

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

MAKLAKOVA Svetlana Nikolaevna – Senior Lecturer of the Department of Building Structures, Kostroma State Agricultural Academy, 34, Karavajevo, Kostroma region, 156530, Russia.
E-mail: *aviapetra@mail.ru*

GALKINA Marina Aleksandrovna – Senior Lecturer of the Department of Building Structures, Kostroma State Agricultural Academy, 34, Karavajevo, Kostroma region, 156530, Russia.
E-mail: *aviapetra@mail.ru*

BROVKIN Pavel Nikolaevich – General Director of LLC «Stroika», 21, Gagarina St, Kostroma region, 156000, Russia.

CITATION FOR AN ARTICLE

Maklakova S.N., Galkina M.A., Brovkin V.N. Study of concrete strength under biaxial compression // Vestnik of Tver State Technical University. Series «Building. Electrical engineering and chemical technology». 2022. No. 1 (13), pp. 23–28.

УДК 69.04**МОДЕЛЬ МЕХАНИКИ РАЗРУШЕНИЯ ЖЕЛЕЗОБЕТОНА*****С.В. Черемных****Тверской государственный технический университет (г. Тверь)*

© Черемных С.В., 2022

Аннотация. В статье рассматривается контактная задача определения напряжений и деформаций в статически неопределимых железобетонных элементах с трещинами. Расчетная схема представляется в виде системы блоков, разделенных трещинами и связанных между собой сжатой зоной бетона и растянутой арматурой. Усилия в сечении с трещиной определяются из решения уравнений метода сил, а все перемещения вычисляются на основе метода Мора или способа Верещагина. Устанавливаются различные положения трещины, при которых определяется такое ее положение, когда напряженно-деформированное состояние конструкции наиболее неблагоприятно как по прочности, так и по деформациям. На основании вычислений сравниваются значения, рассчитанные представленным в статье методом, и решения, выполненные согласно нормативной документации.

Ключевые слова: метод сил, деформация, железобетонный элемент, растянутая арматура, сжатый бетон, трещины, метод Мора.

DOI: 10.46573/2658-7459-2022-28-38**ВВЕДЕНИЕ**

Одним из способов ускорения научно-технического прогресса в строительстве является повышение прочности бетона и оптимизация его деформативных свойств. По этому поводу написано множество научных трудов, в которых теории и предположения подтверждены экспериментально и вычислительно [1–8].

Для проведения вычислений классическим примером расчетной схемы является балка, расположенная на двух опорах. Расчетная схема представляется в виде системы блоков, разделенных трещинами и связанных между собой сжатой зоной бетона и растянутой арматурой (рис. 1).

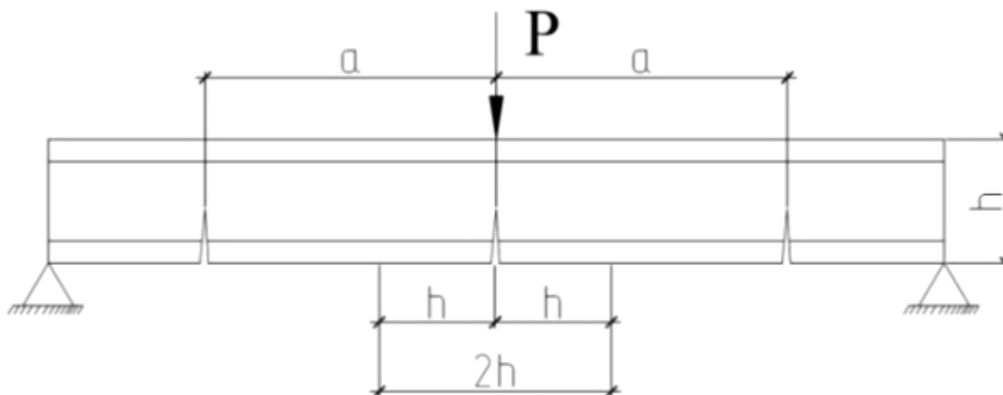


Рис. 1. Расчетная схема железобетонной балки с трещинами

Задача определения напряжений и деформаций рассматривается как контактная для смешанных блоков с удовлетворением граничных условий по длине балки, учитывающих сцепление арматуры с бетоном по линии контакта между блоками с учетом поля напряжения в вершине трещины.

Трещины изначально образуются в растянутой зоне, перпендикулярно продольной оси, и развиваются без нарушения сплошности сжатой зоны. По мере роста первичных, а также возникающих между ними вторичных трещин сжатая зона уменьшается. Однако в отличие от неармированных элементов сжатая зона железобетонной конструкции имеет определенное минимальное значение, обусловленное физико-механическими свойствами материалов и коэффициентом армирования. Эта минимальная высота сжатой зоны бетона является препятствием для развития поперечных трещин, при ее достижении рост трещин приостанавливается.

Ведущими факторами процесса разрушения являются текучесть арматуры и образование продольных трещин в сжатом бетоне при его поперечном деформировании и сжатии продольных трещин с вершинами поперечных [9–14].

В соответствии с моделью расчета по двум смежным трещинам, отстающим друг от друга на $l_{cr} = 2a_l$, из элемента выделяется прямоугольный блок длиной $2a_l$ (см. рис. 1).

Грани блока в области раскрытия трещин свободны от напряжений, а в области сопряжения соседних блоков загружены распределенной нагрузкой, равной нормальным напряжениям при продолжении трещины.

Условием стабильности системы трещин является условие $k_I \leq k_{IC}$, где k_I – коэффициент интенсивности напряжений; k_{IC} – критический коэффициент интенсивности напряжений.

Если $k_I > k_{IC}$, то трещина распространяется. В армированных железобетонных элементах функция k_I имеет сначала восходящую ветвь, на которой поведение трещины неустойчиво, т. е. малое увеличение нагрузки может привести к значительному росту

трещины, затем нисходящую ветвь – область устойчивого роста, характеризующуюся тем, что малое увеличение нагрузки приводит к малому росту трещин.

Глубины распространения трещин, при которых $k_l = 0$, являются максимальными. Нагрузка, соответствующая предельным длинам поперечных трещин, близка к значению разрушающей нагрузки. В малоармированных железобетонных изгибающих конструкциях имеет место образование единичных локальных трещин вследствие температурно-усадочных деформаций в строительный период и на ранних стадиях нагружения. Трещины при этом располагаются с большим шагом $l_{cr} > 2h$ и могут проникать на значительную глубину [15, 16].

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Алгоритм расчета статически неопределимых железобетонных элементов с трещинами:

1. Для заданной расчетной схемы конструкции строим эпюры изгибающих моментов и поперечных сил M^0 и Q^0 как для упругой задачи.

2. По условию прочности определяем площадь арматуры согласно сечению, изображенному на рис. 2.

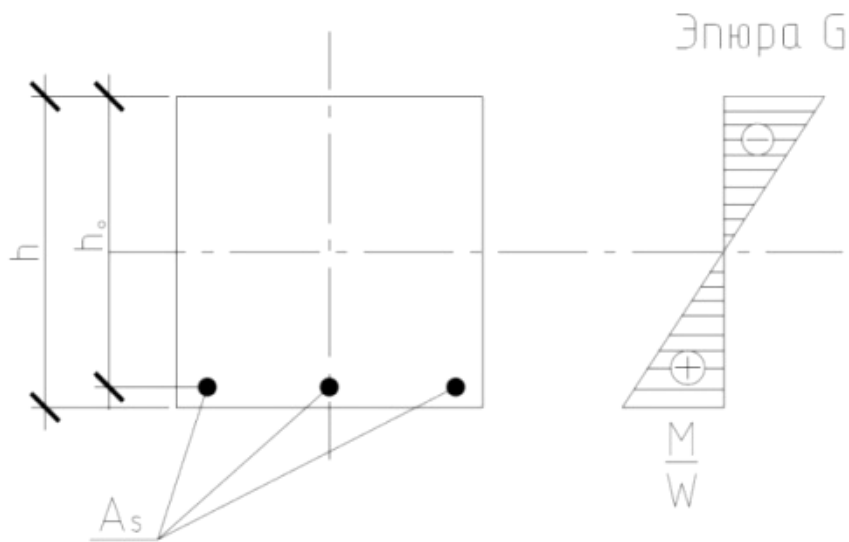


Рис. 2. Сечение железобетонной балки с трещинами

Предварительно вычислим величины α_m и A_s :

$$\alpha_m = \frac{M^0}{R_b \cdot b \cdot h_0^2}; \quad (1)$$

$$A_s = \xi \cdot b \cdot h_0 \cdot \frac{R_b}{R_s}, \quad (2)$$

где R_b – расчетное сопротивление бетона осевому сжатию, МПа; b – ширина сечения балки, м; h_0 – рабочая высота сечения, м; ξ – относительная высота сжатой зоны бетона;

R_s – расчетное сопротивление арматуры растяжению, МПа; A_s – площадь сечения арматуры, м^2 .

Полагаем, что трещины в бетоне уже имеются. Необходимо установить, будет ли трещина неустойчива при $M = M^0$.

3. При известных k_{IC} и M^0 находим приведенный коэффициент интенсивности напряжений L :

$$L = \frac{K_{IC} \cdot b \cdot h_0^{3/2}}{M^0}. \quad (3)$$

Вычислив по формуле (3) значение L и зная коэффициент армирования μ , по экспериментальным графикам, изображенным на рис. 3, определяем относительную глубину проникновения трещин в первом приближении.

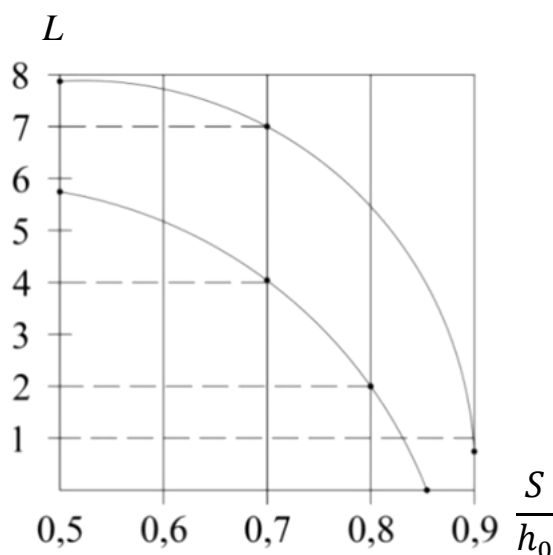


Рис. 3. Экспериментальный график проникновения трещин

По значениям на основе экспериментальных графиков определяем ξ , A_s , M_b и вычисляем напряжения в арматуре по формуле

$$\sigma_s = \frac{M^0 - M_b}{A_s \cdot (h_0 - x/3)}, \quad (4)$$

а также в сжатом бетоне для сечения с трещиной по уравнению

$$\sigma_b = \frac{2[\sigma_s A_s + M_b / 2(h - S)]}{\xi \cdot b \cdot h_0}, \quad (5)$$

где x – высота сжатой зоны бетона над трещиной; S – глубина трещины.

Наличие трещин изменяет жесткость сечения в окрестности трещины и ведет к перераспределению моментов и сил. Неизвестные усилия M и Q в сечении с трещиной определяются из решения уравнений метода сил.

$$\begin{cases} M(\delta_{MM} + \delta_M^*) + Q\delta_{MQ} + \Delta_M = 0; \\ M\delta_{QM} + Q\delta_{QQ} + \Delta_Q = 0; \\ \delta_{MQ} = \delta_{QM}, \end{cases} \quad (6)$$

где δ_{MM} – угол поворота сечения с трещиной от единичного момента в этом сечении; δ_M^* – дополнительный единичный угол поворота сечения с трещиной, учитывающий нелинейность расчета за счет раскрытия трещин; δ_{QQ} – прогиб сечения с трещиной от единичной силы в этом сечении; Δ_Q, Δ_M – перемещения от действия внешней нагрузки, при которых Δ_Q определяется от действия перерезывающей силы, а Δ_M – от действия изгибающего момента.

Место воздействия единичных усилий представляется в соответствии с рис. 4.

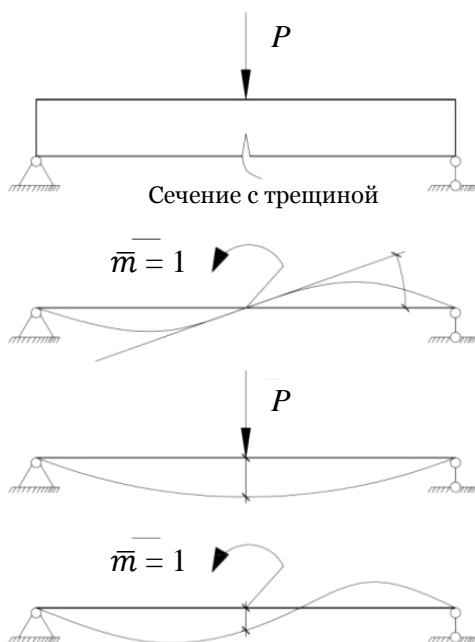


Рис. 4. Единичные усилия на балку

Все перемещения вычисляются на основе метода Мора или способа Верещагина:

$$\delta_M^* = 2 \cdot h \cdot \left(\frac{\bar{\varepsilon}_s + \bar{\varepsilon}_b}{h_0 \cdot M} - \frac{1}{E_b \cdot I_{red}} \right), \quad (7)$$

где $\left(\frac{2h}{E_b \cdot I_{red}} \right)$ – угол поворота упругой части балки на участке $2h$ от трещины; $2h$ – экспериментально обоснованная зона влияния трещины на жесткость балки (зона изменения жесткости балки за счет наличия трещины), м; E_b – начальный модуль упругости бетона при сжатии и растяжении, МПа; I_{red} – момент инерции сечения всего бетона относительно центра тяжести сечения элемента, м⁴; $\bar{\varepsilon}_b$ и $\bar{\varepsilon}_s$ – средние деформации

бетона и арматуры на участке $2h$, определяемые соответственно как $\bar{\varepsilon}_b = \frac{\sigma_b \psi_b}{E_b}$ и $\bar{\varepsilon}_s = \frac{\sigma_s \psi_s}{E_s}$ (ψ_s и ψ_b – эмпирические коэффициенты; E_s – модуль упругости арматуры, МПа).

При новом значении M в сечении с трещиной $M < M^0$ переходим к следующей итерации. Процесс расчета заканчиваем, получив неравенство

$$M^i - M^{i-1} < \zeta, \quad (8)$$

где i – номер итерации; ζ – заданная точность решения.

Задаваясь различными положениями трещины, можно выявить такое, при котором напряженно-деформированное состояние конструкции наиболее неблагоприятно как по прочности, так и по деформациям [17].

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

В качестве примера рассмотрим железобетонную балку шириной $b = 0,1$ м, высотой $h = 0,06$ м, длиной $l = 8,0$ м (рис. 5). В качестве исходных данных имеем следующие характеристики материала: модуль упругости арматуры $E_s = 2,1 \cdot 10^5$ МПа; начальный модуль упругости бетона при сжатии и растяжении $E_b = 2,65 \cdot 10^4$ МПа; нормативное сопротивление бетона осевому растяжению $R_{bt} = 1,3$ МПа; $R_s = 270$ МПа; $R_b = 11$ МПа; $k_{IC} = 1,7$ МПа·м; $4k^4 = \partial / EI$; коэффициент постели $\partial = 50$ кН/м³; момент инерции сечения $I = 0,018$ м⁴.

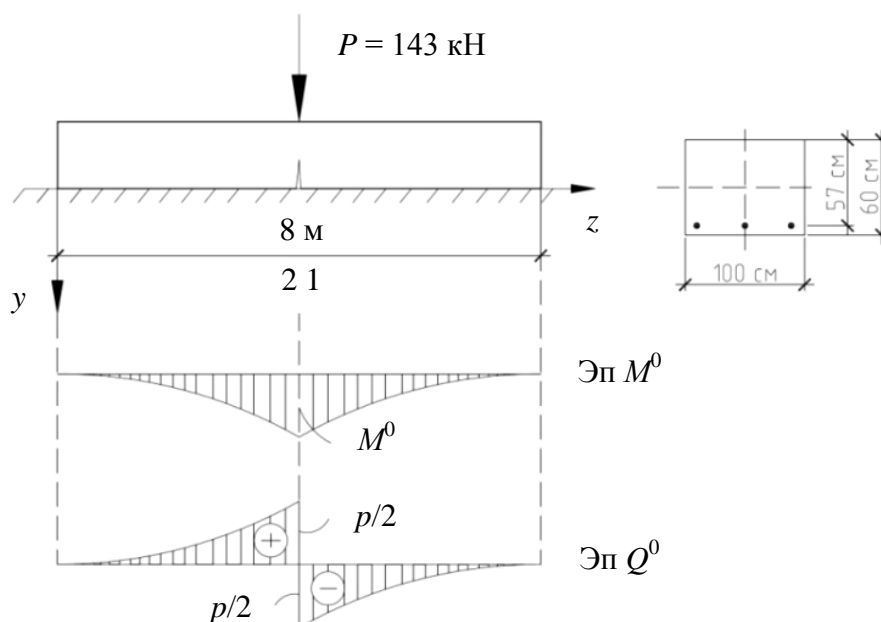


Рис. 5. Расчетная схема

Момент сопротивления сечения принимаем равным $W_0 = \frac{bh^2}{6} = 0,06 \text{ м}^3$, а пластический момент сопротивления растянутой зоны бетона $W_{pl} = \frac{bh^2}{3,5} = 0,105 \text{ м}^3$.

Далее вычисляем момент трещиностойкости бетона $M_{crc} = W_{pl} \cdot R_{bt} = 0,105 \cdot 1,3 = 136,5 \text{ кН} \cdot \text{м}$, сравнив его с изгибающим моментом сечения $M^0 = 135 \text{ кН} \cdot \text{м} \Rightarrow M^0 < M_{crc}$.

Определяем площадь арматуры (см. формулы (1) и (2)):

$$\alpha_m = \frac{M^0}{R_b \cdot b \cdot h_0^2} = \frac{0,135}{11 \cdot 1 \cdot 0,57^2} = 0,038;$$

$$A_s = \xi \cdot b \cdot h_0 \cdot \frac{R_b}{R_s} = 0,04 \cdot 1 \cdot 0,57 \cdot \frac{11}{270} = 9,3 \text{ см}^2,$$

где относительная высота сжатой зоны бетона принимается $\xi = 0,04$ м.

Далее определяем коэффициент армирования μ и приведенный коэффициент интенсивности напряжений L :

$$\alpha\mu = \alpha \cdot \frac{A_s}{bh} = \frac{E_s}{E_b} \cdot \frac{A_s}{bh} = \frac{2,1 \cdot 10^5}{0,265 \cdot 10^5} \cdot \frac{9,3}{60 \cdot 100} = 0,012,$$

где $\alpha = \frac{E_s}{E_b}$ – коэффициент приведения арматуры к бетону;

$$L = \frac{k_{IC} \cdot b \cdot h_0^{3/2}}{M^0} = \frac{1,7 \cdot 10^6 \cdot 1 \cdot 0,57^{3/2}}{135 \cdot 10^3} = 5,4.$$

Напряжения в сечении с трещиной:

$$\sigma_s = \frac{M - M_b}{A_s (h_0 - x/3)} = 248,5 \text{ МПа};$$

$$\sigma_b = \frac{2[\sigma_s A_s + M_b / 2(h - S)]}{\xi b h_0} = 19,7 \text{ МПа}.$$

Методом Мора определяем единичные и грузовые перемещения сечения с трещиной:
 $\delta_{MM} = 40\,609 \cdot 10^{-6} \text{ м}^{-1}$; $\delta_{QQ} = 20\,214 \cdot 10^{-6} \text{ м}^{-1}$; $\Delta_{MP} = 5\,476 \cdot 10^{-6} \text{ м}^{-1}$; $\Delta_{QP} = 28\,845 \cdot 10^{-6} \text{ м}^{-1}$;
 $\delta_{MQ} = \delta_{QM} = 0$; $\delta_M^* = 6\,827 \cdot 10^{-6} \text{ м}^{-1}$.

Уравнения перемещений имеют вид:

$$M(\delta_{MM} + \delta_M^*) = -\Delta_{MP};$$

$$Q\delta_{QQ} = -\Delta_{QP};$$

$$M = \left| \frac{\Delta_{MP}}{\delta_{MM} + \delta_M^*} \right| = 115,45 \text{ кН} \cdot \text{м}.$$

Разница принятого и полученного в пределах итерации момента

$$\frac{M^0 - M}{M^0} \cdot 100\% = \frac{13,5 - 11,5}{13,5} \cdot 100\% = 14,8\%.$$

Если в качестве допуска взять невязку 5 %, то необходимо выполнить вторую итерацию. Принимаем $M^{(1)} = 115,45$ кН·м и выполняем перерасчет. После второй итерации $M^{(2)} = 112,6$ кН·м (2,5 %), третья итерация к изменениям не приводит.

Окончательные значения примут вид:

$$A_s = 7,4 \text{ см}^2; \sigma_s = 253,98 \text{ МПа}; \sigma_b = 17,15 \text{ МПа.}$$

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Аналогичные расчеты для случая, когда трещина проникает во всю растянутую зону бетона, т. е. без учета работы бетона растянутой зоны, можно выполнить по СП 63.13330.2018.

Расчет трещиностойкости по СП 63.13330.2018 дает следующие результаты:

$$A_s = 7,7 \text{ см}^2; \sigma_s = 271,40 \text{ МПа}; \sigma_b = 8,16 \text{ МПа}; M = 116,40 \text{ МПа,}$$

т. е. неучитывание работы растянутого бетона над трещиной приводит к завышениям напряжений в арматуре и к занижению в сжатом бетоне.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Korotkikh D., Panfilov D., Polikutin A. Modeling of aerated cement concrete structure and increasing its crack resistance // *Materials Science Forum*. 2019. Vol. 945. P. 951–956. DOI: 10.4028/www.scientific.net/MSF.945.951.
2. Sylovanyuk V.P., Yukhym R.Y., Ivantyshyn N.A., Lisnichuk A.E. Prediction of the crack resistance of cement stone and fibrous concrete // *Materials Science*. 2016. Vol. 51. № 4. P. 570–575. DOI: 10.1007/s11003-016-9877-5.
3. Безгоднов И.М., Борисюк Е.А., Кожевников М.М., Свиридов В.Н. Влияние фиксаторов арматуры на трещиностойкость железобетонных конструкций // *Технологии бетонов*. 2016. № 7-8 (120-121). С. 21–23.
4. Иващенко Ю.Г., Страхов А.В., Багапова Д.Ю. Трещиностойкость цементного неавтоклавно пенобетона // *Техническое регулирование в транспортном строительстве*. 2018. № 5 (31). С. 35–38.
5. Никитин Г.П., Симаков В.Д. Трещиностойкость оголовков железобетонных колонн при вертикальном нагружении // *Промышленное и гражданское строительство*. 2017. № 9. С. 42–47.
6. Семенюк О.С., Тур В.В. Параметры трещинообразования изгибаемых элементов из напрягающего бетона // *Вестник Брестского государственного технического университета. Строительство и архитектура*. 2017. № 1 (103). С. 71–81.
7. Polikutin A.E., Potapov Y.B., Levchenko A.V. Experimental research of the durability, crack resistance of the normal sections of bending elements produced of rubber concrete with fiber and their deformability // *Materials Science Forum*. 2018. Vol. 931. P. 232–237. DOI: 10.4028/www.scientific.net/MSF.931.232.
8. Polikutin A.E., Oforkaja T.O., Nguyen P.D. Experimental research on the strength and crack resistance of flexural members normal sections of reinforced rubber concrete of a t-section // *Materials Science Forum*. 2018. Vol. 931. P. 258–263.

9. Yue L., Hongwen L., Yinuo L., Caiyun J. Optimum design of high-strength concrete mix proportion for crack resistance using artificial neural networks and genetic algorithm // *Frontiers in Materials*. 2020. Vol. 7. P. 1–12. DOI: 10.3389/fmats.2020.590661.
10. Struchkova A.Y., Barabanshchikov Yu.G., Semenov K.V., Shaibakova Al.A. Heat dissipation of cement and calculation of crack resistance of concrete massifs // *Magazine of Civil Engineering*. 2018. № 2 (78). P. 128–135.
11. Goncalves J.R.A., Boluk Y., Bindiganavile V. Crack growth resistance in fibre reinforced alkali-activated fly ash concrete exposed to extreme temperatures // *Materials and Structures*. 2018. Vol. 51. № 2. P. 42.
12. Dang J., Miao W., Zhao J., Du Z. Effect of superabsorbent polymer on the shrinkage and crack resistance of concrete at early age // *Iranian Polymer Journal (English Edition)*. 2018. Vol. 27. № 5. P. 349–358.
13. Sandan A.S., Kysydak A.S. Using fine aggregate to improve concrete properties // *Components of Scientific and Technological Progress*. 2018. № 4 (38). P. 20–22.
14. Mansur M.A., Islam M.M. Interpretation of concrete strength for nonstandard specimens // *Journal of Materials in Civil Engineering*. 2012. Vol. 14. Iss. 2. P. 151–155.
15. Федорова Н.В., Губанова М.С. Трещиностойкость и прочность шва контакта железобетонной коррозионно поврежденной составной балки-стенки при силовом нагружении // *Научный журнал строительства и архитектуры*. 2018. № 1 (49). С. 11–21.
16. Wang L., Yang H.Q., Zhou S.H., Chen E., Tang S.W. Mechanical properties, long-term hydration heat, shrinkage behavior and crack resistance of dam concrete designed with low heat portland (Ihp) cement and fly ash // *Construction and Building Materials*. 2018. Vol. 187. P. 1073–1091. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2018.08.056.
17. Масиулла А.К. Моделирование трещиностойкости легкого бетона на сжатие в критическом состоянии по механике разрушений в программе ANSYS // *БСТ: Бюллетень строительной техники*. 2021. № 11 (1047). С. 29–31.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРЕ

ЧЕРЕМНЫХ Степан Валерьевич – канд. техн. наук, депутат Тверской городской Думы, доцент кафедры конструкций и сооружений, ФГБОУ ВО «Тверской государственный технический университет», 170026, г. Тверь, наб. А. Никитина, д. 22. E-mail: *cheremnykh_s.v@mail.ru*

БИБЛИОГРАФИЧЕСКАЯ ССЫЛКА

Черемных С.В. Модель механики разрушения железобетона // Вестник Тверского государственного технического университета. Серия «Строительство. Электротехника и химические технологии». 2022. № 1 (13). С. 28–38.

MODEL OF REINFORCED CONCRETE FRACTURE MECHANICS*S.V. Cheremnykh**Tver State Technical University (Tver)*

Abstract. The contact problem of determining stresses and deformations in statically indeterminate reinforced concrete elements with cracks is considered. The design scheme is presented in the form of a system of blocks separated by cracks and interconnected by a compressed zone of concrete and stretched reinforcement. The forces in the crack section are determined from solving the equations of the force method, and all displacements are calculated based on the Mohr method or the Vereshchagin method. Various positions of the crack are established, at which its position is determined when the stress-strain state of the structure is most unfavorable both in strength and deformations. Based on the calculations, the values calculated by the method presented in the article and the solutions made according to the regulatory documentation are compared.

Keywords: force method, deformation, reinforced concrete element, stretched reinforcement, compressed concrete, cracks, Mora method.

REFERENCES

1. Korotkikh D., Panfilov D., Polikutin A. Modeling of aerated cement concrete structure and increasing its crack resistance. *Materials Science Forum*. 2019. Vol. 945, pp. 951–956. DOI: 10.4028/www.scientific.net/MSF.945.951.
2. Sylovanyuk V.P., Yukhym R.Y., Ivantyshyn N.A., Lisnichuk A.E. Prediction of the crack resistance of cement stone and fibrous concrete. *Materials Science*. 2016. Vol. 51. No. 4, pp. 570–575. DOI: 10.1007/s11003-016-9877-5.
3. Bezgodov I.M., Borisyuk E.A., Kozhevnikov M.M., Sviridov V.N. The effect of reinforcement clamps on the crack resistance of reinforced concrete structures. *Tehnologii betonov*. 2016. No. 7-8 (120-121), pp. 21–23. (In Russian).
4. Ivashchenko Yu.G., Strakhov A.V., Agapova D.Yu. Crack resistance of cement non-autoclaved foam concrete. *Tehnicheskoe regulirovanie v transportnom stroitelstve*. 2018. No. 5 (31), pp. 35–38. (In Russian).
5. Nikitin G.P., Simakov V.D. Crack resistance of the heads of reinforced concrete columns under vertical loading. *Promishlennoe i grajdanskoe stroitelstvo*. 2017. No. 9, pp. 42–47. (In Russian).
6. Semenyuk O.S., Typ V.V. Parameters of crack formation of bent elements from straining concrete. *Vestnik Brestskogo gosudarstvennogo tehnikeskogo universiteta. Stroitelstvo i arhitektura*. 2017. No. 1 (103), pp. 71–81. (In Russian).
7. Polikutin A.E., Potapov Y.B., Levchenko A.V. Experimental research of the durability, crack resistance of the normal sections of bending elements produced of rubber concrete with fiber and their deformability. *Materials Science Forum*. 2018. Vol. 931, pp. 232–237. DOI: 10.4028/www.scientific.net/MSF.931.232.
8. Polikutin A.E., Oforkaja T.O., Nguyen P.D. Experimental research on the strength and crack resistance of flexural members normal sections of reinforced rubber concrete of a t-section. *Materials Science Forum*. 2018. Vol. 931, pp. 258–263.

9. Yue L., Hongwen L., Yinuo L., Caiyun J. Optimum design of high-strength concrete mix proportion for crack resistance using artificial neural networks and genetic algorithm. *Frontiers in Materials*. 2020. Vol. 7, pp. 1–12. DOI: 10.3389/fmats.2020.590661.
10. Struchkova A.Y., Barabanshchikov Yu.G., Semenov K.V., Shaibakova Al.A. Heat dissipation of cement and calculation of crack resistance of concrete massifs. *Magazine of Civil Engineering*. 2018. No. 2 (78), pp. 128–135.
11. Goncalves J.R.A., Boluk Y., Bindiganavile V. Crack growth resistance in fibre reinforced alkali-activated fly ash concrete exposed to extreme temperatures. *Materials and Structures*. 2018. Vol. 51. No. 2, pp. 42.
12. Dang J., Miao W., Zhao J., Du Z. Effect of superabsorbent polymer on the shrinkage and crack resistance of concrete at early age. *Iranian Polymer Journal (English Edition)*. 2018. Vol. 27. No. 5, pp. 349–358.
13. Sandan A.S., Kysydak A.S. Using fine aggregate to improve concrete properties. *Components of Scientific and Technological Progress*. 2018. No. 4 (38), pp. 20–22.
14. Mansur M.A., Islam M.M. Interpretation of concrete strength for nonstandard specimens. *Journal of Materials in Civil Engineering*. 2012. Vol. 14. Iss. 2, pp. 151–155.
15. Fedorova N.V., Gubanova M.S. Crack resistance and strength of the contact seam of a reinforced concrete corrosively damaged composite beam-wall under force loading. *Nauchnii jurnal stroitelstva i arhitekturi*. 2018. No. 1 (49), pp. 11–21. (In Russian).
16. Wang L., Yang H.Q., Zhou S.H., Chen E., Tang S.W. Mechanical properties, long-term hydration heat, shrinkage behavior and crack resistance of dam concrete designed with low heat portland (lhp) cement and fly ash. *Construction and Building Materials*. 2018. Vol. 187, pp. 1073–1091. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2018.08.056.
17. Masiulla A.K. Modeling of crack resistance of light concrete for compression in a critical state according to the mechanics of destruction in the program ANSYS. *BST: Byulleten stroitelnoi tehniki*. 2021. No. 11 (1047), pp. 29–31. (In Russian).

INFORMATION ABOUT THE AUTHOR

CHEREMNYKH Stepan Valerievich – Candidate of Technical Sciences, Deputy of the Tver City Duma, Associate Professor of the Department of Constructions and Structures, Tver State Technical University, 22, embankment of A. Nikitin, Tver, 170026, Russia. E-mail: *cheremnykh_s.v@mail.ru*

CITATION FOR AN ARTICLE

Cheremnykh S.V. Model of reinforced concrete fracture mechanics // Vestnik of Tver State Technical University. Series «Building. Electrical engineering and chemical technology». 2022. No. 1 (13), pp. 28–38.