь раз. Нормы DIN 1045, появившиеся в 1978 г. и перевыпущенные в 2008 г. [12], пригодны для расчета и проектирования всех конструкций, выполняемых из железобетона.

В нормах ФРГ [12] трещиностойкость считается обеспеченной, если растягивающие напряжения не превышают:

- при жестких требованиях к непроницаемости бетона:

$$\sigma_v \leq 0,35 \sqrt[3]{\beta_{wN}^2}, \quad (21)$$

- в остальных случаях:

$$\sigma_v \leq 0,46 \sqrt[3]{\beta_{wN}^2}, \quad (22)$$

где β_{wN} – нормативное сопротивление бетона сжатию.

Раскрытие трещин проверяется, как правило, в сечениях с максимальным изгибающим моментом. Раскрытие трещины считается допустимой, если выполняются следующие требования (23-25):

- содержание арматуры (в %) в растянутой части сечения;

$$\mu_z = 100 \frac{A_s}{A_{bz}} \leq 3\%, \quad (23)$$

- содержание арматуры для растянутой зоны прямоугольного сечения:

$$\mu_z = \mu(1 - k_x), \quad (24)$$

где $\mu = 100A_s/bh$, k_x – коэффициент по [12];

- для максимального диаметра арматуры должно выполняться требование:

$$d_s \leq r \mu_z \frac{10^4}{\sigma_{sd}^2}, \quad (25)$$

где r – коэффициент сцепления арматуры с бетоном, принимаемый в пределах 25-120 в зависимости от наличия рифления и анкерующих устройств; σ_{sd} – напряжение в растянутой в арматуре от действия нагрузки, принимаемой равной 0,7 от суммы постоянных и временных нормативных нагрузок, которая должна быть не менее постоянной ее составляющей.

В США последовательно использовались три метода расчета железобетонных конструкций. До 1956 г. был развит метод расчета по допускаемым напряжениям. С 1956 г. начали частично применять расчет по разрушающим усилиям (ACI 318-56), хотя основным еще оставался расчет по допускаемым напряжениям. В 1963 г. метод расчета по разрушающим усили-

ям был усовершенствован (ACI 318-63), к нему прибегали наряду с расчетом по допускаемым напряжениям. Последующие нормы расчета, появившиеся в 1971, 1977 и в 1983 гг. (ACI 318-71, ACI 318-77 и ACI 318-83), основаны на методике, близкой к расчету по предельным состояниям. Эти нормы используются вместе с расчетом по допускаемым напряжениям. На сегодняшний день актуальными являются нормы США ACI 318-19 [13], выпущенные в 2019 году.

В нормах США [13] момент образования трещин определяется по формуле:

$$M_{crc} = \frac{f_r \cdot I_g}{y_t}, \quad (26)$$

здесь $f_r = 0,62\sqrt{f_c}$; y_t – расстояние от центра тяжести бетонного сечения до наиболее растянутого волокна; I_g – момент инерции бетонного сечения; f_c – сопротивление бетона сжатию.

Ширина раскрытия трещин на растянутой поверхности элемента определяются по формуле (28):

$$w = 0,076\beta Z, \quad (27)$$

где $\beta = h_2/h_1$;

$$Z = f_s \sqrt[3]{d_c A_b},$$

здесь f_s – напряжение в растянутой арматуре для стадии эксплуатации конструкции; d_c – защитный слой для арматурных стержней, растянутой поверхности; A_b – площадь растянутого бетона, имеющего тот же центр тяжести, что и растянутая арматура.

Значения коэффициента для балок принимают $\beta = 1,2$ (для плит – 1,35), тогда $w = 0,0912Z$, $Z = 10,96w$.

Допустимая ширина раскрытия трещин принимается равной:

- 0,4 мм - для конструкций, расположенных внутри помещений;
- 0,3 мм – для конструкций, расположенных снаружи.

В Великобритании в период с 1934 по 1965 гг. расчет железобетонных конструкций выполнялся по методу допускаемых напряжений. В 1972 г. были опубликованы нормы CP110, в основу которых положены предельные состояния (рекомендации ЕКБ/ФИП [11]). Затем они потерпели некоторые изменения в 1974, 1976 и 1980 гг.

Нормы CP110 [14] применимы как для обычного, так и для предварительно напряженного железобетона из тяжелого и легкого бетона.

В английских нормах [14] вводятся следующие ограничения при оценке трещиностойкости:

- при нормальных условиях эксплуатации на поверхности элемента ширина раскрытия трещин w не должна превышать 0,3 мм;
- ширина w не должна превышать $1/250$ минимального защитного слоя бетона и 0,3 мм для элементов, эксплуатируемых в условиях с повышенной агрессивностью.

Согласно нормам CP 110 [14] теоретическая ширина трещины вычисляется по приближенной формуле, полученной на основании экспериментов:

$$w_{cr} = \frac{3a_{cr}\xi_m}{1+2(a_{cr}-c_{min})/(h-x)}, \quad (28)$$

где x – высота сжатой зоны бетона; h – полная высота сечения элемента; c_{min} – минимальный защитный слой продольной арматуры; a_{cr} – расстояние от рассматриваемой точки до поверхности ближайшей продольной арматуры; ξ_m – средние деформации арматуры на рассматриваемом уровне с учетом работы растянутого бетона.

До 1980-х гг. во Франции использовался метод расчета железобетонных конструкций по допускаемым напряжениям (нормы ССВА-63). В 1983 г. появились нормы BAEL-83, основанные на предельных состояниях, затем, в 1991 г., несколько измененный их вариант BAEL-91 [15]. Отметим, что нормы BAEL мало чем отличаются от рекомендаций ЕКБ/ФИП [11].

Во французских нормах максимальные сжимающие напряжения бетона в стадии эксплуатации для предотвращения образования трещин ограничиваются значением $0,6f_{c28}$. Так как они обычно остаются меньше допускаемых, для сечений таврового профиля напряжения сжатия в бетоне не проверяют. Если армирование изгибаемых элементов не превышает 2%, разрешается не проверять и их. Для внецентренно нагруженных элементов и при большем проценте армирования проверка напряжений в бетоне в стадии эксплуатации необходима. Если не выполняется условие $\sigma_{bc} \leq 0,6f_{c28}$, то следует изменить размеры сечения элемента или поставить дополнительную сжатую арматуру,

По трещиностойкости конструкции разделены на три группы. Для первой группы конструкций достаточно соблюдать конструктивные требования при размещении арматуры без выполнения расчетов. Для второй группы конструкций напряжения в растянутой арматуре не должны превышать $2f_e/3$ и $100\sqrt{n}f_{tj}$, где $f_e=1$ для гладкой арматуры и сварных сеток из гладких стержней; $f_e=1,6$ для арматуры периодического профиля. Для элементов третьей группы при эксплуатационных воздействиях напряжения в растянутой арматуре не должны превышать $0,5f_e$.

РЕЗУЛЬТАТЫ

Были произведены расчеты по приведенным выше нормативным методикам для железобетонного образца прямоугольного сечения с одиночным армированием (в растянутой зоне) без предварительного напряжения. Приняты площадь растянутой арматуры $A_s = 6,28 \text{ см}^2$; ширина сечения $b = 25 \text{ см}$; высота сечения $h = 50 \text{ см}$, толщина защитного слоя $a = 5 \text{ см}$, класс бетона B25, класс арматуры A500, усилие предварительного обжатия $P = 100 \text{ кН}$ с эксцентриситетом $e_{op} = 16,5 \text{ см}$. Результаты расчета сведены в таблицу 1.

Таблица 1

Результаты расчета

Нормативный документ	СП63.13330.2018	СНиП 2.03.01-84*	СНиП II-21-75	ACI 318	ФИП/ЕКБ	Eurocode, BAEL, CP-110
Параметр						
без предварительного напряжения арматуры						
$M_{crc}, \text{кН}\cdot\text{м}$	22,9	30,8	31	27,8	-	-
$a_{crc}, \text{мм}$	0,21 (0,294)	0,219 (0,316)	0,214 (0,32)	0,4	0,316	0,26 (0,34)
с предварительным напряжением арматуры						
$M_{crc}, \text{кН}\cdot\text{м}$	48,1	56,1	56,3	-	-	-
$a_{crc}, \text{мм}$	0,142 (0,198)	0,148 (0,224)	0,145 (0,206)	-	-	0,22 (0,31)

Примечание: в скобках указаны полученные значения ширины раскрытия трещин при продолжительном действии нагрузок. Без скобок – при кратковременном действии нагрузки.

Table 1

Calculation results

Standards	SP63.13330.2018	SNiP 2.03.01-84*	SNiP II-21-75	ACI 318	FIB/EKB	Eurocode, BAEL, CP-110
Parameter						
Without prestressing of reinforcement bars						
$M_{crc}, \text{kN}\cdot\text{m}$	22.9	30.8	31	27.8	-	-
a_{crc}, mm	0.21 (0.294)	0.219 (0.316)	0.214 (0.32)	0.4	0.316	0.26 (0.34)
With prestressing of reinforcement bars						
$M_{crc}, \text{kN}\cdot\text{m}$	48.1	56.1	56.3	-	-	-
a_{crc}, mm	0.142 (0.198)	0.148 (0.224)	0.145 (0.206)	-	-	0.22 (0.31)

Note: in parentheses are the obtained values of the crack opening width under prolonged action of loads. Without brackets - for short-term load.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

По результатам работы были сделаны следующие выводы:

1. Методика расчета по образованию трещин (определении момента трещинообразования) не претерпела существенных изменений в отечественной нормативной литературе и для часто встречаемых форм поперечных сечений железобетонных элементов основывается на упругой схеме работы сжатого бетона, растянутой арматуры и учитывает неупругие деформации в растянутом бетоне.

Предварительное обжатие учитывается как внешнее усилие, приложенное с эксцентриситетом, определяемым в зависимости от геометрии сечения.

2. В зарубежных нормах развитых стран к образованию нормальных трещин подходят конструктивно, т.е. проектируют исходя из того, что трещиностойкость обеспечена, если соблюдаются требования по уровню напряжений и прочности бетона, геометрии сечений и объема армирования.

Расчетный анализ показал, что расчетная трещиностойкость изгибаемых элементов без предварительного напряжения арматуры несколько выше зарубежных.

3. В действующем СП 63.13330 [10] методика по определению ширины раскрытия трещин принята на основе работ В.И. Мурашева [1], которые имеют некоторую аналогию с последними рекомендациями международных норм (Eurocode 2 [7] и др. [11-18]). Предыдущая методика СНиП [6] была практически полностью построена на эмпирической зависимости. В новом документе (СП) [19], принятая методика более четко раскрывает процесс раскрытия трещин.

Численные исследования показывают, что на стадии предельной по несущей способности расчетная ширина раскрытия трещин ниже, чем по зарубежным нормам.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Мурашев В.И.* Трещиностойчивость, жесткость и прочность железобетона. Москва: Машстройиздат, 1950. 268 с.
2. ННТУ 123-55 Нормы и технические условия проектирования бетонных и железобетонных конструкций.
3. *Гвоздев А.А., Дмитриев С.А.* К вопросу о расчете сечений по трещинообразованию // Бетон и железобетон. 1960. №7. С. 14-17.
4. СНиП II-B.1-62 Бетонные и железобетонные конструкции. Нормы проектирования.
5. СНиП II-21-75 Бетонные и железобетонные конструкции. Нормы проектирования.
6. СНиП 2.03.01-84* «Бетонные и железобетонные конструкции»
7. Eurocode 2 Design of Concrete Structures. Part 1 General Rules and Rules for Buildings: EN 1992 – 1:2001
8. СНиП 52-01-2003 «Бетонные и железобетонные конструкции. Основные положения».
9. СП 63.13330.2012 «Бетонные и железобетонные конструкции. Основные положения»
10. СП 63.13330.2018 «Бетонные и железобетонные конструкции. Основные положения»
11. CEB/FIB Model Code for Concrete Structures. -Lausanne: International Federation for Structural Concrete (fib) Switzerland, 2013
12. DIN-1045-1-2008 Concrete, reinforced and prestressed concrete structures - Part 1: Design and construction
13. Building Code Requirements for Structural Concrete (ACI 318-19) Commentary on Building Code Requirements for Structural Concrete (ACI 318R-19)
14. CP110 The Structural Use of Concrete: Part 1 Design, Materials & Workmanship. London: British Standards Institution
15. BAEL-91 Règles techniques de conception et de calcul des ouvrages et constructions en béton armé suivant la méthode des états limites
16. *Clark A.* Cracking in reinforced concrete flexural members // ACI Journal. 1956. Proc. v. 52. Pp. 851-862

17. Ahmed A. Abu El Naas, Hany M. El Hashimy, Khaled F. El Kashif Comparative Analytical Study on Crack Width of Reinforced Concrete Structures // *Civil Engineering Journal*. 2021. Vol. 7, No. 07, July, Pp.1201-1221
18. Chowdhury S.H., Loo Y.C. A New Formula for Prediction of Crack Widths in Reinforced and Partially Prestressed Concrete // *Advances in Structural Engineering*. 2001. Vol. 4, No. 2. Pp. 100-110.
19. Трекин Н.Н., Кодыш Э.Н., Терехов И.А. Совершенствование нормативной базы стандартизации сборных железобетонных конструкций // *Железобетонные конструкции*. 2023. №1(1). С. 64-71.

REFERENCES

1. Murashev V.I. Treshchinoustoychivost', zhestkost' i prochnost' zhelezobetona [Resistance to cracking, stiffness and strength of reinforced concrete]. – Moscow: Mashstroyizdat, 1950. 268 p.
2. NiTU 123-55 Normy i tekhnicheskiye usloviya proyektirovaniya betonnykh i zhelezobetonnykh konstruktсий [Standards on the design of concrete and reinforced concrete structures].
3. Gvozdev A.A., Dmitriev S.A. K voprosu o raschete secheniy po treshchinoobrazovaniyu [Calculation of cross sections for cracking]. *Beton i zhelezobeton*. 1960. No.7. Pp. 14-17.
4. SNiP II-V.1-62 Betonnyye i zhelezobetonnyye konstruktсии. Normy proyektirovaniya [Concrete and reinforced concrete structures. Design Code].
5. SNiP II-21-75 Betonnyye i zhelezobetonnyye konstruktсии. Normy proyektirovaniya [Concrete and reinforced concrete structures. Design Code].
6. SNiP 2.03.01-84* “Betonnyye i zhelezobetonnyye konstruktсии” [Concrete and reinforced concrete structures]
7. Eurocode 2 Design of Concrete Structures. Part 1. General Rules and Rules for Buildings: EN 1992 –1:2001
8. SNiP 52-01-2003 “Betonnyye i zhelezobetonnyye konstruktсии. Osnovnyye polozheniya” [Concrete and reinforced concrete structures. General provisions].
9. SP 63.13330.2012 “Betonnyye i zhelezobetonnyye konstruktсии. Osnovnyye polozheniya” [Concrete and reinforced concrete structures. General provisions].
10. SP 63.13330.2018 “Betonnyye i zhelezobetonnyye konstruktсии. Osnovnyye polozheniya” [Concrete and reinforced concrete structures. General provisions].
11. CEB/FIB Model Code for Concrete Structures. -Lausanne: International Federation for Structural Concrete (fib) Switzerland, 2013
12. DIN-1045-1-2008 Concrete, reinforced and prestressed concrete structures - Part 1: Design and construction
13. Building Code Requirements for Structural Concrete (ACI 318-19) Commentary on Building Code Requirements for Structural Concrete (ACI 318R-19)
14. CP110 The Structural Use of Concrete: Part 1 Design, Materials & Workmanship. London: British Standards Institution
15. BAEL-91 Règles techniques de conception et de calcul des ouvrages et constructions en béton armé suivant la méthode des états limites
16. Clark A. Cracking in reinforced concrete flexural members. *ACI Journal*. 1956. Proc. v. 52. Pp. 851-862
17. Ahmed A. Abu El Naas, Hany M. El Hashimy, Khaled F. El Kashif Comparative Analytical Study on Crack Width of Reinforced Concrete Structures. *Civil Engineering Journal*. 2021. Vol. 7. No. 07. July. Pp.1201-1221
18. Chowdhury S.H., Loo Y.C. A New Formula for Prediction of Crack Widths in Reinforced and Partially Prestressed Concrete. *Advances in Structural Engineering*. 2001. Vol. 4. No. 2. Pp. 100-110.
19. Trekin N.N., Kodysh E.N., Terekhov I.A. Improving the Regulatory Framework for the Standardization of Precast Concrete Structures. *Reinforced concrete structures*. 2023. 1(1). Pp. 64-71. (In Russ.)