

УДК 624.012

[https://doi.org/10.37538/0005-9889-2025-3\(628\)-20-32](https://doi.org/10.37538/0005-9889-2025-3(628)-20-32)**А.К. ЖАЛНИН**

АО «НИЦ «Строительство», 2-я Институтская ул., д. 6, к. 1, г. Москва, 109428, Российская Федерация

СРАВНЕНИЕ РАСЧЕТНОЙ ШИРИНЫ РАСКРЫТИЯ ТРЕЩИН НА РАННЕМ ЭТАПЕ ТВЕРДЕНИЯ БЕТОНА

Аннотация

Введение. Расчет ширины раскрытия трещины является одним из требований к эксплуатационной надежности железобетонных конструкций. Возникновение трещин в железобетонных элементах происходит как при эксплуатационных нагрузках, так и в начальный период набора прочности из-за низкой прочности бетона на растяжение и характера его работы в целом. Возрастающая скорость строительства требует учитывать термонапряженное состояние не только массивных, но и обычных конструкций в раннем возрасте бетона, в том числе выполнять расчет ширины раскрытия трещин на этапе набора прочности, для обеспечения проектных и эксплуатационных характеристик конструкций и оценки возможности нагружения конструкций, бетон которых пока не достиг своих эксплуатационных характеристик.

Цель. Исследование направлено на анализ необходимости учета особенности бетона в раннем возрасте (соотношение прочности и модуля деформаций отличается от проектного возраста) при расчете ширины раскрытия трещин.

Материалы и методы. В работе проведен анализ методов расчета, заложенных в нормативных документах. Выполнены расчеты ширины раскрытия трещин для железобетонных сечений с разным процентом армирования. Выполнено сравнение расчетных методик и полученных значений ширины раскрытия трещин по различным нормативным документам для бетона на ранних стадиях твердения, а также выполнена оценка влияния изменения модуля упругости на процесс трещинообразования. Анализ выполнен с учетом как нормативного модуля упругости бетона (28 суток), так и его сниженного значения на 7 суток. Используются данные экспериментальных исследований для верификации результатов.

Результаты. Установлено, что снижение модуля упругости бетона на ранних стадиях твердения (до 24 %) приводит к увеличению расчетной ширины трещин (до 11 %) при идентичной прочности.

Выводы. Результаты исследования подчеркивают необходимость учета изменения модуля упругости бетона на ранних стадиях твердения при проектировании конструкций. Это позволит более точно прогнозировать ширину раскрытия трещин, включая температурно-усадочные, и обеспечит повышение надежности железобетонных конструкций в процессе эксплуатации.

Ключевые слова: железобетон, ширина раскрытия трещин, модуль упругости бетона в период твердения, температурно-усадочные трещины, трещиностойкость конструкций, гидратация

Для цитирования: Жалнин А.К. Сравнение расчетной ширины раскрытия трещин на раннем этапе твердения бетона // *Бетон и железобетон*. 2025. № 3 (628). С. 20–32. DOI: [https://doi.org/10.37538/0005-9889-2025-3\(628\)-20-32](https://doi.org/10.37538/0005-9889-2025-3(628)-20-32). EDN: YAKLXG

Вклад автора

Автор берет на себя ответственность за все аспекты работы над статьей.

Финансирование

Исследование не имело спонсорской поддержки.

Конфликт интересов

Автор заявляет об отсутствии конфликта интересов.

Поступила в редакцию 09.04.2025

Поступила после рецензирования 29.05.2025

Принята к публикации 05.06.2025

A.K. ZHALNIN

JSC Research Center of Construction, 2nd Institutskaya str., 6, bld. 1, Moscow, 109428, Russian Federation

COMPARISON OF THE ESTIMATED CRACK OPENING WIDTH AT AN EARLY STAGE OF CONCRETE HARDENING

Abstract

Introduction. The calculation of the crack opening width is one of the requirements for the operational reliability of reinforced concrete structures. Cracks in reinforced concrete elements occur both under operating loads and during the initial period of strength gain due to the low tensile strength of concrete and the nature of its operation in general. The increasing speed of construction requires taking into account the thermally stressed state of not only massive, but also conventional structures at an early age of concrete, including calculating the crack opening width at the strength gain stage to ensure the design and operational characteristics of structures and assess the possibility of the loading of the structures whose concrete has not yet reached its operational characteristics.

Aim. The study is aimed at analyzing the need to take into account the features of concrete at an early age (the ratio of strength and modulus of deformation differs from the design age) when calculating the crack opening width.

Materials and methods. The paper analyzes the calculation methods laid down in the regulatory documents. Calculations of crack opening widths for reinforced concrete sections with different percentages of reinforcement have been performed. A comparison of the calculation methods and the obtained values of the crack opening width according to various regulatory documents for concrete in the early stages of hardening was performed, as well as an assessment of the effect of changes in the modulus of elasticity on the cracking process. The analysis was performed taking into account both the standard modulus of elasticity of concrete (28 days) and its reduced value on day 7. Experimental research data was used to verify the results.

Results. It was found that a decrease in the modulus of elasticity of concrete in the early stages of hardening (up to 24 %) leads to an increase in the estimated crack width (up to 11 %) with identical strength.

Conclusions. The results of the study emphasize the need to take into account the changes in the modulus of elasticity of concrete in the early stages of hardening when designing the structures. This will make it possible to more accurately predict the crack opening width, including temperature and shrinkage, and will increase the reliability of reinforced concrete structures during operation.

Keywords: reinforced concrete, crack opening width, modulus of elasticity of concrete during hardening, temperature-shrinkage cracks, crack resistance of structures, hydration

For citation: Zhalnin A.K. Comparison of the estimated crack opening width at an early stage of concrete hardening. *Beton i Zhelezobeton* [Concrete and Reinforced Concrete]. 2025, no. 3 (628), pp. 20–32. (In Russian). DOI: [https://doi.org/10.37538/0005-9889-2025-3\(628\)-20-32](https://doi.org/10.37538/0005-9889-2025-3(628)-20-32). EDN: YAKLXG

Author contribution statement

The author takes responsibility for all aspects of the paper.

Funding

No funding support was obtained for the research.

Conflict of interest

The author declares no conflict of interest.

Received 09.04.2025

Revised 29.05.2025

Accepted 05.06.2025

Введение

До 1940-х годов развитие теории железобетона направлялось в основном по пути рассмотрения вопросов расчета прочности. В 1931 г. профессором А.Ф. Лолейтом [1] созданы предпосылки для создания теории прочности железобетона, которые дали толчок большому количеству исследований по расчету прочности железобетона.

После 1940-х годов метод расчета трещин, основанный на работах В.И. Мурашева [2], был включен в нормативные документы. В исследованиях было предложено учитывать пластическую работу бетона растянутой зоны при образовании трещин с помощью прямоугольной эпюры напряжений.

В соответствии с СП 63.13330.2018 [3] для определения ширины раскрытия обычных трещин используется произведение средних относительных деформаций арматуры на участке между трещинами и длины этого участка. Чтобы найти средние относительные деформации арматуры между трещинами, необходимо учитывать работу растянутого бетона между ними. Относительные деформации арматуры внутри трещин определяются с помощью условно упругого расчета железобетонного элемента, используя приведенный модуль деформации сжатого бетона с учетом неупругих деформаций бетона сжатой зоны, либо по нелинейной деформационной модели. Расстояние между трещинами определяется из условия, что разность усилий в продольной арматуре в сечении с трещиной и между трещинами должна быть удержана усилиями сцепления арматуры с бетоном на длине этого участка.

Данный подход согласуется с международными методами расчета ширины трещин в изгибаемых элементах, где итоговое значение определяется как произведение максимального расстояния между трещинами и средней деформации растянутой арматуры. Ширина трещины зависит от характера и расположения арматуры, пересекающей трещины, и связи между стержнями, находящимися в зоне растяжения бетона. Многочисленные исследования были посвящены разработке методов прогнозирования ширины трещин в изгибаемых железобетонных элементах, в частности Салигер [4] в своих работах 1936 года предложил фундаментальные принципы анализа трещинообразования, заложив основы для последующих исследований, Томас [5] в тот же период разработал теоретическую модель, связывающую ширину трещин с деформациями арматуры, Бромс [6] существенно дополнил эти подходы, предложив методику расчета расстояния между трещинами, а Бэйс [7, 8] внес значительный вклад в развитие вероятностных методов оценки параметров трещинообразования.

Существующий в Еврокоде 2 [9] метод расчета ширины трещин использует эмпирический подход со статистическим анализом экспериментов. На этой основе устанавливаются уравнения, которые пред-

сказывают наблюдения, сделанные в экспериментах, с принятой вероятностью превышения. Базовый документ [9] определяет этот подход как основу для расчета ширины трещин. По сей день проводятся обширные исследования, посвященные статистическому анализу старых и новых экспериментов. АСІ в свою очередь также основана на обширных методах статистического анализа экспериментальных данных нескольких исследователей [10, 11].

Все представленные верификационные работы и расчетные методики ширины раскрытия трещин были выполнены В.И. Мурашевым с набравшим полную прочность бетоном и с полным модулем деформации бетона, как и перечисленные зарубежные исследования.

Таким образом, остается неизученным в полной мере вопрос о допустимости применения методики, указанной в [3], при решении задачи в период набора прочности бетона, когда изменяется соотношение модулей деформации бетона к модулю деформации арматуры в отличную сторону от испытываемых моделей, а также присутствуют термические напряжения от процесса гидратации, что наиболее критично для массивных железобетонных конструкций.

Теория, заложенная в [3], основана на предпосылках теории Мурашева, в работе которого проводился анализ и испытания изгибаемых балок, без освещения вопроса трещинообразования в массивных железобетонных конструкциях.

В статье проводится исследование нескольких формул, предложенных различными строительными нормами и правилами для расчета ширины трещины в железобетонных изгибаемых элементах. Дополнительно к этому в тех нормах, где это возможно, расчет выполнен для разной стадии твердения с разным модулем деформации бетона. Кроме того, было проведено сравнение уравнений для обсуждения различных факторов и параметров, влияющих на ширину трещины.

Методы расчета ширины раскрытия трещин по разным нормам

Теория Мурашова в СП 63.13330.2018 [3]

Ширина раскрытия трещин определяется из условия равенства удлинения арматуры в пределах расстояния между трещинами l_s и суммы удлинения растянутого бетона в этих пределах и ширины трещины (рис. 1):

$$E_{sm}l_s = \varepsilon_{bm}l_s + \alpha_{crc} \quad (1)$$

где $\varepsilon_{sm} = \varepsilon_s \Psi_{s1}$ – «средняя» деформация арматуры;
 Ψ_{s1} – коэффициент учитывающего работу растянутого бетона между трещинами;
 ε_s – деформации арматуры;

$l_s = \frac{0,5A_{bt}}{A_s d_s}$ – расстояние между трещинами, где A_{bt} – площадь сечения растянутого бетона непосредственно перед образованием трещин, т. е. определяемое при действии момента M_{crc} .

С ростом напряжений влияние работы растянутого бетона между трещинами уменьшается, т. е. значения ε_{sm} и ε_s сближаются, и значение Ψ_s приближается к 1,0 (рис. 2).

Итоговый вид уравнения ширины раскрытия трещин приобретает вид (2), дополнительно добавляя коэффициенты действия нагрузки, профиля армирования и характера загрузки:

$$A_{crc} = \Psi_s \frac{\sigma_s}{E_s} l_s, \quad (2)$$

где σ_s – напряжения в растянутой арматуре изгибаемых элементов;

E_s – модуль деформации арматуры.

Выражая ε_{bm} через $\frac{\sigma_{bm}}{\sigma_s}$, а $\varepsilon_s = \sigma/E_s$, получаем:

$$\Psi_s = \Psi_{s1} - \frac{\sigma_{bm}}{\sigma_s} \alpha, \quad (3)$$

где $\alpha = \frac{E_s}{E_b}$ – отношение модуля деформации арматуры к модулю деформации бетона;

$$\Psi_s = \Psi_{s1} - \frac{\sigma_{bm}}{\sigma_s} \frac{E_s}{E_b};$$

Ψ_{s1} – коэффициент, учитывающий работу растянутого бетона между трещинами.

Часть выражения $(\frac{\sigma_{bm}}{\sigma_s} \frac{E_s}{E_b})$, за малостью величины, была опущена в работе Мурашева, а Ψ_s в итоге приравнена к Ψ_{s1} с небольшим эмпирическим упрощением для разных НДС. Для изгибаемых – $\Psi_s = 1 - 0,8 \frac{M_{crc}}{M}$, для центрально растянутых – $\Psi_s = 1 - 0,8 \frac{N_{crc}}{N}$.

Часть уравнения $\frac{\sigma_{bm}}{\sigma_s} \frac{E_s}{E_b}$ из определения Ψ_s , выведенная из теории, является линейной функцией отношения бетона к арматуре и линейной функцией отношения параметров бетона к параметрам армирования.

Верификация методики, а следовательно, и упрощения была определена из ряда испытаний балок, выполненных в 1947–1948 годах.

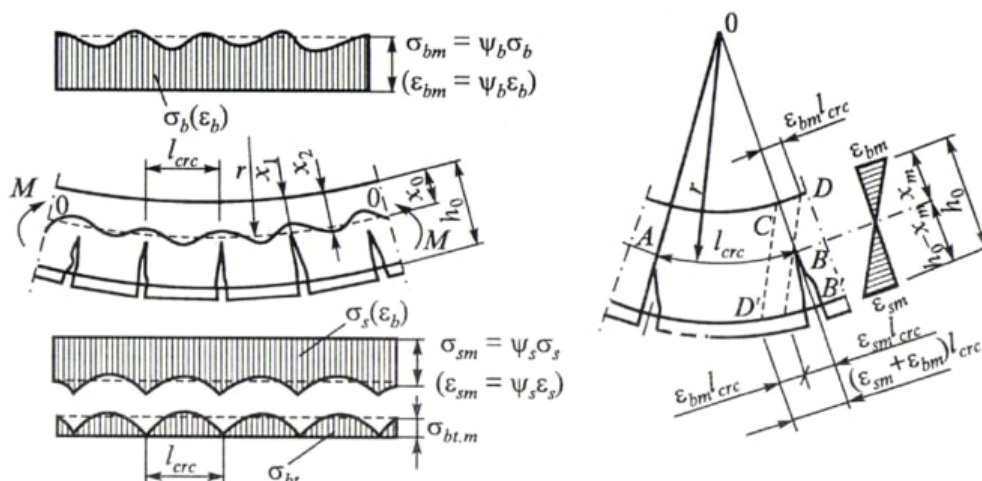


Рис. 1. Неравномерность напряжений арматуры в зонах образования трещин [2, 3]

Fig. 1. Unevenness of the reinforcement stresses in crack formation zones [2, 3]



Рис. 2. Теоретические и опытные значения коэффициента Ψ_s для испытанных балок [2]

Fig. 2. Theoretical and experimental values of the Ψ_s coefficient for the tested beams [2]

Все испытанные конструкции достигли набора прочности.

Определение прочности анкеровки на выдергивание в 1937 году также было выполнено в бетоне с полным набранным модулем упругости.

Ширина раскрытия трещин по Еврокоду 2 [9]

Существующий в [9] метод расчета ширины трещин использует эмпирический подход со статистическим анализом экспериментов. На этой основе устанавливаются уравнения, которые предсказывают наблюдения, сделанные в экспериментах, с принятой вероятностью превышения. Базовый документ [9] определяет этот подход как основу для расчета ширины трещин. По сей день проводятся обширные исследования, посвященные статистическому анализу старых и новых экспериментов.

Еврокод 2 [9] формирует следующую ширину раскрытия трещин w_k , определяющуюся по формуле:

$$W_k = S_{r,max} \times (\epsilon_{sm} - \epsilon_{cm}), \quad (4)$$

где $S_{r,max}$ – максимальное расстояние между трещинами;

ϵ_{sm} – средние относительные деформации арматуры при определяющем сочетании воздействий, включая влияние вынужденных деформаций и учитывая работу бетона на растяжение. Учитывается только дополнительная относительная деформация, выходящая за нулевое значение деформаций бетона на том же уровне;

ϵ_{cm} – средняя относительная деформация бетона между трещинами.

Значение $\epsilon_{sm} - \epsilon_{cm}$ определяется по формуле:

$$\epsilon_{sm} - \epsilon_{cm} = \frac{\sigma_s - k_t \times \frac{f_{ct,eff}}{p_{p,eff}} (1 + \alpha_e \times p_{p,eff})}{E_s} \geq 0,6 \frac{\sigma_s}{E_s}, \quad (5)$$

где σ_s – напряжение в растянутой арматуре сечения с трещиной;

α_e – отношение модулей деформации арматуры к бетону E_s/E_{cm} ,

$$p_{p,eff} = \frac{A_s + \xi_1 A'_p}{A_{c,eff}}, \quad (6)$$

где A'_p – площадь сечения предварительно напрягаемых и пост-напрягаемых арматурных элементов в пределах эффективной площади $A_{c,eff}$;

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

$$\xi_1 = \sqrt{\frac{\xi \times \sigma_s}{\sigma_p}}, \quad (7)$$

здесь ξ – отношение прочностей сцепления напрягаемой и арматурной стали согласно [9, табл. 6.2];

σ_s – наибольший диаметр арматурной стали;

σ_p – эквивалентный диаметр напрягающих элементов.

k_t – коэффициент, зависящий от длительности действия нагрузки.

Максимальное расстояние между трещинами определяется:

$$S_{r,max} = k_3 c + k_1 k_2 k_4 \sigma / \rho_{p,eff}, \quad (8)$$

где σ – диаметр стержня;

c – защитный слой бетона для продольной арматуры;

k_1 – коэффициент, учитывающий свойства сцепления арматуры;

k_2 – коэффициент, учитывающий распределения относительных деформаций: 0,5 – для изгиба, 1 – для чистого растяжения.

Ширина раскрытия трещин по ACI 318 [14]

До 1999 года требования по контролю трещин при изгибе в ACI основывались на так называемом методе z-фактора, разработанном Гергелем и Лутцем [10]. Их работа была основана на обширных методах статистического анализа экспериментальных данных нескольких исследователей. Уравнение, предложенное ранней версией ACI 318-95 [11], приняло следующий вид:

$$W_{max} = 0,076 \beta f_s \sqrt{d_c A} \cdot 10^{-3} \text{ мм}, \quad (9)$$

где W_{max} – наиболее вероятная максимальная ширина раскрытия трещин;

d_c – толщина защитного слоя от крайнего растягивающегося волокна до ближайшего стержня;

f_s – напряжения в арматуре;

$\beta = \frac{h - x}{d - x}$ – отношение расстояния между нейтральной осью и растягивающей плоскостью до расстояния между нейтральной осью и арматурой, 1,2 в балках можно использовать для сравнения ширины трещин, полученных при изгибе и осевом растяжении;

A – площадь бетона, симметричного арматурной стали, делится на количество стержней.

Выражение ширины изгибной трещины в приведенном выше уравнении, где $\beta = \frac{h - x}{d - x} = 1,2$, используется в ACI 318-95 [11] в следующей форме:

$$z = f_s \sqrt{d_c A}. \quad (10)$$

Для усилий допускается максимальное значение $z = 3064,5 \text{ Н/мм}$, что соответствует предельной ширине

трещины 0,41 мм. ACI 318-95 [11] также ограничивает значение z до 2539,2 Н/мм для внешнего воздействия, что соответствует ширине трещины 0,33 мм. Когда конструкции подвергаются очень агрессивному воздействию или спроектированы водонепроницаемыми, комитет ACI 350 [13] ограничивает значение z до 1700 Н/мм, что соответствует ширине трещины 0,2 мм.

В издании 1999 года ACI решил значительно упростить требования по борьбе с трещинами из-за увеличения количества доказательств, свидетельствующих о снижении корреляции между шириной трещины и коррозией арматуры. ACI внес изменения в расчет ширины раскрытия трещин, в которых ведется расчет максимального расстояния между стержнями, а не z -фактор (связанный с шириной трещины).

ACI 318-05 [14], ACI 318-08 [12] предложили следующее уравнение для раскрытия ширины трещин:

$$s = 380 \left(\frac{280}{f_s} \right) - 2,5c \leq 300 \left(\frac{280}{f_s} \right), \quad (11)$$

где s – максимальное расстояние между арматурой, ближайшей к растянутой грани;

c – наименьшее расстояние от поверхности арматуры до растянутой поверхности (защитный слой);

f_s – напряжения в арматуре.

Ширина раскрытия трещин по BS 8110-2 [15]

Согласно BS 8110-2 [15] ширина изгибных трещин в конкретной точке поверхности элемента зависит прежде всего от трех факторов и основана на эмпирических уравнениях:

– близость к рассматриваемой точке арматурных стержней, перпендикулярных трещинам; бетонное покрытие;

– близость нейтральной оси к рассматриваемой точке; $h - x$;

– средняя поверхностная деформация в рассматриваемой точке.

В BS 8110-2 [15] рекомендуется, чтобы деформация в растянутой арматуре ограничивалась значением $0,8 \frac{f_y}{E_s}$ (т. е. 0,8 предела текучести стали), а ширина расчетной поверхностной трещины не должна превышать соответствующее значение. Растрескивание не должно приводить к порче внешнего вида. Таким образом, для видимых элементов расчетная максимальная ширина трещины не должна превышать 0,3 мм. Также образование трещин не должно приводить к коррозии стали, поэтому для элементов, находящихся в агрессивной среде, расчетная максимальная ширина трещины не должна приводить к потере работоспособности конструкции.

Уравнение имеет общий вид:

$$W_d = \frac{3 \alpha_{cr} \varepsilon_m}{1 + 2 \left(\frac{\alpha_{cr} - c_{\min}}{h - x} \right)}, \quad (12)$$

где α_{cr} – расстояние от рассматриваемой точки до поверхности ближайшего продольного стержня;

ε_m – средняя деформация на уровне, на котором рассматривается трещина;

$c_{\min}$ – минимальный защитный слой растянутой арматуры;

h – общая высота элемента;

x – высота нейтральной оси.

Согласно BS 8110-2 [15] при оценке деформаций модуль упругости бетона следует принимать равным половине начального значения.

Модуль упругости в разных нормах

Модуль упругости бетона (E_c) – это характеристика, которая показывает способность материала сопротивляться деформации под воздействием нагрузки. Он определяется как отношение напряжения к соответствующей деформации и отражает жесткость бетона.

При проектировании бетонных конструкций важно определить модуль упругости. Для этого используется линейный анализ элементов на основе теории упругости.

Согласно разделу 19.2.2 ACI 318 [12], модуль упругости бетона оценивается следующим образом:

$$E_c = 4700 \sqrt{f'_c} \text{ (МПа)}. \quad (13)$$

Модуль упругости бетона по EN (Еврокоду) [9] можно оценить с помощью следующего выражения:

$$E_{cm} = 22 \left[\frac{\sqrt{f'_{cm}}}{10} \right]^{0,3}, \quad (14)$$

где E_{cm} – средний модуль упругости;

f'_{cm} – средняя прочность бетона на сжатие через 28 дней в соответствии с [9, табл. 3.1].

По [15] значение модуля упругости в возрасте 28 дней бетона приведено в BS 8110: Часть II 1985:

$$E_{c,28} = k_0 + 0,2 f_{cu,28}, \quad (15)$$

где k_0 – составляет 20 кН на квадратный миллиметр для бетона нормальной массы;

$f_{cu,28}$ – прочность бетона на сжатие через 28 дней.

Рассчитаем модули упругости бетона для прочности на 28 суток 25 МПа на 1, 3 и 7 суток по стандартам EN 1992-1-1 [9], ACI 318 [12], BS 8110 [15] и СП 63.13330.2018 [3].

Для построения графиков сравнения разных возрастов примем ориентировочную таблицу роста прочности бетона по дням (табл. 1).

Таблица 1
Table 1

Прочность бетона на различных этапах твердения
Concrete strength at various stages of hardening

Время твердения, сутки	Прочность, % от R
1	30–40 %
3	50–60 %
7	65–75 %
28	100 %

Таблица 2
Table 2

Модули упругости бетона на различные сутки по разным нормам
Modules of elasticity of concrete for different days according to different standards

Сроки, сутки	EN 1992-1-1 [9], ГПа	ACI 318 [12], ГПа	BS 8110 [15], ГПа	СП 63.13330.2018 [3], ГПа
1	19,2	14,8	16,0	19,5
3	23,7	18,9	20,5	24,0
7	26,5	21,8	22,8	27,0
28	31,0	28,3	27,5	32,14

Используем средние значения из этого диапазона (табл. 1) для расчетов:

На 1 сутки – 8,75 МПа, что составляет 35 % от прочности на 28 сутки.

На 3 сутки – 13,75 МПа, что составляет 55 % от прочности на 28 сутки.

На 7 сутки – 17,5 МПа, что составляет 70 % от прочности на 28 сутки.

Пересчитаем значения модулей упругости для каждого срока (по прочности) и стандарта (табл. 2).

Из табл. 2 видно, что величина модуля упругости для различных нормативных документов бетона од-

ной и той же прочности отличается как на этапе набора прочности, так и на этапе 28 суток.

Модуль упругости бетона различается (рис. 3) в зависимости от используемого нормативного документа. На начальных этапах твердения (1, 3, 7 сутки) и на 28 сутки значения модулей упругости по различным стандартам отличаются.

Сравнение стандартов:

– EN [9] и СП [3] демонстрируют близкие значения, что отражает схожие подходы;

– ACI [12] показывает более консервативные значения, особенно на ранних сроках.

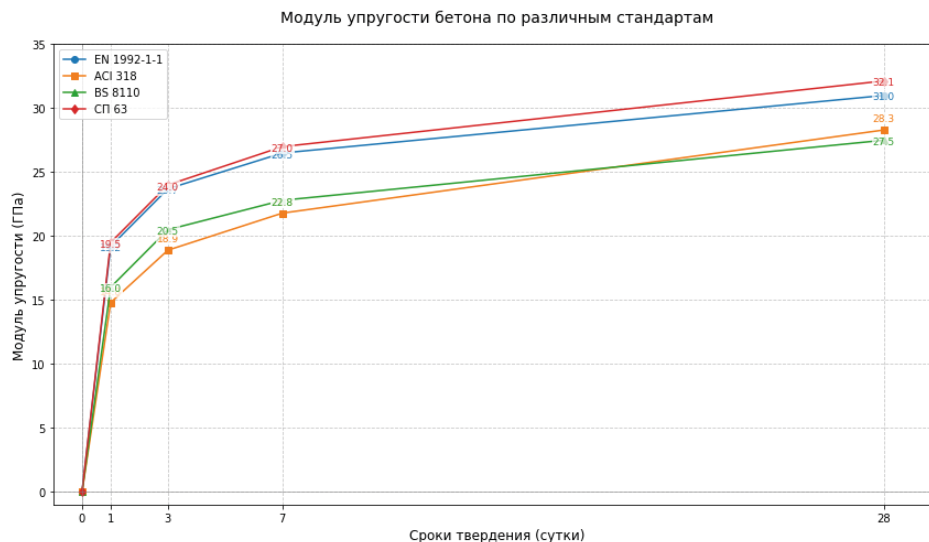


Рис. 3. График, отображающий модули упругости бетона по различным стандартам на 1, 3, 7 и 28 сутки для бетона 25 Н/мм²
Fig. 3. Graph showing the elastic modulus of concrete according to various standards on days 1, 3, 7 and 28 for concrete of 25 N/mm²

Причины различий в значениях:

- Различные стандарты основываются на различных методологиях и эмпирических данных, полученных в результате исследований и практических наблюдений в разных странах и условиях.
- В разных стандартах могут использоваться различные типы испытаний и методы измерения.
- В различных регионах могут использоваться разные материалы и учитываться различные климатические и строительные условия, что влияет на расчетные формулы и коэффициенты.
- Некоторые стандарты могут быть более консервативными, закладывая большие запасы для обеспечения безопасности конструкций.

Сравнение ширины раскрытия трещин по разным нормам для разного процента армирования при полном проектном модуле

В этом разделе выполнен расчет ширины раскрытия трещин пяти различных железобетонных сечений (рис. 4), имеющих разные значения коэффициента армирования, разное распределение стержней и класса прочности арматуры. В расчет приняты параметры бетона с модулем деформации, равным 31 ГПа в соответствии с EN, и прочностью бетона на сжатие 25 Н/мм². Для 28 суток результаты представлены на рис. 5.

Прикладываемые усилия действующего момента приравнены к $2M_{crc}$.

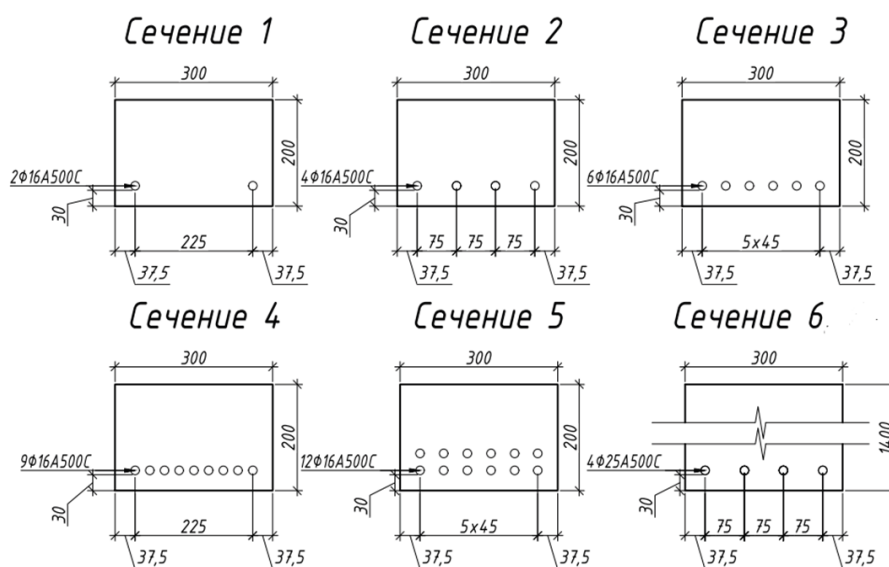


Рис. 4. Типы рассчитываемых сечений

Fig. 4. Types of calculated cross sections

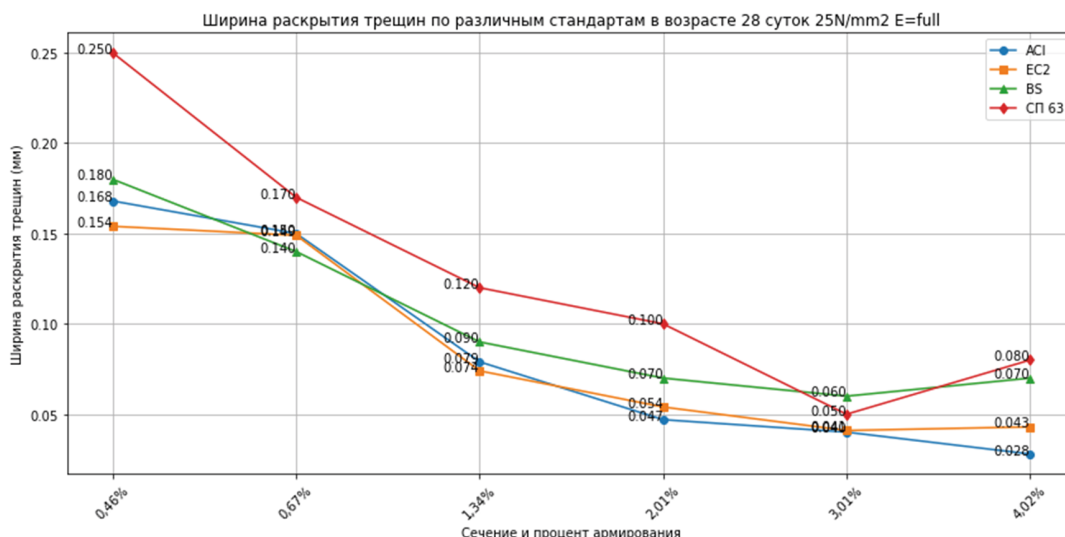


Рис. 5. Ширина раскрытия трещин по различным стандартам (слева направо увеличение процента армирования)

Fig. 5. Crack opening width according to various standards (from left to right, the increase of the percentage of reinforcement)

Таблица 3

Table 3

Ширина раскрытия трещин для бетона проектного возраста с прочностью 25 Н/мм² и полным модулем упругости для 28 суток

Crack opening width for design-age concrete with a strength of 25 N/mm² and a full modulus of elasticity for 28 days

									$F_c = 25 \text{ Н/мм}^2, F_y = 500 \text{ Н/мм}^2, E = \text{full}$ (28 суток)			
Сечение	Высота, h , мм	Ширина, b , мм	Армирова- ние		% армирования	M_{cr} , прод., тм	M_{ult} , тм	$2M_{cr}$	ACI [12]	EC2 [9]	BS [15]	СП 63 [3] $R_{bn}=25\text{Н/}$ мм^2
			кол- во	диа- метр					Max шир. раскр., мм	Ширина раскр., мм	Ширина раскр., мм	a_{cr} , мм
Сечение 1	200	300	2	16	0,67019	0,583	2,51	1,166	0,157	0,149	0,18	0,17
Сечение 2	200	300	4	16	1,34037	0,721	3,89	1,442	0,079	0,074	0,09	0,12
Сечение 3	200	300	6	16	2,01056	0,85	4,13	1,7	0,047	0,054	0,07	0,1
Сечение 4	200	300	9	16	3,01584	1,02	4,31	2,04	0,0401	0,041	0,06	0,05
Сечение 5, армату- ра в два ряда	200	300	12	16	4,02112	0,907	3,99	1,814	0,028	0,043	0,07	0,08
Сечение 6	1400	300	4	25	0,46749	31,6	109	63,2	0,168	0,154	0,14	0,25

Сравнение результатов расчетов, приведенных в табл. 3, по различным стандартам:

– **ACI [12]** в целом показывает меньшие значения ширины раскрытия трещин по сравнению с другими стандартами, особенно для сечений 3, 4 и 5.

– **Еврокод 2 [9]** и **BS 8110 [15]**. Значения ширины раскрытия трещин по этим стандартам близки друг к другу и часто ниже, чем у [3] (B25), но выше, чем у ACI [12].

– **СП 63.13330.2018 [3]**. Значения находятся между другими стандартами, иногда сопоставимы с [9, 15].

Тенденции изменения ширины раскрытия трещин:

Увеличение количества арматуры приводит к уменьшению ширины раскрытия трещин по всем стандартам, что подтверждает ожидаемое поведение, так как большее армирование ограничивает раскрытие трещин.

Различные стандарты используют различные методики расчета и эмпирические данные, что приводит к различиям в результатах. Например, в ACI [12] могут быть более консервативные допущения по раскрытию трещин, могут учитывать условия эксплуатации и прочие факторы, влияющие на образование трещин.

В разных странах могут быть разные требования к конструкциям в зависимости от местных условий, климата, сейсмической активности и других факторов, что также влияет на значения раскрытия трещин.

График позволяет визуально оценить и сравнить поведение различных стандартов в отношении ширины раскрытия трещин в бетоне для различных условий армирования и размеров сечений.

Сравнение ширины раскрытия трещин по разным нормам для разного процента армирования эквивалентного по прочности бетона на раннем этапе

Для оценки влияния раннего модуля на трещинообразование рассмотрим случай, когда бетон имеет проектную прочность (25 Н/мм^2), но сниженный модуль упругости ($23,9 \text{ ГПа}$, 7 суток). Это соответствует данным исследований [16] для бетона с $w/c = 0,4$.

Воспользуемся данными, представленными в исследованиях [16], выполненных факультетом гражданского строительства Корейского института передовых наук и технологий, в которых были получены результаты для бетона типа 1, который на третьи сутки имел $31,6 \text{ Н/мм}^2$, при этом модуль упругости его

составлял $23,9 \text{ ГПа}$. Данные параметры подходят нам для сравнения в указанной конфигурации. Отметим, что в соответствии с представленными исследованиями [16] (рис. 6) полный модуль, заложенный в нормативных документах, на ранних сроках не коррелирует модулю соответствующей прочности. Примем данные одного из испытаний, показывающие при $24,5 \text{ Н/мм}^2$ значение модуля $23,4 \text{ ГПа}$ на 7 суток. Это бетон с $w/c = 0,4$ и условиями твердения 10°C .

Ширина раскрытия трещин для балок при соответствующей прочности, но сниженного модуля из-за начального периода твердения, отличается от ширины раскрытия трещин при той же прочности, но полностью набранном модуле на 28 суток (табл. 4).

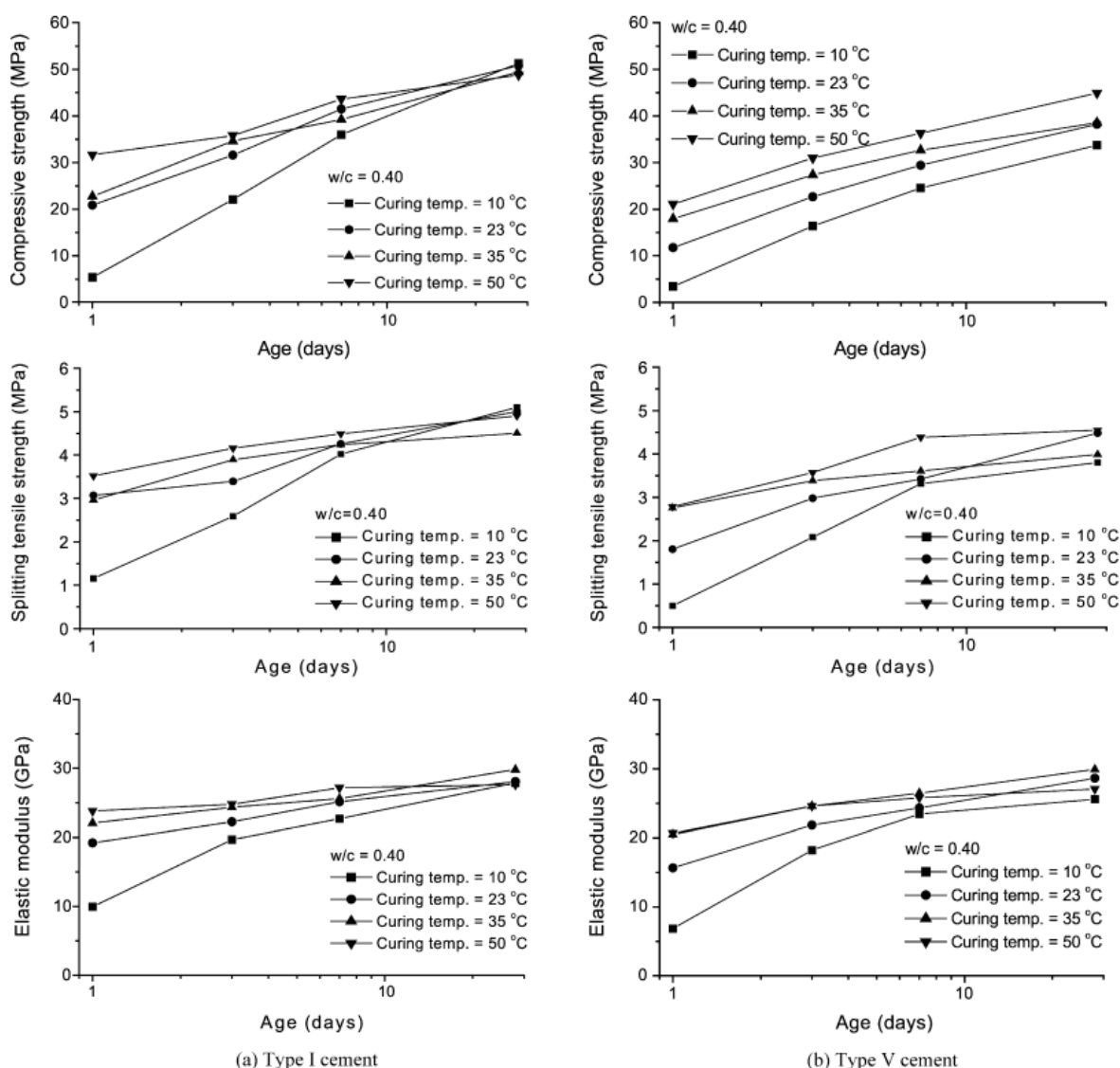


Рис. 6. Прочность на сжатие, прочность на растяжение и модуль упругости образцов на раннем этапе твердения [16]
Fig. 6. Compressive strength, tensile strength and modulus of elasticity of samples at an early stage of hardening [16]

Таблица 4

Table 4

Ширина раскрытия трещин для бетона промежуточного возраста с прочностью 25 Н/мм² и неполным модулем упругости для 7 суток

Crack opening width for intermediate-aged concrete with a strength of 25 N/mm² and an incomplete modulus of elasticity for 7 days

									$F_c = 25 \text{ Н/мм}^2, F_y = 500 \text{ Н/мм}^2, E = 23,9 \text{ ГПа (7 суток)}$			
Сечение	Высота, h , мм	Ширина, b , мм	Армирование		% армирования	$M_{кр}^2$ прод., тм	M_{ult}^2 тм	$2M_{кр}$	ACI [12]	EC2 [9]	BS [15]	СП 63 [3] $R_{bn} = 25 \text{ Н/мм}^2$
			кол-во	диа-метр					Мах шир. раскр., w , мм	Ширина раскр., мм	Ширина раскр., w , мм	$a_{кр}^2$ мм
Сечение 1	200	300	2	16	0,67019	0,583	2,51	1,166	0,159	0,144	0,17	0,19
Сечение 2	200	300	4	16	1,34037	0,721	3,89	1,442	0,0808	0,073	0,08	0,14
Сечение 3	200	300	6	16	2,01056	0,85	4,13	1,7	0,048	0,053	0,07	0,11
Сечение 4	200	300	9	16	3,01584	1,02	4,31	2,04	0,041	0,04	0,05	0,06
Сечение 5, арматура в два ряда	200	300	12	16	4,02112	0,907	3,99	1,814	0,028	0,042	0,06	0,09
Сечение 6	1400	300	4	25	0,46749	31,6	109	63,2	0,17	0,15	0,14	0,26



Рис. 7. Ширина раскрытия трещин по различным стандартам в возрасте 7 суток 25 Н/мм², E = 23,9 ГПа
Fig. 7. The crack opening width according to various standards at the age of 7 days 25 N/mm², E = 23.9 GPa

Как видно из графиков (рис. 8), снижение модуля упругости с 31 ГПа (28 суток) до 23,9 ГПа (7 суток) при сохранении прочности 25 Н/мм приводит к увеличению ширины раскрытия трещин в среднем до 11 % (например, для сечения 1 по СП 63.13330.2018 [3] – с 0,17 до 0,19 мм). Это объясняется уменьшением жесткости бетона, что подтверждается исследованиями [16], где показано, что модуль упругости на ранних сроках нелинейно зависит от прочности.

Выводы

Соотношение модуля упругости и прочности бетона в раннем возрасте может существенно отличаться от соотношения в проектном возрасте (до 24 %), что приводит к изменению (до 11 %) ширины раскрытия трещин, рассчитанной по методикам нормативных документов различных стран.

Выявленное различие методик расчета различных стандартов (EN 1992-1-1 [9], ACI 318 [12], BS 8110 [15] и СП 63.13330.2018 [3]) приводит к значительному отличию расчетной ширины раскрытия трещин. Это связано с различиями в подходах и эмпирических данных, заложенных в расчетных уравнениях.

Наибольшие расхождения между стандартами наблюдаются при низком проценте армирования (сечение 1: ACI [12] – 0,16 мм, СП 63 [3] – 0,19 мм). Это связано с разными подходами к учету пластичности

бетона. ACI [12] использует консервативные допущения, минимизируя расчетные значения, СП 63 [3] и EN2 [9] учитывают работу растянутого бетона между трещинами, что дает более высокие результаты.

На основе проведенных расчетов предложено учитывать изменение модуля упругости бетона на ранних стадиях твердения при проектировании железобетонных конструкций. Это позволит более точно прогнозировать ширину раскрытия трещин, в том числе температурно-усадочных, возникающих в раннем возрасте бетона.

Список литературы / References

1. Лолейт А.Ф. Курс теории проектирования железобетона для строительных техникумов, основы теории и проектирования. Москва–Ленинград: Государственное издательство, 1925. 262 с.
1. Loleit A.F. Course of theory of reinforced concrete design for construction technical schools, fundamentals of theory and design. Moscow–Leningrad: State Publishing House, 1925, 262 p. (In Russian).
2. Мурашев В.И. Трещиноустойчивость, жесткость и прочность железобетона. Москва: Издательство Министерства строительства предприятий машиностроения, 1950. 268 с.

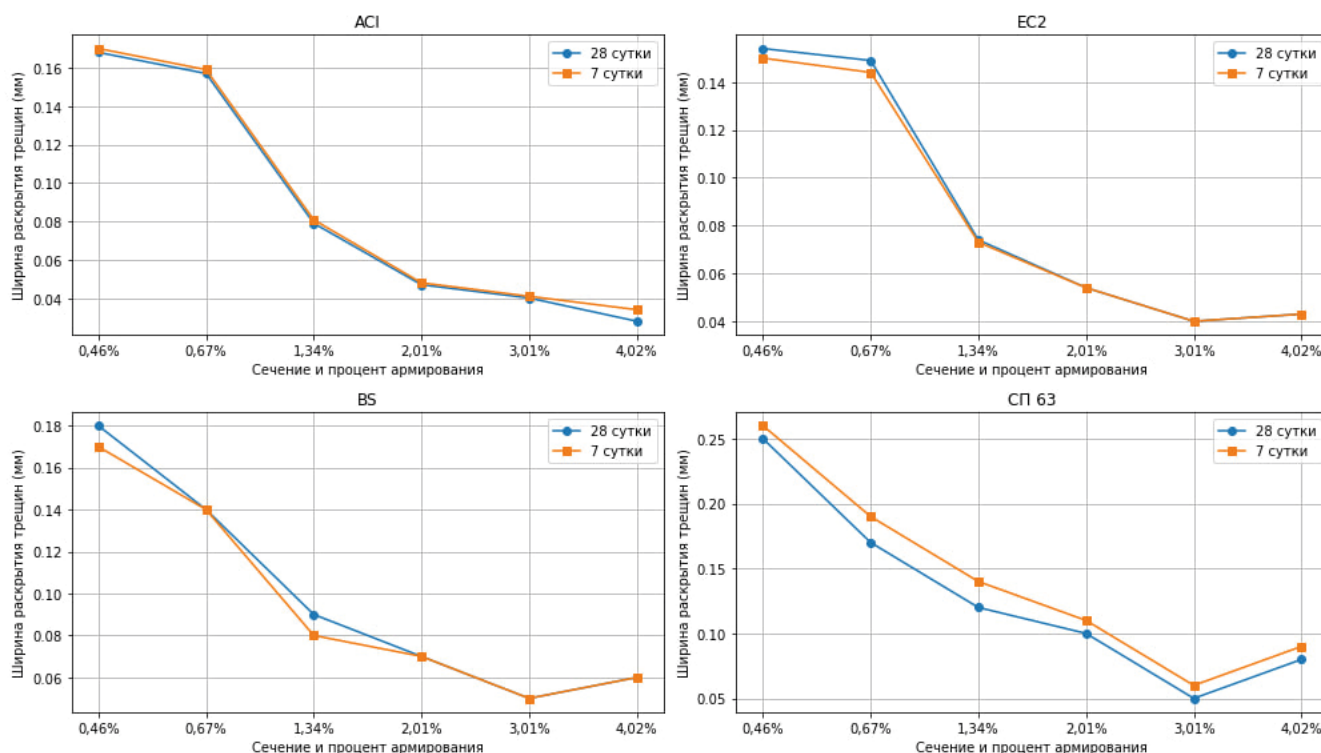


Рис. 8. Графики сравнения ширины раскрытия трещин по различным стандартам идентичной прочности на разных этапах твердения и разным модулем упругости при идентичной прочности

Fig. 8. Graphs comparing the crack opening width according to different standards of identical strength at different stages of hardening and different modulus of elasticity at identical strength

2. Murashev V.I. Crack resistance, rigidity and strength of reinforced concrete. Moscow: Publishing House of the Ministry of Construction of the Mechanical Engineering Enterprises, 1950, 268 p. (In Russian).
3. СП 63.13330.2018. Бетонные и железобетонные конструкции. Основные положения. Актуализированная редакция СНиП 52-01-2003 (с Изменениями № 1, 2). Москва, 2018.
3. SP 63.13330.2018. Concrete and reinforced concrete structures. General provisions. Updated version of SNiP 52-01-2003 (with Changes No. 1, 2). Moscow, 2018. (In Russian).
4. Saliger R. High grade steel in reinforcement concrete. *2nd Congress, International Association for Bridges and Structural Engineering*, Preliminary Publication, Berlin-Munich, 1936, pp. 293–315.
5. Tomas F.G. Cracking in reinforced concrete. *Structural Engineer*. 1936, no. 7, vol. 14, pp. 298–320.
6. Broms B.B. Crack width and crack spacing in reinforced concrete members. *Journal of American Concrete Institute*. 1965, no. 10, vol. 62, pp. 1237–1256.
7. Mr Bayes, Mr Price. An Essay towards Solving a Problem in the Doctrine of Chances. By the Late Rev. Mr. Bayes, F. R. S. Communicated by Mr. Price, in a Letter to John Canton, A. M. F. R. S. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London*. 1763, vol. 53, pp. 370–418. DOI: <https://doi.org/10.1098/rstl.1763.0053>.
8. Base G.D., J.B. Read, Beeby A.W., Taylor H.P.J. An Investigation of the Crack Control Characteristics of Various Types of Bar in Reinforced Concrete Beams. Research Report No. 18, Parts I and II, Cement and Concrete Association, London, 1966.
9. EN 1992-1-1:2004. Eurocode 2: Design of concrete structures. – Part 1-1: General rules and rules for buildings.
10. Gergely P., Lutz L.A. Maximum Crack Width in RC Flexural Members, Causes, Mechanism and Control of Cracking in Concrete. SP-20, American Concrete Institute, Detroit, 1968, pp. 87–117.
11. Building Code Requirements for Reinforced Concrete (ACI 318-95) and Commentary (ACI 318R-95). American Concrete Institute, Detroit, 1995.
12. Building Code Requirements for Reinforced Concrete (ACI 318-08) and Commentary (ACI 318R-08). American Concrete Institute, Detroit, 2008.
13. Concrete sanitary engineering structures, a report by ACI committee 350. *ACI Structural Journal*. 1983, vol. 80, pp. 467–486.
14. Building Code Requirements for Reinforced Concrete (ACI 318-05) and Commentary (ACI 318R-05). American Concrete Institute, Detroit, 2005.
15. BS 8110-2:1985. Structural use of concrete – Part 2: Code of practice for special circumstances. 1997, British Standard Institution, London, 1998.
16. Jin-Keun Kim, Sang Hun Han, Young Chul Song. Effect of temperature and aging on the mechanical properties of concrete: Part I. Experimental results. *Cement and Concrete Research*. 2002, vol. 32, no. 7, pp. 1087–1094. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0008-8846\(02\)00744-5](https://doi.org/10.1016/S0008-8846(02)00744-5)
17. Трапезников Л.П. Температурная трещиностойкость массивных бетонных сооружений. Москва: Энергоатомиздат, 1986. 270 с.
17. Trapeznikov L.P. Thermal crack resistance of massive concrete structures. Moscow: Energoatomizdat Publ., 1986, 270 p. (In Russian).

**Информация об авторе /
Information about the author**

Абузарр Каримович Жалнин, аспирант,
АО «НИЦ «Строительство», Москва
e-mail: abduzarr@mail.ru
Abuzarr K. Zhalnin, Postgraduate Student,
JSC Research Center of Construction, Moscow
e-mail: abduzarr@mail.ru