Научная статья
УДК 691-4
https://doi.org/10.21285/2227-2917-2022-2-206-213

Статистические закономерности изменения параметров внутреннего сопротивления цементных композитов при замораживании и оттаивании

© Борис Израилевич Пинус[1], Инна Геннадьевна Корнеева[1], Михаил Петрович Калашников[2]
[1]Иркутский национальный исследовательский технический университет, г. Иркутск, Россия
[2]Восточно-Сибирский государственный университет технологий и управления, г. Улан-Удэ, Россия
Автор, ответственный за переписку: Корнеева Инна Геннадьевна, kornee-inna@yandex.ru

Аннотация. Статья содержит результаты экспериментального фрагмента вероятностно-статистического подхода к проектному учету последствий, обусловленных нестационарными стохастическими изменениями температуры и влажности внешней среды. Низкотемпературные воздействия внешней среды смоделированы циклическими испытаниями на морозостойкость по регламенту третьего метода ГОСТ 1006-2012. Испытанию подвергнуты кубические и призматические (100 × 100 × 400 мм) образцы двух серий: «ОБ» – обычный бетон и «ФБ» – бетон с дисперсным объемным армированием (μ = 1,5 %) полипропиленовыми волокнами диаметром d_f = 0,8 мм и l_f = 40 мм. По истечении заданного количества циклов образцы были испытаны на осевое сжатие в режиме постоянства скорости деформирования $5 \cdot 10^{-3}$ 1/с. Анализируется кинетика при циклическом замораживании и оттаивании и взаимная корреляция значений статистики распределения прочности и деформативности обычных и фиброармированных бетонов с использованием полных диаграмм $\sigma_b - \varepsilon_b$ и дискретных моделей, соответствующих различным этапам деформационного отклика. Предлагается дифференцировать критериальные условия оценки последствий климатической деградации конструкций с учетом спецификации требований эксплуатационной пригодности сооружений.

Ключевые слова: морозостойкость, усталость, фибробетон, деформации

Для цитирования: 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.

Original article

Statistical patterns of changes in internal resistance parameters of cement composites during freezing and thawing

Boris I. Pinus[1], Inna G. Korneeva[1], Michail P. Kalashnikov[2]
[1]Irkutsk National Research Technical University, Irkutsk, Russia
[2]East Siberia state university of technology and management, Ulan-Ude, Russia
Corresponding author: Inna G. Korneeva, kornee-inna@yandex.ru

Abstract. The article presents the results of an experimental part of the probabilistic and statistical approach to the design accounting of consequences caused by non-stationary stochastic changes in the temperature and humidity of external environment. Cryogenic effects of the environment are modelled by cyclic freezing tests according to the third method of GOST 1006-2012. Two series of cubic and prismatic (100 × 100 × 400 mm) samples were tested, including standard concrete (SC) and fibrous concrete (FC, μ = 1.5%) reinforced by polypropilen fibres with d_f = 0.8 mm diameter and l_f = 40 mm length. Following the specified number of cycles, the samples were subject to axial compression under the constant deformation rate of $5 \cdot 10^{-3}$ 1/s. The kinetics of cyclic freezing and thawing is analysed. In addition, the cross-correlation between the statistics of the strength and deformability distribution in the standard and fibrous concretes was assessed using complete $\sigma_b - \varepsilon_b$ diagrams and discrete models corresponding to different stages of the deformation response. It is proposed to differentiate the criteria conditions for

assessing the consequences of climatic structural degradation taking into account the usability specification of structures.

Keywords: frost resistance, fatigue, fiber concrete, deformations

For citation: 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.

Введение

Эксплуатация железобетонных конструкций сооружений в суровых климатических условиях сопряжена с нестационарными стохастическими колебаниями температур и влажности.

Механизм инициируемых откликов в наиболее обобщенном виде характеризуется перепадами напряженно-деформированного состояния и структурной трансформацией, тождественной закономерностям малоцикловой усталости[1] [1–12].

Исследования цементно-содержащих фиброкомпозитов с учетом физических и статистических закономерностей усталостного изменения параметров внутреннего сопротивления при замораживании и оттаивании очень ограничены и противоречивы [13–15]. Их выводы имеют фрагментарный характер ввиду отсутствия регламентированной методики испытаний.

Поэтому целевая задача настоящего исследования состояла в сравнении потенциалов усталостного сопротивления обычных и полипропиленфиброармированных бетонов на базе морозных воздействий, соответствующих их нормативной морозостойкости.

Методы

Низкотемпературные воздействия внешней среды смоделированы циклическими испытаниями на морозостойкость по регламенту третьего (ускоренного) метода ГОСТ 1006-2012. Испытанию подвергнуты кубические и призматические (100 × 100 × 400 мм) образцы двух серий:

- «ОБ» – бетон состава Ц:П:Щ:В = = 1:1,42:3,57:0,55 с расходом цемента М400 380 кг/м^3;
- «ФБ» – бетон аналогичного состава с дисперсным объемным армированием (μ = 1,5 %) полипропиленовыми волокнами (ГОСТ 9550-81) диаметром d_f = 0,8 мм и l_f = 40 мм.

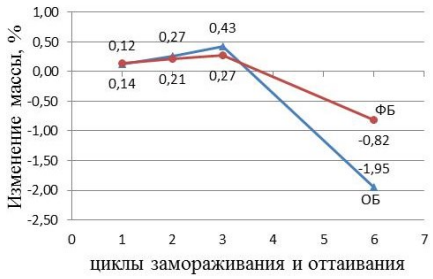
Цикл испытаний включал 7 часов понижения температуры до минус 35 °С, 4 часа изотермического выдерживания и последующее оттаивание в насыщенном 5 % растворе хлористого натрия.

Опытное число призм каждой серии составляло 18 штук. По результатам контрольных испытаний бетон основного состава соответствует марке по морозостойкости F200 (согласно параметрам доверительного интервала изменения прочности (табл. 1)).

По истечении указанного количества циклов образцы были испытаны на осевое сжатие в режиме постоянства скорости деформирования $5 \cdot 10^{-3}$ 1/с с использованием комплекса *Instron 5989*. В процессе нагружения осуществлялся автоматический контроль времени, всех деформаций на полной базе измерений с точностью $1 \cdot 10^{-5}$. Система креплений датчиков (экстензометров) и механизм нагружения *Instron* позволяли получать полную диаграмму $\sigma_b - \varepsilon_b$, включая начальные (ε_0) и постпиковые ($\varepsilon_{ult,0,8}$) деформации образцов. Используемая программа автоматизированного контроля соответствовала дискретно-структурной модели (рис. 1), которая адекватно отражает фактическую многостадийность деформационного отклика и ее трансформацию в усталостном процессе. При этом кинетика начальных деформаций ε_0 характеризует необратимые (остаточные) структурные изменения, ε_e – условно упругие, ε_{pl} – пластическую составляющую пиковых деформаций. Что касается псевдопластических деформаций ($\varepsilon_{pl,u}$), то их кинетика позволяет оценивать влияние усталостных последствий на способность к перераспределению внутренних усилий.

[1]Пинус Б. И. Обеспечение долговечности функционирования железобетонных конструкций при низкотемпературных воздействиях: дис. … д-ра техн. наук. М., 1987. 367 с.;
Надежность в технике. Методы оценки параметрической надежности по функции измерения одного показателя: метод. указания. М.: Издательство стандартов, 1969. С. 52;
Антонов Л. Н. Исследование влияния низких температур на прочность и деформативность бетона и железобетона: автореф. дис. ... канд. техн. наук. М., 1968. 24 с.

Таблица 1. Средние значения контролируемых параметров циклов замораживания и оттаивания
Table 1. Average values of the controlled parameters of freezing and thawing cycles

Серия	Прочность, МПа			Изменение массы, %		Динамика изменения массы
	Исход-ная	После 3 ЦЗО	После 6 ЦЗО	После 3 ЦЗО	После 6 ЦЗО	
«ОБ»	34,7	32,6	27,8	0,43	–1,95	
«ФБ»	30,9	26,6	20,5	0,27	–0,82	

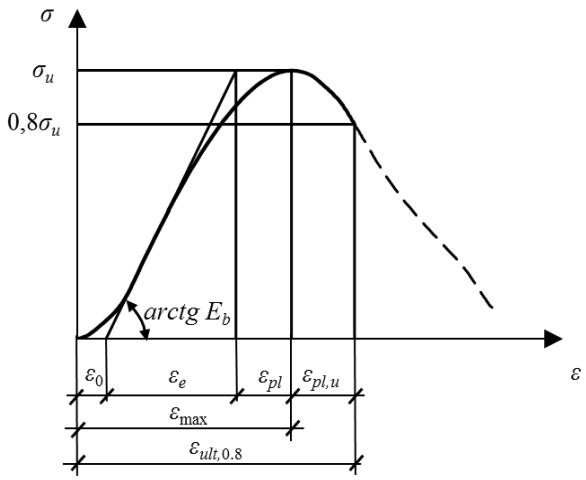


Рис. 1. Модель деформационного отклика при монотонном сжатии
Fig. 1. Model of deformation response under monotonic compression

Результаты и их обсуждение

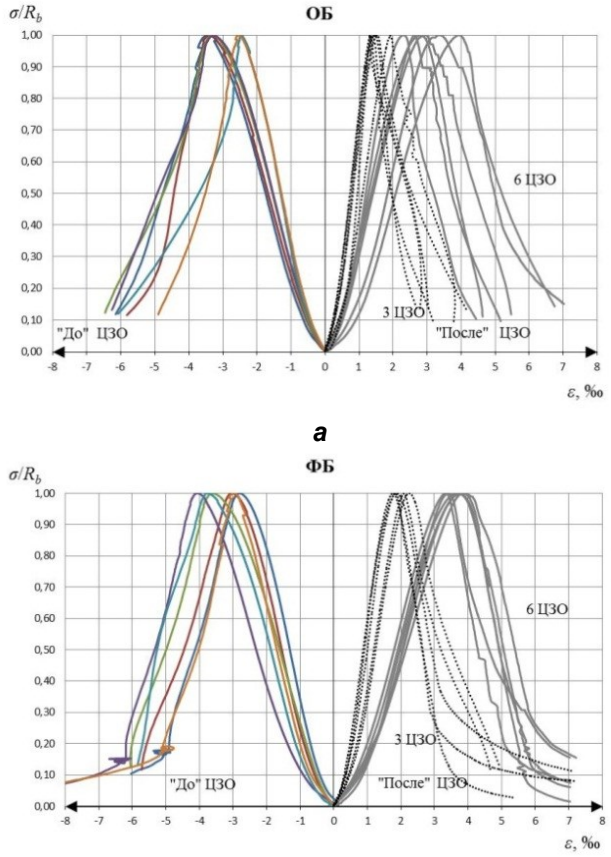
Семейства диаграмм монотонного сжатия образцов обеих серий до и после морозных испытаний представлены на рис. 2 и свидетельствуют о значимых количественных и статистических изменениях показателей сопротивления бетонов и фибробетонов. Оценке показателей сопротивления предшествовала проверка соответствия экспериментальных данных нормальному распределению по критериям Колмогорова[2]. Установлено, что на всех этапах испытаний вероятность нормального распределения контролируемых параметров для бетонов серии «ОБ» составляет (0,69–0,83), а «ФБ» – (0,74–0,91), что позволяет вести вероятностные прогнозы с учетом закономерностей гауссовского распределения.

Соответствующие значения статистики прочности и деформативности в исходном состоянии приведены в табл. 2, а кинетика их изменения после ЦЗО – в табл. 3. Данные табл. 2 и 3, прежде всего, характеризуются существенными различиями плотности распределения показателей внутреннего сопротивления в процессе монотонного нагружения и динамики изменений в цикловых температурно-влажностных воздействиях.

При этом снижение прочности обычных бетонов происходит в пределах ожидаемых (по стандарту) значений, а его возрастание у фибробетонов объяснимо увеличением структурной и деформационной неоднородности вследствие дисперсного армирования. На начальных циклах происходит двукратное снижение пиковых (ε_{max}) деформаций, преимущественно за счет потенциала пластического деформирования.

Этим объяснимо существующее увеличение модуля упругости при снижении прочности композитов. В дальнейшем (после 6 ЦЗО) уровень пластических деформаций соразмерен исходному потенциалу с преобладающей псевдопластической составляющей ($\varepsilon_{pl,u}$).

[2]Вентцель Е. С. Теория вероятностей: учеб. для вузов. 6-е изд. стер. М.: Высш. шк., 1999. 576 с.



a

b

Рис. 2. Диаграммы сжатия опытных композитов в монотонных испытаниях:
a – серия «ОБ», *b* – серия «ФБ»
Fig. 2. Compression diagrams of experimental composites in monotonous tests:
a – series "CC", *b* – series "FC"

Таблица 2. Статистики исходного распределения показателей
Table 2. Statistics of the initial distribution of indicators

Параметр	Серия «ОБ»			Серия «ФБ»		
	Среднее	Коэффициент вариации, %	Диапазон 95 % обеспеченности	Среднее	Коэффициент вариации, %	Диапазон 95 % обеспеченности
σ_u, МПа	34,67	8	29,42–39,92	30,88	7	26,47–35,28
E_b, МПа	16107	11	12615–19599	13813	13	10198–17427
ε_0, ‰	0,43	17	0,28–0,57	0,59	42	0,09–1,10
ε_e, ‰	2,18	14	1,58–2,78	2,26	12	1,7–2,81
ε_{pl}, ‰	0,47	30	0,19–0,75	0,53	37	0,14–0,9
ε_{max}, ‰	3,07	15	2,17–3,98	3,37	15	2,36–4,38
$\varepsilon_{ult,0,8}$, ‰	3,51	16	2,4–4,62	3,95	13	2,89–5,01
$\varepsilon_{u,pl}$, ‰	0,44	27	0,2–0,68	0,58	17	0,38–0,77
$\varepsilon_{max}/\sigma_u$, ‰/ГПа	0,09	10	0,07–0,11	0,11	15	0,08–0,14
$\varepsilon_{ult}/0{,}8\sigma_u$, ‰/ГПа	0,13	12	0,1–0,16	0,16	12	0,12–0,20
ε'_{max}, ‰	1,175	35	0,35–2	1,398	30	0,55–2,24
$\varepsilon'_{ult,0,8}$, ‰	3,68	80	–2,24–9,60	2,61	54	–0,19–5,41
Θ, мм	0,994	22	0,548–1,439	1,07	18	0,685–1,454
R^0_{crc}	0,81	15	0,57–1,05	0,82	12	0,62–1,02
R^v_{crc}	0,93	4	0,86–1,01	0,92	4	0,85–0,98

Последнее подтверждается динамикой поперечных деформаций (ε'_{max}). Специфична кинетика изменений при ЦЗО начальных деформаций (ε_0), косвенно характеризующих структурную неоднородность материала. Ее снижение после начальных циклов свидетельствует о преобладании на этом этапе конструктивных факторов усталостной трансформации. Преходящий характер процессов подобных последствий подтверждается резким возрастанием (ε_0) после шестого цикла.

Очевидно, сказывается интенсификация процесса трещинообразования по мере исчерпания ресурса морозостойкости композитов. Разнонаправленность изменений в кумулятивном процессе морозной деструкции подтверждает это предположение. Так, кратное начальное увеличение (ε'_{max}) на первом этапе ЦЗО в обычных бетонах исчезает в последующем и существенно снижается в фибробетонах. Заканчивая анализ морозно-усталостной динамики параметров внутреннего сопротивления, необходимо отметить стабильность относительных (к прочности) границ микроразрушений, косвенно свидетельствующих о незначительных изменениях компонентов объемных деформаций композитов.

Таблица 3. Относительные изменения средних значений параметров внутреннего сопротивления после циклического замораживания и оттаивания
Table 3. Relative changes in the average values of the internal resistance parameters after cyclic freezing and thawing

Параметр сопротивления	3 ЦЗО		6 ЦЗО	
	«ОБ»	«ФБ»	«ОБ»	«ФБ»
σ_u	0,94	0,86	0,8	0,66
E_b	2,06	1,52	0,87	0,62
ε_{max}	0,49	0,58	0,97	1,08
ε_e	0,47	0,58	0,94	1,06
ε_{pl}	0,26	0,51	0,92	0,89
ε_0	0,81	0,59	1,18	1,33
$\varepsilon_{ult,0,8}$	0,51	0,59	1,03	1,08
ε'_{max}	1,77	1,59	–0,04	0,39
$\varepsilon'_{ult,0,8}$	1,62	2,09	0,04	1,02
R^0_{crc}	1,01	1,01	0,96	0,8
R^v_{crc}	1,01	0,97	1,01	0,97

Заключение

Таким образом, можно заключить, что:

1. Проектирование железобетонных конструкций зданий и сооружений, эксплуатируемых в суровых климатических условиях, должно осуществляться с анализом предельных состояний по усталостному разрушению, обусловленному стохастическими колебаниями температуры и влажности окружающей среды.

2. Ввиду статистической нетождественности распределения параметров прочности и деформативности бетонов (фибробетонов) в исходном и постусталостном состояниях критериальные условия по усталостному сопротивлению определяются с учетом эксплуатационных требований.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Москвин В. М., Капкин М. М., Савицкий А. Н., Ярмаковский В. Н. Бетон для строительства в суровых климатических условиях. М.: Стройиздат, 1973. 172 с.
2. Леонович М. Ф. О характере изменения коэффициента вариации деформаций бетона при сжатии // Бетон и железобетон. 1960. № 12. С. 43.
3. Москвин В. М., Голубых Н. Д. Экспериментальная проверка некоторых гипотез разрушения бетона при циклическом воздействии отрицательных температур // Труды НИИЖБ. 1974. Вып. 11. С. 50–54.
4. Иванов Ф. М. Исследование морозостойкости бетона // Защита от коррозии строительных конструкций и повышение их долговечности. М.: Стройиздат, 1969. С. 109–116.
5. Пинус Б. И., Курилов В. И. Повышение надежности железобетонных конструкций в условиях агрессивности среды эксплуатации. Иркутск: Вост.-Сиб. кн. изд-во, 1977. 159 с.

6. Рогонский В. А., Кострич А. П., Шеряков В. Ф. Эксплуатационная надежность зданий. Л.: Стройиздат, 1983. 280 с.
7. 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.
8. 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.
9. Важенин Б. В. К вопросу о морозостойкости бетона и железобетона // Железобетон и железобетонные конструкции. Челябинск, 1965. С. 199.
10. Москвин В. М., Голубых Н. Д. Экспериментальная проверка некоторых гипотез разрушения бетона при циклическом воздействии отрицательных температур // Труды НИИЖБ. 1974. Вып. 11. С. 50–54.
11. Пинус Б. И., Семенов В. В., Гузеев Е. А. Предельные деформации бетонов, подвергнутых циклическому замораживанию и оттаиванию // Бетон и железобетон. 1981. № 10. С. 19–20.
12. Савицкий А. Н., Москвин В. М., Ярмаковский В. Н., Капкин М. М. Прочностные и деформативные характеристики бетона и железобетона при действии криогенных температур // Повышение стойкости бетона и железобетона при действии агрессивных сред. М.: Стройиздат, 1975. С. 16–23.
13. Jeongsoo Nam, Gyuyong Kim, Bokyeong Lee, Ryo Hasegawa, Yukio Hama. Frost resistance of polyvinyl alcohol fiber and polypropylene fiber reinforced cementitious composites under freeze thaw cycling // Composites Part B: Engineering. 2016. Vol. 90. p. 241-250. https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2015.12.009.
14. Hyun-Do Yun. Effect of accelerated freeze-thaw cycling on mechanical properties of hybrid PVA and PE fiber-reinforced strain-hardening cement-based composites (SHCCs) // Composites Part B: Engineering. 2013. Vol. 52. p. 11-20. https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2013.03.021.
15. Hyun-Do Yun, Keitetsu Rokugo. Freeze-thaw influence on the flexural properties of ductile fiber-reinforced cementitious composites (DFRCCs) for durable infrastructures // Cold Regions Science and Technology. 2012. Vol. 78. p. 82-88. https://doi.org/10.1016/j.coldregions.2012.02.002.

REFERENCES

1. Moskvin VM, Kapkin MM, Savitsky AN, Yarmakovsky VN. Concrete for construction in harsh climatic conditions. Moscow: Stroyizdat; 1973. 172 p. (In Russ.).
2. Leonovich MF. On the nature of the change in the coefficient of variation of concrete deformations during compression. *Beton i zhelezobeton*. 1960;12:43. (In Russ.).
3. Moskvin VM, Golubykh ND. Experimental verification of some hypotheses of concrete destruction under cyclic exposure to negative temperatures. *Trudy NIIZhB.* 1974;11:50-54. (In Russ.).
4. Ivanov FM. Study on the frost resistance of concrete. *Zashchita ot korrozii stroitel'nykh konstruktsii i povyshenie ikh dolgovechnosti*. Moscow: Stroyizdat; 1969. p. 109-116. (In Russ.).
5. Pinus BI, Kurilov VI. Improving the reliability of reinforced concrete structures in aggressive environments. Irkutsk: Vost.-Sib. kn. izd-vo; 1977. 159 p. (In Russ.).
6. Roginsky VA, Kostic AP, Seryakov VF. Operational reliability of buildings. Leningrad: Stroyizdat; 1983. 280 p. (In Russ.).
7. Aktuganov IZ. Method of estimating the effects of climatic temperature and humidity influence on the durability of concrete building structures. *Izvestiya vuzov. Stroitel'stvo i arkhitektura*. 1983;4:14-18. (In Russ.).
8. Gladkov VS. On the destruction of hydraulic concrete during repeated freezing and thawing in a non-stationary mode. *Trudy koordinatsionnykh soveshchanii po gidrotekhnike*. 1972;73:133-142. (In Russ.).
9. Vazhenin BV. On frost resistance of concrete and reinforced concrete. *Zhelezobeton i zhelezobetonnye konstruktsii*. Chelyabinsk, 1965. p. 199. (In Russ.).
10. Moskvin VM, Blue ND. Experimental test of some hypotheses of the fracture of concrete under cyclic exposure to freezing temperatures. *Trudy NIIZhB*. 1974;11:50-54. (In Russ.).
11. Pinus BI, Semenov VV, Guzeev EA. Limiting deformations of concretes subjected to cyclic freezing and thawing. *Beton i zhelezobeton*. 1981;10:19-20. (In Russ.).
12. Savitsky AN, Moskvin VM, Yarmakovsky VN, Kapkin MM. Strength and deformation characteristics of concrete and reinforced concrete under the action of cryogenic temperatures. *Povyshenie stoikosti betona i zhelezobetona pri deistvii agressivnykh sred*. Moscow: Stroyizdat; 1975. p. 16-23. (In Russ.).

13. Jeongsoo Nam, Gyuyong Kim, Bokyeong Lee, Ryo Hasegawa, Yukio Hama. Frost resistance of polyvinyl alcohol fiber and polypropylene fiber reinforced cementitious composites under freeze thaw cycling. *Composites Part B: Engineering*. 2016;90:241-250. https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2015.12.009.
14. Hyun-Do Yun. Effect of accelerated freeze-thaw cycling on mechanical properties of hybrid PVA and PE fiber-reinforced strain-hardening cement-based composites (SHCCs). *Composites Part B: Engineering*. 2013;52:11-20. https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2013.03.021.
15. Hyun-Do Yun, Keitetsu Rokugo. Freeze-thaw influence on the flexural properties of ductile fiber-reinforced cementitious composites (DFRCCs) for durable infrastructures. *Cold Regions Science and Technology*. 2012;78:82-88. https://doi.org/10.1016/j.coldregions.2012.02.002.

Информация об авторах

Б. И. Пинус,
доктор технических наук, 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

И. Г. Корнеева,
старший преподаватель кафедры
строительного производства,
Иркутский национальный исследовательский
технический университет,
664074, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 83,
Россия,
e-mail: kornee-inna@yandex.ru
https://orcid.org/0000-0001-6130-0195

М. П. Калашников,
доктор технических наук, профессор
кафедры теплогазоснабжения и вентиляции,
Восточно-Сибирский государственный
университет технологий и управления,
670013, г. Улан-Удэ, ул. Ключевская, 40В,
Россия,
e-mail: kmp02@rambler.ru
https://orcid.org/0000-0003-1040-3228

Information about the authors

Boris I. Pinus,
Dr. Sci. (Eng.), 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

Inna G. Korneeva,
Senior Lecturer of the Department of Building
Production,
Irkutsk National Research Technical
University,
83 Lermontov St., Irkutsk, 664074, Russia,
e-mail: kornee-inna@yandex.ru
https://orcid.org/0000-0001-6130-0195

Michail P. Kalashnikov,
Dr. Sci. (Eng.), Professor of the Department
of Heat and Gas Supply and Ventilation,
East Siberia State University of Technology
and Management,
40V Klyuchevskaya St., Ulan-Ude, 670013,
Russia,
e-mail: kmp02@rambler.ru
https://orcid.org/0000-0003-1040-3228

Вклад авторов

Все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации.

Contribution of the authors

The authors contributed equally to this article.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

Conflict of interests

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

The final manuscript has been read and approved by all the co-authors.

Статья поступила в редакцию 03.03.2022.
Одобрена после рецензирования 05.04.2022.
Принята к публикации 06.04.2022.

The article was submitted 03.03.2022.
Approved after reviewing 05.04.2022.
Accepted for publication 06.04.2022.