

УДК 624.071

© М. Г. Плюснин, старший преподаватель  
© С. В. Цыбакин, канд. техн. наук, доцент  
(Костромская государственная сельскохозяйственная академия, пос. Караваево, Костромская область, Россия)  
E-mail: apraiser3@yandex.ru, sv44kostroma@yandex.ru

DOI 10.23968/1999-5571-2023-20-2-38-43

© М. G. Plyusnin, senior lecturer  
© S. V. Tsybakin, PhD in Sci. Tech., Associate Professor  
(Kostroma State Agricultural Academy, Karavaevo, Kostroma region, Russia)  
E-mail: apraiser3@yandex.ru, sv44kostroma@yandex.ru

## АРМИРОВАНИЕ ВНЕЦЕНТРЕННО СЖАТЫХ ЭЛЕМЕНТОВ ЖЕЛЕЗОБЕТОННЫХ КОНСТРУКЦИЙ В УСЛОВИЯХ ВОЗДЕЙСТВИЯ ЗНАКОПЕРЕМЕННЫХ ТЕМПЕРАТУР

### REINFORCEMENT OF ECCENTRICALLY COMPRESSED ELEMENTS OF REINFORCED CONCRETE STRUCTURES UNDER THE INFLUENCE OF FREEZE-THAW TEMPERATURES

Рассмотрено влияние снижения начального модуля упругости бетона при воздействии циклов замораживания и оттаивания на уменьшение несущей способности внецентренно сжатых железобетонных элементов. Разработана инженерная методика определения процента армирования, позволяющая снизить влияние циклов замораживания и оттаивания на несущую способность элементов железобетонных конструкций при внецентренном сжатии.

*Ключевые слова:* деформационные характеристики бетона, надежность железобетонных конструкций, внецентренно сжатый железобетонный элемент, циклы замораживания и оттаивания.

The paper presents the study results regarding the influence of decrease in the concrete elasticity initial modulus under the influence of freezing and thawing cycles on decrease in the bearing capacity of eccentrically compressed reinforced concrete elements. There has been elaborated an engineering technique for determining the percentage of reinforcement that allows reducing the effect of freezing and thawing cycles on the bearing capacity of reinforced concrete structure elements under the influence of eccentric compression.

*Keywords:* deformation characteristics of concrete, reliability of reinforced concrete structures, eccentrically compressed reinforced concrete element, freezing and thawing cycles.

#### Введение

Исходя из географического расположения России, снижение несущей способности железобетонных конструкций часто происходит из-за деградации бетона под действием попеременного замораживания и оттаивания. В результате ряда исследований [1–13] установлено, что деградация бетона в результате циклов замораживания и оттаивания (ЦЗО) проявляется в изменении значений его прочностных и деформационных характеристик. Наиболее заметно снижаются значения прочности и модуля упругости бетона, а также накапливаются остаточные

деформации расширения бетона [12]. Как показано в работе [14], снижение модуля упругости бетона в результате ЦЗО уменьшает жесткость сечений железобетонных элементов, что приводит к снижению расчетной несущей способности при внецентренном сжатии в случае большой гибкости (сочетание малого процента продольного армирования и больших расчетных длин).

На рис. 1 представлены графики изменения несущей способности внецентренно сжатого железобетонного элемента прямоугольного сечения 40×40 см с процентом армирования  $\mu = 0,25\%$  и  $\mu = 3,00\%$  в ре-

зультате воздействия ЦЗО в зависимости от относительного эксцентриситета  $e_0/h_0$ , приведенные в работе [15]. Данные зависимости получены в результате численного эксперимента, методика которого приведена в статье [14]. Исходные данные для расчетов принимались в соответствии с результатами натурного эксперимента, описанного в работе [13], где количество ЦЗО принималось исходя из предполагаемого снижения прочности бетона при сжатии на 10 %. Указанное значение снижения прочности принято исходя из п. 5.2.4.3 ГОСТ 10060–2012, в соответствии с которым критерием морозостойкости является снижение нижней границы доверительного интервала прочности образцов после ЦЗО по сравнению с аналогичным показателем образцов после ЦЗО на 10 %. Фактическое снижение средней прочности при эксперименте составило 13,2 %, а прочности с обеспеченностью 95 % — 13,5 %. Среднее значение начального модуля упругости при этом снизилось на 16 %.

Наиболее заметно влияние гибкости на несущую способность при воздействии ЦЗО проявляется при малом проценте армирования (см. рис. 1, а). Снижение несущей способности составляет 17 и 26 % при  $l_0 = 3$  м и  $l_0 = 6$  м соответственно. Собственно, за счет гибкости снижение составило 2 и 11 %. В данном случае проявляется влияние снижения модуля упругости бетона при ЦЗО на гибкость колонны [15]. Увеличение продольного армирования приводит к снижению влияния модуля упругости бетона на общую жесткость сечения элемента и, соответственно, к меньшему влиянию ЦЗО на несущую способность внецентренно сжатых железобетонных элементов (рис. 1, б).

Таким образом, значение процента армирования должно определяться с учетом воздействия ЦЗО, а задачей настоящей работы является разработка рекомендаций по армированию внецентренно сжатых желе-

зобетонных элементов, эксплуатирующихся в условиях ЦЗО.

### Материалы и методы

Исходя из положений п. 8.1.15 СП 63.13330.2018 и в соответствии с выражениями (8.14), (8.15), приведенными в этом нормативном документе, выражение для коэффициента продольной гибкости можно представить как функцию продольной силы  $N$ , модуля упругости бетона  $E_b$ , процента армирования  $\mu$  и расчетной длины  $l_0$ :

$$\eta(N, E_b, \mu, l_0) = \frac{1}{1 - \frac{N}{N_{кр}(E_b, \mu, l_0)}}. \quad (1)$$

В выражении (1) критическая сила записана как функция модуля упругости бетона  $E_b$ , процента армирования  $\mu$  и расчетной длины  $l_0$ .

Тогда изменение коэффициента продольной гибкости при воздействии ЦЗО определяется следующим образом:

$$\begin{aligned} \Delta\eta(N, E_b, E_{b, ЦЗО}, \mu, l_0) &= \\ &= \eta(N, E_{b, ЦЗО}, \mu, l_0) - \eta(N, E_b, \mu, l_0), \end{aligned} \quad (2)$$

где  $E_{b, ЦЗО}$  и  $E_b$  — значения модуля упругости бетона после ЦЗО и до ЦЗО соответственно.

Далее, задавшись значением изменения коэффициента продольной гибкости, при котором не происходит существенного снижения несущей способности  $\Delta\eta_{гр}$ , можно составить уравнение

$$\Delta\eta(N, E_b, E_{b, ЦЗО}, \mu, l_0) = \Delta\eta_{гр}. \quad (3)$$

Решая это уравнение при фиксированных значениях  $N, E_b, E_{b, ЦЗО}, \mu$  относительно значения расчетной длины  $l_0$ , получим ее значение, при котором изменение коэффициента продольной гибкости в результате ЦЗО будет не более заданного. Также решение данного уравнения возможно относительно любой переменной, входящей в него. Для этого достаточно зафиксировать значения остальных переменных.

### Результаты

Уравнение (3) было решено численно относительно расчетной длины  $l_0$  при  $\Delta\eta_{гр} = 0,05$

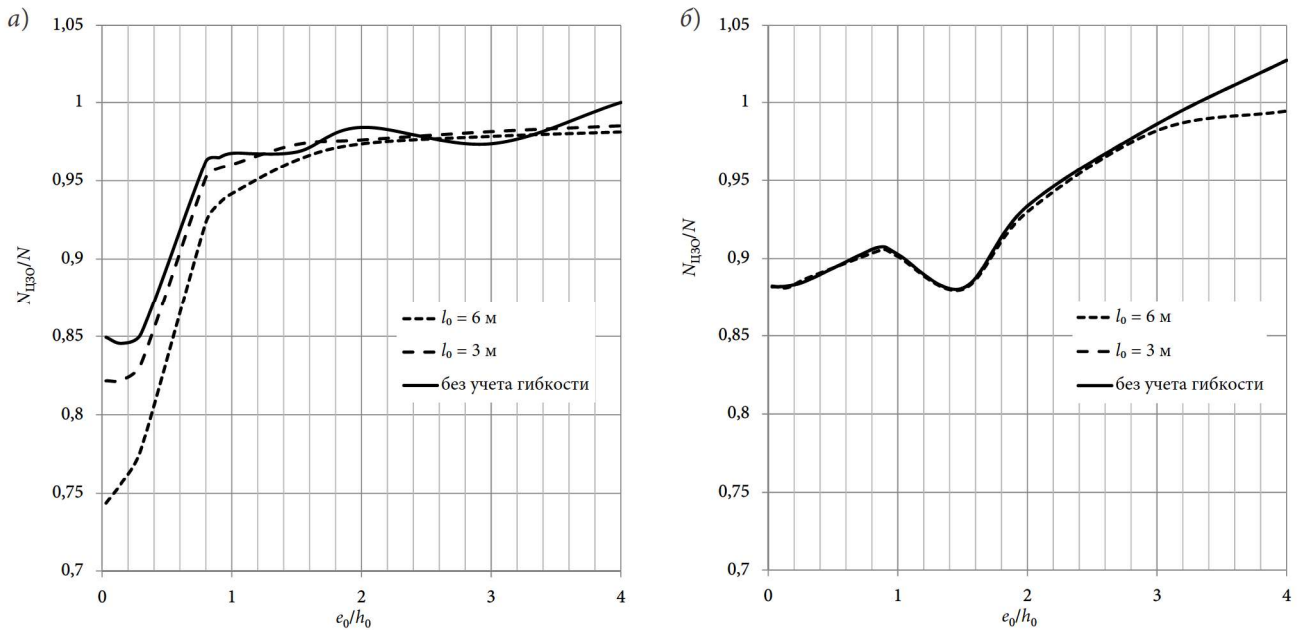


Рис. 1. Изменение расчетной несущей способности в результате ЦЗО при внецентренном сжатии в зависимости от относительного эксцентриситета с учетом гибкости для элемента сечением 40×40 см: а — при  $\mu = 0,25\%$ ; б — при  $\mu = 3,00\%$

и  $E_{b,ЦЗО} = 0,8E_b$ . То есть предполагалось, что при снижении начального модуля упругости бетона при воздействии ЦЗО снижение несущей способности за счет уменьшения жесткости не должно превышать 5%. При этом варьировались значения процента армирования  $\mu$  и продольной силы  $N$ .

Значение максимально возможной для данного сечения продольной силы без учета гибкости при значениях расчетных сопротивлений при сжатии бетона  $R_b$  и арматуры  $R_{sc}$  будет равно:

$$N_{\max} = R_b b h + R_{sc} \mu b h_0. \quad (4)$$

Тогда значения продольной силы в выражении (3) удобнее записать в долях от  $N_{\max}$ : в виде  $N/N_{\max}$ .

Далее была подобрана линейная функция, которая достаточно точно соответствует решению уравнения (3):

$$\mu = k l_0 / h - 4,48; k = 0,36 N / N_{\max} + 0,25. \quad (5)$$

На рис. 2 точками показаны результаты решения уравнения (4) в координатах  $l_0/h$  и  $\mu$  для  $N/N_{\max}$ , равного 0,5, 0,8 и 1,0. Прямые линии на данном рисунке являются графиками

выражений (5) для соответствующего отношения  $N/N_{\max}$ .

Выражение (5) позволяет с приемлемой для инженерных расчетов точностью определять минимальное армирование с учетом воздействия ЦЗО.

Таким образом, инженерная методика определения нижней границы значения процента продольного армирования внецентренно сжатого железобетонного элемента выглядит следующим образом:

1. Исходя из заданных геометрических характеристик элемента и результатов статического расчета определяются относительная продольная сила  $N/N_{\max}$  и гибкость  $l_0/h$ .

2. По выражению (5) определяется значение процента армирования  $\mu$ .

3. В случае  $\mu \leq \mu_{\min}$ , где  $\mu_{\min}$  — минимальный процент армирования по СП 63.13330.2018, принимается  $\mu = \mu_{\min}$ .

В случае конструктивной сложности или экономической нецелесообразности реализации полученных по формуле (5) больших

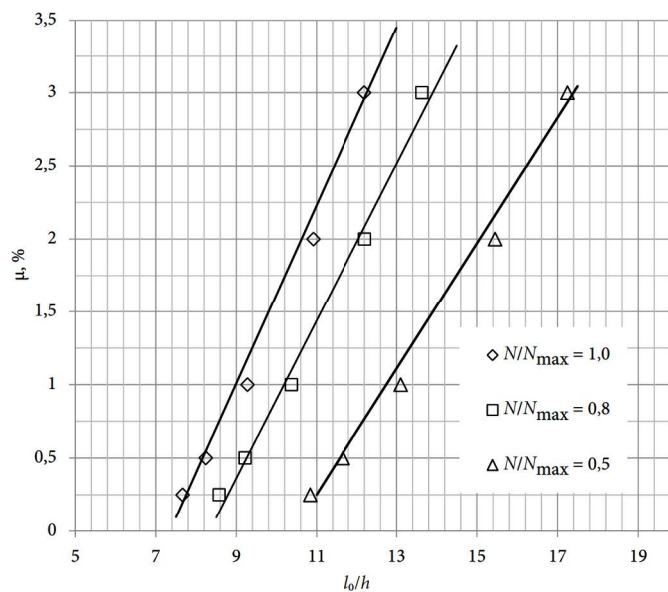


Рис. 2. Решение уравнения (4) — точки и соответствующие им прямые по выражению (5)

процентов армирования ( $\mu > 3,0 \dots 4,0$  %) необходима корректировка геометрии элемента.

### Выводы

Разработанная методика позволяет путем минимального количества вычислений подбирать армирование внецентренно сжатых железобетонных элементов, подвергающихся воздействию циклов замораживания и оттаивания. В большинстве случаев процент армирования с учетом ЦЗО будет больше минимального процента армирования по СП 63.13330.2018. С учетом выводов, полученных в работе [12], увеличение продольного армирования дополнительно приведет к снижению остаточных деформаций бетона после воздействия ЦЗО.

### Библиографический список

1. Пинус Б. И. Обеспечение долговечности железобетонных конструкций при низкотемпературных воздействиях: дис. ... д-ра техн. наук. Иркутск, 1986. 495 с.
2. Пинус Б. И., Пинус Ж. Н., Хомякова И. В. Изменение конструктивных свойств бетонов при охлаждении и замораживании // Вестник Иркутского гос. техн. ун-та. 2015. № 2 (97). С. 111–116.
3. Пинус Б. И., Семёнов В. В. О сопротивляемости деформированию бетона, подвергнутого циклическому замораживанию и оттаиванию // Бетон и железобетон. В кн.: Проблемы совершенствования строительных конструкций на Дальнем Востоке. Хабаровск, 1982. С. 101–106.
4. Duan A., Jin W., Qian J. Effect of freeze-thaw cycles on the stress-strain curves of unconfined and confined concrete // Materials and Structures. 2011. Vol. 44 (7). Pp. 1309–1324. DOI:10.1617/s11527-010-9702-9.
5. Guan Xiao, Jisheng Qiu, Huitao Song, Qing Qin, Chenghua Zhang. Stress-strain behaviour and acoustic emission characteristic of gangue concrete under axial compression in frost environment // Construction and Building Materials. 2019. Vol. 220. Pp. 476–488. URL: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.06.008>.
6. Zandi Hanjari K., Utgenannt P., Lundgren K. Experimental study of the material and bond properties of frost-damaged concrete // Cement and Concrete Research. 2011. Vol. 41 (3). Pp. 244–254.
7. Xiaolin Yang, Genhui Wang, Hongzhao Li, Jiang Fan. Numerical Simulation of Static Stress-Strain Relationship and Failure Mode for Freeze-Thaw Concrete // Advances in Civil Engineering. Vol. 2020 (2). 9 p. URL: <https://doi.org/10.1155/2020/1921598>.
8. Xiaolin Yang, Genhui Wang, Shiwu Gao, Min Song, Anqi Wang. Equation for the Degradation of Uniaxial Compression Stress of Concrete due to Freeze-Thaw Damage // Advances in Materials Science and Engineering. Vol. 2019 (3). 8 p. URL: <https://doi.org/10.1155/2019/8603065>.
9. Hasan M., Okuyama H., Sato Ya., Ueda T. Stress-strain model of concrete damaged by freezing and thawing

cycles // *Journal of Advanced Concrete Technology*. 2004. Vol. 2 (1). Pp. 89–99.

10. Sun Ming, Xin Dabo, Zou Chaoying. Damage evolution and plasticity development of concrete materials subjected to freeze-thaw during the load process // *Mechanics of Materials*. 2019. Vol. 139 (8). URL: <https://doi.org/10.1016/j.mechmat.2019.103192>.

11. Zhang Xuhui, Wand Lei, Zhang Jianren. Mechanical behavior and chloride penetration of high strength concrete under freeze-thaw attack // *Cold Regions Science and Technology*. 2017. Vol. 142. Pp. 17–24. URL: <https://doi.org/10.1016/j.coldregions.2017.07.004>.

12. Истомин А. Д., Петрова В. А. Остаточные деформации бетона железобетонных элементов при циклическом замораживании и оттаивании // *Строительство и реконструкция*. 2022. № 3. С. 23–31. URL: <https://doi.org/10.33979/2073-7416-2022-101-3-23-31>.

13. Попов В. М., Плюснин М. Г. Экспериментальное исследование диаграмм  $\sigma - \epsilon$  бетона при одноосном сжатии и влияния на их форму циклов замораживания и оттаивания // *Вестник гражданских инженеров*. 2020. № 4 (81). С. 80–88.

14. Плюснин М. Г. Оценка обеспеченности результатов расчетов несущей способности по нормальному сечению внецентренно сжатых железобетонных элементов с использованием нелинейной деформационной модели при действии циклов замораживания и оттаивания // *Вестник гражданских инженеров*. 2021. № 2 (85). С. 57–67.

15. Плюснин М. Г. Влияние циклов замораживания и оттаивания на несущую способность внецентренно сжатых элементов железобетонных конструкций // *Вестник гражданских инженеров*. 2022. № 2 (91). С. 30–35.

## References

1. Pinus B. I. *Obespechenie dolgovechnosti zhelezobetonnykh konstruksiy pri nizkotemperaturnykh vozdeystviyakh*. Diss. dokt. tekhn. nauk [Ensuring the durability of reinforced concrete structures under low-temperature influences. Dr. Sci. Tech. diss.]. Irkutsk, 1986, 495 p.

2. Pinus B. I., Pinus Zh. N., Khomyakova I. V. *Izmenenie konstruktivnykh svoystv betonov pri okhlazhdenii i zamorazhivanii* [Variation of structural properties of concretes during cooling and freezing]. *Vestnik Irkutskogo gos. tekhn. universiteta – Bulletin of Irkutsk State Technical University*, 2015, no. 2 (97), pp. 111–116.

3. Pinus B. I., Semyonov V. V. *O soprotivlyaemosti deformirovaniyu betona, podvergnutogo tsiklicheskomu zamorazhivaniyu i ottaivaniyu* [On resistance to deformation of concrete subjected to cyclic freezing and thawing]. *Coll. of works «Beton i zhelezobeton. Problemy*

*sovershenstvovaniya stroitel'nykh konstruksiy na dal'nem vostokey»* [In: “Concrete and reinforced concrete. Problems of improving building structures in the Far East”]. Khabarovsk, 1982, pp. 101–106.

4. Duan A., Jin W., Qian J. Effect of freeze-thaw cycles on the stress-strain curves of unconfined and confined concrete. *Materials and Structures*, 2011, vol. 44 (7), pp. 1309–1324. DOI: 10.1617/s11527-010-9702-9

5. Guan Xiao, Jisheng Qiu, Huitao Song, Qing Qin, Chenghua Zhang. Stress-strain behaviour and acoustic emission characteristic of gangue concrete under axial compression in frost environment. *Construction and Building Materials*, 2019, vol. 220, pp. 476–488. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.06.008>

6. Zandi Hanjari K., Utgenannt P., Lundgren K. Experimental study of the material and bond properties of frost-damaged concrete. *Cement and Concrete Research*, 2011, vol. 41 (3), pp. 244–254.

7. Xiaolin Yang, Genhui Wang, Hongzhao Li, Jiang Fan. Numerical simulation of static stress-strain relationship and failure mode for freeze-thaw concrete. *Advances in Civil Engineering*, 2020, vol. (2), 9 p. DOI: <https://doi.org/10.1155/2020/1921598>

8. Xiaolin Yang, Genhui Wang, Shiwu Gao, Min Song, Anqi Wang. Equation for the degradation of uniaxial compression stress of concrete due to freeze-thaw damage. *Advances in Materials Science and Engineering*, 2019, vol. 3, 8 p. DOI: <https://doi.org/10.1155/2019/8603065>

9. Hasan M., Okuyama H., Sato Ya., Ueda T. Stress-strain model of concrete damaged by freezing and thawing cycles. *Journal of Advanced Concrete Technology*, 2004, vol. 2 (1), pp. 89–99.

10. Sun Ming, Xin Dabo, Zou Chaoying. Damage evolution and plasticity development of concrete materials subjected to freeze-thaw during the load process. *Mechanics of Materials*, 2019, vol. 139 (8). DOI: <https://doi.org/10.1016/j.mechmat.2019.103192>

11. Zhang Xuhui, Wand Lei, Zhang Jianren. Mechanical behavior and chloride penetration of high strength concrete under freeze-thaw attack. *Cold Regions Science and Technology*, 2017, vol. 142, pp. 17–24. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.coldregions.2017.07.004>

12. Istomin A. D., Petrova V. A. *Ostatochnye deformatsii betona zhelezobetonnykh elementov pri tsiklicheskom zamorazhivanii i ottaivanii* [Residual deformations of concrete of reinforced concrete members under cyclic freezing and thawing]. *Stroitel'stvo i rekonstruktsiya – Construction and reconstruction*, 2022, no. 3, pp. 23–31. DOI: <https://doi.org/10.33979/2073-7416-2022-101-3-23-31>

13. Popov V. M., Plyusnin M. G. *Eksperimental'noe issledovanie diagramm  $\sigma - \epsilon$  betona pri odnoosnom szhatii i vliyaniya na ikh formu tsiklov zamorazhivaniya i ottaivaniya* [Experimental study of  $\sigma - \epsilon$  diagrams of concrete under uniaxial compression and the influence of

freezing and thawing cycles on the form of the diagrams]. *Vestnik grazhdanskikh inzhenerov – Bulletin of Civil Engineers*, 2020, no. 4 (81), pp. 80–88.

14. Plyusnin M. G. *Otsenka obespechennosti rezul'tatov raschetov nesushchey sposobnosti po normal'nomu secheniyu vnetsentrenno szhatykh zhelezobetonnykh elementov s ispol'zovaniem nelineynoy deformatsionnoy modeli pri deystvii tsiklov zamorazhivaniya i ottaivaniya* [Evaluation of the security of the calculation results of the load-bearing capacity for the normal cross-section of eccentrically compressed reinforced concrete elements

using a nonlinear deformation model under the action of freezing and thawing cycles]. *Vestnik grazhdanskikh inzhenerov – Bulletin of Civil Engineers*, 2021, no. 2 (85), pp. 57–67.

15. Plyusnin M. G. *Vliyanie tsiklov zamorazhivaniya i ottaivaniya na nesushchuyu sposobnost' vnetsentrenno szhatykh elementov zhelezobetonnykh konstruktsiy* [The effect of freezing and thawing cycles on the load-bearing capacity of eccentrically compressed elements of reinforced concrete structures]. *Vestnik grazhdanskikh inzhenerov – Bulletin of Civil Engineers*, 2022, no. 2 (91), pp. 30–35.