

УДК 69.04

В. А. Пшеничкина, К. Н. Сухина, М. Е. Дубовский, А. В. Глухов

Волгоградский государственный технический университет

ОЦЕНКА НАДЕЖНОСТИ МОНОЛИТНОЙ ЖЕЛЕЗОБЕТОННОЙ ПЛИТЫ ПЕРЕКРЫТИЯ ПРИ ВВОДЕ ЗДАНИЯ В ЭКСПЛУАТАЦИЮ

Важной проблемой является определение ресурса здания на стадиях проектирования и ввода в эксплуатацию. Дана оценка ресурса наиболее поврежденных конструкций рассматриваемого здания. Выполнен анализ напряженно-деформированного состояния конструкций, а также вероятностный расчет. Оценка проводилась как по представленным проектным данным, так и с учетом технического состояния и фактических прочностных характеристик.

Ключевые слова: долговечность, коэффициент надежности, напряженно-деформированное состояние, ресурс, вероятностный расчет, характеристика безопасности.

На сегодняшний день, в связи со сложившейся экономической обстановкой, в строительстве наиболее популярным и востребованным является возведение железобетонных монолитных зданий и сооружений. Железобетонные конструкции применяются во многих отраслях строительства. Одним из преимуществ применения железобетонных конструкций является длительный срок их эксплуатации. Поэтому остается актуальным вопрос прогнозирования уровня надежности таких зданий и сооружений на протяжении всего срока эксплуатации [1—3].

Основной проблемой является сложность определения с достаточной точностью уровня надежности при вводе зданий и сооружений в эксплуатацию. В связи с ошибками при проектировании и возведении зданий и сооружений их индивидуальный начальный ресурс не соответствует назначенному ресурсу, который определяется методом предельных состояний [4—6].

Помимо ошибок при проектировании и строительстве проблемой определения уровня надежности зданий и сооружений является консервация строительства. Большое количество зданий остаются недостроенными длительный период времени. Конструкции продолжают воспринимать нагрузки от собственного веса и погодных условий, что исчерпывает их ресурс и усложняет определение уровня надежности [7—10].

Было рассмотрено пятиэтажное монолитное железобетонное каркасное здание, которое остается недостроенным более пяти лет. Из-за долговременной и несоответствующей нормам консервации несущие конструкции здания имеют различные повреждения: разрушение бетона и защитного слоя, коррозия арматурных стержней, накопление атмосферных осадков. Помимо этого, были допущены ошибки при строительстве: класс бетона колонн и перекрытий не соответствует проектному и варьируется от В22,5 до В25, проектный — В25 [11—15].

Определение уровня надежности выполнялось для монолитных железобетонных перекрытий, так как они являются наиболее поврежденными конструкциями. Это связано с тем, что скопление атмосферных осадков привело к деструкции защитного слоя бетона и, как следствие, к уменьшению толщины

плит перекрытий на величину 5...20 мм. При расчете с учетом фактических данных перекрытиям и колоннам на третьем и четвертом этажах был задан фактический класс бетона В22,5, класс арматуры — А400 — не отличается от проектного (теоретического). На рис. 1 показаны зоны деструкции бетона. На рис. 2 можно увидеть сами повреждения.

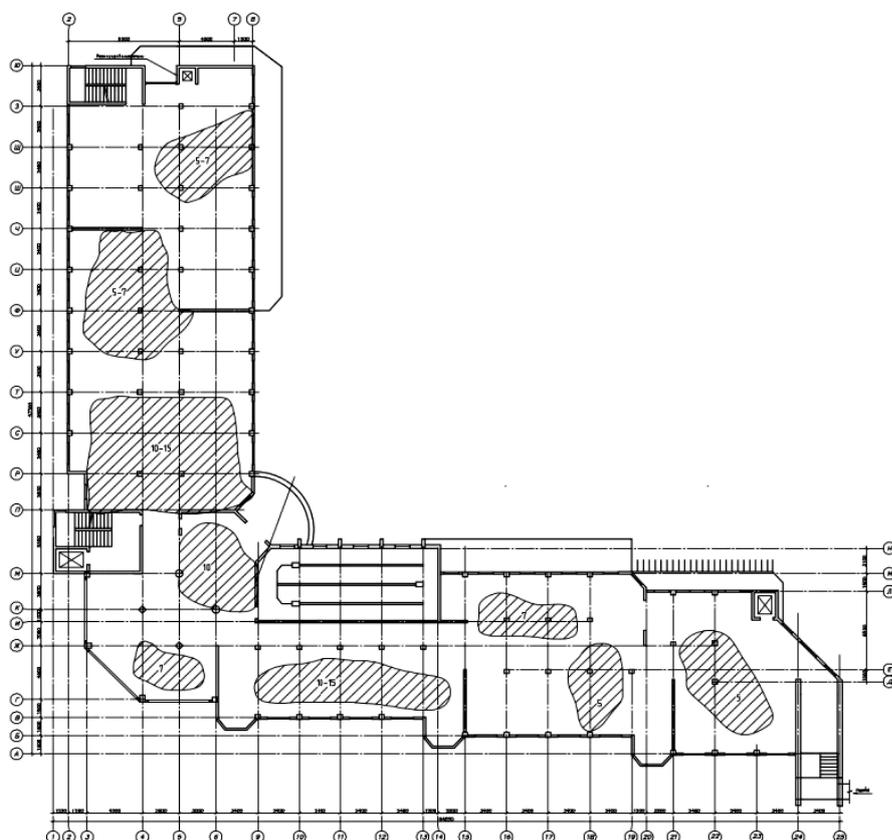


Рис. 1. Монолитная плита с разрушением защитного слоя бетона. Схема расположения деструктивных повреждений монолитной плиты:  — зона повреждений плиты с указанием глубины повреждений, мм

Данная задача решалась в два этапа. На первом этапе оценивалось напряженно-деформированное состояние конструкций, а на втором был выполнен вероятностный расчет. В свою очередь, каждый этап был рассмотрен дважды: сначала с учетом представленных проектных (теоретических) данных, затем с учетом фактических характеристик конструкций, полученных при проведении экспертизы [16—19].

Первым этапом был выполнен статический расчет с применением программных комплексов. На рис. 3 и 4 можно увидеть мозаику напряжений монолитной плиты по M_x , полученную при расчете в программном комплексе LIRA SAPR, по проектным (теоретическим) данным и с учетом технического состояния и фактических прочностных характеристик соответственно.



Рис. 2. Деструктивное повреждение монолитной плиты

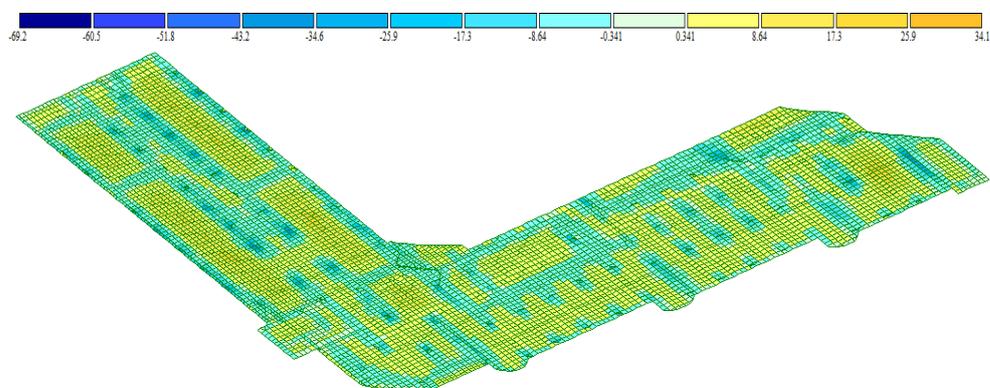


Рис. 3. Мозаика напряжений монолитной плиты по M_x , кН/м, при расчете по проектным данным

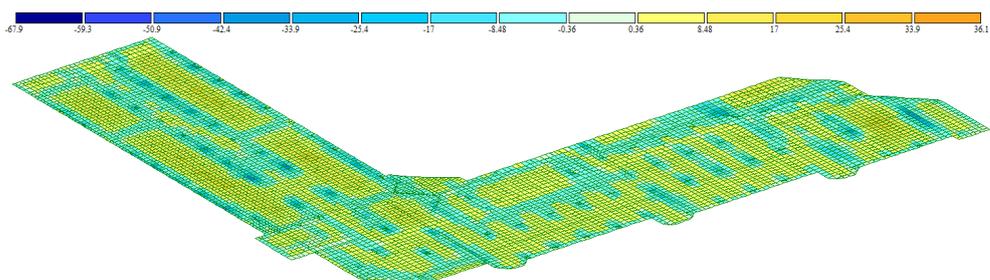


Рис. 4. Мозаика напряжений монолитной плиты по M_x , кН/м, при расчете с учетом технического состояния и фактических прочностных характеристик

Основные формулы статистического расчета

Коэффициент α_m :

$$\alpha_m = \frac{M_{\text{расч}}}{\gamma_{b2} \cdot R_b \cdot b \cdot h_0^2}, \quad (1)$$

где $M_{\text{расч}}$ — максимальное значение изгибающего момента; γ_{b2} — коэффициент условия работы бетона, $\gamma_{b2} = 1$; R_{bn} — нормативное сопротивление бетона осевому сжатию; h_0 — рабочая высота сечения монолитной плиты; b — ширина сечения плиты, принятая 1 м.

Требуемая площадь сечения растянутой арматуры A_s :

$$A_s = \frac{\gamma_{b2} \cdot R_b \cdot b \cdot h_0 (1 - \sqrt{1 - 2\alpha_m})}{R_s}, \quad (2)$$

где R_b — расчетное сопротивление бетона осевому сжатию; R_s — расчетное сопротивление арматуры растяжению.

Высота сжатой зоны сечения x :

$$x = \frac{R_s \cdot A_s}{\gamma_{b2} \cdot R_b \cdot b}. \quad (3)$$

Предельное значение изгибающего момента M_{max} :

$$M_{\text{max}} = R_s \cdot A_s (h_0 - 0,5x). \quad (4)$$

При выполнении расчета по представленным проектным данным была получена зависимость несущей способности сечения от его высоты (рис. 5).

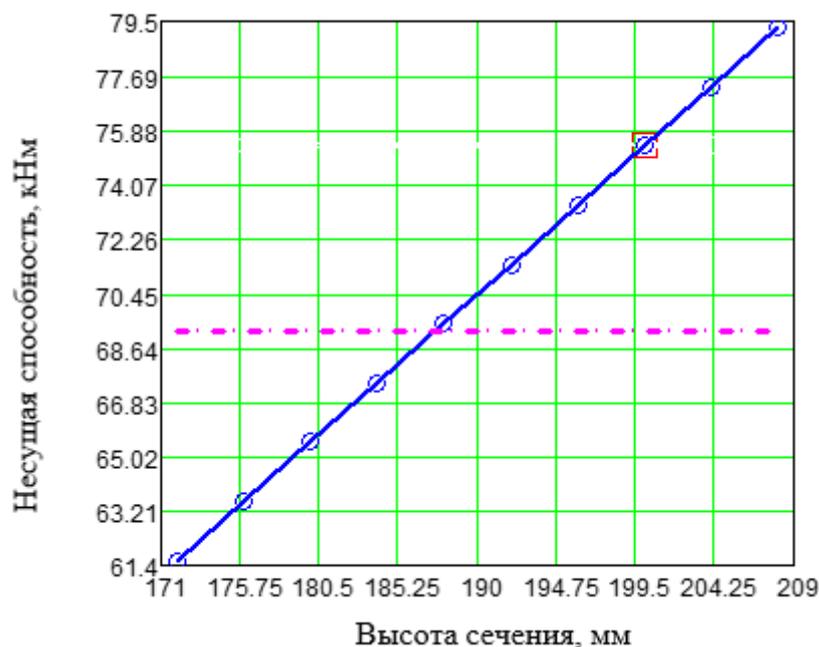


Рис. 5. График зависимости несущей способности сечения от высоты сечения при расчете по проектным данным: $\circ\circ\circ$ — кривая зависимости несущей способности сечения от его высоты; \square — максимальное значение несущей способности сечения при заданном значении высоты сечения; $-\cdot-\cdot-$ — расчетное значение несущей способности сечения при заданном значении высоты сечения

При учете технического состояния и фактических прочностных характеристик здания зависимость несущей способности сечения от его высоты имеет вид, представленный на рис. 6.

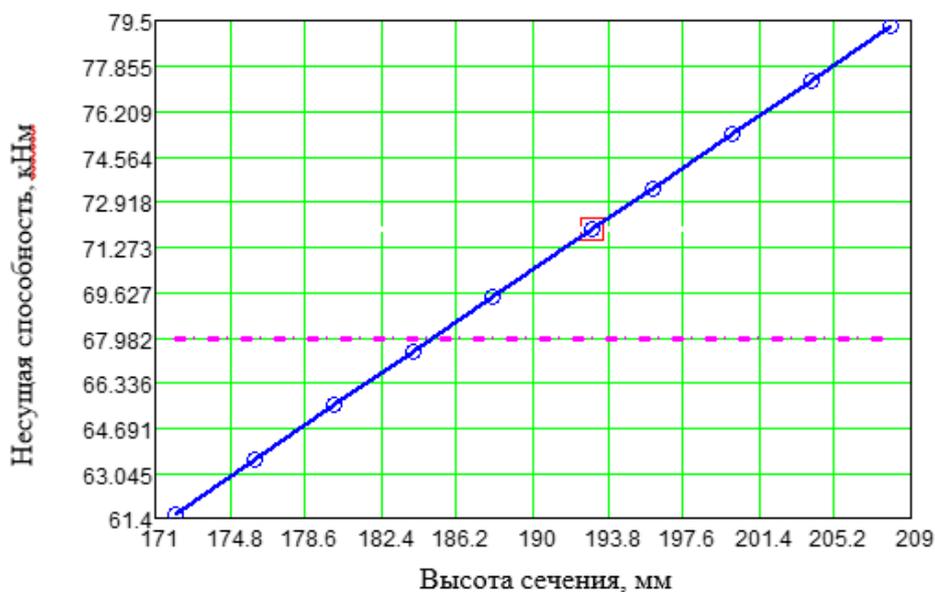


Рис. 6. График зависимости несущей способности сечения от высоты сечения при расчете с учетом технического состояния и фактических прочностных характеристик: $\bullet\bullet\bullet\bullet$ — кривая зависимости несущей способности сечения от его высоты; \blacksquare — максимальное значение несущей способности сечения при заданном значении высоты сечения; \cdots — расчетное значение несущей способности сечения при заданном значении высоты сечения

Значения внутренних усилий в монолитной плите здания, полученные при статическом расчете, отражены в табл. 1.

Таблица 1

Значения основных характеристик статического расчета

Внутренние усилия в конструкции	Значения при расчете по проектным данным	Значения при расчете с учетом технического состояния конструкции
M_x , кН/м	69,2	67,9
M_y , кН/м	70,8	70,8
Q_x , кН	824	843
Q_y , кН	1530	1630
N_x , кН	412	411
N_y , кН	442	444

Вторым этапом были определены характеристики безопасности с использованием следующих формул [20, 21].

Математическое ожидание прочности бетона m_b :

$$m_b = \frac{R_{bn}}{1 - 1,64 \cdot f_b}, \quad (5)$$

где R_{bn} — нормативное сопротивление бетона осевому сжатию; f_b — коэффициент вариации бетона, принятый 0,09.

Математическое ожидание прочности стали m_s :

$$m_s = \frac{R_{sn}}{1 - 1,64 \cdot f_s}, \quad (6)$$

где R_{sn} — нормативное сопротивление арматуры растяжению; f_s — коэффициент вариации стали, принятый 0,044.

Стандарт прочности бетона σ_b :

$$\sigma_b = m_b \cdot f_b. \quad (7)$$

Стандарт прочности стали σ_s :

$$\sigma_s = m_s \cdot f_s. \quad (8)$$

Математическое ожидание M :

$$M = m_s \cdot A_s \left(h_0 - \frac{m_s \cdot A_s}{2 \cdot m_b \cdot b} \right), \quad (9)$$

где A_s — площадь сечения арматуры; h_0 — рабочая высота сечения монолитной плиты; b — ширина сечения плиты, принятая 1 м.

Дисперсия D :

$$D = \left(\frac{m_s^2 \cdot A_s^2}{2 \cdot b \cdot m_b^2} \right)^2 \sigma_b^2 + \left(A_s \cdot h_0 - \frac{m_s \cdot A_s^2}{m_b \cdot b} \right)^2 \sigma_s^2. \quad (10)$$

Среднеквадратичное отклонение σ_M :

$$\sigma_M = \sqrt{D}. \quad (11)$$

Средний момент M_{cp} :

$$M_{cp} = \frac{M_{расч}}{1 + 3f}, \quad (12)$$

где $M_{расч}$ — максимальное значение изгибающего момента; f — коэффициент по нагрузке, принятый 0,18.

Средний стандарт σ_{cp} :

$$\sigma_{cp} = M_{cp} \cdot f. \quad (13)$$

Коэффициент надежности β :

$$\beta = \frac{M_{\max} - M_{\text{ср}}}{\sqrt{\sigma_M^2 + \sigma_{\text{ср}}^2}}, \quad (14)$$

где M_{\max} — предельное значение изгибающего момента.

На основании анализа характера повреждений рассматриваемой конструкции в качестве основного критерия была принята функция предельного изгибающего момента с двумя случайными величинами:

$$M_{\max} = M(\tilde{h}; \tilde{R}_b), \quad (15)$$

где \tilde{h} — высота сечения монолитной плиты; \tilde{R}_b — расчетное сопротивление бетона осевому сжатию.

Данный расчет также выполнялся как по проектным данным, так и с учетом технического состояния и фактических прочностных характеристик. Сравнительные результаты приведены в табл. 2.

Таблица 2

Значения статистических характеристик плиты перекрытия

Расчетный параметр	Теоретические значения	Фактические значения
Математическое ожидание m_R , кН	94,641	90,395
Стандарт σ_R , кН	3,867	3,684
Коэффициент вариации бетона f_R	0,135	0,09
Средний момент m_f , кН	45,974	45,974
Средний стандарт σ_f , кН	8,275	8,275
Коэффициент вариации по нагрузке f_f	0,18	0,18
Индекс надежности β	3,22	2,86

Согласно проведенному исследованию, можно увидеть снижение несущей способности конструкции при уменьшении высоты сечения конструкции, а также при снижении класса бетона, что, в свою очередь, снижает характеристику безопасности. Характеристика безопасности (индекс надежности) β , заложенная на стадии проектирования, составляет 3,22. С учетом фактически выявленных при проведении технического обследования прочностных характеристик индекс надежности β равен 2,86. Снижение величины индекса надежности вызвано ошибками, возникшими в ходе строительства, а также повреждениями конструкций после длительного простоя здания.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Raizer V. D. Theory of Reliability in Structural Design // Journal of Applied Mechanics Reviews. 2004. Vol. 57. No. 1.
2. Raizer V. D. Reliability of Structures. Analysis and Applications. New York, USA : Backbone Publishing Company, 2009.
3. Ditlevsen H. O. Madsen Structural reliability methods. Department of Mechanical Engineering Technical University of Denmark, 2007.
4. Wu L., Wang H., Lin Zh. Ultimate strength behavior of steel plate-concrete composite slabs: An experimental and theoretical study. China : Steel and Composite Structures, 2020. 18 p.
5. Yang Yong, Li Hui. Experimental study on shear behaviors of Partial Precast Steel Reinforced Concrete beams. China : Steel and Composite Structures, 2020. 15 p.

6. Yunlong Yu, Yong Yang, Yicong Xue, Yaping Liu. Shear behavior and shear capacity prediction of precast concrete-encased steel beams. China : Steel and Composite Structures, 2020. 11 p.
7. Yuxuan Tao, Yuan Huang. Numerical investigation on progressive collapse resistance of post-tensioned precast concrete beam-column assemblies under a column-loss scenario. China : Engineering Structures, 2022. 15 p.
8. Effects of loading regimes on the structural behavior of RC beam-column sub-assemblages against disproportionate collapse / Kai Qian, Song-Yuan Geng, Shi-Lin Liang, Feng Fu, Jun Yu. China : Engineering Structures, 2022. 17 p.
9. Chae-Rim Im, Keun-Hyeok Yang, Sanghee Kim, Ju-Hyun Mun. Flexural performance of lightweight aggregate concrete columns. China : Engineering Structures, 2022. 14 p.
10. Пшеничкина В. А., Бабалич В. С., Сухина К. Н., Сухин К. А. Оценка остаточного ресурса несущих железобетонных конструкций эксплуатируемых промышленных зданий. М. : АСВ, 2017.
11. Сухина К. Н., Пшеничкина В. А. Вероятностный анализ ресурса конструкций покрытия промышленного здания с учетом случайного характера снеговой нагрузки // Инженер. вестн. Дона. 2015. № 4. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n4y2015/3397.
12. Туснина О. А., Павлов С. А. Оценка устойчивости к прогрессирующему обрушению каркаса конвертерного цеха // Вестн. граждан. инженеров. 2019. № 6.
13. Попов В. М., Плюснин М. Г. Влияние изменчивости характеристик бетона и арматуры на несущую способность изгибаемых железобетонных элементов // Вестн. граждан. инженеров. 2015. № 3(50).
14. Райзер В. Д. Теория надежности сооружений / Пер. с англ. М. : АСВ, 2010.
15. Бандурин М. А. Проблемы оценки остаточного ресурса длительно эксплуатируемых водопроводящих сооружений // Инженер. вестн. Дона. № 3. 2012. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n3y2012/891.
16. Лыженко К. Ю., Кубасов А. Ю., Маляев Д. Р. К вопросу восстановления экспериментальной надежности железобетонных конструкций // Инженер. вестн. Дона. 2017. № 4. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n4y2017/4422.
17. Калашиников С. Ю., Пшеничкина В. А., Бояльская А. А. К вопросу об анализе риска строительных конструкций, зданий и сооружений при экстремальных воздействиях природного или техногенного характера // Инженерные проблемы строительного материаловедения, геотехнического и дорожного строительства : материалы II науч.-техн. конф., 2009. С. 39—43.
18. Острейковский В. А. Теория надежности. М. : Высш. шк., 2003. С. 127—132.
19. Пшеничкина В. А., Гордеев С. С., Иванов М. А. Основные положения метода анализа риска при проведении мониторинга технического состояния зданий и сооружений // Малоэтажное строительство в рамках Национального проекта «Доступное и комфортное жилье гражданам России: технологии и материалы, проблемы и перспективы развития в Волгоградской области»: материалы Междунар. науч.-практ. конф. Волгоград, 2009. С. 238—241.
20. Тамразян А. Г. Анализ риска обрушения зданий и сооружений от критических дефектов и различных техногенных воздействий. М. : МГСУ, 2004. 106 с.
21. Ржаницын А. Р. Теория расчета строительных конструкций на надежность. М. : Стройиздат, 1978. 239 с.

© Пшеничкина В. А., Сухина К. Н., Дубовский М. Е., Глухов А. В., 2023

Поступила в редакцию
в декабре 2022 г.

Ссылка для цитирования:

Пшеничкина В. А., Сухина К. Н., Дубовский М. Е., Глухов А. В. Оценка надежности монолитной железобетонной плиты перекрытия при вводе здания в эксплуатацию // Вестник Волгоградского государственного архитектурно-строительного университета. Серия: Строительство и архитектура. 2023. Вып. 1(90). С. 54—62.

Об авторах:

Пшеничкина Валерия Александровна — д-р техн. наук, проф., зав. каф. строительных конструкций, оснований и надежности сооружений, Волгоградский государственный технический уни-

верситет (ВолгГТУ). Российская Федерация, 400074, г. Волгоград, ул. Академическая, 1;
ORCID: 0000-0001-9148-2815; rap_hm@list.ru

Сухина Ксения Николаевна — канд. техн. наук, доц., Волгоградский государственный технический университет (ВолгГТУ). Российская Федерация, 400074, г. Волгоград, ул. Академическая, 1; zhukova_kseniya@mail.ru

Дубовский Максим Евгеньевич — аспирант, Волгоградский государственный технический университет (ВолгГТУ). Российская Федерация, 400074, г. Волгоград, ул. Академическая, 1

Глухов Антон Викторович — аспирант, Волгоградский государственный технический университет (ВолгГТУ). Российская Федерация, 400074, г. Волгоград, ул. Академическая, 1

**Valeriya A. Pshenichkina, Kseniya N. Sukhina, Maksim E. Dubovskiy,
Anton V. Glukhov**

Volgograd State Technical University

ASSESSMENT OF THE RELIABILITY OF A MONOLITHIC REINFORCED CONCRETE FLOOR SLAB DURING THE COMMISSIONING OF A BUILDING

An important problem is the determination of the building resource during the design and commissioning stages of the building. The resource of the most damaged structures considered by the building was evaluated. Analysis of stress-strain state of structures as well as probabilistic calculation was performed. The evaluation was carried out both according to the presented design data and considering the technical state and actual strength characteristics.

Key words: durability, reliability factor, stress-strain state, life, probabilistic calculation, safety characteristic.

For citation:

Pshenichkina V. A., Sukhina K. N., Dubovskiy M. E., Glukhov A. V. [Assessment of the reliability of a monolithic reinforced concrete floor slab during the commissioning of a building]. *Vestnik Volgogradskogo gosudarstvennogo arhitekturno-stroitel'nogo universiteta. Seriya: Stroitel'stvo i arhitektura* [Bulletin of Volgograd State University of Architecture and Civil Engineering. Series: Civil Engineering and Architecture], 2023, iss. 1, pp. 54—62.

About authors:

Valeriya A. Pshenichkina — Doctor of Engineering Sciences, Professor, Volgograd State Technical University (VSTU). 1, Akademicheskaya st., Volgograd, 400074, Russian Federation; ORCID: 0000-0001-9148-2815; rap_hm@list.ru

Kseniya N. Sukhina — Candidate of Engineering Sciences, Docent, Volgograd State Technical University (VSTU). 1, Akademicheskaya st., Volgograd, 400074, Russian Federation; zhukova_kseniya@mail.ru

Maksim E. Dubovskiy — Postgraduate student, Volgograd State Technical University (VSTU). 1, Akademicheskaya st., Volgograd, 400074, Russian Federation

Anton V. Glukhov — Postgraduate student, Volgograd State Technical University (VSTU). 1, Akademicheskaya st., Volgograd, 400074, Russian Federation