

Оригинальная статья

УДК 502/504:627.8:626.01:693.5

DOI: 10.26897/1997-6011-2022-4-84-89

ЧИСЛЕННЫЙ АНАЛИЗ ПОВЕДЕНИЯ ИЗГИБАЕМЫХ ЖЕЛЕЗОБЕТОННЫХ БАЛОК, ИЗГОТОВЛЕННЫХ ИЗ ЛЕГКОГО ВЫСОКОПРОЧНОГО БЕТОНА, С РАЗНЫМ КОЭФФИЦИЕНТОМ АРМИРОВАНИЯ

БАКЛЫКОВ ИГОРЬ ВЯЧЕСЛАВОВИЧ, ведущий специалист

i.baklykov@hydroproject.ru

Филиал АО «Проектно-изыскательский и научно-исследовательский институт «Гидропроект» им. С.Я. Жука – НИИ энергетических сооружений» (АО «Институт Гидропроект»-НИИЭС); 125080, г. Москва, Волоколамское шоссе, 2, Россия

В настоящее время распространяются конструкции из легкого высокопрочного бетона, в первую очередь – в гражданском и мостовом строительстве. Высокопрочный бетон на основе легкого заполнителя имеет преимущества в сравнении с тяжелым бетоном при использовании его в конструкциях, которые должны обладать высокой прочностью и плавучестью, ввиду более низкой плотности и достаточно высокой прочности. В этой связи представляется целесообразным применение легкого высокопрочного бетона в гидротехническом строительстве в морских нефтяных платформах и батопортах. Выполнены расчетные исследования напряженно-деформированного состояния железобетонных балочных конструкций, изготовленных из легкого высокопрочного бетона. Для моделирования поведения железобетонных балок, изготовленных из легкого высокопрочного бетона, разработаны пространственные конечно-элементные модели. Исследования выполнены в программном комплексе «ANSYS». Разработанные модели верифицированы по данным натурных испытаний балок с двумя коэффициентами армирования: 0,036 и 0,015. Выполненные исследования позволили сделать вывод о различии поведения и разрушения балок при двух коэффициентах армирования.

Ключевые слова: легкий высокопрочный бетон, железобетонные конструкции, трещинообразование, коэффициент армирования, конечно-элементные модели, численный анализ

Формат цитирования: Баклыков И.В. Численный анализ поведения изгибаемых железобетонных балок, изготовленных из легкого высокопрочного бетона, с разным коэффициентом армирования // Природообустройство. – 2022. – № 4. – С. 84-89. DOI: 10.26897/1997-6011-2022-4-84-89.

© Баклыков И.В., 2022

Original article

NUMERICAL ANALYSIS OF THE BEHAVIOR OF BENDABLE REINFORCED CONCRETE BEAMS MADE OF LIGHTWEIGHT HIGH-STRENGTH CONCRETE WITH DIFFERENT REINFORCEMENT COEFFICIENTS

BAKLYKOV IGOR VYACHESLAVOVICH, leading specialist

i.baklykov@hydroproject.ru

Branch of JSC "Design, Survey and Research Institute «Hydroproject» named after S.Ya. Zhuk – Research Institute of Energy Structures», (JSC «Institute Hydroproject»-«NIIES»), 125080, Moscow, Volokolamskoe sh., 2. Russia

Lightweight high-strength concrete structures are currently spreading, primarily in civil engineering and bridge construction. High-strength lightweight aggregate concrete has advantages over heavyweight concrete when used in structures that must have high strength and buoyancy due to lower density and high enough strength. In this regard, it seems appropriate to use lightweight high-strength concrete in hydraulic engineering construction in offshore oil platforms and dry dock gate. In the presented work, computational studies of the stress-strain state of reinforced concrete beam structures made of light high-strength concrete have been carried out. To model the behavior of reinforced concrete beams made of lightweight

high-strength concrete, spatial finite-element models have been developed. Researches were performed in the software «ANSYS». The developed models are verified by data of full-scale tests of beams with two reinforcement coefficients: 0.036 and 0.015. The performed studies allowed making a conclusion about the difference in behavior and destruction of beams at two reinforcement coefficients.

Keywords: lightweight high-strength concrete, reinforced concrete structures, cracking, reinforcement coefficient, finite element models, numerical analysis

Format of citation: Baklykov I.V. Numerical analysis of the behavior of bendable reinforced concrete beams made of lightweight high strength concrete with different reinforcement coefficients // Prirodoobustrojstvo. – 2022. – № 4. – S. 84-89. DOI: 10.26897/1997-6011-2022-4-84-89.

Введение. Высокопрочный бетон на легком заполнителе (ЛВБ) предпочтителен для использования в таких конструкциях, как мосты с большими пролетами, высотные здания, батопорты и морские нефтяные платформы ввиду его более низкой плотности, достаточно высокой прочности [1-9].

В большинстве случаев метод конечных элементов (МКЭ) является достаточным инструментом для анализа напряженно-деформированного состояния.

Статья посвящена расчетным исследованиям балочных конструкций из ЛВБ с разными коэффициентами продольного армирования, с использованием алгоритма трещинообразования. Расчетные исследования были верифицированы по результатам экспериментальных исследований.

Моделирование балок. На рисунке 1 представлена модель, разработанная в программе ANSYS.

Чтобы получить регулярную аппроксимирующую сетку, для моделирования бетона использовалась технология структурированной сетки.

Связь между арматурными стержнями и бетоном считалась идеальной с использованием технологии уравнений связи, в то время как передача напряжений «сцепления-проскальзывания» учитывалась путем изменения жесткости бетона при растяжении.

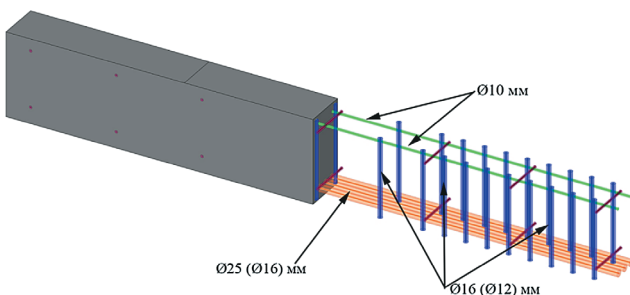


Рис. 1. Модель балки
Fig. 1. Beam model

На рисунке 2 представлена расчетная схема балки.

Для исследований были выбраны две серии балок с коэффициентами армирования 0,036 (3Ø25 мм) и 0,015 (3Ø16 мм) [1].

Материал бетона железобетонной балки моделируется 8-узловыми твердотельными

элементами (SOLID65) с тремя степенями свободы в каждой точке и возможностью перемещения по осям X, Y и Z. Этот элемент также обладает пластическими деформациями, способностью к трещинообразованию в направлениях X, Y и Z, пока не разрушится бетон [10].

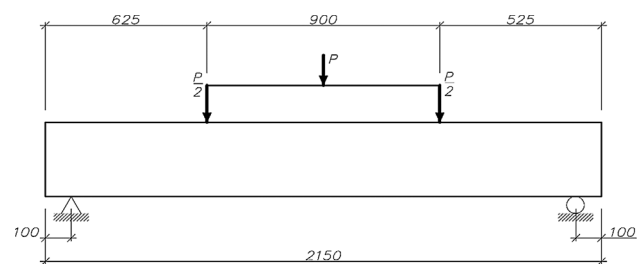


Рис. 2. Расчетная схема балки
Fig. 2. Design scheme of the beam

Используемая модель бетона представляет собой модель многолинейного кинематического упрочнения по кривым «напряжения-деформации» при сжатии бетона.

Использование конечных элементов SOLID65 при моделировании бетонных материалов даёт близкие результаты за счет нелинейного поведения железобетонных балок [11].

При испытаниях образцов из ЛВБ были получены основные физико-механические свойства бетона: плотность, модуль деформации, прочность на сжатие и прочность на растяжение.

В результате испытаний образцов были получены следующие физико-механические характеристики:

- средняя плотность бетона – 1830 кг/м³;
- средняя кубиковая прочность на сжатие – 55 МПа;
- средняя прочность на растяжение – 4 МПа;
- начальный модуль деформации бетона – 22500 МПа;
- коэффициент Пуассона – 0,2.

Для армирования была использована арматура класса А500С.

Свойства бетона в расчетах были приняты на основе испытаний по определению физико-механических характеристик бетона.

На рисунке 3 представлен график зависимости «напряжение-деформация» для бетона.

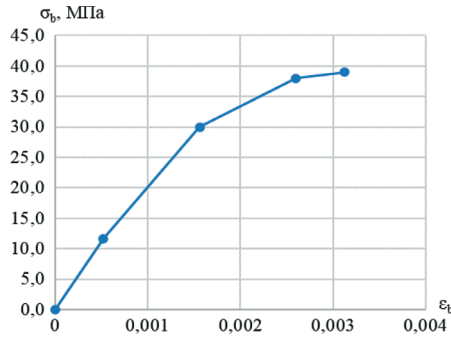


Рис. 3. Зависимость «Напряжение-деформация» для ЛВБ
Fig. 3. «Stress-strain» dependence for LWHSB (light weight high strength beam)

В качестве модели разрушения бетона принята трехмерная модель Menetrey-Willam [12]. Она представляет трехпараметрическую поверхность разрушения, имеющую следующее выражение:

$$f(\xi, \rho, \theta) = \left[\sqrt{1.5} \cdot \frac{\rho}{f'_c} \right]^2 + m \cdot \left[\frac{\rho}{\sqrt{6} \cdot f'_c} \cdot r(\theta, e) + \frac{\xi}{\sqrt{3} \cdot f'_c} \right] - c = 0, \quad (1)$$

где

$$r(\theta, e) = \frac{4 \cdot (1 - e^2) \cdot \cos^2 \theta + (2 \cdot e - 1)^2}{2 \cdot (1 - e^2) \cdot \cos \theta + (2 \cdot e - 1) \cdot \sqrt{4 \cdot (1 - e^2) \cdot \cos^2 \theta + 5 \cdot e^2 - 4 \cdot e}} \quad (2)$$

$$m := 3 \cdot \frac{f'_c{}^2 - f'_t{}^2}{f'_c \cdot f'_t} \cdot \frac{e}{e + 1}. \quad (3)$$

Уравнение (1) выражается с помощью трех инвариантов напряжений, известных как координаты Haigh-Westergaard; m – параметр материала, зависящий от прочности на одноосное сжатие f'_c , от прочности на одноосное растяжение f'_t , а также от параметра эксцентриситета e . Эксцентриситет e определяет гладкость поверхности Menetrey-Willam, и его значение влияет на описание разрушения либо при двухосном растяжении, либо при сжатии. В (1) ξ – инвариант гидростатического напряжения; ρ – инвариант девиаторного напряжения; θ – девиаторный полярный угол Лоде.

Координаты Haigh-Westergaard (H-W) записываются как

$$\xi = \frac{1}{\sqrt{3}} \cdot I_1, \quad I_1 = \sigma_{ii}; \quad (4)$$

$$\rho = \sqrt{2 \cdot J_2}, \quad J_2 = \frac{1}{2} s_{ij} s_{ij}; \quad (5)$$

$$\cos 3\theta = \frac{3 \cdot \sqrt{3}}{2} \cdot \frac{J_3}{J_2^{3/2}}, \quad J_3 = \frac{1}{3} s_{ij} s_{ik} s_{ki}, \quad (6)$$

где s_{ij} обозначает компоненты девиаторного напряжения, то есть $s_{ij} = \sigma_{ij} - \frac{1}{3} \sigma_{kk} \delta_{ij}$, δ_{ij} является символом Кронекера.

Необходимо отметить, что при $0 \leq \theta \leq \frac{\pi}{3}$ выполняются следующие соотношения между главными напряжениями σ_{ij} и координатами H-W:

$$\begin{Bmatrix} \sigma_1 \\ \sigma_2 \\ \sigma_3 \end{Bmatrix} = \frac{1}{\sqrt{3}} \begin{Bmatrix} \xi \\ \xi \\ \xi \end{Bmatrix} + \sqrt{\frac{2}{3}} \cdot \rho \begin{Bmatrix} \cos \theta \\ \cos \left(\theta - \frac{2 \cdot \pi}{3} \right) \\ \cos \left(\theta + \frac{2 \cdot \pi}{3} \right) \end{Bmatrix} \quad (7)$$

Поверхность, представленная формулой (1), определенная для $0 \leq \theta \leq \frac{\pi}{3}$, поэтому простирается во все полярные направления $0 \leq \theta \leq 2\pi$, используя тройную симметрию.

Верификация данной модели бетона была проведена в исследовании [13]. Результаты верификации показали хорошую сходимость.

Результаты экспериментальных исследований. Испытание железобетонной балки с коэффициентом армирования 0,036 в стадии трещинообразования представлено на рисунке 4.



Рис. 4. Испытание железобетонной балки ($\mu = 0,036$) на стадии трещинообразования
Fig. 4. Testing of a reinforced concrete beam ($\mu = 0.036$) at the stage of cracking

Средняя нагрузка разрушения балок с коэффициентом армирования 0,036 составила 473 кН.

В качестве примера на рисунке 5 представлен характер разрушения балки с коэффициентом армирования 0,036.



Рис. 5. Характер разрушения железобетонной балки ($\mu = 0,036$)
Fig. 5. Mode of destruction of the reinforced concrete beam ($\mu = 0.036$)

Как следует из рисунка 5, при высоком коэффициенте армирования (0,036) происходит разрушение конструкции по наклонной трещине и бетону сжатой зоны конструкции.

Далее были проведены экспериментальные исследования балок с коэффициентом армирования 0,015.

Средняя нагрузка разрушения балок с коэффициентом армирования 0,015 составила 284 кН.

При этом разрушение было зафиксировано при достижении продольной рабочей арматурой предела текучести, равного 500 МПа для арматуры класса А500С.

Результаты верификационных расчетов. Расчеты были проведены с учетом этапов нагружения балок. График приложения нагрузки представлен на рисунке 7.

На рисунках 8 и 9 представлены результаты расчета прогиба балок с коэффициентами армирования $\mu=0,036$ и $\mu=0,015$.

При этом прогиб балки также напрямую зависит от коэффициента армирования. При большем коэффициенте армирования расчетный прогиб больше.

Таким образом, видим, что при увеличении несущей способности балки увеличивается и ее прогиб.

При коэффициенте армирования 0,036 расчетный прогиб составляет 17,6 мм, фактический прогиб – 18,1 мм. При коэффициенте армирования 0,015 расчетный прогиб составляет 11,4 мм, фактический – 11,1 мм.

Таким образом, расчетные и замеренные прогибы хорошо согласуются.

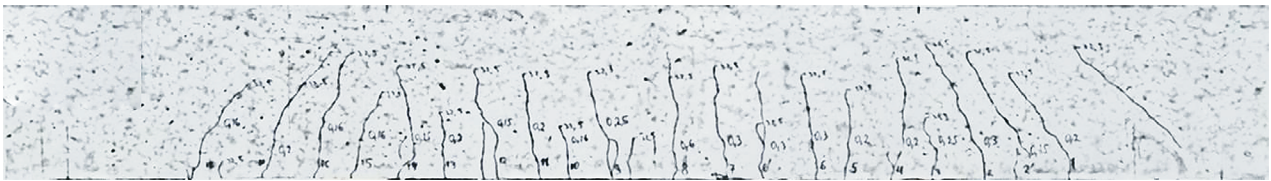


Рис. 6. Испытание железобетонной балки ($\mu = 0,015$) на стадии трещинообразования
Fig. 6. Testing of reinforced concrete beam ($\mu = 0,015$) at the stage of cracking

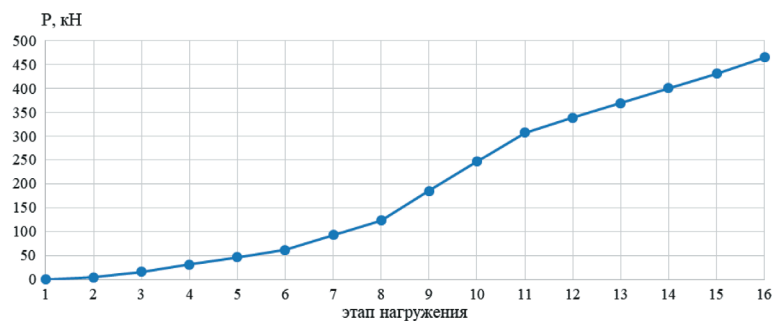


Рис. 7. График нагружения балок
Fig. 7. Beam loading graph

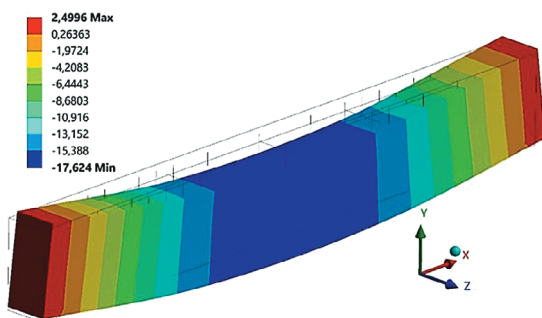


Рис. 8. Прогиб балки ($\mu = 0,036$) при нагрузке 473 кН

Fig. 8. Beam deflection ($\mu = 0,036$) at a load of 473 kN

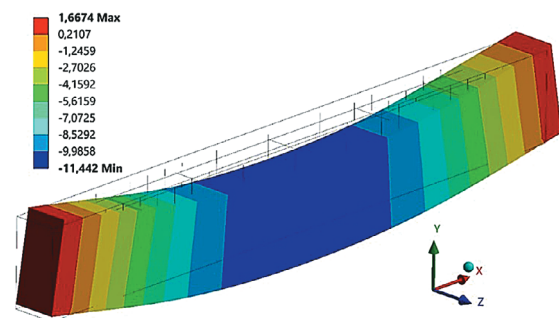


Рис. 9. Прогиб балки ($\mu = 0,015$) при нагрузке 284 кН

Fig. 9. Beam deflection ($\mu = 0,015$) at a load of 284 kN

На рисунках 10 и 11 представлен расчетный характер трещинообразования балок с коэффициентами армирования 0,036 и 0,015.

Как следует из рисунков 11 и 12, характер трещинообразования является неодинаковым.

Так, при коэффициенте армирования 0,036 интенсивность трещинообразования сгруппирована ближе к опорным частям балки, в зоне действия больших поперечных сил, в то время как при коэффициенте армирования 0,015

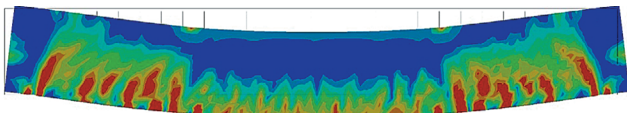


Рис. 10. Характер трещинообразования при нагрузке 473 кН ($\mu = 0,036$)

Fig. 10. Nature of cracking at 473 kN load ($\mu = 0.036$)

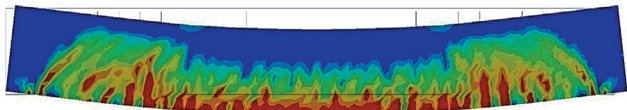


Рис. 11. Характер трещинообразования при нагрузке 284 кН ($\mu = 0,015$)

Fig. 11. Nature of cracking at a load of 284 kN ($\mu = 0.015$)

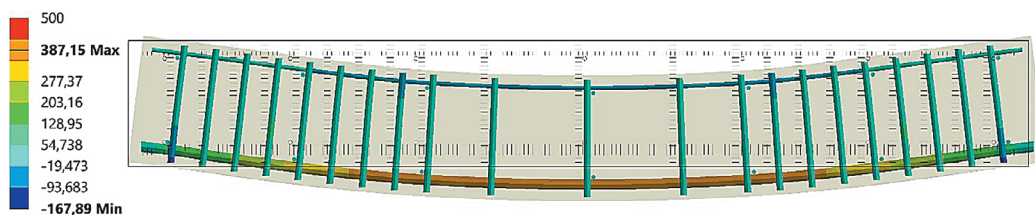


Рис. 12. Напряжение в арматуре при нагрузке 473 кН ($\mu = 0,036$)

Fig. 12. Armature stress at a load of 473 kN ($\mu = 0.036$)

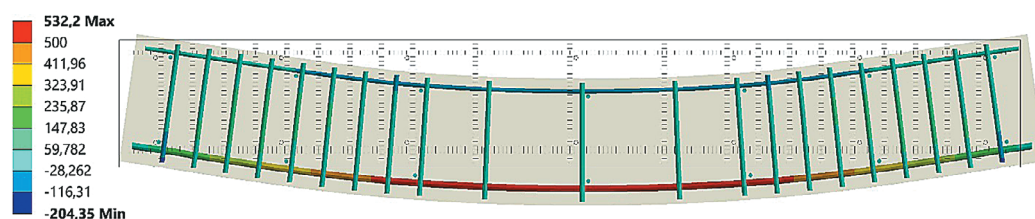


Рис. 13. Напряжение в арматуре при нагрузке 284 кН ($\mu = 0,015$)

Fig. 13. Armature stress at a load of 284 kN ($\mu = 0.015$)

Напряжение в рабочей арматуре (как следует из рисунка 12) при коэффициенте армирования 0,036 не достигает расчетного сопротивления арматуры класса А500С.

Таким образом, получается, что ресурс арматуры используется не полностью, а разрушение балки характеризуется хрупким разрушением бетона.

При коэффициенте армирования 0,015 напряжение в арматуре превышает расчетное сопротивление арматуры класса А500С (435 МПа) и достигает текучести арматуры (500 МПа). При этом механизм разрушения балки является вязким за счет текучести арматуры.

Выводы

Высокопрочный бетон на основе легкого заполнителя (ЛВБ) предпочтителен (в сравнении с тяжелым бетоном) для использования в первую очередь в конструкциях, которые должны обладать высокой прочностью и пластичностью, ввиду его более низкой плотности и достаточно высокой прочности.

существенно увеличивается трещинообразование в пролетной части балки, в зоне действия изгибающего момента.

Таким образом, видим, что разрушение балок происходит по разным схемам: при коэффициенте армирования 0,036 разрушение происходит преимущественно по наклонным сечениям, в то время как при коэффициенте армирования 0,015 – в зоне нормальных трещин.

Характер расчетного трещинообразования в сравнении с фактически полученным показывает хорошую сходимость результатов.

На рисунках 12 и 13 представлено напряжение в рабочей арматуре балок с коэффициентами армирования 0,036 и 0,015.

Проведены исследования напряженно-деформированного состояния железобетонных балок с несколькими типами армирования: балки с коэффициентом армирования 0,036 и балки с коэффициентом армирования 0,015. Экспериментальные исследования показали различный характер трещинообразования и разрушения этих балок. Так, балки с коэффициентом армирования 0,036 характеризуются разрушением по наклонной трещине и бетону сжатой зоны на опорном участке балок, где преобладает действие поперечных сил. Балки с коэффициентом армирования 0,015 характеризуются разрушением по нормальному сечению в зоне действия изгибающего момента при напряжениях в арматуре, достигающих предела текучести (500 МПа).

Проведенные расчетные исследования показали хорошую сходимость результатов расчетов на основе разработанных конечно-элементных моделей с экспериментальными данными, а также подтвердили характер разрушения балок

с коэффициентом армирования 0,036 (хрупкое разрушение по наклонным трещинам и сжатой зоне бетона) при преобладании поперечных сил. При коэффициенте армирования моделей 0,015 разрушение происходило по нормальным сечениям в зоне действия изгибающего момента при напряжениях в арматуре, достигающих предела текучести (500 МПа).

Библиографический список

1. Экспериментальные исследования железобетонных конструкций из легкого высокопрочного бетона (применительно к конструкции батопорта сухого дока) / О.Д. Рубин, С.Е. Лисичкин, С.Ю. Кузнецов и др. // Природообустройство. – 2021. – № 4. – С. 59-66.
2. Gao Y.L., Chao Z. Experimental study on segregation resistance of nanoSiO₂ fly ash lightweight aggregate concrete. *Constr. Build. Mater.* 2015, 93, pp. 64-69.
3. Sohle K.M.A., Al-Jabri K., Zhang M.H., Liew J.Y.R. Flexural fatigue behavior of ultra-lightweight cement composite and high strength lightweight aggregate concrete // *Constr. Build. Mater.* – 2018. – 173. – Pp. 90-100.
4. Gao J.M., Wei S., Keiji M. Mechanical properties of steel fiber-reinforced, high-strength, lightweight concrete // *Cem. Concr. Compos.* – 1997. – 19. – Pp. 307-313.
5. Karayannis C.G. Nonlinear analysis and tests of steel-fiber concrete beams in torsion // *Struct. Eng. Mech.* – 2000. – 9. – Pp. 323-338.
6. Campione G. Flexural and shear resistance of steel fiber-reinforced lightweight concrete beams // *J. Struct. Eng.* – 2013. – 140. – Pp. 1-9.
7. Grabois T.M., Guilherme C.C., Toledo Filho R.D. Fresh and hardened-state properties of self-compacting lightweight concrete reinforced with steel fibers // *Constr. Build. Mater.* – 2016. – 104. – Pp. 284-292.
8. Li J.J., Wan C.J., Niu J.G., Wu L.F., Wu Y.C. Investigation on flexural toughness evaluation method of steel fiber reinforced lightweight aggregate concrete // *Constr. Build. Mater.* – 2017. – 131. – Pp. 449-458.
9. Libre N.A., Shekarchi M., Mahoutian M., Soroushian P. Mechanical properties of hybrid fiber reinforced lightweight aggregate concrete made with natural pumice // *Constr. Build. Mater.* – 2011. – 25. – Pp. 2458-2464.
10. Adheem A.H. Nonlinear Analysis of Reinforced Concrete Beams Strengthened in Shear with NSM FRP Rods, *Journal of Babylon University / Engineering Sciences.* – 2013. – Vol. 21. – No 1. – Pp. 1-8.
11. Musmar M.A., Rjoub M.I. and Abdel Hadi M.A. Nonlinear Finite Element Analysis of Shallow Reinforced Concrete Beams Using SOLID65 Element, *ARPN / Journal of Engineering and Applied Sciences.* – 2014. – Vol. 9. – No 2. – Pp. 1-5. – February.
12. Menetrey P., Willam K.J. A triaxial failure criterion for concrete and its generalization // *ACI Structural Journal.* – 92. – Pp. 311-318.
13. Jasiński Radosław. Validation of Elastic-Brittle, and Elastic-Plastic FEM Model of the Wall Made of Calcium Silicate and AAC Masonry Units // *IOP Conference Series Materials Science and Engineering.* – 2019. – 603. – Pp. 1-11. – September.

Критерии авторства

Баклыков И.В. выполнил практические и теоретические исследования, на основании которых провел обобщение и написал рукопись. Баклыков И.В. имеет на статью авторское право и несет ответственность за плагиат.

Статья поступила в редакцию 17.08.2022

Одобрена после рецензирования 12.09.2022

Принята к публикации 19.09.2022

Предложенная методика моделирования и расчета железобетонных конструкций из легкого высокопрочного бетона на основе легкого заполнителя верифицирована с использованием данных экспериментальных исследований моделей и рекомендуется проектным и эксплуатационным организациям для обеспечения безопасности ГТС и продления срока их службы.

References

1. Experimentalnyye issledovaniya zhelezobetonnykh konstruksij iz legkogo vysokoprochnogo betona (primenitelno k konstruksii batoporta sukhogo doka) / Rubin O.D., Lisichkin S.E., Kuznetsov S.Yu. i dr. // *Prirodobustrojstvo.* – 2021. – № 4. – S. 59-66.
2. Gao Y.L., Chao Z. Experimental study on segregation resistance of nanoSiO₂ fly ash lightweight aggregate concrete. *Constr. Build. Mater.* 2015, 93, pp. 64-69.
3. Sohle K.M.A., Al-Jabri K., Zhang M.H., Liew J.Y.R. Flexural fatigue behavior of ultra-lightweight cement composite and high strength lightweight aggregate concrete. *Constr. Build. Mater.* 2018, 173, pp. 90-100.
4. Gao J.M., Wei S., Keiji M. Mechanical properties of steel fiber-reinforced, high-strength, lightweight concrete. *Cem. Concr. Compos.* 1997, 19, pp. 307-313.
5. Karayannis C.G. Nonlinear analysis and tests of steel-fiber concrete beams in torsion. *Struct. Eng. Mech.* 2000, 9, pp. 323-338.
6. Campione G. Flexural and shear resistance of steel fiber-reinforced lightweight concrete beams. *J. Struct. Eng.* 2013, 140, pp. 1-9.
7. Grabois T.M., Guilherme C.C., Toledo Filho R.D. Fresh and hardened-state properties of self-compacting lightweight concrete reinforced with steel fibers. *Constr. Build. Mater.* 2016, 104, pp. 284-292.
8. Li J.J., Wan C.J., Niu J.G., Wu L.F., Wu Y.C. Investigation on flexural toughness evaluation method of steel fiber reinforced lightweight aggregate concrete. *Constr. Build. Mater.* 2017, 131, pp. 449-458.
9. Libre N.A., Shekarchi M., Mahoutian M., Soroushian P. Mechanical properties of hybrid fiber reinforced lightweight aggregate concrete made with natural pumice. *Constr. Build. Mater.* 2011, 25, pp. 2458-2464.
10. Adheem A.H. (2013). Nonlinear Analysis of Reinforced Concrete Beams Strengthened in Shear with NSM FRP Rods, *Journal of Babylon University/ Engineering Sciences*, Vol. 21, No. 1 pp. 1-8.
11. Musmar M.A., Rjoub M.I. and Abdel Hadi M.A. (2014). Nonlinear Finite Element Analysis of Shallow Reinforced Concrete Beams Using SOLID65 Element, *ARPN Journal of Engineering and Applied Sciences*, Vol. 9, No. 2, February pp. 1-5.
12. P. Menetrey K.J., Willam. A triaxial failure criterion for concrete and its generalization. *ACI Structural Journal* 92, pp. 311-318.
13. Jasiński Radosław; Validation of Elastic-Brittle, and Elastic-Plastic FEM Model of the Wall Made of Calcium Silicate and AAC Masonry Units. *IOP Conference Series Materials Science and Engineering* 603 September 2019 pp. 1-11.

Criteria of authorship

Baklykov I.V. carried out theoretical studies, on the basis of which he generalized and wrote the manuscript. Baklykov I.V. has a copyright on the article and is responsible for plagiarism.

The article was submitted to the editorial office 17.08.2022

Approved after reviewing 12.09.2022

Accepted for publication 19.09.2022