



16. Купчикова Н. В. Экспертиза геоподосновы, оснований и фундаментов: современные приборы и оборудование при проведении экспериментальных исследований и геотехнического мониторинга / Н. В. Купчикова, А. С. Таркин // Инженерно-строительный вестник Прикаспия. – 2021. – № 4 (38). – С. 47–55. – DOI 10.52684/2312-3702-2021-38-4-47-55. – EDN OCRXNE.

17. Золина Т. В. Мониторинг состояния береговых зон и результаты внедрения новых технологий их закрепления на территории Астраханской области / Т. В. Золина, Н. В. Купчикова, Р. И. Шаяхмедов // Каспий и глобальные вызовы: материалы Международной научно-практической конференции, Астрахань, 23–24 мая 2022 года / сост.: О. В. Новиченко и др. – Астрахань: Астраханский государственный университет, 2022. – С. 760–768. – EDN FUGSMP.

18. Купчикова Н. В. Технология реконструкции, санации и капитального ремонта зданий, включая экспертизу геоподосновы, оснований и фундаментов / Н. В. Купчикова. – Астрахань: Астраханский государственный архитектурно-строительный университет, 2019. – 105 с. – ISBN 978-5-93026-077-9. – EDN PWKXHV.

19. Kupchikova N. V. Numerical researches of the work of the pile with end spherical broadening as part of the pile group / N. V. Kupchikova // Building and Reconstruction. – 2019. – № 6 (86). – P. 3–9. – DOI 10.33979/2073-7416-2019-86-6-3-9. – EDN YRHETP.

20. Фильтрационная устойчивость грунтовых перемычек плотин как временных гидротехнических сооружений / В. С. Федоров, Н. В. Купчикова, С. С. Рекунов, И. В. Федосюк // Строительство и реконструкция. – 2024. – № 5 (115). – С. 44–60. – DOI 10.33979/2073-7416-2024-115-5-44-60. – EDN BVHOSI.

© Ю. В. Лазуткин

Ссылка для цитирования:

Лазуткин Ю. В. Влияние сочетания динамических воздействий от наземного и подземного транспорта в условиях плотной застройки мегаполиса // Инженерно-строительный вестник Прикаспия: научно-технический журнал / Астраханский государственный архитектурно-строительный университет. Астрахань: ГБОУ АО ВО «АГАСУ», 2025. № 1 (51). С. 28–36.

УДК 69.01

DOI 10.52684/2312-3702-2025-51-1-36-40

ОЦЕНКА ПРОЧНОСТИ МОНОЛИТНЫХ И СБОРНО-МОНОЛИТНЫХ ЖЕЛЕЗОБЕТОННЫХ БАЛОК С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ДИАГРАММНЫХ МЕТОДОВ РАСЧЕТА

П. А. Кайдас, С. Р. Меликсетян, О. О. Коренькова

Кайдас Павел Анатольевич, старший преподаватель кафедры промышленного и гражданского строительства, Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет, г. Москва, Российская Федерация, тел.: + 7 (978) 808-12-26; e-mail: KaydasPA@mgsu.ru;

Меликсетян Сергей Романович, преподаватель промышленного и гражданского строительства, Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет, г. Москва, Российская Федерация, тел.: + 7 (934) 888-44-00; e-mail: MeliksetyanSR@mgsu.ru;

Коренькова Олеся Олеговна, кандидат биологических наук, доцент кафедры инженерной графики и компьютерного моделирования, Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет, г. Москва, Российская Федерация, тел.: + 7 (499) 183-24-83; e-mail: KorenkovaOO@mgsu.ru

В статье рассматривается актуальная проблема оценки прочности сечений железобетонных элементов с учетом действительных диаграмм работы конструкционных материалов изгибаемых элементов. Авторами проанализированы различные подходы к моделированию напряженно-деформированного состояния железобетонных элементов, уделено особое внимание методу нелинейной деформационной модели и полуаналитическому вариационному методу В. З. Власова. В работе представлены результаты, демонстрирующие различия в оценке прочностных характеристик рассматриваемых конструкций, а также особенности их разрушения. Исследование показывает важность выбора модели оценки прочности изгибаемых элементов из сборного, монолитного и сборно-монолитного железобетона при изгибе.

Ключевые слова: железобетонные конструкции, предельное состояние, нелинейная деформационная модель, вариационный метод строительной механики, нормальные трещины, деформирование.

STRENGTH ASSESSMENT OF MONOLITHIC AND PREFABRICATED MONOLITHIC REINFORCED CONCRETE BEAMS USING DIAGRAMMATIC CALCULATION METHODS

P. A. Kaydas, S. R. Meliksetyan, O. O. Korenkova

Kaydas Pavel Anatolyevich, Senior Lecturer of Industrial and Civil Engineering Department, Moscow State University of Civil Engineering, Moscow, Russian Federation, phone: + 7 (978) 808-12-26; e-mail: KaydasPA@mgsu.ru

Meliksetyan Sergey Romanovich, Lecturer of Industrial and Civil Engineering Department, Moscow State University of Civil Engineering, Moscow, Russian Federation, phone: + 7 (934) 888-44-00; e-mail: MeliksetyanSR@mgsu.ru;

Korenkova Olesya Olegovna, Candidate of Biological Sciences, Associate Professor of Engineering Graphics and Computer Modeling Department, Moscow State University of Civil Engineering, Moscow, Russian Federation, phone: + 7 (499) 183-24-83; e-mail: KorenkovaOO@mgsu.ru

The paper deals with the urgent problem of assessing the strength of reinforced concrete element sections, taking into account the actual work diagrams of structural materials of bending elements. The authors have analysed various approaches to modelling the stress-strain state of reinforced concrete elements, paying special attention to the nonlinear deformation model method and the semi-analytical Variation method of Vlasov V.Z. The paper presents the results demonstrating the differences in the assessment of strength characteristics of the considered structures, as well as the peculiarities of their failure. The study shows the importance of choosing a model for assessing the flexural strength of precast and monolithic and precast-monolithic reinforced concrete elements in bending.

Keywords: reinforced concrete constructions, limit state, nonlinear deformation model, variational method of structural mechanics, flexure cracks, deformation.

Актуальность

Одной из основных целей современных инженерных изыскательных работ в области проектирования железобетонных конструкций является учет действительной работы конструктивных материалов для обеспечения безопасности возводимых, проектируемых и реконструируемых объектов различного функционального назначения. Актуальность названной тематики обусловлена значительным количеством публикаций как в отечественной [1–5, 17–20] так и в зарубежной [6–9] литературе. В связи с этим основной задачей данного исследования является сопоставление на основе численного моделирования результатов напряженно-деформированного состояния различных вариантов конструктивного исполнения изгибаемых железобетонных элементов.

Для решения поставленной задачи в практике отечественного проектирования все чаще можно встретить применение метода нелинейной деформационной модели (НДМ), являющегося основным, согласно действующим нормам проектирования железобетонных конструкций [10]. Одним из главных его преимуществ безусловно является возможность оценки параметров напряженно-деформированного состояния (НДС) на всех этапах жизненного цикла НДМ при сохранении гипотезы плоских сечений [11]. Однако в ряде случаев, когда ее применение является в значительной степени допустимым, имеет смысл использовать другие модели.

Метод

Интерес в этом случае представляет полуаналитический вариационный метод В. З. Власова. Его основные положения изложены в монографии [12], в которой, в отличие от метода перемещений, приводится смешанный метод расчета многосвязных призматических складок коробчатого типа. Выпишем приведенные там три группы уравнений смешанного типа:

$$\begin{aligned} \sum_c [\bar{J}_{dc} U_c''(x) - b_{dc} U_c(x)] - \sum_g r_{dg}^* V_g'(x) &= 0; \\ \sum_c r_{hc}^* U_c'(x) - \sum_g r_{hg} V_g''(x) - \sum_m S_{hm} M_m(x) - q_h &= 0; \quad (1) \\ \sum_g S_{lg} V_g(x) + \sum_m \theta_{lm} M_m(x) + \theta_l &= 0, \end{aligned}$$

где $d, c = 0, 1, \dots, U_1$; $h, g = 0, 1, \dots, U_2$; $l, m = 0, 1, \dots, m_1$.

Эти уравнения являются дифференциальными, поскольку в качестве неизвестных принимаются функции продольных $U_c(x)$, поперечных перемещений ребер складки $V_g(x)$ и моментов $M_m(x)$ по ребрам складки. Первые две группы (1) являются уравнениями равновесия, при этом первая выражает равенство нулю усилий в фиктивных продольных связях, введенных в основной системе, а вторая – в фиктивных поперечных связях. Последняя группа представляет собой уравнения неразрывности деформаций и выражает отсутствие взаимных углов поворота в цилиндрических шарнирах, введенных по всем ребрам основной системы складки. Поэтому для единичных состояний изменение поперечных перемещений между ребрами складки для элементарной поперечной полоски, выделенной сечениями x и $x + dx$, происходит линейно как для варьируемой рамной системы с шарнирами во всех узлах; поперечных моментов между шарнирами (ребрами складки) при наличии поперечных фиктивных связей – как для шарнирно-опертой балки от искомых узловых моментов и внешней нагрузки.

Изложенный метод распространяется на расчет рам, у которых один, несколько или все элементы являются составными стержнями (по терминологии А. Р. Ржаницына [13]) с податливыми связями, при этом, в отличие от метода сил, здесь для расчета составных стержней применяется метод перемещений [14]. При сохранении для составных стержней тех же гипотез о несжимаемости волокон и неучете деформации сдвига по высоте сечения, как и для монолитного стержня, изменение продольных перемещений по высоте сечения составляющих стержней будет линейным, а продольных перемеще-

ний для всего пакета составного стержня, состоящего из « n » стержней сечением $h_c \cdot t$, можно представить следующим выражением:

$$u(x, z) = u_0(x)z + \sum_{c=1}^{c=n} u_c(x)\xi_c(z), \quad (2)$$

где функции $u_0(x)$ и $u_c(x)$ являются искомыми, $X_i(z)$ – линейными, то есть заранее известными, и могут задаваться с точностью до произвольного множителя, в частности, приниматься постоянными и равными единице по высоте отдельного составляющего стержня.

Жесткостные коэффициенты на различных уровнях нелинейного деформирования рассматриваемой составной конструкции после образования в ней трещин в наиболее напряженных сечениях на каждом шагу нагружения могут быть определены методом итераций по приведенным эквивалентным значениям квазисплошного тела, перемножением соответствующих единичных эпюр. При их вычислении используется модифицированный коэффициент В. И. Мурашева [15]. Так, например, коэффициенты J_{00}, J_{11}, J_{22} , определяемые жесткостями сечения на изгиб, растяжение – сжатие и сдвиг вычисляются, соответственно, по формулам (3–5):

$$J_{00} = \int_h A_0 \xi_0^2 dz; \quad (3)$$

$$J_{11} = \int_h A_1 \xi_1^2 dz; \quad (4)$$

$$J_{22} = \int_h A_2 \bar{\xi}_2^2 dz, \quad (5)$$

где $A_0 = B_{red}\psi_{bt,i}$; $A_1 = A_{red}\psi_{bt,i}^*$; $A_2 = G_{red}$.

В формулах (3)–(5) приведенная площадь растянутого сечения определяется введением коэффициента $\psi_{bt,i}$, учитывающего работу растянутого бетона между трещинами. Согласно

[16], этот коэффициент при изгибе определяется по формуле (6):

$$\psi_{bt,i} = \left(\frac{M}{M_{crc}} \right) (1 - \psi_s). \quad (6)$$

Здесь M, M_{crc} соответственно, изгибающий момент, воспринимаемый сечением элемента на заданном уровне нагрузки и момент трещиностойкости сечения; ψ_s – коэффициент, учитывающий работу растянутого бетона между трещинами, определяемый для изгибаемого элемента по модифицированной зависимости [15] формулой (7):

$$\psi_s = 1 - \frac{2}{3} \cdot \frac{\chi M_{b,crc}}{M(1-\varphi_1)} \cdot \left(1 - \frac{2t}{l_{crc}} \right) + \left(\frac{M_{b,j}}{M_y} \right) \left[\frac{1}{3} \left(1 - \frac{2t}{l_{crc}} - \frac{l_1}{l_{crc}} \right) + \frac{t}{l_{crc}} \right], \quad (7)$$

где $M_{b,crc}$ – момент, воспринимаемый растянутой зоной бетона между трещинами при напряжениях, равных R_{bt} ; M_b – то же при рассматриваемой стадии работы. Эти и другие параметры определяются в соответствии с указаниями [15].

В качестве объекта исследования для анализа напряженно-деформированного состояния был выбран ряд изгибаемых железобетонных элементов в различном конструктивном исполнении. Непосредственно физико-механические и геометрические характеристики этих элементов представлены на рисунке 1 в виде поперечных сечений. Здесь а) и б) – это сборно-монолитные варианты конструктивного исполнения железобетонных ригелей, в) – то соответствующий первым двум вариантам по армированию и габаритным размерам ригель, но монолитный; г) и д) – случаи конструктивного исполнения монолитных железобетонных ригелей, предполагающие разрушение по бетону (переармированное сечение) и по арматуре соответственно.

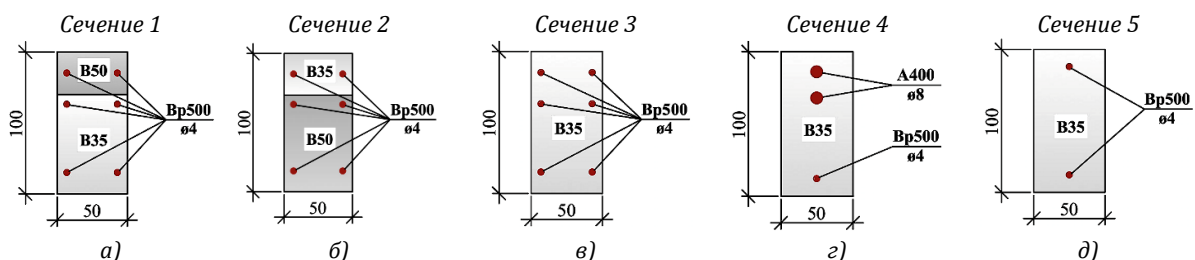


Рис. 1. Варианты конструктивного исполнения рассматриваемых сечений железобетонных ригелей:
а) сборно-монолитное составное сечение; б) то же, но бетоны поменяли местами;
в) монолитный ригель с арматурой, аналогичной вариантам а) и б); г) и д) монолитные ригели

Результаты численного моделирования по методу НДМ представлены на рисунке 2. Наглядно видно, что наибольшую деформативность имеет Сечение 5, поскольку именно в нем арматура достигает наибольших напряжений и предела текучести, когда еще бетон имеет большой запас прочности. В тоже время именно Сечение 5 имеет наименьшую прочность в абсолютных величинах, в соответствии с площадью

армирования A_s для него. Стоит отметить что наибольших значений по M_{crc} достигло Сечение 2, так как именно у него бетон растянутой части обладает наибольшей прочностью среди прочих рассматриваемых случаев. Все варианты разрушения, как и перечисленные, в целом, соответствуют принятым диаграммам деформирования материалов, напряженно-деформированное состояние которых представлено рисунком 3.

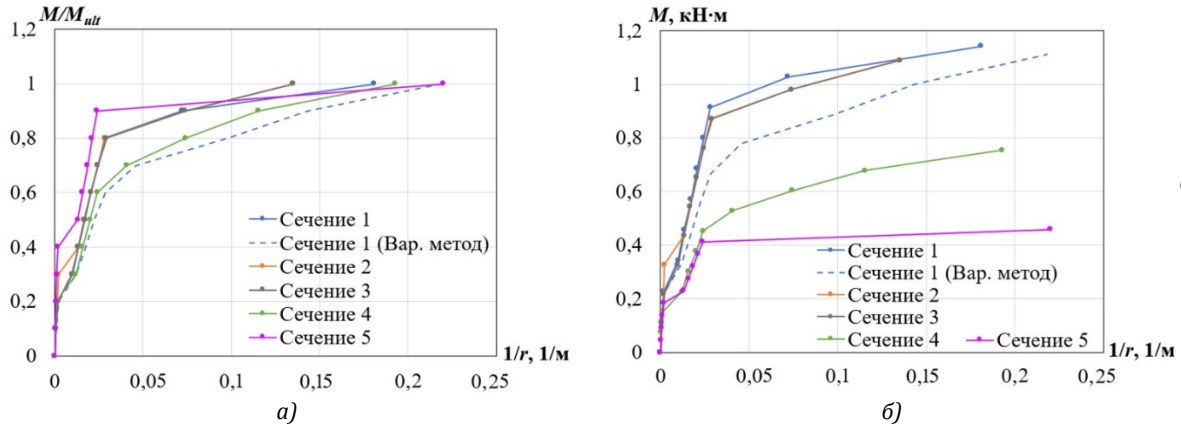


Рис. 2. Зависимости «момент – кривизна» сечения ригелей различного конструктивного исполнения: а) в относительных величинах шкалы момента; б) в абсолютных величинах шкалы момента

Интерес представляет кривая Сечения 5 на рисунке 3 а) и б), где наглядно видно, что сечение не было разрушено, достигнув предельной деформативности по бетону, и наоборот – для арматуры. Сечение 4 же перед разрушением достигло предела деформативности по бетону на сжатие, и не достигло по арматуре. Оба этих случая соответствуют принятому сценарию разрушения. Однако же для сборно-монолитных конструктивных случаев исполнения (Сечения 1 и 2), не только бетон разрушается, достигнув предела по деформациям, но и арматура тоже. Это

связано с высокой площадью армирования в зоне сечения, близкой к нейтральной, обусловленной технологическими особенностями физического исполнения ригелей, что тем не менее не предполагает хрупкое разрушение, как в случае с Сечением 4. Следует отметить также большую деформативность, полученную по результату расчета вариационным методом, в сравнении с нелинейной деформационной моделью, которая обусловлена учетом сдвига между бетонами.

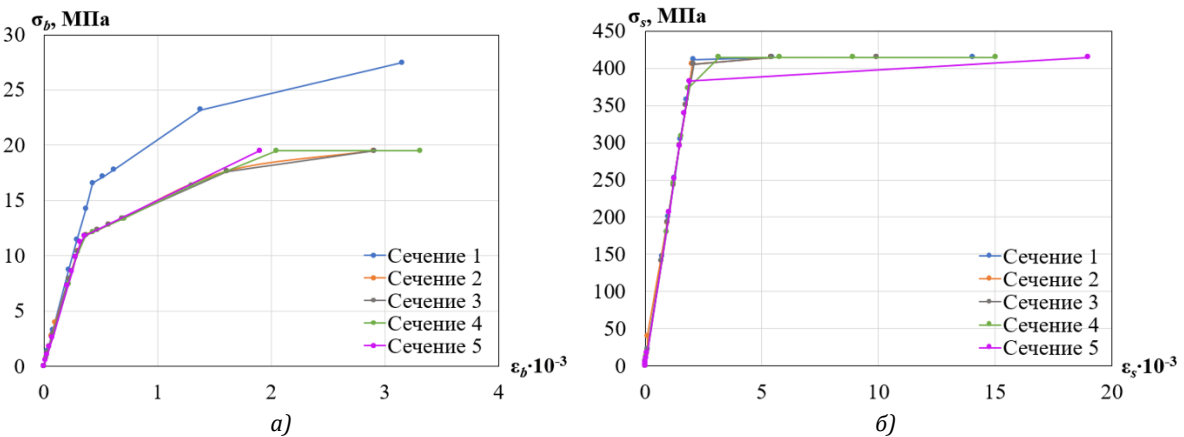


Рис. 3. Диаграммы изменения напряжений в бетоне (а) и арматуре (б) в рассматриваемых сечениях ригелей при разрушении

Заключение

Выполненные аналитические и численные расчеты позволяют оценить возможность, диапазон применения различных методов оценки прочности сечений монолитных и сборно-монолитных изгибаемых железобетонных конструкций. Установлено, что использование диаграммного метода расчета дает завышенные показатели вслед-

ствие учета нелинейного характера деформирования материалов. Полученные результаты позволяют отметить, что учет обозначенных факторов оказывает значительное влияние на оценку прочности, особенно в сечениях, разрушение которых происходит по бетону и находится в интервале от 30 до 45 % для Сечения 4, а для сборно-монолитного Сечения 1 достигает 18 % на промежуточных этапах деформирования.

Список литературы

1. Карпенко Н. И. Проектирование бетонных, железобетонных, каменных и армокаменных элементов и конструкций с применением диаграммных методов расчета / Н. И. Карпенко, Б. С. Соколов, О. В. Радаikin. – Москва : АСВ, 2019. – 192 с.

2. Трекин Н. Н. Совершенствование метода оценки трещиностойкости изгибаемых железобетонных элементов / Н. Н. Трекин, Э. Н. Кодыш, Д. Н. Трекин // Бетон и железобетон. – 2020. – Т. 601, № 1. – С. 61–64.
3. Трекин Н. Н. Расчет по образованию нормальных трещин на основе деформационной модели / Н. Н. Трекин, Э. Н. Кодыш, Д. Н. Трекин // Промышленное и гражданское строительство. – 2016. – № 7. – С. 74–78.
4. Колчунов Вл. И. Численно-аналитический метод в механике железобетона / Вл. И. Колчунов // Строительная механика инженерных конструкций и сооружений. – 2022. – Т. 18, № 6. – С. 525–533. – <http://doi.org/10.22363/1815-5235-2022-18-6-525-533>.
5. Колчунов В. И. Жесткость железобетонных конструкций при изгибе с поперечной и продольной силами / В. И. Колчунов, О. И. Аль-Хашими, М. В. Протченко // Строительство и реконструкция. – 2021. – № 6. – С. 5–19.
6. Vu N. T. Calculation of the formation of normal cracks in a reinforced concrete element based on the deformation theory of plasticity of concrete by G. A. Geniev / N. T. Vu, N. V. Fedorova // Structural Mechanics of Engineering Constructions and Buildings. – 2023. – Vol. 19, № 1. – P. 3–16. – DOI: 10.22363/1815-5235-2023-19-1-3-16.
7. Jebasingh D. J. Experimental and numerical study on the cracking behavior and flexural strength of RC shallow beams with rectangular opening and varying length / D. J. Jebasingh // Structures. – 2022. – Vol 40. – P. 460–468. – <http://doi.org/10.1016/j.ISTRUC.2022.04.040>.
8. Wei C. Flexural cracking behavior of reinforced UHPC overlay in composite bridge deck with orthotropic steel deck under static and fatigue loads / C. Wei, Q. Zhang, Z. Yang, M. Li, Z. Cheng, Y. Bao // Engineering Structures. – 2022. – Vol. 265. – Art. 114537. – <http://doi.org/10.1016/j.ENGSTRUCT.2022.114537>.
9. Głodkowska W. Cracking behavior of steel fiber reinforced waste sand concrete beams in flexure – experimental investigation and theoretical analysis / W. Głodkowska, M. Ziarkiewicz // Engineering Structures. – 2018. – Vol. 176. – P. 1–10. – <http://doi.org/10.1016/j.ENGSTRUCT.2018.08.097>.
10. СП 63.13330.2018. Бетонные и железобетонные конструкции. Основные положения. – Дата введения 2019–06–20. – Москва : Стандартинформ, Россия. 2020. – 124 с.
11. Колчунов В. И. Об использовании гипотезы плоских сечений в железобетоне / В. И. Колчунов, И. А. Яковенко // Строительство и реконструкция. – 2011. – Т. 38, № 6. – С. 16–23.
12. Милейковский И. Е. Расчет тонкостенных конструкций / И. Е. Милейковский, С. И. Трушин. – Москва : Стройиздат. 1989. – 200 с.
13. Ржаницын А. Р. Теория составных стержней строительных конструкций / А. Р. Ржаницын. – Москва : Госстройиздат. 1948. – 192 с.
14. Милейковский И. Е. Расчет составных стержней методами строительной механики оболочек / И. Е. Милейковский // Экспериментальные и теоретические исследования тонкостенных пространственных конструкций. – Москва : Госстройиздат, 1952. – С. 138–167.
15. Пимочкин В. Н. Методика определения основного параметра железобетона (ψ) при учете эффекта нарушения сплошности бетона и относительных взаимных смещений арматуры и бетона в изгибаемых железобетонных конструкциях / В. Н. Пимочкин, В. И. Колчунов // Известия Орловского государственного технического университета. – 2007. – №3. – С. 46–52.
16. Колчунов В. И. Расчет составных тонкостенных конструкций / В. И. Колчунов, Л. А. Панченко. – Москва : АСВ, 1999. – 281 с.
17. Купчикова Н. В. Способ электростатической грануляции сероцемента / Н. В. Купчикова, Р. И. Шаяхмедов // Инженерно-строительный вестник Прикаспия. – 2023. – № 2 (44). – С. 37–41. – DOI: 10.52684/2312-3702-2023-44-2-37-41. – EDN FIXGJO.
18. Федоров В. С. Комплексная модель управления обеспечением пожарной безопасности высотных зданий / В. С. Федоров, Н. В. Купчикова, А. С. Реснянская // Инновационное развитие регионов: потенциал науки и современного образования : материалы VI Национальной научно-практической конференции с международным участием, приуроченной ко Дню российской науки, Астрахань, 08–09 февраля 2023 года / под общ. ред. Т. В. Золиной. – Астрахань : Астраханский государственный архитектурно-строительный университет, 2023. – С. 14–25. – EDN SFLRPB.
19. Федоров В. С. Конструктивная пожарная инженерия в управлении стадией проектирования высотного здания с учетом требований безопасности / В. С. Федоров, Т. В. Золина, Н. В. Купчикова, А. С. Реснянская // Инженерно-строительный вестник Прикаспия. – 2022. – № 3 (41). – С. 141–144. – DOI: 10.52684/2312-3702-2022-41-3-141-144. – EDN CXZSEV.
20. Патент № 2730607 С1 Российская Федерация, МПК E02B 3/02, E02B 3/06. Подвижная берегозащитная шпора : № 2020107423 : заявл. 18.02.2020 : опубл. 24.08.2020 / Н. В. Купчикова, Р. И. Шаяхмедов, Т. В. Золина ; заявитель Астраханский государственный архитектурно-строительный университет. – EDN VFZZKF.

© П. А. Кайдас, С. Р. Меликсетян, О. О. Коренькова

Ссылка для цитирования:

Кайдас П. А., Меликсетян С. Р., Коренькова О. О. Оценка прочности монолитных и сборно-монолитных железобетонных балок с использованием диаграммных методов расчета // Инженерно-строительный вестник Прикаспия : научно-технический журнал / Астраханский государственный архитектурно-строительный университет. Астрахань : ГБОУ АО ВО «АГАСУ», 2025. № 1 (51). С. 36–40.