



Проектное прогнозирование эксплуатационной надежности сооружений в суровых климатических условиях

Б.И. Пинус

Иркутский национальный исследовательский технический университет, г. Иркутск, Россия

Аннотация. На основании системного анализа физических закономерностей взаимодействия внешней низкотемпературной среды и железобетонных конструкций и его последствий предложен графоаналитический алгоритм коррекции нормативных функциональных зависимостей показателей эксплуатационной пригодности по условиям обеспечения требуемой надежности в расчетный срок эксплуатации. Динамическая модель работы конструкции рассматривается в форме совокупности статических испытаний на различных этапах низкотемпературных стандартизованных воздействий. При этом временной фактор анализируется в виде относительного (к марке по морозостойкости) количества циклов, что позволяет получить статистическое обобщение различных испытаний. Контролируемые параметры надежности обоснованы методами статистического анализа с учетом изменчивости всех параметров, входящих в нормативные критериальные модели. При этом их чувствительность и информационная представительность оценивается апробированными методами вероятностного прогноза. Экспериментально подтверждена технико-экономическая приемлемость и целесообразность предлагаемого подхода к коррекции обеспечения параметрической надежности изгибаемых железобетонных конструкций. Выполнены статистически представительные экспериментальные исследования с автоматической фиксацией всех значимых параметров сопротивления на различных этапах исчерпания ресурса усталостной структурной трансформации конструктивных элементов «северного исполнения». Получена картотека графических зависимостей отказных значений прочности изгибаемых элементов в полях рассеивания различного уровня их армирования и в различных температурно-влажностных климатических условиях. Подтверждено существенное влияние температур и внутреннего сопротивления на параметрические отказы конструктивных элементов априорно установленной обеспеченности (вероятности).

Ключевые слова: эксплуатационная надежность, динамическая модель, морозная деградация

Для цитирования: Пинус Б.И. Проектное прогнозирование эксплуатационной надежности сооружений в суровых климатических условиях // Известия вузов. Инвестиции. Строительство. Недвижимость. 2023. Т. 13. № 2. С. 316–323. <https://elibrary.ru/mupnbe>. <https://doi.org/10.21285/2227-2917-2023-2-316-323>.

Original article

Design forecasting of serviceability of structures in harsh climatic conditions

Boris I. Pinus

Irkutsk National Research Technical University, Irkutsk, Russia

Abstract. By using system analysis, which examines the physical laws of the interaction between external low-temperature environments and reinforced concrete structures, along with their resulting consequences, a graphical-analytical algorithm is proposed in order to adjust the standard functional relationships of serviceability indicators, thereby ensuring the required reliability within the designated service life. The analysis of structural behaviour was carried out through a dynamic model, which involves a combination of static tests at different stages of standardized low-temperature actions. In this case, the time factor was analysed in the form of a relative (to the frost-resistance grade) number of

cycles, enabling the statistical compilation of various tests. The controlled reliability parameters were substantiated by the methods of statistical analysis with due regard for the variability of all the parameters within the standard criteria models. Here, their sensitivity and representativeness were assessed using approved probabilistic forecast methods. The technical and economic feasibility of the proposed approach for adjusting the parametric reliability of bending reinforced concrete structures was experimentally confirmed. Statistically significant experimental studies were carried out with automatic registration of all significant resistance parameters during various stages of fatigue-induced structural transformations of the elements intended for arctic service. A catalogue, containing graphical relationships of ultimate tensile strength values for bending elements within dispersion fields at different levels of reinforcement and under varying temperature-humidity climatic conditions, was compiled. The research findings confirm the significant influence of temperature and internal resistance on the parametric failures of structural elements having previously established reliability (probability).

Keywords: operational reliability, dynamic model, frost degradation

For citation: Pinus B.I. Design forecasting of serviceability of structures in harsh climatic conditions. *Izvestiya vuzov. Investitsii. Stroitel'stvo. Nedvizhimost' = Proceedings of Universities. Investment. Construction. Real estate.* 2023;13(2):316-323. (In Russ.). <https://elibrary.ru/mupnbe>. <https://doi.org/10.21285/2227-2917-2023-2-316-323>.

ВВЕДЕНИЕ

В соответствии с современной методологией проектирования сооружений¹, их надежность отождествлена с вероятностью наступления расчетных предельных состояний в форме функциональных параметрических отказов.

В отсутствие статистически представительных данных об отказах элементов сооружений в неблагоприятных условиях эксплуатации необходимый проектный ресурс работоспособности может быть обоснован коррекцией расчетных значений сопротивления материалов, учитывающей физические и статистические закономерности их изменения. При этом корректируемые и контролируемые параметры должны обладать повышенной чувствительностью к вероятному отказу, кинетике изменения и приемлемыми возможностями обеспечения информационно-статистической представительности. С учетом существующей практики проектирования, эксплуатации и контроля отбор контролируемых параметров целесообразно производить по критериям стандарта и рекомендаций² с использованием расчетных динамических моделей. Принципиальное отличие последних от соответствующих нормативных функциональных зависимостей состоит в наличии временных (время, циклы) и статистических факторов распределения значимых параметров отклика конструкций, априори принимаемых как случай-

ные величины. В качестве примера практической реализации такого подхода ниже приведен графоаналитический алгоритм коррекции нормативной функциональной модели прочности изгибаемых железобетонных элементов сооружений, эксплуатируемых в суровых климатических условиях.

МЕТОДЫ

Динамическая модель эксплуатации конструкций в суровых климатических условиях рассматривается в виде совокупности статических испытаний по истечении определенного количества циклов (N) температурно-влажностных ($T-W$) воздействий. Ее приемлемость следует из принципа Бейли [1–4], соответствие которого для рассматриваемых условий подтверждено экспериментально [5–7]. Предпочтительная периодичность испытаний определяется физическими закономерностями морозной деструкции бетона как нестационарного процесса экстремального вида [8–12].

С учетом специфики контроля и стандартизированных показателей качества, а также возможности обобщения многочисленных экспериментальных данных временной фактор анализируется в виде относительного количества циклов $T-W$ воздействий ($n = N / F$) [13].

Контролируемые параметры надежности установлены вероятностным моделированием с применением критериальных нормативных уравнений несущей способности и стандартизированных показателей их изменчивости

¹ГОСТ Р ИСО 2394-2016. Конструкции строительные. Основные принципы надежности // Гарант [Электронный ресурс]. URL: <https://base.garant.ru/71911912/> (07.01.2023).

²ГОСТ 27.201.81. Оценка показателей надежности при малом числе наблюдений с использованием дополнительной информации. Рекомендации по использованию дополнительной информации // StandartGOST. URL: https://standartgost.ru/g/ГОСТ_27.201-81 (07.01.2023).

(допусков). Сопоставительная динамика при Ц30 прочностных и деформативных свойств устанавливалась экспериментально³.

В качестве опытных контролируемых показателей надежности изгибаемых элементов по критериям стандарта [3] приняты призмная прочность бетона $R_b(n)$ и его предельная деформативность $\varepsilon_{bu}(n)$, оцениваемые по совокупности случайных реализаций на отдельных этапах испытаний. При этом долговечность конструкций соответствует количеству циклов, по истечению которых вероятность снижения $R_b(n)$ находится в пределах установленного допуска (СП, СНиП, ГОСТ) составляет 99,7%.

Необходимая коррекция расчетного сопротивления бетона из условия обеспечения надежности по несущей способности изгибаемого элемента на срок эксплуатации, соответствующей ресурсу морозостойкости, устанавливается графоаналитическим методом в следующей последовательности.

Функциональная модель прочности изгибаемого элемента по нормальному сечению в параметрах случайных реализаций преобразуется к виду

$$\tilde{R}_b = \frac{\tilde{\sigma}_e^2 A_s^2}{R\tilde{b}(\tilde{\sigma}_e \tilde{A}_s \tilde{h}_0 - \tilde{M}_0)}$$

где \tilde{M}_0 – совокупность случайных значений несущей способности элемента в предположении стандартизированной изменчивости всех параметров нормативной зависимости.

Аналитическим моделированием определяются отказные значения прочности бетона R_{ba} , соответствующие вероятности параметрического отказа элемента по несущей способности не более 0,3%. При этом рассматриваются варианты различного уровня армирования (от минимального до максимально ожидаемого) и изменчивости (от стандарта до прогнозируемого). На основании анализа строятся графики зависимости вероятности параметрического отказа ($\alpha = 0,3\%$) от принятого армирования и дисперсии прочности бетона. Одновременно рассматриваются различные варианты коррекции снижения расчетного значения при оценке проектного значения несущей способности M_0 .

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Ниже представлены кривые изменения отказного (по условию надежности) значения прочности бетона для 2-х вариантов армирования и различных коэффициентов изменчивости показателя прочности бетона

(рис. 1 и 2). Наглядно подтверждается существенное влияние уровня армирования ($\mu' = \mu/\mu_R$) и статистических показателей распределения на величину отказного значения прочности бетона R_{ba} , косвенно характеризующего надежность конструкции по несущей способности. Здесь же приведены графики риска отказа при двух наиболее распространенных вариантах коррекции расчетного значения $\gamma_{BF} = 0,85$ и $0,7$. Наблюдается неоднозначность эффекта корректирующих процедур от относительного (к граничному) уровня армирования и плотности распределения прочности бетона. Полученная картотека графических зависимостей отказных значений R_{ba} в полях рассеивания μ' принята базовой для косвенной оценки надежности железобетонных конструкций "северного исполнения" по результатам стандартных испытаний призматических образцов на сжатие после циклического замораживания и оттаивания различной интенсивности. Температурно-влажностным воздействиям (-42°C и оттаивание воды $20 \pm 2^\circ\text{C}$) подвергнуты около ста образцов бетона нормального твердения (Ц:П:Щ:В = 1:1,75:2,9:0,45). Периодически образцы испытывались на сжатие в режиме постоянства скорости деформирования (0,05 мм/с) с автоматическим контролем деформаций (диаграмм σ - ε). Количество одновременно испытываемых призм (12–18 штук) позволяло получать статистически достоверные данные обоснованных показателей распределения [8–10, 13–18] прочности бетона на этапах исчерпания нормируемого ресурса его морозостойкости. Используя опытные значения статистик и картотеку отказных значений прочности по условиям обеспечения требуемой надежности конструкций (не менее 0,07), устанавливались средние значения R_{ba} , для изгибаемых элементов с различным относительным уровнем армирования μ' (таблица). Как и следовало ожидать, отказное значение прочности бетона, рассматриваемое как критерий обеспечения необходимой надежности по несущей способности нормального сечения, зависит от уровня армирования и является чувствительным показателем к условиям внешнего воздействия. Наблюдается его монотонное возрастание с увеличением армирования и практическая стабилизация при $\mu' = 0,85\mu_R$. Аналогичные тенденции сохраняются и во временном аспекте вплоть до момента исчерпания ресурса нормируемой морозостойкости бетона F.

³Пинус Б.И. Обеспечение долговечности железобетонных конструкций при низкотемпературных воздействиях: дисс. ... д-ра. техн. наук. Иркутск, 1986. 495 с.

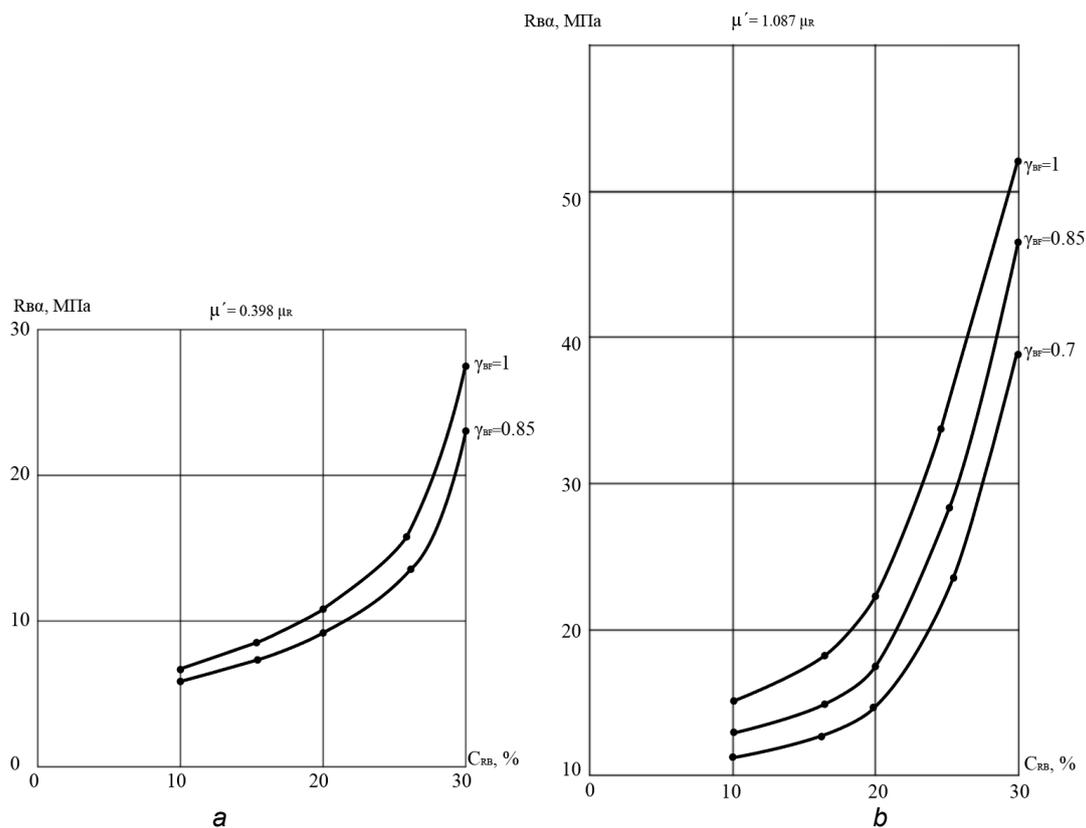


Рис. 1. Изменение $R_{b\alpha}$ в поле рассеивания коэффициента вариации прочности бетона при относительном армировании: $a - \mu' = 0,398\mu_R$; $b - \mu' = 1,087\mu_R$
Fig. 1. Change of $R_{b\alpha}$ in the dispersion field of the coefficient of variation of concrete strength under relative reinforcement: $a - \mu' = 0,398\mu_R$; $b - \mu' = 1,087\mu_R$

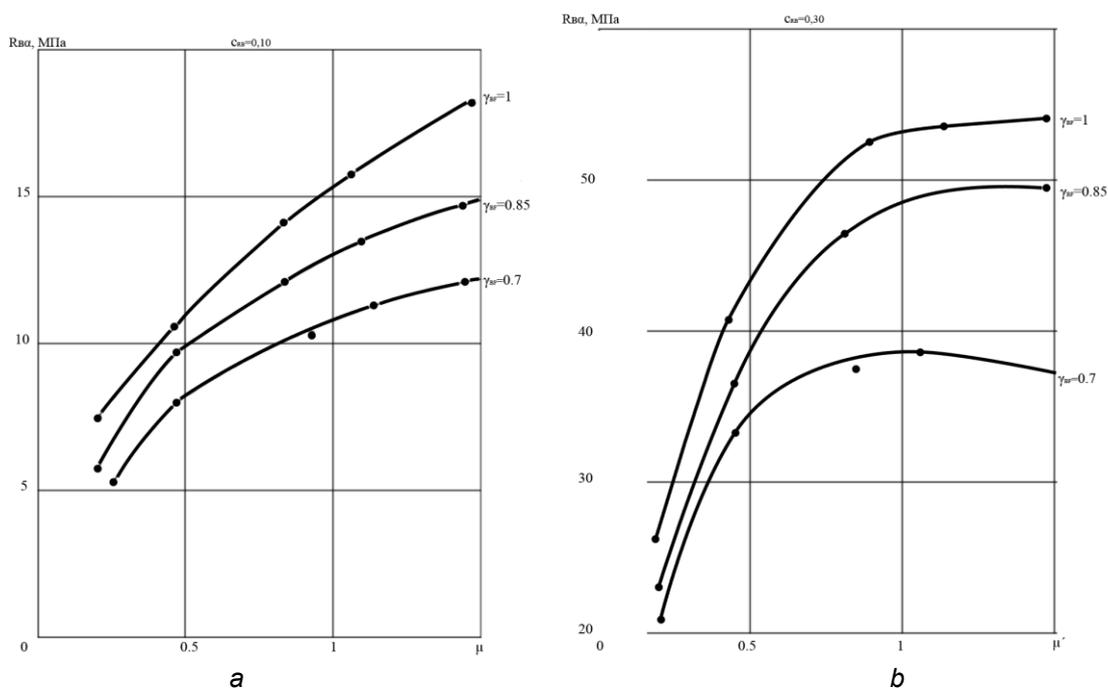


Рис. 2. Изменение $R_{b\alpha}$ для изгибаемых элементов различного уровня армирования при коэффициенте вариаций прочности бетона: $a - C_{Rb} = 10\%$; $b - C_{Rb} = 30\%$
Fig. 2. Change of $R_{b\alpha}$ for bent elements of different reinforcement levels with a coefficient of variations in concrete strength: $a - C_{Rb} = 10\%$; $b - C_{Rb} = 30\%$

Изменение при ЦЗО отказного значения R_{ba}
Change in the failure value of R_{ba} at the CFT

n	Статистики распределения прочности бетона		γ_{bF}	Отказное значение R_{ba} для изгибаемых элементов с μ' , равное				
	Среднее $R_b(n)$, МПа	Коэффициент изменчивости $C_V R_b$, %		0,181	0,398	0,833	1,087	1,449
0	24,0	12,5	1	7,5	11,9	15,4	15,6	16,0
0,29	24,5	14,2	1	8,1	12,8	16,6	16,8	17,1
0,86	20,2	20,7	1	11,8	18,1	23,6	23,8	24,3
			0,85	–	–	21,0	21,3	22,2
			0,70	–	–	17,0	17,4	19,8
1,0	19,7	23,4	1	14,5	22,1	28,8	29,6	29,9
			0,85	–	20,4	24,8	25,1	27,3
			0,70	–	18,2	20,8	21,7	24,9
1,29	19,1	27,0	1	20,0	38,6	38,6	39,2	41,6
			0,85	17,4	33,4	33,3	35,3	38,2
			0,70	–	29,0	29,0	30,5	34,8

Сопоставительная оценка статистик распределения $R_b(n)$ и R_{ba} позволяет утверждать, что на начальных этапах циклических Т-В воздействий ($n \leq 0,3$) расчетная функциональная модель норм ($\gamma_F = 1,0$) обеспечивает требуемый уровень надежности по прочности нормального сечения для всего анализируемого диапазона армирования. Простая интерполяция приведенных данных показывает, что в дальнейшем ($n > 0,3$) риск параметрического отказа может превышать допустимый уровень (0,3%) в элементах с $\mu' = (0,4-0,45)\mu_R$.

На наш взгляд, сказывается принципиальное различие основных предпосылок нормативного (детерминированного) метода определения несущей способности и вероятностно-статистического прогноза долговечности.

Первый предполагает наличие граничной высоты сжатой зоны ε_R , что при заданном армировании априори исключает возможность двойственного характера [19–25] параметрического отказа.

Второй постулирует вероятность различного типа разрушения, обусловленного статистическими закономерностями совместного распределения значимых показателей конструктивных свойств арматуры и бетона, т.е. параметрические отказы вследствие разрушения сжатой зоны до достижения текучести растянутой арматуры вполне вероятны при армировании существенно ниже граничного (μ_R). С увеличением μ его вероятность растет, что и под-

тверждается динамикой отказного значения R_{ba} . Подтверждается необходимость дифференцированной коррекции расчетного сопротивления с учетом установленных закономерностей и с целью обеспечения необходимого уровня надежности конструкции на период эксплуатации в суровых климатических условиях, соответствующих ее морозостойкости.

Приведенные в таблице данные свидетельствуют о возможности достижения паритета $R_b(n)$ и R_{ba} путем приемлемого снижения расчетного значения на 15–30% ($\gamma_F = 0,85-0,7$). При этом уровень армирования изгибаемых элементов не должен превышать $0,8\mu_R$. Не трудно убедиться в том, что обеспечение надежности более армированных сечений сопряжено с экономически проблематичным снижением расчетного сопротивления и нуждается в соответствующем обосновании.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

С учетом физических и статистических закономерностей морозной деструкции бетона и железобетона [5, 7, 26–30], температуры среды эксплуатации (Т) и конструктивных особенностей элементов (μ') предлагается, в первом приближении, коррекция критериального уравнения несущей способности введением коэффициента надежности бетона

$$\gamma_{bF} = (1 - 0,0075T) \cdot (1,36 - 0,48\mu') \leq 1. (2)$$

При этом значение $\gamma_{bF} = 1-0,5$ при расчетной температуре до -60°C и $\mu' \leq 1,2\mu_R$.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Li W.T., Sun W., Jiang J.Y. Damage of Concrete Experiencing Flexural Fatigue Load and Closed Freeze/thaw Cycles Simultaneously // *Concrete and building materials*. 2011. No. 25 (5). P. 2604–2610. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2010.12.007>.
2. Soroushian P., Elzafraney M. Damage Effects on Concrete Performance and Microstructure // *Cement and concrete composites*. 2004. No. 26 (7). P. 853–859. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2003.05.001>.
3. Shang H.S., Song Y.P. Experimental study of strength and deformation of plain concrete under biaxial compression after freezing and thawing cycles // *Cement and Concrete Research*. 2006. No. 36. P. 1857–1864. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2006.05.018>.
4. Карпенко Н.И. Общие модели механики железобетона. М.: Стройиздат, 1996. 416 с.
5. Актуганов И.З., Пушкин А.А. Экспериментальная проверка принципа линейность суммирования повреждений бетона при действии нестационарных знакопеременных циклов. В кн.: Вопросы надежности железобетонных конструкций. Куйбышев, 1972. С. 5–8.
6. Важенин В.В. К вопросу о морозостойкости бетона и железобетона. В кн.: Вопросы надежности железобетонных конструкций. Челябинск, 1966. С. 197–199.
7. Гладков В.С. О разрушении гидротехнического бетона при многократном замораживании и оттаивании в нестационарном режиме // *Труды координационных совещаний по гидротехнике*. 1972. Вып. 73. С. 133–142.
8. Пинус Б.И., Пинус Ж.Н., Хомякова И.В. Изменение конструктивных свойств бетонов при охлаждении и замораживании // *Вестник Иркутского государственного технического университета*. 2015. № 2 (97). С. 111–116. EDN: TKOKYR.
9. Pinus B.I. Consideration of cumulative effects un concrete structures at low temperatures impact. In: *Investment, Construction, Real Estate: New technologies and special-purpose development priorities: International scientific conference // MATEC Web of Conferences*. 2018. Vol. 212. P. 01025.212:01025. <https://doi.org/10.1051/matecconf/201821201025.2018>.
10. Трофимов Б.Я., Погорелов С.Н. Исследование деформации бетона в процессе циклического замораживания. В кн.: Работоспособность строительных материалов при воздействии различных эксплуатационных факторов. Казань, 1986. С. 79–82.
11. Penttala V., Al-Neshawy F. Stress and strain state of concrete during freezing and thawing cycles // *Cement and concrete research*. 2002. Vol. 32. No. 9. P. 1407–1420. [https://doi.org/10.1016/S0008-8846\(02\)00785-8](https://doi.org/10.1016/S0008-8846(02)00785-8).
12. Minhoto M.J.C., Pais J.C., Fontes L.P.T.L. Evaluation of Fatigue Performance at Different Temperatures // *2nd Workshop on Four Point Bending*. Pais (ed.). University of Minho. 2009. P. 217–230.
13. Pinus B.I., Pinus Z.N. Probabilistic analysis of the strength and reliability of reinforced concrete structures under low-temperature impact // *Investment, construction, real estate: new technologies and special-purpose development priorities: International scientific conference (ICRE-2018) (Irkutsk, 26–27 April 2018)*. MATEC Web of conferences. 2018. Vol. 212. P. 01026. EDN: WTWZMC. <https://doi.org/10.1051/matecconf/201821201026>.
14. Ueda T., Hasan M., Nagai K., Sato Ya., Wang L. Mesoscale Simulation of Influence of Frost Damage on Mechanical Properties of Concrete // *Journal of Materials in Civil Engineering*. 2009. Vol. 21. No. 6. P. 244–252. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0899-1561\(2009\)21:6\(244\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0899-1561(2009)21:6(244)).
15. Fagerlund G. Mechanical Damage and Fatigue Effects Associated with Freeze-thaw of Materials // *Proceeding 2nd International RILEM Workshop on Frost Resistance of Concrete*. 2002. P. 117–132.
16. Hasan M., Okuyama H., Sato Y., Ueda T. Stress-strain model of concrete damaged by freezing and thawing cycles // *Journal of advanced concrete technology*. 2004. Vol. 2 No. 1. P. 89–99. <https://doi.org/10.3151/jact.2.89>.
17. Li W., Sun W., Jiang J. Damage of concrete experiencing flexural fatigue load and closed freeze/thaw cycles simultaneously // *Construction and building materials*. 2011. Vol. 25 No. 5. P. 2604–2610. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2010.12.007>.
18. Cicekli U., Voyiadjis G. Z., Abu Al-Rub R. K. A Plasticity and Anisotropic Damage Model for Plain Concrete // *International Journal of Plasticity*. 2007. Vol. 23 No. 10-11. P. 1874–1900. <https://doi.org/10.1016/J.IJPLAS.2007.03.006>.
19. Михайлов К.В. Новое о прочности железобетона. М.: Стройиздат, 1977. 272 с.
20. Гвоздев А.А. Новое в проектировании бетонных и железобетонных конструкций. М., 1978. 202 с.
21. Litvan G.G. Frost Action in Cement Paste // *Materials and Structures*. 1973. Vol. 6. No. 4. P. 293–298.
22. Setzer M.J. Micro-ice-lens formation in porous solid // *Journal of colloid and interface science*. 2001. Vol. 243. No. 1. P. 193–201. <https://doi.org/10.1006/jcis.2001.7828>.
23. Scherer G W. Crystallization in Pores // *Cement and concrete research*. 1999. Vol. 29. No. 8. P. 1347–1358. [https://doi.org/10.1016/S0008-8846\(99\)00002-2](https://doi.org/10.1016/S0008-8846(99)00002-2).

24. Fagerlund G. The critical degree of saturation method of assessing the freeze/thaw resistance of concrete // *Materials and structures*. 1977. Vol. 10. No. 4. P. 217–229.

25. Fagerlund G. The International Cooperative Test of the Critical Degree of Saturation Method of Assessing the Freeze/Thaw Resistance of Concrete // *Materials and Structures*. 1977. Vol. 10. No. 4. P. 231–253.

26. Philleo R.E. Freezing and thawing resistance of high-strength concrete // NCHRP Synthesis of Highway Practice; Transportation Research Board. Washington: National Research Council, 1986. 31 p.

27. Shang H., Song Y., Ou J. Behavior of air-entrained concrete after freeze-thaw cycles // *Acta mechanica solida sinica*. 2009. Vol. 22. P. 261–266. [https://doi.org/10.1016/S0894-9166\(09\)60273-1](https://doi.org/10.1016/S0894-9166(09)60273-1).

28. Van de Veen V. Properties of concrete at very low temperatures: A surveys of the literature. Delft: Delft University of Technology, 1987. 123 p.

29. Powerst T.C. A Working hypothesis for further studies of frost resistance of concrete // *Journal of ACI*. 1945. Vol. 16. No. 4. P. 245–272. <https://doi.org/10.14359/8684>.

30. Powers T.C, Helmuth R.A. Theory of volume change in hardened portland cement pastes during freezing // *Proceedings of the Highway Research Board*. 1953. Vol. 32. P. 285–297.

REFERENCES

1. Li W.T., Sun W., Jiang J.Y. Damage of Concrete Experiencing Flexural Fatigue Load and Closed Freeze/thaw Cycles Simultaneously. *Concrete and Building Materials*. 2011;25(5):2604-2610. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2010.12.007>.

2. Soroushian P., Elzafraney M. Damage Effects on Concrete Performance and Microstructure. *Cement and Concrete Composites*. 2004;26(7):853-859. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2003.05.001>.

3. Shang H.S., Song Y.P. Experimental study of strength and deformation of plain concrete under biaxial compression after freezing and thawing cycles. *Cement and concrete research*. 2006;36:1857-1864. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2006.05.018>.

4. Karpenko N.I. General models of reinforced concrete mechanics. Moscow: Stroyizdat; 1996. 416 p. (In Russ.).

5. Aktuganov I.Z., Pushkin A.A. Experimental verification of the principle of linearity of summation of concrete damages under the action of non-stationary alternating cycles. In: *Questions of reliability of reinforced concrete structures*. Kuibyshev, 1982. p. 5–8 (In Russ.).

6. Vazhenin V.V. On the issue of frost resistance of concrete and reinforced concrete. In: *Questions of reliability of reinforced concrete structures*. Chelyabinsk, 1966. p.197-199. (In Russ.).

7. Gladkov V.S. On the destruction of hydraulic concrete during repeated freezing and thawing in a non-stationary mode. *Trudy koordinatsionnykh soveshchaniy po gidrotekhnike*. 1972; 73:133-142. (In Russ.).

8. Pinus B.I., Pinus Zh.N., Khomyakova I.V. Change in concrete structural properties under cooling and freezing. *Vestnik Irkutskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta = Proceedings of Irkutsk state technical university*. 2015; 2:111-116. (In Russ.). EDN: TKOKYR.

9. Pinus B.I. Consideration of cumulative effects un concrete structures at low temperatures impact. In: *Investment, Construction, Real Estate: New Technologies and Special-Purpose Development Priorities: International Scientific Conference. MATEC Web of Conferences*. 2018;212:01025. <https://doi.org/10.1051/mateconf/201821201025>.

10. Trofimov B.Ya., Pogorelov S.N. Investigation of concrete deformation during cyclic freezing. In: *The efficiency of building materials under the influence of various operational factors*. Kazan; 1986. p. 79-82. (In Russ.).

11. Penttala V., Al-Neshawy F. Stress and Strain State of Concrete During Freezing and Thawing Cycles. *Cement and concrete research*. 2002;32:1407-1420. [https://doi.org/10.1016/S0008-8846\(02\)00785-8](https://doi.org/10.1016/S0008-8846(02)00785-8).

12. Minhoto M.J.C., Pais J.C., Fontes L.P.T.L. Evaluation of Fatigue Performance at Different Temperatures. In: *2nd Workshop on Four Point Bending*. Pais (ed.). University of Minho; 2009. p. 217–230.

13. Pinus B.I., Pinus Z.N. Probabilistic analysis of the strength and reliability of reinforced concrete structures under low-temperature impact. In: *Investment, construction, real estate: new technologies and special-purpose development priorities: International scientific conference (ICRE-2018)*. MATEC Web of conferences. 26-27 April 2018, Irkutsk. 2018. Vol. 212. p. 01026. <https://doi.org/10.1051/mateconf/201821201026>. EDN: WTWZMC.

14. Ueda T., Hasan M., Nagai K., Sato Ya., Wang L. Mesoscale Simulation of Influence of Frost Damage on Mechanical Properties of Concrete. *Journal of Materials in Civil Engineering*. 2009;21(6):244-252. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0899-1561\(2009\)21:6\(244\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0899-1561(2009)21:6(244)).

15. Fagerlund G. Mechanical damage and fatigue effects associated with freeze-thaw of materials. In: Setzer M.J., Auberg R., Keck H.-J. (Eds.). *International RILEM Workshop on Frost Resistance of Concrete*. 2002. p. 117-132.

16. Hasan M., Okuyama H., Sato Y. et al. Stress-Strain Model of Concrete Damaged by Freezing and Thawing Cycles. *Journal of Advanced Concrete Technology*. 2004;2(1):89-99.

<https://doi.org/10.3151/jact.2.89>.

17. Li W., Sun W., Jiang J. Damage of concrete experiencing flexural fatigue load and closed freeze/thaw cycles simultaneously. *Construction and Building Materials*. 2011;25(5):2604-2610. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2010.12.007>.

18. Cicekli U., Voyiadjis G. Z., Abu Al-Rub R. A plasticity and anisotropic damage model for plain concrete. *International Journal of Plasticity*. 2007;23(10-11):1874-1900. <https://doi.org/10.1016/J.IJPLAS.2007.03.006>.

19. Mikhailov K.V. New about the strength of reinforced concrete. Moscow: Stroizdat; 1977. 272 p. (In Russ.).

20. Gvozdev A.A. New in the design of concrete and reinforced concrete structures. Moscow; 1978. 202 p. (In Russ.).

21. Litvan G.G. Frost Action in Cement Paste. *Materials and Structures*. 1973;6(4):293-298.

22. Setzer M.J. Micro-ice-lens formation in porous solid. *Journal of colloid and interface science*. 2001;243(1):193-201. <https://doi.org/10.1006/jcis.2001.7828>.

23. Scherer G.W. Crystallization in Pores. *Cement and concrete research*. 1999;29(8):1347-1358. [https://doi.org/10.1016/s0008-8846\(99\)00002-2](https://doi.org/10.1016/s0008-8846(99)00002-2).

24. Fagerlund G. The critical degree of saturation method of assessing the freeze/thaw resistance of concrete. *Materials and structures*. 1977;10(4):217-229.

25. Fagerlund G. The international cooperative test of the critical degree of saturation method of assessing the freeze/thaw resistance of concrete. *Materials and structures*. 1977;10(4):231-253.

26. Philleo R.E. Freezing and thawing resistance of high-strength concrete. In: NCHRP Synthesis of Highway Practice; Transportation Research Board. Washington: National Research Council; 1986. 31 p.

27. Shang H., Song Y., Ou J. Behavior of air-entrained concrete after freeze-thaw cycles. *Acta mechanica solida sinica*. 2009;22:261-266. [https://doi.org/10.1016/S0894-9166\(09\)60273-1](https://doi.org/10.1016/S0894-9166(09)60273-1).

28. Van de Veen V. Properties of concrete at very low temperatures: A surveys of the literature. Delft: Delft University of Technology; 1987. 123 p.

29. Powerst T.C. A Working hypothesis for further studies of frost resistance of concrete. *Journal of ACI*. 1945;16(4):245-272. <https://doi.org/10.14359/8684>.

30. Powers T.C, Helmuth R.A. Theory of volume change in hardened portland cement pastes during freezing. *Proceedings of the Highway Research Board*. 1953;32:285-297.

Информация об авторе

Пинус Борис Израилевич,

д.т.н., профессор, профессор
кафедры строительного производства,
Иркутский национальный исследовательский
технический университет,
664074, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 83, Россия,
e-mail: pinus@istu.edu
<https://orcid.org/0000-0002-3067-9478>

Information about the author

Boris I. Pinus,

Dr. Sci. (Eng.), Professor, Professor
of the Department of Building Production,
Irkutsk National Research
Technical University,
83 Lermontov St., Irkutsk 664074, Russia,
e-mail: chupinvr@istu.edu
<https://orcid.org/0000-0002-3067-9478>

Вклад автора

Автор провел исследование, подготовил рукопись к печати и несет ответственность за плагиат.

Contribution of the author

Autor has conducted the study, prepared the manuscript for publication and bears the responsibility for plagiarism.

Конфликт интересов

Автор заявляет об отсутствии конфликта интересов.

Conflict of interests

The author declare no conflict of interests regarding the publication of this article.

Автор прочитал и одобрил окончательный вариант рукописи.

The final manuscript has been read and approved by the author.

Информация о статье

Статья поступила в редакцию 22.02.2023.
Одобрена после рецензирования 21.03.2023.
Принята к публикации 23.03.2023.

Information about the article

The article was submitted 22.02.2023.
Approved after reviewing 21.03.2023.
Accepted for publication 23.03.2023.