



Прогнозирование жизненного цикла железобетонных конструкций в суровых климатических условиях

Б.И. Пинус^{1✉}

¹Иркутский национальный исследовательский технический университет, г. Иркутск, Россия

Аннотация. Рассматривается вопрос проектного прогнозирования в рамках методологии предельных состояний жизненного цикла железобетонных конструкций, эксплуатируемых в суровых климатических условиях. Предлагается в качестве критериального показателя функциональной пригодности конструкций принять индекс надежности β , условно регламентированного нормами для расчетных предельных состояний. Кинетика индекса надежности β в процессе циклического замораживания и оттаивания оценивается посредством многофакторного периодического экспериментального контроля показателей прочности и деформативности в замороженном и оттаявшем состояниях. Испытания велись на призматических (100×100×400 мм) и кубических (100 мм) образцах зрелого бетона (180 суток) класса В25, марки по морозостойкости F270. При этом параметрический отказ элемента отождествляется с моментом достижения критериальным параметром порогового значения. Его выбор и величина устанавливается (с требуемой обеспеченностью!) по нормативным функциональным моделям предельного состояния, преобразованным к виду, характеризующему зависимость параметра сопротивления бетона от величины расчетного усилия и параметров сечения. Периодичность испытаний принята с учетом специфики морозной деструкции бетонов как многостадийного процесса структурной приспособляемости, образования и накопления микротрещин. Статистические аспекты параметров сопротивления определялись по опытными данным с использованием метода максимума правдоподобия и критерия Пирсона (χ^2) в оценке их согласованности теоретическим распределением. Рассматриваются дополнительные переходные расчетные ситуации, учитывающие термо-влажностное состояние конструкций, и приводятся статистически представительные экспериментальные данные, подтверждающие приемлемость предлагаемого подхода.

Ключевые слова: железобетонные конструкции, жизненный цикл, индекс надежности, температурно-влажностные воздействия, морозостойкость

Для цитирования: Пинус Б.И. Прогнозирование жизненного цикла железобетонных конструкций в суровых климатических условиях // *Известия вузов. Инвестиции. Строительство. Недвижимость*. 2024. Т. 14. № 2. С. 340–347. <https://doi.org/10.21285/2227-2917-2024-2-340-347>. EDN: VDFRJV.

Original article

Forecasting the life cycle of reinforced concrete structures in severe climatic conditions

Boris I. Pinus^{1✉}

¹Irkutsk National Research Technical University, Irkutsk, Russia

Abstract. The article considers the problem of design forecasting of the life cycle of reinforced concrete structures operated in severe climatic conditions using the methodology of limit states. The authors propose to use the reliability index β , conditionally regulated by the norms for design limit states, as a criterion index of the functional suitability of structures. The kinetics of the reliability index β during cyclic freezing and thawing is evaluated by means of multifactor periodic experimental control of strength and deformability indices in frozen and thawed states. Testing was conducted using prismatic (100×100×400 mm)

and cubic (100 mm) specimens of the B25 mature concrete (180 days), F270 frost resistance grade. In this case, the parametric failure of an element was identified by the moment when the criterion parameter reached the threshold value. The threshold is established (with the required level of reliability) by normative functional models of the limit state, transformed to a form describing the dependence of the concrete resistance parameter on the value of the estimated force and section parameters. Test intervals were determined considering the specificity of concrete frost degradation as a multistage process of structural adaptability, as well as microcrack formation and accumulation. Statistical aspects of resistance parameters were identified from experimental data using the maximum likelihood method and Pearson's criterion (χ^2) in assessing their consistency with the theoretical distribution. Additional transient design situations that consider the thermal-moisture state of the structures are considered. The presented experimental data confirmed the feasibility of the proposed approach.

Keywords: reinforced concrete structures, life cycle, reliability index, temperature and humidity effects, frost resistance

For citation: Pinus B.I. Forecasting the life cycle of reinforced concrete structures in severe climatic conditions. *Izvestiya vuzov. Investitsii. Stroitel'stvo. Nedvizhimost = Proceedings of Universities. Investment. Construction. Real estate*. 2024;14(2): 340–347. (In Russ.) <https://doi.org/10.21285/2227-2917-2024-2-340-347>. EDN: VDFRJV.

ВВЕДЕНИЕ

Эксплуатация железобетонных конструкций в суровых климатических условиях сопровождается случайными суточными колебаниями температур в диапазоне отрицательных и знакопеременных значений.

Иницируемый при этом отклик конструкций характеризуется нестационарными теплообменными процессами [1–5]¹, фазовыми переходами [6–8], и, как следствие [7–15] с сопутствующими изменениями внутреннего сопротивления.

Проектное прогнозирование возникающих последствий в рамках методологии нормативного подхода возможно посредством рассмотрения двух переходных расчетных ситуаций – сопротивления конструкций в криогенном и оттаявшем состояниях.

Предлагаемые для их анализа мгновенные динамические модели представляют собой преобразованные уравнения функциональной пригодности к форме, представляющей зависимость чувствительного к T-W воздействиям используемого показателя сопротивления бетона от проектного усилия, размеров сечения и планируемого армирования (СП 63.13330). При этом отказ конструкций по рассматриваемому предельному состоянию прогнозируется его достижением критериального значения, определяемого нормативным уровнем обеспеченности – индексом надежности β [16–19].

Экспериментально-аналитическое обоснование необходимости подобного подхода составляет целевую задачу исследования и

предполагает априорную приемлемость следующих предпосылок:

– взаимонезависимость климатического воздействия и отклика железобетонных конструкций [6–9];

– прогноз надежности конструкций ведется на проектный срок эксплуатации, соответствующий времени исчерпания ресурса морозостойкости бетона («F»);

– проектная обеспеченность эксплуатационной пригодности конструкций не ниже 99,73 % и 95 %, соответственно по условиям прочности и деформациям [17–21].

МЕТОДЫ

Внешнее воздействие моделируется стационарными циклами замораживания и оттаивания. Кинетика индекса надежности β в процессе циклического замораживания и оттаивания (ЦЗО) оценивается посредством многофакторного периодического экспериментального контроля показателей прочности и деформативности в замороженном и оттаявшем состояниях. Испытания велись на призматических (100×100×400 мм) и кубических (100 мм) образцах зрелого бетона (180 суток) класса B25, марки по морозостойкости F270. Суточный цикл T-W воздействий состоял из постепенного (4 ч) охлаждения до минус 42 °С, 4-х часовой изотермии с последующим оттаиванием в воде (18 ± 2 °С). По истечении планового количества циклов этапа проводились испытания кубиков на раскалывание (6–12 штук) и призм на осевое сжатие (12–18 штук) в режиме постоянства скорости деформирования

¹Пинус Б.И. Обеспечение долговечности функционирования железобетонных конструкций при низкотемпературных воздействиях.: дис. на соиск. уч. степ. докт. техн. наук: 05.23.17. Иркутск, 1986. 495 с.

0,05 мм/мин. При этом время испытания и используемая термоизоляция позволяли исключить влияние изменения температуры замороженных образцов. В автоматическом режиме осуществлялась запись диаграмм сопротивления вплоть до момента полного разрушения бетона. Периодичность испытаний принята с учетом специфики морозной деструкции бетонов как многостадийного процесса структурной приспособляемости, образования и накопления микротрещин [6, 7, 10].

Статистические аспекты параметров сопротивления определялись по опытным данным с использованием метода максимума правдоподобия [20, 21] и критерия Пирсона (χ^2) в оценке их согласованности теоретическим распределением.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Целенаправленный систематизированный анализ опытных данных подтверждает установленное ранее [5, 12] разнонаправленное изменение при ЦЗО плотности и характера распределения всех нормируемых показателей сопротивления бетона в обоих расчетных состояниях. Нормальное распределение

сохраняется при T-W воздействиях, не превышающих 70–80 % нормативного потенциала морозостойкости.

В дальнейшем опытные данные лучше аппроксимируются асимметричными распределениями различной направленности и амплитуды. Но ввиду ограниченности целевых задач исследования статистики параметров качества бетона определены в предположении их нормального распределения.

Такой подход приемлем [12, 23–27], и позволяет рассматривать его результаты в качестве приближенной (первичной) оценки исследуемых закономерностей.

Цикловая изменчивость всех контролируемых показателей сопротивления (табл. 1, 2, рисунок) имеет экстремальный вид, что связано с неоднозначностью инициированных последствий. На начальных этапах воздействий ($N \leq (0,3-0,4)F$) преобладают конструктивные эффекты структурной трансформации, характеризующиеся возрастанием определяющих факторов функциональной надежности – величины и плотности распределения всех параметров прочности и деформативности.

Таблица 1. Статистики распределения параметров сопротивления в замороженном состоянии
Table 1. Statistics of the distribution of resistance parameters in the frozen state

Цикл	Прочность при сжатии, МПа			Предельные деформации, ‰			Модуль упругости, ГПа			Прочность при раскалывании, МПа		
	R_{bm}	$C_{V, \%}$	β_R	ϵ_{bm}	$C_{V, \%}$	β_ϵ	E_{bm}	$C_{V, \%}$	β_E	R_{tm}	$C_{V, \%}$	β_t
0	24	12,5	7,9	1,7	19,6	5,1	3,0	16,1	6,2	3,5	20,3	4,9
4	33,4	11,1	9,0	2,1	18,3	5,5	2,9	14,3	7,0	3,9	19,7	5,1
30	22,4	15,2	6,6	1,7	22,0	4,5	2,4	19,7	5,1	2,3	20,8	4,8
45	21,0	20,8	4,8	2,5	25,9	3,8	1,6	26,3	3,8	1,2	31,5	2,9

Таблица 2. Статистики распределения параметров сопротивления в оттаявшем состоянии
Table 2. Statistics of the distribution of resistance parameters in the thawed state

Цикл	Прочность при сжатии, МПа			Предельные деформации, ‰			Модуль упругости, ГПа			Прочность при раскалывании, МПа		
	R_{bm}	$C_{V, \%}$	β_R	ϵ_{bm}	$C_{V, \%}$	β_ϵ	E_{bm}	$C_{V, \%}$	β_E	R_{tm}	$C_{V, \%}$	β_t
10	24,5	14,2	7,0	1,9	18,4	5,4	2,9	15,2	6,6	3,2	18,8	5,3
31	20,2	27,1	3,7	2,6	23,6	4,2	2,2	24,9	4,0	2,0	24,8	4,0
45	19,1	29,4	3,4	6,5	31,9	3,1	1,4	34,8	2,9	1,1	36,6	2,7

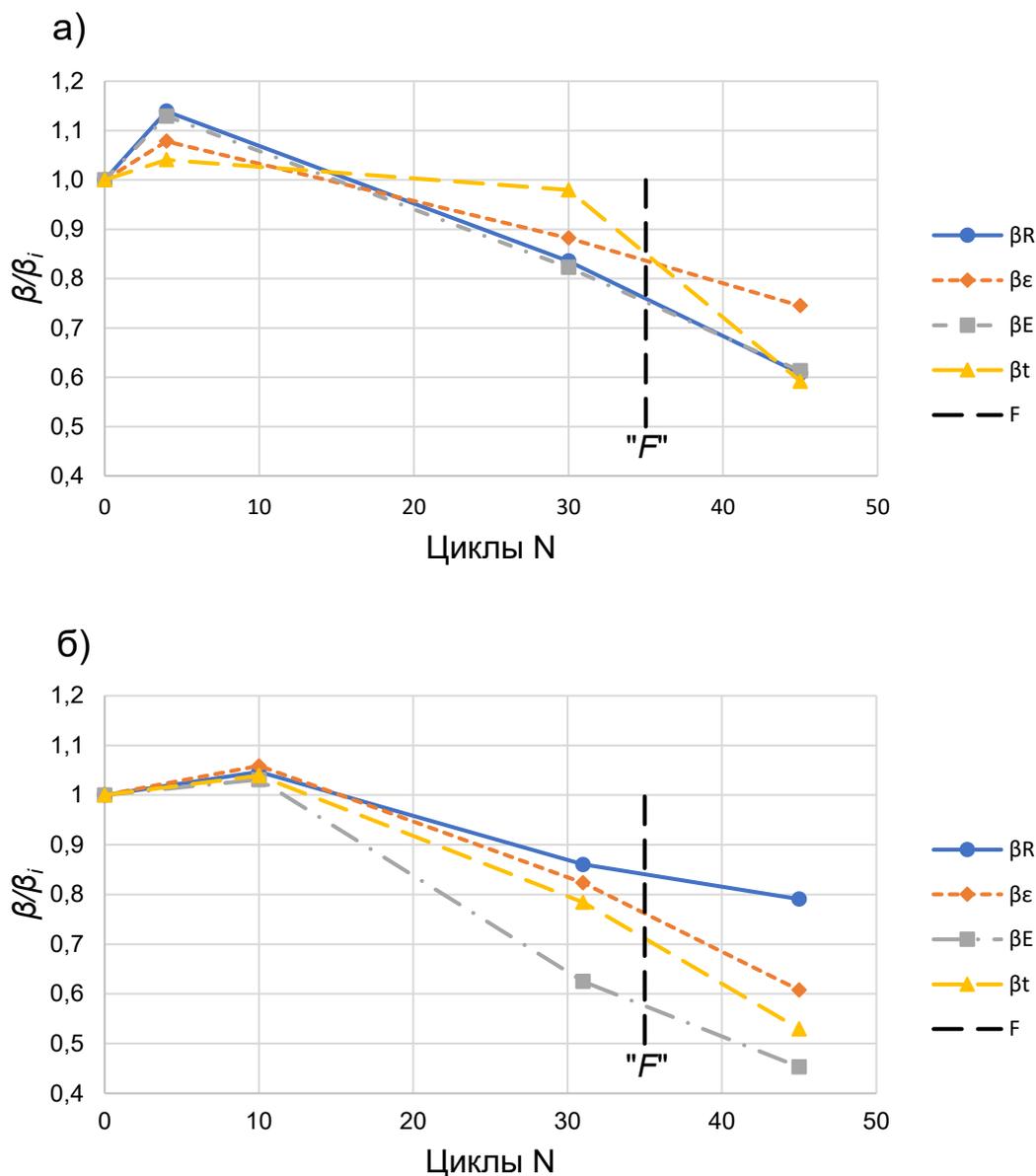
С физических позиций это объяснимо [7, 10, 15, 28–30] частичной разрядкой внутреннего напряженного состояния из-за образования локальных микротрещин, развития сдвиговых деформаций и сопутствующим повышением плотности и однородности.

Не исключается и дополнительная гидратация бетона во время водного оттаивания образцов [3–7, 14, 31].

Преходящий характер конструктивных явлений подтверждается последующим

неуклонным снижением всех индексов надежности β , определенных в форме индивидуализированных критериев функциональной пригодности конструкций (рисунок).

Их динамика различна, возрастает при оттаивании и свидетельствует как о более вероятном первоначальном преодолении порога деформационной надежности. Примечательно, что на принятой базе испытаний все значения индекса β находятся выше условного нормативного уровня.



Относительное изменение индекса надежности
а) в криогенном состоянии, б) в оттаявшем состоянии
Relative change in the reliability index
a) in a cryogenic state, b) in a thawed state

Это позволяет предполагать достаточность (соразмерность) нормативного учета низкотемпературных условий обеспечению функциональной надежности железобетонных конструкций в срок эксплуатации, соответствующий исчерпанию потенциала морозостойкости бетона.

ВЫВОДЫ

1. Проектное прогнозирование надежности железобетонных конструкций на расчетный срок эксплуатации в суровых климатических условиях возможно посредством рассмотр-

ения динамических моделей функциональной пригодности, учитывающих статистические закономерности изменения всех значимых показателей сопротивления в криогенном и оттаявшем состояниях.

2. Необходимый ресурс функциональной пригодности может обеспечиваться дифференцируемой коррекцией индекса надежности по наиболее чувствительному к температурно-влажностным воздействиям критериальным параметрам соответствующего расчетного предельного состояния.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Рогонский В.А., Костриц А.П., Шеряков В.Ф. Эксплуатационная надежность зданий. Л.: Стройиздат, 1983. 280 с.
2. Актуганов И.З. Методика оценки влияния климатических температурно-влажностных воздействий на долговечность бетона строительных конструкций // Известия вузов. Строительство и архитектура. 1983. № 4. С. 14–18.
3. Горчаков Г.И., Гузев Е.А., Сейланов Л.А. Криогенная деструкция железобетонных конструкций // Бетон и железобетон. 1985. № 1. С. 40–42.
4. Москвин В.М., Капкин Б.М., Мазур Б.М., Подвальный А.М. Стойкость бетона и железобетона при отрицательной температуре. М.: Стройиздат, 1967. 131 с.
5. Иванов Ф.М. Исследование морозостойкости бетона // Защита от коррозии строительных конструкций и повышение долговечности. М.: Стройиздат, 1969. С. 109–116.
6. Collins A.R. The destruction of Concrete by Frost // Journal of the Institute of Civil Engineering. 1944. Vol. 23. Iss. 1. P. 29–41. <https://doi.org/10.1680/ijoti.1944.14086>.
7. Москвин В.М., Капкин М.М., Савицкий А.Н., Ярмаковский В.Н. Бетон для строительства в суровых климатических условиях. Л.: Стройиздат, 1973. 172 с.
8. Актуганов И.З., Пушкин А.А. Экспериментальная проверка принципа линейность суммирования повреждений бетона при действии нестационарных знакопеременных циклов // Вопросы надежности железобетонных конструкций. Куйбышев: Куйбышевский инженерно-строительный институт им. А.И. Микояна, 1982. С. 5–8.
9. Важенин В.В. К вопросу о морозостойкости бетона и железобетона // Вопросы надежности железобетонных конструкций. Челябинск, 1966. С. 197–199.
10. Гладков В.С. О разрушении гидротехнического бетона при многократном замораживании и оттаивании в нестационарном режиме // Труды координационных совещаний по гидротехнике. Л.: Энергия, 1972. Вып. 73. С. 133–142.
11. Пинус Б.И., Пинус Ж.Н., Хомякова И.В. Изменение конструктивных свойств бетонов при охлаждении и замораживании // Вестник Иркутского государственного технического университета. 2015. № 2. С. 111–115. EDN: TKOKYR.
12. Юдин А.П., Ткаченко Т.А. Деформации и стойкость одноосносжатого бетона при периодических T-W воздействиях среды // Труды Ростовского инженерно-строительного института. Ростов- на-Дону, 1976. Вып. 15. С. 16–25.
13. Москвин В.М., Капкин Б.М., Мазур Б.М., Подвальный А.М. Стойкость бетона и железобетона при отрицательной температуре. М.: Стройиздат, 1967. 131 с.
14. Власов Г.М., Бокарев С.А. Учет изменения прочностных и деформативных характеристик бетона после попеременного замораживания и оттаивания // Известия вузов. Строительство и архитектура. 1984. № 11. С. 112–114.
15. Болотин В.В. Применение методов теории вероятности и теории надежности в расчетах надежности сооружений. М.: Стройиздат, 1971. 254 с.
16. Ржаницын А.Р. Теория расчета строительных конструкций на надежность. М.: Стройиздат, 1978. 239 с.
17. Зайцев Ю.В. Моделирование деформаций и прочности бетона методами механики разрушений. М.: Стройиздат, 1982. 196 с.
18. Карпенко Н.И. Общие модели механики железобетона. М.: Стройиздат, 1996. 412 с.
19. Кубарев А.И., Аршакуни В.Л., Аронов И.З. Надежность в технике. Методы оценки параметрической надежности по функции измерения одного показателя. М.: Издательство стандартов, 1979. 52 с.
20. Ллойд Д.К., Липов М.П. Надежность. Организация. Исследование. Методы. Математический аппарат. М.: Советское радио, 1964. 686 с.
21. Батяновский Э.И., Гуриненко Н.С., Корсун А.М. Структура, непроницаемость и долговечность цементного бетона // Наука и техника. 2022. Т. 21. № 1. С. 19–27. <https://doi.org/10.21122/2227-1031-2022-21-1-19-27>. EDN: WLFAP.
22. Малюк В.В. Концепция долговечности бетона для прогноза срока службы конструкций в условиях морозного воздействия // Вестник Инженерной школы Дальневосточного федерального университета. 2020. № 4 (45). С. 105–115. <https://doi.org/10.24866/2227-6858/2020-4-11>. EDN: WEOVQW.
23. Пинус Б.И., Корнеева И.Г., Калашников М.П. Статистические закономерности изменения параметров внутреннего сопротивления цементных композитов при замораживании и оттаивании // Известия вузов. Инвестиции. Строительство. Недвижимость. 2022. Т. 12. № 2. С. 206–213. <https://doi.org/10.21285/2227-2917-2022-2-206-213>. EDN: HDMYUU.

24. Корсаков Н.В., Корсакова Т.И. Анализ долговечности сталефибробетонных конструкций в условиях знакопеременных температур // Международный журнал гуманитарных и естественных наук. 2023. № 6-3 (81). С. 122–126. <https://doi.org/10.24412/2500-1000-2023-6-3-122-126>. EDN: IWWKWE.
25. Парфенов А.А., Сивакова О.А., Гусарь О.А., Балакирева В.В. Работа и разрушение бетона в условиях высокой и низкой температуры // Строительные материалы. 2019. № 3. С. 64–67. <https://doi.org/10.31659/0585-430X-2019-768-3-64-66>. EDN: ZIKFHV.
26. Непомящий А.Н., Выровой В.Н., Суханов В.Г. Влияние условий замораживания на морозостойкость строительных композитов // Эксперт: теория и практика. 2020. № 4 (7). С. 41–46. <https://doi.org/10.24411/2686-7818-2020-10034>. EDN: MLXYLM.
27. Осипов С.Н., Чик В.М. О стохастическом подходе к оценке долговечности железобетонных строительных элементов и конструкций при карбонизации бетона // Наука и техника. 2020. Т. 19. № 3. С. 241–251. <https://doi.org/10.21122/2227-1031-2020-19-3-241-251>. EDN: FIANOM.
28. Леонович С.Н., Шалый Е.Е., Литвиновский Д.А., Степанова А.В. Долговечность бетона при комбинированном воздействии окружающей среды и механической нагрузки: анализ экспериментальных исследований // Наука и техника. 2022. Т. 21. № 4. С. 269–280. <https://doi.org/10.21122/2227-1031-2022-21-4-269-280>. EDN: LRLHXF.
29. Чернышов Е.М., Федосов С.В., Румянцева В.Е. Развитие методов прогнозирования долговечности строительных конструкций на основе разработки теории и моделей коррозии бетонов с учетом явлений тепломассопереноса и формирования градиентных состояний // Academia. Архитектура и строительство. 2023. № 1. С. 89–100. <https://doi.org/10.22337/2077-9038-2023-1-89-100>. EDN: LUOBRF.
30. Селяев В.П., Селяев П.В., Кечуткина Е.Л., Бабушкина Д.Р., Грязнов С.И. Моделирование работы железобетонных конструкций с учетом совместного действия механических нагрузок и агрессивных сред // Эксперт: теория и практика. 2021. № 1 (10). С. 19–24. https://doi.org/10.51608/26867818_2021_1_19. EDN: QSBQUA.
31. Плюснин М.Г., Цыбакин С.В. Экспериментальное исследование изменчивости деформационных характеристик бетона при сжатии // Вестник МГСУ. 2020. Т. 15. № 10. С. 1390–1398. <https://doi.org/10.22227/1997-0935.2020.10.1390-1398>. EDN: TZXXMA.

REFERENCES

1. Rogonskii V.A., Kostrits A.P., Sheryakov V.F. *Operational Reliability of Buildings*. Leningrad: Stroyizdat, 1983. 280 p. (In Russ.).
2. Aktuganov I.Z. Methodology for Assessing the Influence of Climatic Temperature and Humidity Influences On the Durability of Concrete Building Structures. *Izvestiya vuzov. Stroitel'stvo i arkhitektura = News from Universities. Construction and Architecture*. 1983;4:14-18. (In Russ.).
3. Gorchakov G.I., Guzeev E.A., Seilanov L.A. Cryogenic Destruction of Reinforced Concrete Structures. *Beton i zhelezobeton = Concrete and Reinforced Concrete*. 1985;1:40-42. (In Russ.).
4. Moskvina V.M., Kapkin B.M., Mazur B.M., Podval'nyi A.M. *Resistance of Concrete and Reinforced Concrete at Negative Temperatures*. Moscow: Stroyizdat, 1967. 131 p. (In Russ.).
5. Ivanov F.M. *Study of Frost Resistance of Concrete*. Corrosion Protection of Building Structures and Increased Durability. Moscow: Stroyizdat, 1969. P. 109-116. (In Russ.).
6. Collins A.R. The destruction of Concrete by Frost. *Journal of the Institute of Civil Engineering*. 1944. Vol. 23. Iss. 1. P. 29–41. <https://doi.org/10.1680/ijoti.1944.14086>.
7. Moskvina V.M., Kapkin M.M., Savitskii A.N., Yarmakovskii V.N. *Concrete for Construction in Harsh Climatic Conditions*. Leningrad: Stroyizdat, 1973. 172 p. (In Russ.).
8. Aktuganov I.Z., Pushkin A.A. *Experimental Verification of the Principle of Linear Summation of Concrete Damage Under the Action of Non-Stationary Alternating Cycles*. Questions of Reliability of Reinforced Concrete Structures. Kuibyshev: Kuibyshev Civil Engineering Institute named after. A.I. Mikoyan, 1982. P. 5-8. (In Russ.).
9. Vazhenin V.V. On The Issue of Frost Resistance of Concrete and Reinforced Concrete. Questions of Reliability of Reinforced Concrete Structures. Chelyabinsk, 1966. p.197-199. (In Russ.).
10. Gladkov V.S. *On The Destruction of Hydraulic Concrete During Repeated Freezing and Thawing in A Non-Stationary Mode*. Proceedings of Coordination Meetings on Hydraulic Engineering. Leningrad: Enegria, 1972. Vol. 73. P. 133-142. (In Russ.).
11. Pinus B.I., Pinus Zh.N., Khomyakova I.V. Change in Concrete Structural Properties Under Cooling and Freezing. *Vestnik Irkutskogo gosudarstvennogo tehnikeskogo universiteta = Proceedings of Irkutsk State Technical University*. 2015;2:111-115. (In Russ.). EDN: TKOKYR.
12. Yudin A.P., Tkachenko T.A. *Deformations and Resistance of Uniaxial Compressed Concrete Under Periodic T-W Environmental Influences*. Proceedings of The Rostov Civil Engineering Institute. Rostov-on-Don, 1976. Vol. 15. P. 16-25. (In Russ.).

13. Moskvina V.M., Kapkin B.M., Mazur B.M., Podval'nyi A.M. *Resistance of Concrete and Reinforced Concrete at Negative Temperatures*. Moscow: Stroyizdat, 1967. 131 p. (In Russ.).
14. Vlasov G.M., Bokarev S.A. Accounting for Changes in The Strength and Deformation Characteristics of Concrete After Alternating Freezing and Thawing. *Izvestiya vuzov. Stroitel'stvo i arkhitektura = News from Universities. Construction and Architecture*. 1984;11:112-114. (In Russ.).
15. Bolotin V.V. *Application of Methods of Probability Theory and Reliability Theory in Calculations of the Reliability of Structures*. Moscow: Stroyizdat, 1971. 254 p. (In Russ.).
16. Rzhantsyn A.R. *Theory of Calculation of Building Structures for Reliability*. Moscow: Stroyizdat, 1978. 239 p. (In Russ.).
17. Zaitsev Yu.V. *Modeling of Concrete Deformations and Strength Using Fracture Mechanics Methods*. Moscow: Stroyizdat, 1982. 196 p. (In Russ.).
18. Karpenko N.I. *General Models of Reinforced Concrete Mechanics*. Moscow: Stroyizdat, 1996. 412 p. (In Russ.).
19. Kubarev A.I., Arshakuni V.L., Aronov I.Z. *Reliability in Technology. Methods for Assessing Parametric Reliability Based On the Function of Measuring One Indicator*. Moscow: Standards Publishing House, 1979. 52 p. (In Russ.).
20. Lloid D.K., Lipov M.P. *Reliability. Organization. Study. Methods. Mathematical Apparatus*. Moscow: Soviet Radio, 1964. 686 p. (In Russ.).
21. Batyanovskiy E.I., Gurinenko N.S., Korsun A.M. Structure, Impermeability and Durability of Cement Concrete. *Nauka i tekhnika = Science and Technique*. 2022;21(1):19-27. (In Russ.). <https://doi.org/10.21122/2227-1031-2022-21-1-19-27>. EDN: WLFFAP.
22. Malyuk V. V. Concrete Durability Concept for Predicting the Service Life of Structures Under Frost Conditions Influences. *Vestnik Inzhenernoi shkoly DVFU = FEFU: School of Engineering Bulletin*. 2020;4(45):105-115. (In Russ.). <https://doi.org/10.24866/2227-6858/2020-4-11>. EDN: WEOVQW.
23. Pinus B.I., Korneeva I.G., Kalashnikov M.P. Statistical Patterns of Changes in Internal Resistance Parameters of Cement Composites During Freezing and Thawing. *Izvestiya vuzov. Investitsii. Stroitel'stvo. Nedvizhimost' = Proceedings of Universities. Investment. Construction. Real estate*. 2022;12(2):206-213. (In Russ.). <https://doi.org/10.21285/2227-2917-2022-2-206-213>. EDN: HDMYUU.
24. Korsakov N.V., Korsakova T.I. Analysis of Durability of Steel-Fiber Concrete Structures Under Conditions of Sign-Variable Temperatures. *Mezhdunarodnyi zhurnal gumanitarnykh i estestvennykh nauk = International Journal of Humanities and Natural Sciences*. 2023;6-3(81):122-126. (In Russ.). <https://doi.org/10.24412/2500-1000-2023-6-3-122-126>. EDN: IWWKWE.
25. Parfenov A.A., Sivakova O.A., Gusar' O.A., Balakireva V.V. Operation and Destruction of Concrete at High and Low Temperatures. *Stroitel'nye Materialy = Construction Materials*. 2019;3:64-67. (In Russ.). <https://doi.org/10.31659/0585-430X-2019-768-3-64-66>. EDN: ZIKFHV.
26. Nepomyashchy A.N., Vyrovoy V.N., Sukhanov V.G. Freezing Conditions Impact On the Freezing Resistance of Construction Composites. *Ekspert: teoriya i praktika = Expert: Theory and Practice*. 2020;4(7):41-46. (In Russ.). <https://doi.org/10.24411/2686-7818-2020-10034>. EDN: MLXYLM.
27. Osipov S.N., Chik V.M. On Stochastic Approach to Evaluation of Service Life for Reinforced Concrete Constructional Elements and Structures During Concrete Carbonization. *Nauka i tekhnika = Science and Technique*. 2020;19(3):241-251. (In Russ.). <https://doi.org/10.21122/2227-1031-2020-19-3-241-251>. EDN: FIANOM.
28. Leonovich S.N., Shalyi E.E., Litvinovskiy D.A., Stepanova A.V. Durability of Concrete Under Combined Impact Environment and Mechanical Load: Analysis of Experimental Studies. *Nauka i tekhnika = Science and Technique*. 2022;21(4):269-280. (In Russ.). <https://doi.org/10.21122/2227-1031-2022-21-4-269-280>. EDN: LRLHXF.
29. Chernyshov E.M., Fedosov S.V., Rumyantseva V.E. Development of Methods for Predicting the Durability of Building Structures Based On the Development of the Theory and Models of Concrete Corrosion Taking into Account the Phenomena of Heat and Mass Transfer and The Formation of Gradient States. *Academia. Arkhitektura i stroitel'stvo = Academia. Architecture and Construction*. 2023;1:89-100. (In Russ.). <https://doi.org/10.22337/2077-9038-2023-1-89-100>. EDN: LUOBRF.
30. Selyaev V.P., Selyaev P.V., Kechutkina E.L., Babushkina D.R., Gryaznov S.I. Modeling The Operation of Reinforced Concrete Structures Taking into Account the Combined Action of Mechanical Loads and Aggressive Media. *Ekspert: teoriya i praktika = Expert: Theory and Practice*. 2021;1(10):19-24. (In Russ.). https://doi.org/10.51608/26867818_2021_1_19. EDN: QSBQUA.
31. Plyusnin M.G., Tsybakin S.V. An Experimental Study On Variability of Deformation Characteristics of Concrete in Compression. *Vestnik MGSU = Monthly Journal on Construction and Architecture*. 2020;15(10):1390-1398. (In Russ.). <https://doi.org/10.22227/1997-0935.2020.10.1390-1398>. EDN: TZXXMA.

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>
Author ID: 52413

Вклад автора

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

Конфликт интересов

Автор заявляет об отсутствии конфликта
интересов.

Автор прочитал и одобрил окончательный
вариант рукописи.

Информация о статье

Статья поступила в редакцию 05.03.2024.
Одобрена после рецензирования 21.03.2024.
Принята к публикации 22.03.2024.

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: pinus@istu.edu
<https://orcid.org/0000-0002-3067-9478>
Author ID: 52413

Contribution of the author

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

Conflict interests

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

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

Information about the article

The article was submitted 05.03.2024.
Approved after reviewing 21.03.2024.
Accepted for publication 22.03.2024.