

А.Д. ИСТОМИН¹, В.А. ПЕТРОВА¹¹Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет, г. Москва, Россия

ОСТАТОЧНЫЕ ДЕФОРМАЦИИ БЕТОНА ЖЕЛЕЗОБЕТОННЫХ ЭЛЕМЕНТОВ ПРИ ЦИКЛИЧЕСКОМ ЗАМОРАЖИВАНИИ И ОТТАИВАНИИ

Аннотация. *Опыты по исследованию влияния циклического замораживания и оттаивания (ЦЗО) на поведение бетона показывают, что в бетоне при воздействии отрицательных температур наблюдается рост остаточных деформаций в виде деструктивного расширения бетона. До настоящего времени мало изученным остается вопрос влияния процента армирования железобетонных элементов на величину остаточных деформаций расширения бетона в зависимости от его напряженного состояния (растяжение, сжатие). В частности, насколько арматура замедляет развитие деструктивных процессов в бетоне, а именно уменьшает остаточные деформации его расширения при знакопеременных температурных воздействиях.*

Целью данной работы являлось экспериментальное исследование влияния процента армирования на остаточные деформации бетона железобетонных элементов в условиях знакопеременных температур.

В качестве опытных образцов были приняты бетонные и железобетонные призмы размером 10x10x40 см. При этом варьировался процент армирования (0,0 %; 0,5 %; 1,13 %; 2,54 %) и уровень нагружения образцов (0,0; 0,3; 0,7).

В результате испытаний опытных образцов были получены остаточные деформации расширения бетона в условиях циклического замораживания и оттаивания. На основании полученных результатов предложены формулы для расчета остаточных деформаций бетона железобетонных элементов в условиях знакопеременных температур, учитывающие процент армирования.

Ключевые слова: *циклическое замораживание и оттаивание, деструктивные процессы, бетон, процент армирования, остаточные деформации, уровень нагружения.*

A.D. ISTOMIN¹, V.A. PETROVA¹¹Moscow State University of Civil Engineering, Moscow, Russia

PERMANENT DEFORMATIONS OF CONCRETE OF REINFORCED CONCRETE ELEMENTS DURING CYCLIC FREEZING AND THAWING

Abstract. *Experiments on the study of the effect of cyclic freezing and thawing (GCS) on the behavior of concrete show that in concrete, when exposed to negative temperatures, there is an increase in residual deformations in the form of destructive expansion of concrete. Until now, the question of the influence of the percentage of reinforcement of reinforced concrete elements on the magnitude of residual deformations of concrete expansion depending on its stress state (stretching, compression) remains little studied. In particular, how much reinforcement slows down the development of destructive processes in concrete, namely reduces the residual deformations of its expansion during sign-variable temperature effects.*

The purpose of this work was an experimental study of the effect of the percentage of reinforcement on the residual deformations of concrete of reinforced concrete elements under conditions of alternating temperatures.

Concrete and reinforced concrete prisms with a size of 10x10x40 cm were adopted as prototypes, while the percentage of reinforcement varied (0.0 %; 0.5 %; 1.13 %; 2.54 %) and the level of loading of samples (0.0; 0.3; 0.7).

As a result of testing of prototypes, residual deformations of concrete expansion were obtained under conditions of cyclic freezing and thawing. Based on the results obtained, formulas are proposed for calculating the residual deformations of concrete reinforced concrete elements under alternating temperature conditions, taking into account the percentage of reinforcement.

Keywords: *cyclic freezing and thawing, destructive processes, concrete, percentage of reinforcement, residual deformations, loading level.*

Введение

Обеспечение долговечности зданий и сооружений является одной из основных задач современного строительства [1-7]. Опыты по исследованию влияния циклического замораживания и оттаивания (ЦЗО) на поведение бетона показывают, что в бетоне при воздействии отрицательных температур наблюдается рост остаточных деформаций в виде деструктивного расширения бетона. Основная причина этого процесса - увеличение объема воды при ее замерзании в порах и капиллярах бетона. В большинстве имеющихся исследований с железобетонными элементами в условиях циклических замораживаний и оттаиваний фиксировались остаточные деформации расширения бетона, которые приводят к дополнительным напряжениям в арматуре железобетонных элементов. Это приводит к увеличению кривизны и прогибов балок, ширины раскрытия трещин и как следствие к увеличению скорости коррозии арматуры. На величину остаточных деформаций бетона железобетонных элементов влияет влажность бетона, нижняя температура замораживания, процент армирования, уровень напряжений и вид напряженного состояния (сжатие, растяжение) [8-20]. До настоящего времени мало изученным является вопрос влияния процента армирования железобетонных элементов на величину остаточных деформаций расширения бетона в зависимости от его напряженного состояния (растяжение, сжатие). В частности, насколько арматура замедляет развитие деструктивных процессов в бетоне, а именно уменьшает остаточные деформации его расширения при знакопеременных температурных воздействиях. Целью данной работы являлось экспериментальное исследование влияния процента армирования на остаточные деформации бетона железобетонных элементов в условиях знакопеременных температур.

Модели и методы

Определение остаточных деформаций бетона при центральном сжатии в ходе циклического замораживания и оттаивания производилось при испытании бетонных и железобетонных призм размером 100x100x400 мм.

Силовая установка для испытания образцов призм в условиях центрального сжатия приведена на рисунке 1.

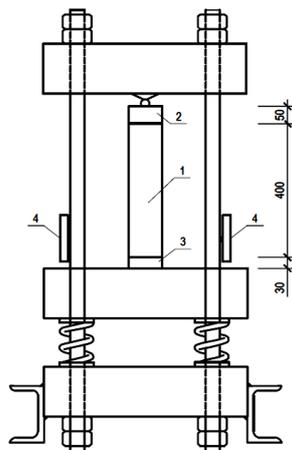


Рисунок 1 – Силовая установка для испытания призм в условиях центрального сжатия:
1 – бетонная призма; 2 – металлическая пластина (оголовник) $\delta=50$ мм;
3 – металлическая пластина $\delta=30$ мм; 4 – индикаторы часового типа с удлинительми

Схема расположения приборов на призмах, испытанных в условиях циклического замораживания-оттаивания приведена на рисунке 2.

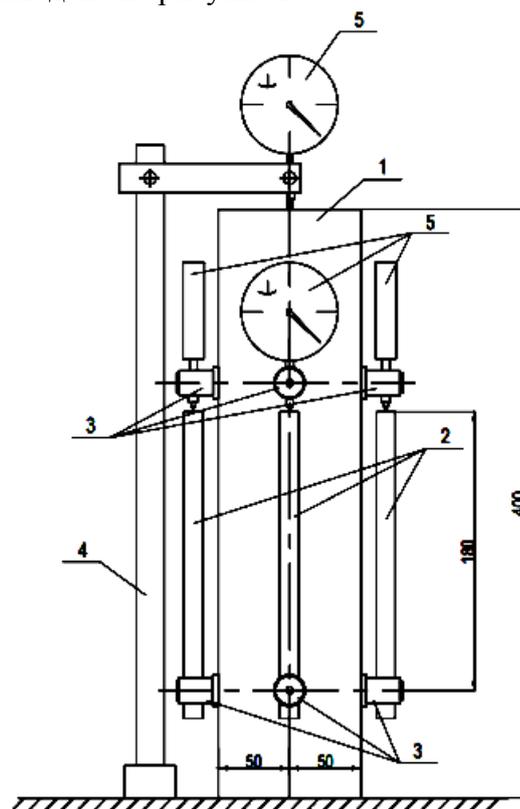


Рисунок 2 – Расположение приборов на призме: 1 – бетонный образец-призма 10x10x40см; 2 – кварцевый стержень; 3 – металлический кронштейн-держатель; 4 – металлический консольный штатив (для ненагруженных призм); 5 – индикатор часового типа

Нагружение призм до необходимого уровня напряжений в бетоне осуществлялось по деформациям опытных диаграммам состояния бетона при кратковременном сжатии.

Во время экспериментов фиксировались остаточные деформации расширения призм в процессе циклического замораживания-оттаивания.

Результаты исследования и их анализ

Зависимость для вычисления остаточных деформаций расширения сжатого бетона может быть представлена в виде:

$$\varepsilon_{bu} = k_b k_{s,sw} \varepsilon_{bu,0}, \quad (1)$$

где k_b – коэффициент, учитывающий уровень напряжений сжатого бетона;

$k_{s,sw}$ – коэффициент, учитывающий влияние армирования;

$\varepsilon_{bu,0}$ – остаточные деформации расширения бетона ненагруженных призм.

Результаты испытаний по накоплению остаточных деформаций расширения ненагруженных бетонных призм при ЦЗО показаны на рисунке 3.

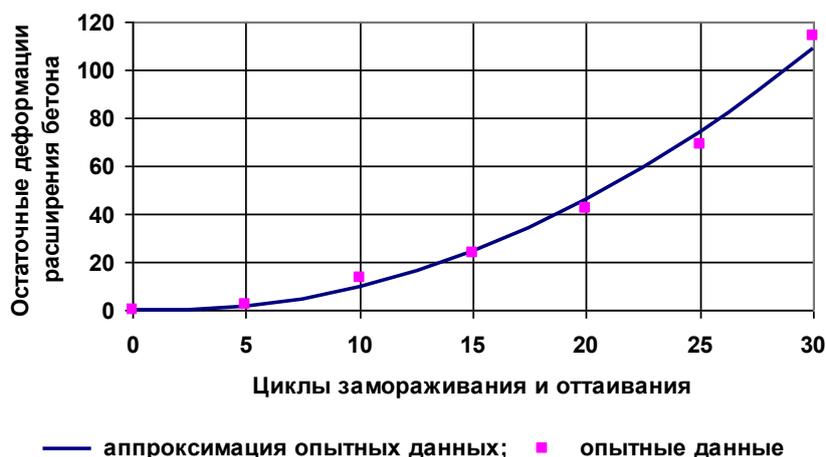


Рисунок 3 – Остаточные деформации ненагруженных бетонных призм в ходе ЦЗО

В результате аппроксимация опытных данных получена зависимость остаточных деформаций от относительного количества циклов замораживания и оттаивания (2):

$$\varepsilon_{bu,0} = 126,8\eta_c^2 - 16,9\eta_c, \quad (2)$$

где $\eta_c = C/F$ – относительное количество ЦЗО;

C – текущее количество циклов замораживания-оттаивания;

F – марка бетона по морозостойкости.

Вид напряженного состояния и уровень нагружения существенным образом влияет на деструктивные процессы в бетоне при ЦЗО. Влияние сжимающих напряжений на деформации расширения бетона согласно (1) учитываются с помощью коэффициента k_b .

На основании аппроксимации опытных данных коэффициент k_b можно представить в виде степенной функции:

$$k_b = -3,539\eta_b^2 + 1,065\eta_b + 1, \quad (3)$$

где η_b – уровень напряжений сжатого бетона

Опытные и расчетные значения коэффициента влияния сжатия k_b по формуле (3) от уровня напряжений в сжатом бетоне представлены на рисунке 4.

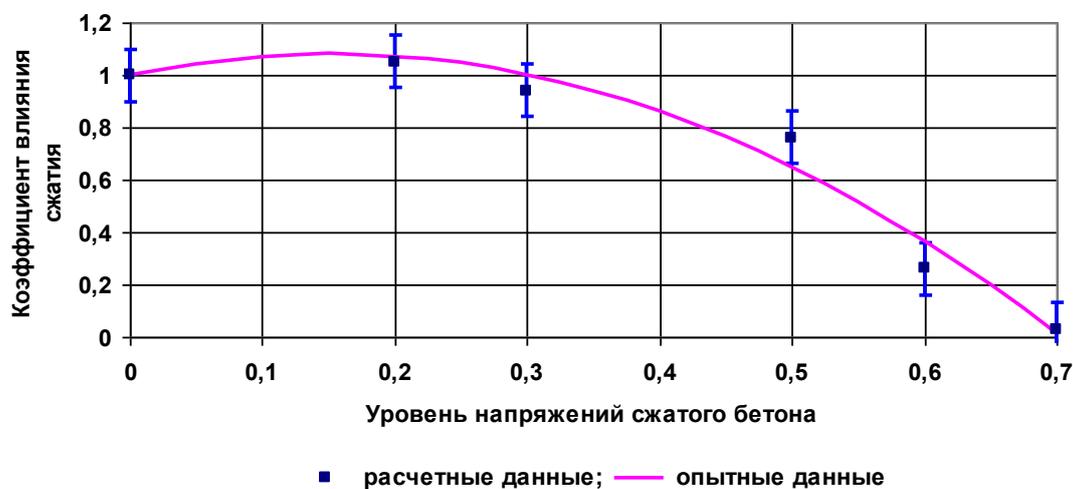


Рисунок 4 – Влияние сжимающих напряжений на коэффициент k_b (опытные и расчетные данные)

На данном графике можно выделить несколько характерных участков. Участок при уровне напряжений от 0 до 0,2 – коэффициент увеличивается с 1 до 1,07. Участок при уровне напряжений от 0,2 до 0,7 – снижение k_b с нарастающей скоростью. При значении уровня напряжений равном 0,7 значения коэффициента k_b стремится к нулю.

Полученные результаты говорят о том, что высокий уровень напряжений сжатия препятствует росту остаточных деформаций расширения бетона. При значениях уровня напряжений сжатого бетона близких к 0,7 и выше, остаточные деформации расширения отсутствуют. Уровень напряжений в диапазоне $\eta_b = 0,0 - 0,3$, согласно опытным данным, не будет препятствовать развитию деформаций расширения.

На основании опытных данных проведенных исследований было выявлено влияние армирования на накопление остаточных деформаций расширения бетона. Остаточные деформации растяжения, как отмечалось выше, можно представить в виде зависимости (1), в которой влияние продольного и поперечного армирования на деформации расширения представлено коэффициентом $k_{s,sw}$. В общем виде формула для расчета коэффициента $k_{s,sw}$ при наличии продольной и поперечной арматуры имеет вид:

$$k_{s,sw} = a \cdot e^{-k\mu_s} \quad (4)$$

где a и k – коэффициенты, учитывающие влияние процента поперечного армирования (μ_{sw}), определяемые по формулам (5,6):

$$a = 0,314\mu_{sw}^2 + 0,803\mu_{sw} + 1, \quad (5)$$

$$k = 0,347\mu_{sw}^2 - 0,407\mu_{sw} + 0,556, \quad (6)$$

μ_s – коэффициент продольного армирования.

На рисунке 5 представлены расчетные значения коэффициента $k_{s,sw}$ в зависимости от процента поперечного армирования μ_{sw} в заданном диапазоне значений процента продольного армирования μ_s .

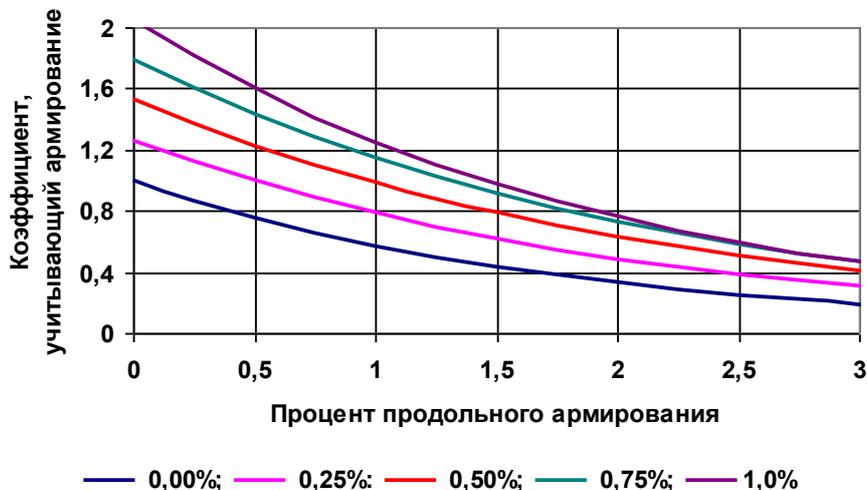


Рисунок 5 – Влияние поперечного армирования на коэффициент $k_{s,sw}$, вычисленные по формуле (4)

Расчетные данные, полученные на основании формулы (4), говорят о том, что при росте процента поперечного армирования μ_{sw} остаточные деформации расширения бетона растут, но чем больше процент продольного армирования μ_s , тем заметнее снижение значение коэффициента $k_{s,sw}$. Это говорит, о том, что продольное армирование снижает рост остаточных деформаций, происходит перераспределение усилий, и при больших значениях (близких к 3 %), влияние поперечного армирования не так значительно, как при небольших значениях μ_s .

На рисунке 6 представлено сравнение опытных и расчетных данных коэффициента $k_{s,sw}$, в зависимости от процента поперечного армирования μ_{sw} в заданном диапазоне значений процента продольного армирования μ_s .

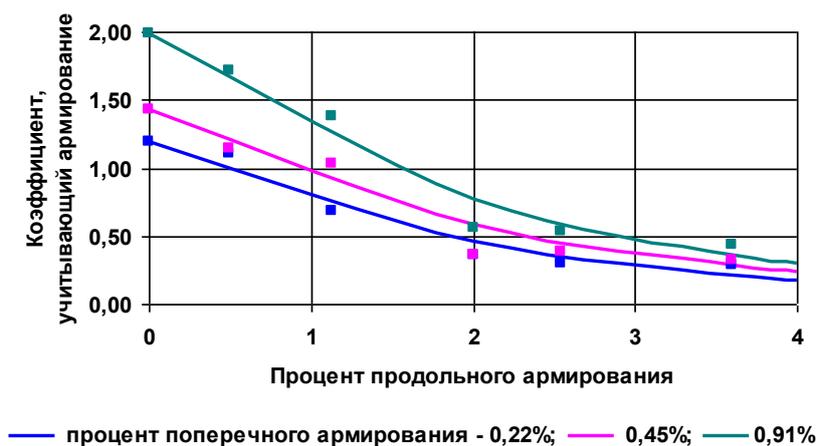


Рисунок 6 – Влияние поперечного армирования на коэффициент $k_{s,sw}$ (опытные и расчетные данные)

Опытные данные соответствуют расчетным значениям, что говорит, о возможности применения данных формул для определения коэффициента $k_{s,sw}$.

На основании проведенных экспериментальных исследований влияния циклического замораживания и оттаивания на остаточные деформации расширения бетона в железобетонных элементах можно сделать следующие выводы.

Выводы

1. Увеличение процента армирования с 0,0 % до 3,0 % уменьшает остаточные деформации расширения бетона на 90 %, возникающие при циклическом замораживании и оттаивании в бетонных образцах.

2. Уровень напряжения в сжатом бетоне ($\eta_b = 0,4 - 0,6$) способствует предотвращению роста деформаций расширения.

3. При расчете железобетонных элементов по второй группе предельных состояний необходимо учитывать усилия, возникающие в арматуре из-за остаточных деформаций расширения бетона при циклическом замораживании и оттаивании.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Тамразян А.Г. Бетон и железобетон: проблемы и перспективы // Промышленное и гражданское строительство. 2014. № 8. С. 30-33.
2. Тамразян А.Г. Оценка риска и надежности несущих конструкций и ключевых элементов - необходимое условие безопасности зданий и сооружений // Вестник ЦНИИСК им. В.А. Кучеренко "Исследования по теории сооружений". 2009. №1. С. 160-171.
3. Карпенко Н.И., Карпенко С.Н. и др. О современных методах обеспечения долговечности железобетонных конструкций // Academia. Архитектура и строительство. 2015. №1. С. 93-102.

4. Струлев В.М., Яркин Р.А. О современных методах обеспечения долговечности железобетонных конструкций // Вестник ТГТУ. 2003. том 9. №2. С.277-281.
5. Каприелов С.С., Гольденберг А.Л., Тамразян А.Г. О самозалечивании высокопрочного бетона, подвергнутого деструкции при циклическом замораживании. // Известия высших учебных заведений. Технология текстильной промышленности. 2017. № 5(371). С. 56-61.
6. Актуганов И.З.. Методика оценки влияния климатических температурно-влажностных воздействий на долговечность бетона строительных конструкций: расчетный метод определения требований к морозостойкости бетона // Монография – Новосибирск: НГТУ. 2008. 386 с.
7. Алимов А.Г., Карпунин В.В. Современные методы ультразвукового диагностирования бетонных и железобетонных конструкций сооружений, эксплуатируемых в условиях высокого водонасыщения и низких температур, для предупреждения чрезвычайных ситуаций // Технологии гражданской безопасности. 2006. Т.3. №3 (11). С.36-44.
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.
9. Пинус Б.И., Пинус Ж.Н. Об одном подходе к оценке агрессивности температурно-климатических условий по отношению к бетону // Известия вузов. Инвестиции. Строительство. Недвижимость. 2011. №1(1). С. 121-125.
10. Подгорнов Н.И. Природно-климатическое и технологическое влияние на конструктивную безопасность железобетонных сооружений // Вестник Российского университета дружбы народов. Серия: Инженерные исследования. 2011. №2. С. 38-42.
11. Добшиц Л.М. Физико-математическая модель разрушения бетонов при попеременном замораживании и оттаивании // Жилищное строительство. 2017. №12. С. 30-36.
12. Kamada E., Katsura O., Yoshio T. A Model for Mechanism of Frost Damage of Cementitious Material // Concrete Research and Technology. 2000. №11(2). P. 22-27.
13. Доценко Н.А. и др. Влияние некоторых рецептурных факторов на показатели морозостойкости и водонепроницаемости бетонов слитной структуры // Вестник евразийской науки. 2020. Т.12. №1. С. 8-12.
14. Подвальный А.М. О концепции обеспечения морозостойкости бетона в конструкциях зданий и сооружений // Морозостойкость бетонов: Труды НИИЖБ. М.: Стройиздат, 1969. №12. С. 45-65.
15. Подвальный А.М. Исследование стойкости нагруженного бетона // Строительные материалы. 2004. №6(594). С. 4-6.
16. Ehsan Solatiyan, Mohammad Asadi and Mahmoud Bozorgmehrasl. Experimental Investigating the effect of freeze-thaw cycles on strength properties of concrete pavements in cold climates // Indian Journal of Fundamental and Applied Life Sciences. Vol. 5(S2), 2015. P. 2421-2428.
17. Истомин А.Д., Александров Е.Н., Огурцова Л.П. Влияние способа водонасыщения бетона и отрицательной температуры на его деформативно-прочностные характеристики // Наука и техника в дорожной отрасли. 2018. №4. С. 40-42.
18. Истомин А.Д., Александров Е.Н. Влияние массивности конструкций на температурные деформации бетона при циклическом замораживании и оттаивании // Наука и техника в дорожной отрасли. 2018. №1. С. 31-32.
19. Andrey Istomin, Mikhail Medyanki., The influence of pliability of supports on statistically undefined reinforced concrete elements at under low temperatures under -50°C // XXI International Scientific Conference on Advanced in Civil Engineering "Construction - The Formation of Living Environment" (FORM 2018) 25–27 April 2018, Moscow, Russian Federation. Volume 365, 2018.
20. Истомин А.Д., Назаров Т.А. Влияние природных циклов замораживания — оттаивания на прочность и деформативность бетона // Известия высших учебных заведений. Технология текстильной промышленности. 2019. №3(381). С. 52-56.

REFERENCES

1. Tamrazyan A.G. Beton i zhelezobeton: problemy i perspektivy [Concrete and reinforced concrete: problems and prospects]. *Promyshlennoe i grazhdanskoe stroitel'stvo*. 2014. No 8. Pp. 30-33. (rus).
2. Tamrazyan A.G. Ocenka riska i nadezhnosti nesushchih konstrukcij i klyuchevyh elementov - neobhodimoe uslovie bezopasnosti zdaniy i sooruzhenij [Evaluation of the risk and reliability of load-bearing structures and key elements is a necessary condition for the safety of buildings and structures]. *Vestnik CNIISK im. V.A. Kucherenko "Issledovaniya po teorii sooruzhenij"*. 2009. No1. Pp. 160-171.
3. Karpenko N.I., Karpenko S.N. i dr. O sovremennyh metodah obespecheniya dolgovechnosti zhelezobetonnyh konstrukcij [The modern methods of ensuring durability of reinforced concrete structures]. *Academia. Arhitektura i stroitel'stvo*. 2015. No 1. Pp. 93-102.

4. Strulev V.M., Yarkin R.A. O sovremennykh metodakh obespecheniya dolgovечnosti zhelezobetonnykh konstruktsiy [The modern methods of ensuring durability of reinforced concrete structures]. *Vestnik TGTU*. 2003. Vol. 9. No 2. Pp. 277-281.
5. Kaprielov S.S., Gol'denberg A.L., Tamrazyan A.G. O samozalechivaniy vysokoprochnogo betona, podvergnutogo destruktsii pri tsiklicheskom zamorazhivaniy [The self-healing of high-strength concrete subjected to destruction during cyclic freezing]. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Tekhnologiya tekstil'noy promyshlennosti*. 2017. No 5(371). Pp. 56-61.
6. Aktuganov I.Z. Metodika ocenki vliyaniya klimaticheskikh temperaturno-vlazhnostnykh vozdeystviy na dolgovечnost' betona stroitel'nykh konstruktsiy: raschetnyy metod opredeleniya trebovaniy k morozostojkosti betona [Estimation of climatic temperature and humidity effects on concrete durability of building structures, calculation method for determining the requirements for frost resistance of concrete]. *Monografiya – Novosibirsk: NGTU*. 2008. 386 p.
7. Alimov A.G., Karpunin V.V. Sovremennyye metody ul'trazvukovogo diagnostirovaniya betonnykh i zhelezobetonnykh konstruktsiy sooruzheniy, ekspluatiruemykh v usloviyakh vysokogo vodonasyscheniya i nizkikh temperatur, dlya preduprezhdeniya chrezvychajnykh situatsiy [Modern methods of ultrasonic diagnostics of concrete and reinforced concrete structures of constructions operated in conditions of high water saturation and low temperatures for the prevention of emergency situations]. *Tekhnologii grazhdanskoj bezopasnosti*. 2006. Vol.3. No 3(11). Pp. 36-44.
8. Pinus B.I., Pinus Zh.N., Homyakova I.V. Izmenenie konstruktivnykh svoystv betonov pri ohlazhdenii i zamorazhivaniy [Changes in the structural properties of concrete during cooling and freezing]. *Vestnik Irkutskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta*. 2015. No 2(97). Pp. 111-116.
9. Pinus B.I., Pinus Zh.N. Ob odnom podhode k ocenke agressivnosti temperaturno-klimaticheskikh usloviy po otnosheniyu k betonu [On an approach to the assessment of corrosiveness caused by temperature and climatic conditions in regard of concrete]. *Izvestiya vuzov. Investitsii. Stroitel'stvo. Nedvizhimost'*. 2011. No 1(1). Pp. 121-125.
10. Podgornov N.I. Prirodno-klimaticheskoe i tekhnologicheskoe vliyanie na konstruktivnuyu bezopasnost' zhelezobetonnykh sooruzheniy [Natural, climatic and technological impact on the structural safety of reinforced concrete structures]. *Vestnik Rossijskogo universiteta druzhby narodov. Seriya: Inzhenernye issledovaniya*. 2011. No 2. Pp. 38-42.
11. Dobshic L.M. Fiziko-matematicheskaya model' razrusheniya betonov pri poperemennom zamorazhivaniy i ottaivaniy [Physical-and-mathematical model of concrete failure under alternate freezing and thawing]. *Zhilishchnoe stroitel'stvo*. 2017. No 12. Pp. 30-36.
12. Kamada E., Katsura O., Yoshio T. A Model for Mechanism of Frost Damage of Cementitious Material // *Concrete Research and Technology*. 2000. № 11(2). Pp. 22-27.
13. Docenko N.A. i dr. Vliyanie nekotorykh recepturnykh faktorov na pokazateli morozostojkosti i vodonepronicaemosti betonov slitnoj struktury [Influence of massiveness of structures on temperature deformation of concrete during cyclic freezing and thawing] *Vestnik evrazijskoj nauki*. 2020. T.12. No 1. Pp. 8-12.
14. Podval'nyy A.M. O koncepcii obespecheniya morozostojkosti betona v konstruktsiyah zdaniy i sooruzheniy [The concept of ensuring the frost resistance of concrete in the structures of buildings and constructions] *Morozostojkost' betonov*: Trudy NIIZhB. M.: Strojizdat, 1969. No 12. Pp. 45-65.
15. Podval'nyy A.M. Issledovanie stojkosti nagruzhennogo betona [Study of the resistance of loaded concrete] *Stroitel'nye materialy*. 2004. No 6(594). Pp. 4-6.
16. Ehsan Solatiyan, Mohammad Asadi and Mahmoud Bozorgmehrasl. Experimental Investigating the effect of freeze-thaw cycles on strength properties of concrete pavements in cold climates // *Indian Journal of Fundamental and Applied Life Sciences*. Vol. 5(S2), 2015. Pp. 2421-2428.
17. Istomin A.D., Aleksandrov E.N., Ogurcova L.P. Vliyanie sposoba vodonasyscheniya betona i otricatel'noj temperatury na ego deformativno-prochnostnye harakteristiki [The influence of the method of water saturation of concrete and negative temperature on its deformation-strength characteristics] *Nauka i tekhnika v dorozhnoj otrasli*. 2018. No 4. Pp. 40-42.
18. Istomin A.D., Aleksandrov E.N. Vliyanie massivnosti konstruktsiy na temperaturnye deformatsii betona pri tsiklicheskom zamorazhivaniy i ottaivaniy [Influence of massiveness of structures on temperature deformation of concrete during cyclic freezing and thawing] *Nauka i tekhnika v dorozhnoj otrasli*. 2018. No 1. Pp. 31-32.
19. Andrey Istomin, Mikhail Medyanki., The influence of pliability of supports on statistically undefined reinforced concrete elements at under low temperatures under -50°C // XXI International Scientific Conference on Advanced in Civil Engineering "Construction - The Formation of Living Environment" (FORM 2018) 25–27 April 2018, Moscow, Russian Federation. Volume 365, 2018.
20. Istomin A.D., Nazarov T.A.. Vliyanie prirodnykh ciklov zamorazhivaniya — ottaivaniya na prochnost' i deformativnost' betona [The influence of natural cycles of freezing - thawing on the strength and deformability of concrete] *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Tekhnologiya tekstil'noy promyshlennosti*. 2019. No 3(381). Pp. 52-56.

Информация об авторах:

Истомин Андрей Дмитриевич

Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет, г. Москва, Россия, кандидат технических наук, доцент кафедры железобетонных и каменных конструкций.

E-mail: nauka.07@mail.ru

Петрова Виктория Алексеевна

Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет, г. Москва, Россия, аспирантка кафедры железобетонных и каменных конструкций.

E-mail: visiren@mail.ru

Information about authors:

Istomin Andrey D.

Moscow State University of Civil Engineering, Moscow, Russia, candidate of technical sciences, associate professor of the department «Reinforced concrete and stone structures».

E-mail: nauka.07@mail.ru

Petrova Victoria A.

Moscow State University of Civil Engineering, Moscow, Russia, graduate student of the department «Reinforce concrete and stone structures».

E-mail: visiren@mail.ru