

К оценке жесткости коррозионно-повреждаемых железобетонных балок

Н.С. Курченко, В.А. Гришков

Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет, г. Москва

Аннотация: Рассматриваются альтернативные подходы к оценке жёсткости коррозионно-повреждаемых балок с учетом локализации очага коррозии и развития коррозионных повреждений бетона на основе модели В.М. Бондаренко. Рассмотрены способы определения перемещений коррозионно-поврежденных железобетонных балок прямоугольного сечения. В первом случае жесткость балки при определении прогиба считается постоянной, при этом значения прогибов при коррозионных повреждениях могут оказаться заниженными ввиду неучета действительной работы железобетона. Во втором - прогиб вычисляется с учетом переменной по длине балки высоты сжатой зоны бетона. Для этих подходов моделируется уменьшение жесткости на участках балки при наличии повреждений от коррозии бетона сжатой зоны. Показано, что при наличии коррозионных повреждений прогибы конструкции могут существенно возрастать, что требует обязательного учета в жизненном цикле несущих конструкции сооружений при оценке их механической безопасности.

Ключевые слова: железобетонные балки, прочность железобетонных элементов, изгибная жесткость, деформативность, коррозионное повреждение бетона, высота сжатой зоны, прогибы

В ряде случаев железобетонные несущие конструкции эксплуатируются в средах, являющихся агрессивными или меняющих степень своей агрессивности. Эксплуатация в таких условиях для конструкций без учета возможного снижения прочности и жесткости может привести к значительным социально-экономическим последствиям от аварий. Поэтому проектирование конструкций с учетом безопасности является актуальной задачей. В связи с этим встает вопрос применения тех или иных методик для оценки НДС коррозионно-повреждаемых систем.

Вопросы анализа работы коррозионно-повреждаемых элементов под нагрузкой являются актуальными в мировой строительной науке. Так, отечественными и зарубежными учеными исследуется несущая способность корродированных элементов при динамических многовариантных нагружениях [1-3], моделирование распространения коррозии [4,5], изучаются эффекты потери сцепления арматуры с бетоном [6,7]. Особое

внимание уделяется коррозии арматуры и [8,9] и сопровождающим этот процесс явлениям давления продуктов коррозии на бетон, а также коррозии отдельно бетона и влиянием ее на несущую способность элементов [10]. Однако деформативности элементов, подверженных коррозии, уделяется недостаточное внимание.

В данной статье рассмотрен анализ влияния коррозии сжатой зоны бетона на жесткость балок при постоянной изгибной жесткости; при учете переменного по длине балки размера высоты сжатой зоны бетона; с учетом коррозионного повреждения. Первоначально выполним сравнение прогибов балки, изображённой на рис. 1. При условно постоянной жесткости по СП 63.13330 допускается определять прогиб по известным правилам строительной механики на основе интегралов Мора:

$$\Delta_c = f_{cp} = \frac{5 \cdot q \cdot l^4}{384 \cdot E_{b1} \cdot I}, \quad (1)$$

где q – распределенная нагрузка; l – расчетный пролет балки; $E_{b1} = 0,85E_b$ – модуль деформации бетона при непродолжительном действии нагрузки; I – максимальный момент инерции сечения относительно центральной оси.

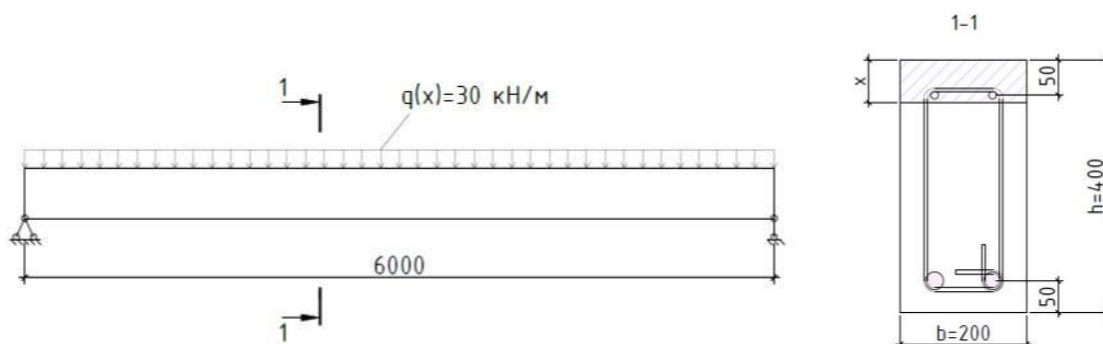


Рис. 1. - Расчетная схема и сечение балки

Получим для заданных размеров и бетона класса В20:

$$\Delta_c = f_{cp} = \frac{5 \cdot 30 \cdot 6^4}{384 \cdot E_{b1} \cdot I} = \frac{506,25}{E_{b1} \cdot I} = 1,567 \text{ см}$$

Используя способ Верещагина, определим прогиб учитывая изменение высоты сжатой зоны приведенного сечения (рис. 2)

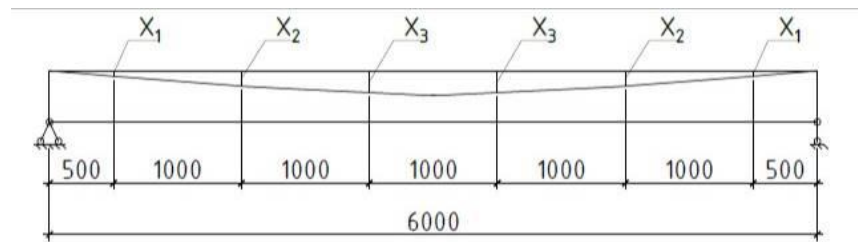


Рис. 2. - Кривая высоты сжатой зоны балки

Далее вычислим геометрические характеристики сечения, приведенного к бетону (рис. 3). Площадь этого сечения:

$$A_{red} = A_b + \alpha \cdot A_s + \alpha \cdot A'_s - A_s - A'_s = A_b + (\alpha - 1) \cdot A_s + (\alpha - 1) \cdot A'_s$$

$$\alpha = \frac{E_s}{E_{b1}}, \quad A_b = b \cdot h \quad (3)$$

Центр тяжести сечения определяется по формуле:

$$z_c = \frac{\sum z_i \cdot A_i}{\sum A_i} = \frac{0.5 \cdot h \cdot A_b + z_s \cdot (\alpha - 1) \cdot A_s + (h - z'_s) \cdot (\alpha - 1) \cdot A'_s}{A_{red}} \quad (4)$$

Момент инерции приведенного сечения с учетом изменения сжатой зоны x вычислим по формулам (5):

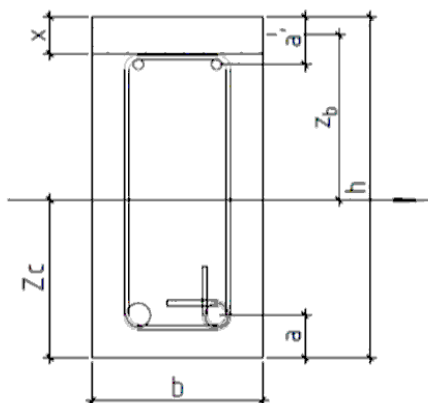


Рис. 3. - К определению геометрических характеристик сечения

Для сечения

$$I_{red} = I_b + I_s + I'_s,$$

Для бетона

$$I_b = \frac{b \cdot x^3}{12} + z_b^2 \cdot A_b,$$

Для арматуры

$$I_s = I_{s0} + z_s^2 \cdot A_s \cdot (\alpha - 1),$$

$$I'_s = I'_{s0} + z_s'^2 \cdot A_s \cdot (\alpha - 1) \quad (5)$$

Растянутый бетон при наступлении предельного состояния не учитываем. Получим:

$$\alpha = \frac{2 \cdot 10^5}{0.85 \cdot 20 \cdot 10^3} = 7.84; A_{red} = 20 \cdot 40 + (7.84 - 1) \cdot 12.32 + (7.84 - 1) \cdot 2.26 = 899.7 \text{ см}^2,$$

Для учета изменения высоты сжатой зоны бетона при определении перемещений разделим балку на равные части по длине (рис. 4.).

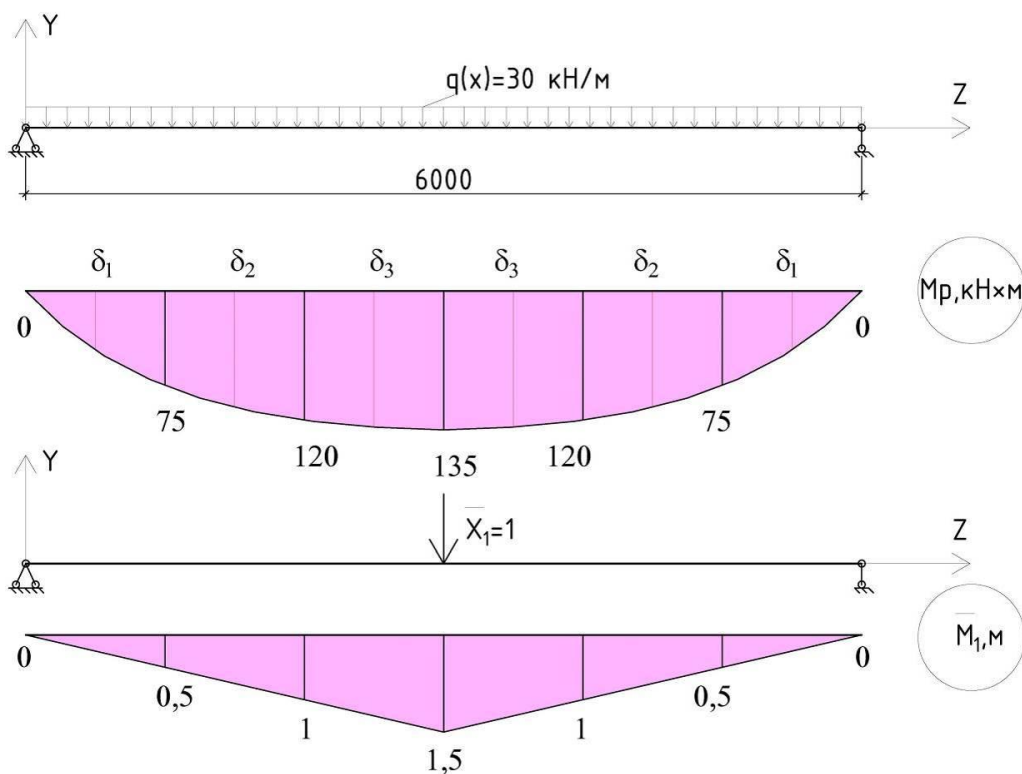


Рис. 4. - Сегменты железобетонной балки

Используя правило Верещагина для взятия интегралов Мора с учетом разделения балки на 6 равных частей получим:

$$\Delta = \int_0^l \frac{M \cdot M_p}{E \cdot I} dz = 2 \cdot (\delta_1 + \delta_2 + \delta_3). \quad (6)$$

Тогда для сечений в серединах участков δ_1 :

$$I_{red}^{(1)} = \frac{b \cdot x^3}{12} + z_b^2 \cdot A_b + z_s^2 \cdot A_s \cdot (\alpha - 1) + z_s'^2 \cdot A_s \cdot (\alpha - 1) = 50334 \text{ см}^4$$

$$\delta_1 = \frac{1}{E_{b1} \cdot I_{red}^{(1)}} \cdot \left[0.5 \cdot 1 \cdot 75 \cdot \frac{2}{3} \cdot 0.5 + \frac{30 \cdot 1^3}{12} \cdot 0.5 \cdot 0.5 \right] = \frac{13.125}{E_{b1} \cdot I_{red}^{(1)}} = 0.102 \text{ см}$$

Для сечений в середине участков δ_2 :

$$I_{red}^{(2)} = \frac{b \cdot x^3}{12} + z_b^2 \cdot A_b + z_s^2 \cdot A_s \cdot (\alpha - 1) + z_s^2 \cdot A_s \cdot (\alpha - 1) = 77022 \text{ см}^4,$$

а перемещение:

$$\delta_2 = \frac{1}{E_{b1} \cdot I_{red}^{(2)}} \cdot \left[\frac{1}{6} \cdot (2 \cdot 75 \cdot 0.5 + 2 \cdot 120 \cdot 1 + 75 \cdot 1 + 120 \cdot 0.5) + \frac{30 \cdot 1^3}{12} \cdot \frac{(1+0.5)}{2} \right] =$$
$$= \frac{76.875}{E_{b1} \cdot I_{red}^{(2)}} = 0.391 \text{ см}^4$$

Для сечений в середине участков δ_3 :

$$I_{red}^{(3)} = \frac{b \cdot x^3}{12} + z_b^2 \cdot A_b + z_s^2 \cdot A_s \cdot (\alpha - 1) + z_s^2 \cdot A_s \cdot (\alpha - 1) = 81609 \text{ см}^4,$$

а перемещение:

$$\delta_3 = \frac{1}{E_{b1} \cdot I_{red}^{(3)}} \cdot \left[\frac{1}{6} \cdot (2 \cdot 120 \cdot 1 + 2 \cdot 135 \cdot 1.5 + 120 \cdot 1.5 + 135 \cdot 1) + \frac{30 \cdot 1^3}{12} \cdot \frac{(1+0.5)}{2} \right] =$$
$$= \frac{163.125}{E_{b1} \cdot I_{red}^{(3)}} = 0.784 \text{ см}^4$$

Таким образом, прогиб в середине пролета по (6) составит:

$$\Delta_c = 2 \cdot (\delta_1 + \delta_2 + \delta_3) = 2 \cdot (0.102 + 0.391 + 0.784) = 2.555 \text{ см}.$$

Как видим, прогибы, вычисленные на основе первого и второго подходов существенно отличаются. Учет снижение модуля упругости E при коррозионном повреждении бетона сжатой зоны балки. Для учета снижения жесткости в результате коррозионного повреждения бетона и арматуры балки, используем модель повреждений нормального сечения, описанную в работе [11]. Сжатая зона будет включать три участка А, Б и С, показанные на рис. 5, а.

При расчетах модули упругости бетона участков вычислены следующим образом: зона А (полностью повреждена коррозией): $E_A = 0.1 \cdot E_{b1}$; зона В

(частично повреждена коррозией): модуль упругости меняется от значения $0.08E_{b1}$ до E_{b1} в соответствии с формулой:

$$E_{b(z+i)} = E_{b(z)} + \Delta E_b \cdot K(i), \quad K(i) = 1 + \frac{z_{bi}}{\delta} + \frac{z_{bi}^2}{\delta^2}, \quad (7)$$

где $K(i)$ – функция коррозии, z_{bi} – координаты центров слоев в границах интервала $[0; \delta]$. В зоне С коррозионные повреждения отсутствуют.

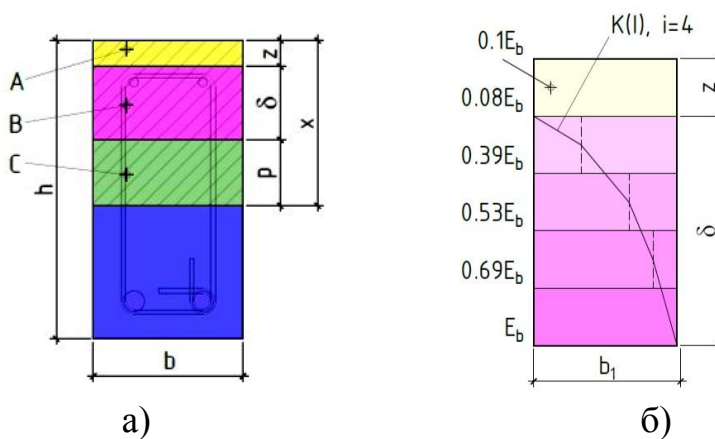


Рис. 5. - Модель коррозионно поврежденной сжатой зоны бетона (а), к расчету модуля упругости (б)

Рассмотрим сценарии коррозионного повреждения в соответствии с рис. 6. Положим, $z = 0,8 \cdot a'$, $\delta = 1/3 \cdot h_0$.

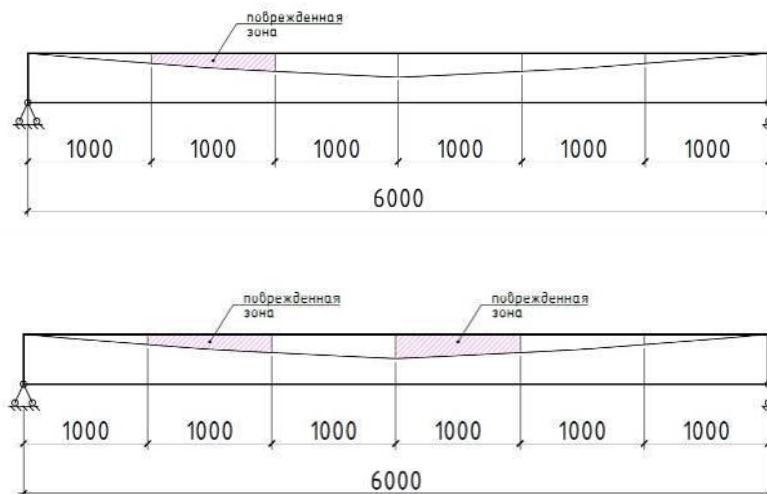


Рис. 7. - Расчетные случаи «№1» (сверху) и №2 (снизу)

Выполним определение перемещений с учетом модели повреждений от коррозии. С учетом допущения о малости слоя z , аналогично выполненным выше расчетам, для случая №1 получим:

$$I_{red}^{(1)} = \frac{b \cdot x^3}{12} + z_b^2 \cdot A_b + z_s^2 \cdot A_s \cdot (\alpha_1^{kop} - 1) + z_s^2 \cdot A_s \cdot (\alpha_1^{kop} - 1) = 72131 \text{ см}^4,$$

$$\delta_1^{kop} = \frac{1}{E_{b1} \cdot I_{red}^{(1)}} \cdot \left[0.5 \cdot 1 \cdot 75 \cdot \frac{2}{3} \cdot 0.5 + \frac{30 \cdot 1^3}{12} \cdot 0.5 \cdot 0.5 \right] = 0.109 \text{ см.}$$

$$I_{red}^{(2)} = \frac{b \cdot x^3}{12} + z_b^2 \cdot A_b + z_s^2 \cdot A_s \cdot (\alpha_2^{kop} - 1) + z_s^2 \cdot A_s \cdot (\alpha_2^{kop} - 1) = 98667 \text{ см}^4,$$

$$\delta_2^{kop} = \frac{1}{E_{b1} \cdot I_{red}^{(2)}} \cdot \left[\frac{1}{6} \cdot (2 \cdot 75 \cdot 0.5 + 2 \cdot 120 \cdot 1 + 75 \cdot 1 + 120 \cdot 0.5) + \frac{30 \cdot 1^3}{12} \cdot \frac{(1+0.5)}{2} \right] = 0.468 \text{ см.}$$

$$I_{red}^{(3)} = \frac{b \cdot x^3}{12} + z_b^2 \cdot A_b + z_s^2 \cdot A_s \cdot (\alpha_3^{kop} - 1) + z_s^2 \cdot A_s \cdot (\alpha_3^{kop} - 1) = 100766 \text{ см}^4,$$

$$\delta_3^{kop} = \frac{1}{E_{b1} \cdot I_{red}^{(3)}} \cdot \left[\frac{1}{6} \cdot (2 \cdot 120 \cdot 1 + 2 \cdot 135 \cdot 1.5 + 120 \cdot 1.5 + 135 \cdot 1) + \frac{30 \cdot 1^3}{12} \cdot \frac{(1+0.5)}{2} \right] = 0.973 \text{ см.}$$

Для расчетного случая №1 прогиб в середине пролета балки равен:

$$\Delta_{c1} = 2 \cdot (\delta_1 + \delta_3) + \delta_2 + \delta_2^{kop} = 2 \cdot (0.102 + 0.784) + 0.391 + 0.468 = 2.631 \text{ см.}$$

Для расчетного случая №2:

$$\Delta_{c2} = 2 \cdot \delta_1 + \delta_2 + \delta_2^{kop} + \delta_3 + \delta_3^{kop} = 2 \cdot 0.102 + 0.391 + 0.468 + 0.784 + 0.973 = 2.82 \text{ см.}$$

Сопоставление результатов расчета приведено в таблице.

Таблица

Максимальный прогиб балки

Вариант расчета	Описание	Перемещение, см
1	$EI = const$	1,576
2	$x \neq const$	2,555
3	Расчетный случай №1	2,631
4	Расчетный случай №2	2,820

Анализ таблицы показывает, что выбор подхода к расчету жесткости железобетонных балок может существенно влиять на как безопасность проектного решения, так и на его эксплуатационные качества. Явление коррозии требует дальнейшего прежде всего экспериментального изучения для эффективного использования как в численном моделировании разрушений в результате силовых воздействий [12,13,14], механически повреждаемых систем [15,16], так и при поиске безопасных и эффективных решений на основе оптимизации. Например, целесообразно разработать механизм учета коррозии в схемах, базирующихся на генетических поисковых алгоритмах [17,18,19], а также в классических вероятностных методах на базе теории надежности [20].

Вывод

Наличие условий работы железобетонных балок, предусматривающих коррозионные повреждения бетона, существенно влияют на ограничения по перемещениям, которые формируются на основе эстетико-психологических требований. Существенные повреждения коррозией могут привести к возникновению хрупкого характера разрушения, так как меняют размеры и расположение сжатой зоны бетона. При этом расчетное обоснование и моделирование повреждений от коррозии требует дальнейших теоретических и экспериментальных исследований.

Литература

1. Тамразян А.Г., Попов Д.С. Напряженно-деформированное состояние коррозионно-поврежденных железобетонных элементов при динамическом нагружении. Промышленное и гражданское строительство. 2019. №2. С. 19-26. DOI:10.33622/0869-7019.2019.02.19-26.
2. Daneshvar K., Moradi M.J., Ahmadi K. and Hajiloo H. 2021. "Strengthening of Corroded Reinforced Concrete Slabs under Multi-Impact

Loading: Experimental Results and Numerical Analysis.” Construction and building materials 284. URL: doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.122650.

3. Daneshvar, K., Moradi M. J., Ahmadi K., Mahdavi G., and Hariri-Ardebili M.A. 2021. “Dynamic Behavior of Corroded RC Slabs with Macro-Level Stochastic Finite Element Simulations.” Engineering structures 239. URL: doi.org/10.1016/j.engstruct.2021.112056.

4. Zhang, W.-P., Chen J.-P., Yu Q.-Q., and Gu X.-L. 2021. “Corrosion Evolution of Steel Bars in RC Structures Based on Markov Chain Modeling.” Structural safety 88. URL: doi.org/10.1016/j.strusafe.2020.102037.

5. Бондаренко В.М. Специфика силового сопротивления поврежденных коррозией железобетонных конструкций и новые факторы разрушения. Строительство и реконструкция. 2009. №4. С. 28-33.

6. Yu, X., S. Robuschi, Fernandez I., and Lundgren K. 2021. “Numerical Assessment of Bond-Slip Relationships for Naturally Corroded Plain Reinforcement Bars in Concrete Beams.” Engineering structures 239. URL: doi.org/10.1016/j.engstruct.2021.112309.

7. Fu, C., Fang D., Ye H., Huang L., and Wang J. 2021. “Bond Degradation of Non-Uniformly Corroded Steel Rebars in Concrete.” Engineering structures 226. URL: doi.org/10.1016/j.engstruct.2020.111392.

8. Zhang, K., Xiao J., and Zhang Q. 2021. Time-Dependent Reliability Analysis of Recycled Aggregate Concrete Cover Cracking Induced by Reinforcement Corrosion. Journal of building engineering 39. URL: doi.org/10.1016/j.job.2021.102320.

9. Bairan M., Oller E., and Duarte N. Modeling Serviceability Performance and Ultimate Capacity of Corroded Reinforced and Prestressed Concrete Structures. Structural concrete. URL: doi.org/10.1002/suco.202100159.

10. He S., Cao, Z., Ma J., Shuai Z., Li P., and Wang H. 2021. “Influence of Corrosion and Fatigue on the Bending Performances of Damaged Concrete

Beams.” Advances in civil engineering 2021. URL: doi.org/10.1155/2021/6693224.

11. Смоляго Г.А., Дронов А.В., Фролов Н.В. Моделирование величины коррозионных повреждений арматуры железобетонных конструкций в условиях хлоридной агрессивной среды // Известия Юго-Западного государственного университета. 2017. Т. 21, № 1(70). С. 43–49.

12. Манаенков И.К. Сравнительный анализ результатов расчета плоских железобетонных плит на продавливание // Инженерный вестник Дона. 2022. No 2. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n2y2022/7480

13. Филатов В.Б., Галяутдинов З.Ш., Коваленко М.В. Экспериментальное исследование работы железобетонной плиты перекрытия при продавливании колонной // Инженерный вестник Дона. 2020. № 6. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/N6y2020/6518

14. Алексейцев А.В., Антонов М.Д. Динамика безбалочных железобетонных каркасов сооружений при повреждениях плит продавливанием // Строительство и реконструкция. 2021. № 4 (96). С. 23-34.

15. Alekseytsev A.V. Mechanical safety of reinforced concrete frames under complex emergency actions // Magazine of Civil Engineering. 2021. № 3 (103). С. 10306.

16. Tamrazyan A., Alekseytsev A. Evolutionary optimization of reinforced concrete beams, taking into account design reliability, safety and risks during the emergency loss of supports. In E3S Web of Conferences. 22nd International Scientific Conference on Construction the Formation of Living Environment, FORM 2019. 2019. С. 04005.

17. Тамразян А.Г., Алексейцев А.В. Эволюционная оптимизация нормально эксплуатируемых железобетонных балочных конструкций с учетом риска аварийных ситуаций // Промышленное и гражданское строительство. 2019. № 9. С. 45-50.

18. Тамразян А.Г., Алексейцев А.В. Современные методы оптимизации конструктивных решений для несущих систем зданий и сооружений // Вестник МГСУ. 2020. Т. 15. № 1. С. 12-30.

19. Серпик И.Н., Муймаров К.В., Швачко С.Н. Оптимизация железобетонных плит с использованием генетического алгоритма //Строительная механика и расчет сооружений. 2015. № 1 (258). С. 30-36.

20. Гениев Г.А., Колчунов В.И., Дегтярь А.Н. Вопросы оптимизации характеристик надежности железобетонных многопролетных балок с позиции минимальной вероятности их отказа. // Новые энергосберегающие архитектурно-конструктивные решения жилых гражданских зданий. 2003. С. 163-166.

References

1. Tamrazyan A.G., Popov D.S. Promyshlennoye i grazhdanskoye stroitel'stvo. 2019. №2. P. 19-26.DOI:10.33622/0869-7019.2019.02.19-26.

2. Daneshvar K., Moradi M.J., Ahmadi K. and Hajiloo H. 2021. Construction and building materials 284. URL: doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.122650.

3. Daneshvar, K., Moradi M. J., Ahmadi K., Mahdavi G., and Hariri-Ardebili M.A. 2021. Engineering structures 239. URL: doi.org/10.1016/j.engstruct.2021.112056.

4. Zhang, W.-P., Chen J.-P., Yu Q.-Q., and Gu X.-L. 2021. Structural safety 88. URL: doi.org/10.1016/j.strusafe.2020.102037.

5. Bondarenko V.M. Stroitel'stvo i rekonstruktsiya. 2009. №4. P. 28-33.

6. Yu, X., S. Robuschi, Fernandez I., and Lundgren K. 2021. Engineering structures 239. URL: doi.org/10.1016/j.engstruct.2021.112309.

7. Fu, C., Fang D., Ye H., Huang L., and Wang J.. 2021. Engineering structures 226. URL: doi.org/10.1016/j.engstruct.2020.111392.



8. Zhang, K., Xiao J., and Zhang Q. 2021. Journal of building engineering 39. URL: doi.org/10.1016/j.jobe.2021.102320.
 9. Bairan M., Oller E., and Duarte N. Structural concrete. URL: doi.org/10.1002/suco.202100159.
 10. He S., Cao, Z., Ma J., Shuai Z., Li P., and Wang H. 2021. Advances in civil engineering 2021. URL: doi.org/10.1155/2021/6693224.
 11. Smolyago G.A., Dronov A.V., Frolov N.V. Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta. 2017. T. 21, № 1(70). pp. 43–49.
 12. Manayenkov I.K. Inzhenernyj vestnik Dona. 2022. № 2. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n2y2022/7480
 13. Filatov V.B., Galyautdinov Z.SH., Kovalenko M.V. Inzhenernyj vestnik Dona. 2020. No 6. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/N6y2020/6518
 14. Alekseytsev A.V., Antonov M.D. Stroitel'stvo i rekonstruktsiya. 2021. № 4 (96). pp. 23-34.
 15. Alekseytsev A.V. Magazine of Civil Engineering. 2021. № 3 (103). P. 10306.
 16. Tamrazyan A., Alekseytsev A. E3S Web of Conferences. 22nd International Scientific Conference on Construction the Formation of Living Environment, FORM 2019. 2019. P. 04005.
 17. Tamrazyan A.G., Alekseytsev A.V. Promyshlennoye i grazhdanskoye stroitel'stvo. 2019. № 9. pp. 45-50.
 18. Tamrazyan A.G., Alekseytsev A.V. Vestnik MGSU. 2020. T. 15. № 1. pp. 12-30.
 19. Serpik I.N., Muymarov K.V., Shvachko S.N. Stroitel'naya mekhanika i raschet sooruzheniy. 2015. № 1 (258). pp 30-36.
 20. Geniyev G.A., Kolchunov V.I., Degtyar' A.N. Novyye energosberegayushchiye arkhitekturno-konstruktivnyye resheniya zhilykh grazhdanskikh zdaniy. 2003. pp. 163-166.
-