

УДК 624.072.2.012.35:624.142

А.Д. ИСТОМИН, М.В. КУДРЯВЦЕВ

**ВЛИЯНИЕ ПОДАТЛИВОСТИ ОПОР  
НА ТЕМПЕРАТУРНЫЕ УСИЛИЯ  
В СТАТИЧЕСКИ НЕОПРЕДЕЛИМОЙ  
ЖЕЛЕЗОБЕТОННОЙ БАЛКЕ**

Работа статически неопределимых железобетонных конструкций в суровых климатических условиях характеризуется наличием температурных усилий. При этом на величину этих усилий влияет изменение деформативно-прочностных характеристик бетона, трещинообразование, податливость опор. Были проведены экспериментальные исследования влияния степени податливости опор на температурные усилия в изгибаемых железобетонных элементах в условиях ограниченной подвижности опор. В результате исследований были получены экспериментальные данные по изменению температурных усилий в зависимости от величины горизонтальной податливости шарнирных опор. Предложена аналитическая зависимость по учету податливости опор и изменению жесткости железобетонной балки при совместном силовом и низкотемпературном воздействии.

**К л ю ч е в ы е с л о в а:** температура, деформации, перемещения, податливость опор, статическая неопределимость, балка, жесткость, усилия.

DOI 10.32683/0536-1052-2021-746-2-52-60

Работа статически неопределимых железобетонных конструкций в суровых климатических условиях характеризуется наличием усилий от температурного воздействия (кратко температурные усилия) [1–5]. При этом эти усилия могут в отличие от усилий от нагрузки либо увеличиваться, либо снижаться практически до нуля. Увеличение этих усилий вызвано повышением прочностных и деформативных характеристик бетона при замораживании, а снижение связано с трещинообразованием, ухудшением структуры бетона в результате циклического замораживания – оттаивания (ЦЗО), податливостью опор [6–11]. Действующие нормативные документы по расчету железобетонных конструкций ограничиваются общими рекомендациями необходимости учета изменения жесткости конструкций и температурных усилий при замораживании и ЦЗО. В результате из-за недостаточно обоснованного учета температурных усилий фактические нагрузки могут привести к превышению допустимого уровня напряжений по трещиностойкости и долговечности.

Наиболее часто встречающимся является случай, когда изгибаемый элемент защемлен или ограничен в осевых перемещениях по торцам. В первом случае при защемлении торца элемента с понижением температуры в нем возникает изгибающий момент и растягивающее усилие, а во втором случае – только растягивающее усилие. Для опытов принят наиболее простой случай сочетания температурного и силового воздействий: изгибаемый элемент ограничен по торцам на уровне опорных частей в осевых перемещениях. При

© Истомин А.Д., Кудрявцев М.В., 2021

этом варьировались степень горизонтальной податливости опор, уровень поперечной нагрузки, количество циклов замораживания и оттаивания.

Цель исследований – изучение влияния степени податливости опор на температурные усилия в изгибаемых железобетонных элементах в условиях ограниченной подвижности опор.

В качестве опытных образцов приняты железобетонные балки прямоугольного сечения размером 10×20 см и длиной 220 см. Балки армировались пространственным вязаным каркасом. Конструкция железобетонных балок показана на рис. 1.

В растянутой зоне каркас имел два стержня диаметром 12 мм из арматурной стали класса А400, а в сжатой зоне для крепления хомутов – два стержня Ø 5 мм из холоднотянутой арматурной проволоки класса В500. Хомуты изготавливались из арматурной проволоки Ø 5 мм класса В500. Процент армирования 1,29 %.

Состав бетона по весу 1 : 1,2 : 2,2 с W/C = 0,32. В состав бетонной смеси вводились суперпластификатор С-3 в количестве 0,7 % и кремнийорганическая жидкость ГКЖ-94 в количестве 0,15 % от массы цемента. Расход цемента на 1 м<sup>3</sup> бетонной смеси составил 500 кг. Морозостойкость бетона, определенная по ускоренной методике, F500.

Для определения прочностных и деформативных характеристик бетона опытных образцов одновременно с железобетонными балками изготавливались из той же бетонной смеси призмы размером 10 × 10 × 40 см.

Температурные деформации бетона определяли на бетонных призмах размером 10 × 10 × 40 см по методике, изложенной в [12–14]. Перед испытанием призмы водонасыщались при атмосферном давлении поэтапно в течение 7 сут. Температура в бетоне призмы определялась с помощью заложенных в образец термодатчиков. Измерение температурных деформаций производилось с помощью индикаторов часового типа с ценой деления 0,001 мм и кварцевых удлинителей. Испытания балок проводились в холодильной камере с рабочим объемом 12 м<sup>3</sup> и минимальной отрицательной температурой –50 °С.

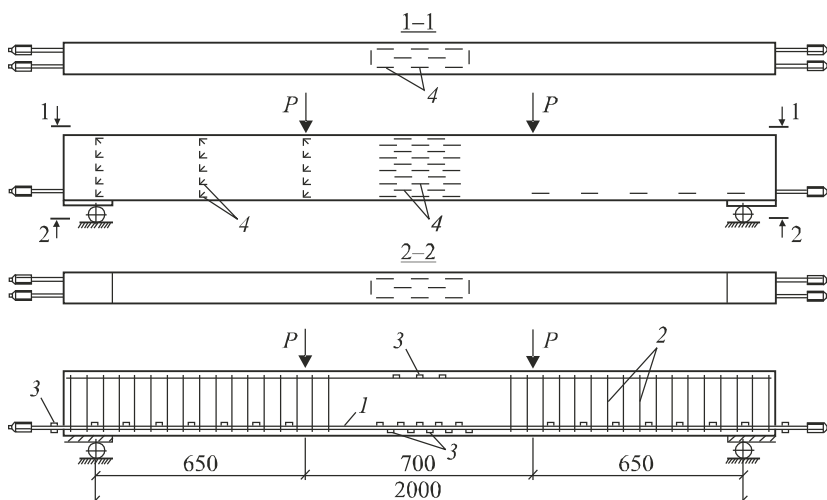


Рис. 1. Конструкция балки и схема расположения датчиков  
1 – рабочая арматура Ø 12 мм; 2 – хомуты Ø 5 мм; 3, 4 – датчики базой 20 и 50 мм

Балки устанавливались на две катковые опоры и нагружались двумя сосредоточенными поперечными силами до заданного уровня с помощью гидравлических домкратов по 5 тс каждый [15]. После этого осуществлялось закрепление пружин с помощью траверс и анкерных гаек, домкраты снимались. Балка выдерживалась под нагрузкой при температуре 15 °С в течение суток. Затем образец закреплялся от продольных смещений с помощью анкерных гаек и охлаждался до температуры –50 °С ступенями через 10 °С. На каждом этапе понижения температуры балка выдерживалась до полного выравнивания температуры по сечению и длине. После снятия показаний приборов, установленных на балке, осуществлялся следующий этап понижения температуры. После того как температура достигала –50 °С, исследуемая балка нагревалась до температуры +15 °С. Возраст образцов к моменту испытания составил 180 сут. Перед испытанием балки водонасыщались в течение 7 сут. В ходе эксперимента варьировались величина поперечного нагружения ( $P/P_{ult}$ ) и податливость опор ( $\Delta_T$ ).

Для расчета температурных усилий в статически неопределимых железобетонных конструкциях необходимо располагать данными о величине свободных температурных деформаций арматуры и бетона.

На рис. 2 представлены изменения свободных температурных деформаций бетона влажностью  $W = 5,0 \%$ , арматуры класса А400 и железобетонных балок при изменении температуры до –50 °С.

Из графиков видно, что при понижении температуры до –50 °С температурные деформации бетона изменяются по нелинейному закону, т.е. коэффициент температурных деформаций (КТД) не является постоянной величиной. При –50 °С его значение составило  $0,88 \cdot 10^{-5} 1/^\circ\text{C}$ . Температурные деформации арматуры незакрепленной железобетонной балки меньше температурных деформаций арматурной стали на 24 %. При этом значение КТД стали на всем участке изменения температуры остается постоянным и равно  $1,19 \cdot 10^{-5} 1/^\circ\text{C}$ . Деформативно-прочностные характеристики бетона и арматуры представлены в таблице.

Прочность бетона на растяжение, а также его модуль упругости возрастают с понижением температуры до –50 °С соответственно на 67 и 15 %.

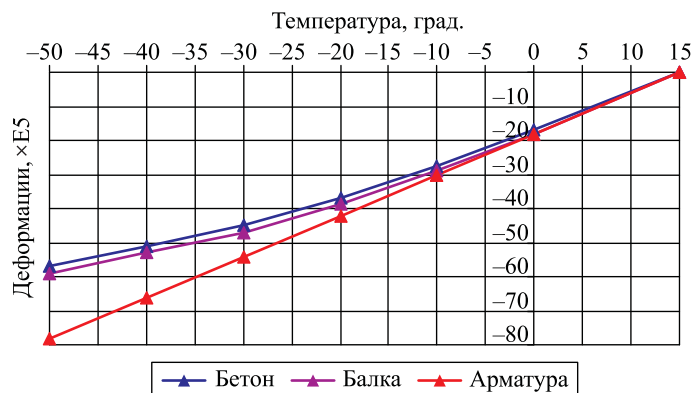


Рис. 2. Температурные деформации железобетонной балки, бетона и арматуры

**Характеристики бетона и арматуры**

Показатель	Температура, °С	
	15	-50
Бетон		
$R_{bt}$ , МПа	3,3	5,5
$R_{bt} / R_{bt,15}$	1,0	1,67
$E_{bt} \cdot 10^{-3}$ , МПа	33,4	38,4
$E_{bt} / E_{bt,15}$	1,0	1,15
Арматура		
$R_s$ , МПа	433	465
$R_s / R_{s,15}$	1,0	1,07
$E_s \cdot 10^{-3}$ , МПа	2,0	2,08
$E_s / E_{s,15}$	1,0	1,04

Примечание.  $W = 5,0 \%$ .

Изменение этих показателей при понижении температуры железобетонных элементов учитывают с помощью соответствующих коэффициентов условий работы бетона [15–17]. Прочность и модуль упругости арматуры возрастают с понижением температуры до  $-50 \text{ }^\circ\text{C}$  соответственно на 7 и 4 %. Изменение этих показателей при понижении температуры рекомендуется учитывать в соответствии с предложениями [13]:

$$R_{s,T} = R_s + 9,53 \cdot 10^{-3} (20 - T)^2, \tag{1}$$

$$E_{s,T} = E_s (1 + 9,3 \cdot 10^{-4} (20 - T)), \tag{2}$$

где  $R_s, E_s$  – соответственно прочность и модуль упругости арматуры в нормальных условиях;

$T$  – отрицательная температура,  $^\circ\text{C}$ .

На рис. 3 представлены температурные усилия, возникающие в статически неопределимой балке при различном начальном поперечном нагружении в зависимости от относительной податливости опор ( $\Delta_{sup} / \Delta_T$ ).

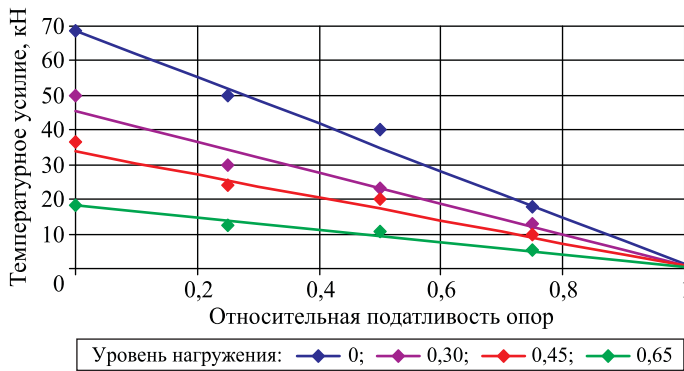


Рис. 3. Температурные усилия в статически неопределимой балке

При отсутствии податливости опор температурное растягивающее усилие в железобетонных балках уменьшается при уровне поперечного нагружения  $P/P_{ult} = 0,3; 0,45; 0,65$  соответственно на 32, 43, 74 %. При податливости опор 75 % температурное усилие снижается в среднем для всех уровней поперечного нагружения на 74 %.

Для сопоставления с опытными данными на рис. 3 представлены графики изменения температурного растягивающего усилия в балке, полученные расчетным путем. Расчет усилий основывался на решении уравнения совместности температурно-силовых деформаций балки и опор, через которые передается растягивающее усилие на стенд [18–20]

$$\Delta_T - \Delta_{sup} = \Delta_N, \quad (3)$$

где  $\Delta_T$  – свободные температурные перемещения балки на уровне опор;

$\Delta_{sup}$  – перемещения узлов заделки арматурных выпусков (опор);

$\Delta_N$  – перемещение балки от температурного усилия на уровне опор.

Из уравнения (3) получаем выражение для определения температурного растягивающего усилия

$$N_T = (\Delta_T - \Delta_{sup}) / \left( \frac{Le_0^2}{D} + \frac{L}{C} \right), \quad (4)$$

где  $L$  – длина балки;

$e_0$  – эксцентриситет растягивающего температурного усилия относительно центра тяжести приведенного сечения;

$D$  – изгибная жесткость балки в зоне чистого изгиба;

$C$  – осевая жесткость балки в зоне чистого изгиба.

Остальные обозначения приведены в формуле (3).

Расчет статически неопределимых железобетонных конструкций производится методом последовательных приближений с принятием действительной жесткости сечений. Жесткость является переменной величиной, которая зависит от напряженного состояния конструкции. Таким образом, жесткость железобетонного элемента и температурное усилие в нем оказываются взаимозависимыми. Число последовательных приближений можно уменьшить, если первоначально задаться жесткостью более близкой к действительной жесткости при соответствующей внешней нагрузке и температурной реакции. В связи с этим была произведена аппроксимация полученных опытных данных изменения температурной реакции в зависимости от уровня поперечного нагружения и податливости опор. В результате получена следующая эмпирическая зависимость

$$N_T = (1 - 1,13P/P_{ult})(1 - 0,978\Delta_{sup}/\Delta_T)N_{T,0}, \quad (5)$$

где  $P/P_{ult}$  – уровень поперечного силового нагружения;

$\Delta_{sup}/\Delta_T$  – относительная податливость опор;

$N_{T,0}$  – температурное усилие, возникающее при температуре  $-50^\circ\text{C}$  при

$\Delta_{sup} = 0, P/P_{ult} = 0$  и определяемое по методике [15].

**Заключение.** Исследования показали, что температурные деформации арматуры незакрепленной балки на 26 % меньше деформаций арматурной стали, т.е. необходимо учитывать усилия, возникающие из-за разности КТД

бетона и арматуры. Прочность на растяжение водонасыщенного бетона при температуре  $-50\text{ }^{\circ}\text{C}$  увеличивается на 67 %, модуль упругости – на 15 %. Прочность и модуль упругости арматуры класса А400 возрастают с понижением температуры до  $-50\text{ }^{\circ}\text{C}$  соответственно на 7 и 4 %.

При отсутствии смещения опор температурная реакция в статически неопределимой железобетонной балке уменьшается на 74 % при увеличении уровня поперечного нагружения до 0,65 от предельной нагрузки. Смещение опор до 75 % от температурных перемещений свободного от закреплений элемента приводит к уменьшению температурных усилий в среднем на 74 % независимо от уровня поперечного нагружения.

Таким образом, результаты исследований показали, что податливость опорных узлов статически неопределимых железобетонных конструкций приводит к значительному снижению температурных реакций.

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Шапиро Г.И., Коровкин В.С. К вопросу о напряженно-деформированном состоянии жилых и общественных зданий при температурных воздействиях // Промышленное и гражданское строительство. 2008. № 12. С. 5–7.
2. Кабанцев О.В., Тамразян А.Г. Учет изменений расчетной схемы при анализе работы конструкции // Инженерно-строительный журнал. 2014. № 5. С. 15–26.
3. Попов В.М., Плюснин М.Г. Оценка несущей способности железобетонных конструкций в естественных условиях холодного климата // Вестник гражданских инженеров. 2014. № 2. С. 42–47.
4. Qin X.-C., Meng S.-P., Cao D.-F., Tu Y.-M., Sabourova N., Grip N., Ohlsson U., Blanksvärd T., Sas G., Elfgrén L. Evaluation of freeze-thaw damage on concrete material and prestressed concrete specimens // Construction and Building Materials. 2016. Vol. 125. P. 892–904.
5. Mahin A., Matsunaga E. Analysis of reinforced and prestressed concrete LNG offshore structure 12 annual offshore Technology Conference. Houston, 1983. Vol. 3. P. 429–438.
6. Истомин А.Д., Петрова В.А. Напряженно-деформированное состояние статически неопределимых балок в условиях отрицательных температур // Строительство и реконструкция. 2019. № 1. С. 3–9.
7. Тамразян А.Г. Бетон и железобетон: проблемы и перспективы // Промышленное и гражданское строительство. 2014. № 8. С. 30–33.
8. Истомин А.Д., Александров Е.Н., Огуцова 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.
9. Klamer E.L., Hordijk D.A., Kleinman C.S. Debonding of cfrp laminates externally bonded to concrete specimens at low and high temperatures // Third International Conference on FRP Composites in Civil Engineering (CICE 2006) December 13–15 2006. Miami, Florida, USA, 2006.
10. Niu H., Wang Y., Zhang X., Yin X. Compressive strength study on the freeze-thaw resistance of recycled aggregate concrete members // The Open Civil Engineering Journal. 2017. Vol. 11. P. 270–280.
11. Li J.Y., Peng X.P., Deng Z.G. et al. Quantitative design on the frost-resistance of concrete // Concrete. 2000. Vol. 9. P. 61–65.
12. Москвин В.М., Капкин М.М., Савицкий А.Н., Ярмаковский В.Н. Бетон для строительства в суровых климатических условиях. Л.: Стройиздат, 1973. 172 с.

13. Дурчева В.Н., Майорова М.А. Тензометрические измерения свободных деформаций бетона плотин // Гидротехническое строительство. 2002. № 11. С. 6–9.
14. Коваль С.Б., Молодцов М.В. Температурные деформации бетона // Вестник ЮУрГУ. 2012. № 38. С. 23–25.
15. Истомин А.Д., Кудрявцев А.В. Работа статически неопределимых железобетонных элементов в условиях отрицательных температур // Промышленное и гражданское строительство. 2016. № 7. С. 51–55.
16. Пинус Б.И., Пинус Ж.Н., Хомякова И.В. Изменение конструктивных свойств бетонов при охлаждении и замораживании // Вестник ИГТУ. 2015. № 2. С. 111–116.
17. Милованов А.Ф., Самойленко В.Н. Учет воздействия низких температур при расчете конструкций // Бетон и железобетон. 1980. № 3. С. 25–26.
18. Мешков В.З. Особенности работы стержневой горячекатаной арматуры в железобетонных конструкциях при низких температурах: Дис. ... канд. техн. наук. М., 1975. 229 с.
19. Ржаницын А.Р. Строительная механика. М.: Высш. шк., 1982. 400 с.
20. Истомин А.Д., Истомин А.С. Температурные усилия в статически неопределимом железобетонном брусе при его замораживании до  $-50^{\circ}\text{C}$  // Научное обозрение. 2015. № 24. С. 88–91.

**Истомин Андрей Дмитриевич**, канд. техн. наук, доц.; E-mail: nauka.07@mail.ru  
Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет

**Кудрявцев Максим Владимирович**, магистр; E-mail: k.m.v.29.12.96@yandex.ru  
Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет

Получено 19.01.2021

**Istomin Andrey Dmitrievich**, PhD, Ass. Professor; E-mail: nauka.07@mail.ru

National Research Moscow State University of Civil Engineering, Russia

**Kudryavtsev Maksim Vladimirovich**, MSc; E-mail: k.m.v.29.12.96@yandex.ru

National Research Moscow State University of Civil Engineering, Russia

## **INFLUENCE OF THE SUPPORTS PLIABILITY ON THE TEMPERATURE FORCES IN A STATICALLY UNDETECTABLE REINFORCED CONCRETE BEAM**

The operation of statically undetectable reinforced concrete structures in harsh climatic conditions is characterized by the presence of temperature forces. The temperature of effort influenced by changes in the deformation-strength characteristics of concrete cracking, yielding of supports. In this regard, experimental studies were conducted on the influence of the degree of pliability of the supports on the temperature forces in the bent reinforced concrete elements under conditions of limited mobility of the supports. As a result of the conducted studies, experimental data were obtained on the change in temperature forces depending on the value of the horizontal pliability of the hinge supports. An analytical relationship is proposed to take into account the flexibility of the supports and the change in the rigidity of a reinforced concrete beam under combined force and low-temperature action.

**Keywords:** temperature, deformation, moving, support pliability, statically indeterminacy, beam, stiffen, efforts.



REFERENCES

1. *Shapiro G.I., Korovkin V.S.* К вопросу о напряженно-деформированном состоянии зhylykh i obschshestvennykh zdaniy pri temperaturnykh vozdeystviyakh [On the question of the stress-strain state of residential and public buildings under temperature influences]. *Promyshlennoye i grazhdanskoye stroitel'stvo* [Industrial and civil construction]. 2008. No. 12. Pp. 5–7. (in Russian)
2. *Kabantsev O.V., Tamrazyan A.G.* Uchet izmeneniy raschetnoy skhemy pri analize raboty konstruksii [Taking into account changes in the design model when analyzing the work of the structure]. *Inzhenerno-stroitel'nyy zhurnal* [Engineering and construction journal]. 2014. No. 5. Pp. 15–26. (in Russian)
3. *Popov V.M., Plyusnin M.G.* Otsenka nesushchey sposobnosti zhelezobetonnykh konstruksiy v estestvennykh usloviyakh kholodnogo klimata [Assessment of the bearing capacity of reinforced concrete structures in natural conditions of a cold climate]. *Vestnik grazhdanskikh inzhenerov* [Bulletin of Civil Engineers]. 2014. No. 2. Pp. 42–47. (in Russian)
4. *Qin X.-C., Meng S.-P., Cao D.-F., Tu Y.-M., Sabourova N., Grip N., Ohlsson U., Blanksvärd T., Sas G., Elfgrén L.* Evaluation of freeze-thaw damage on concrete material and prestressed concrete specimens. *Construction and Building Materials*. 2016. Vol. 125. Pp. 892–904.
5. *Mahin A., Matsunaga E.* Analysis of reinforced and prestressed concrete LNG offshore structure 12 annual offshore Technology Conference. Houston, 1983. Vol. 3. Pp. 429–438.
6. *Istomin A.D., Petrova V.A.* Napryazhenno-deformirovannoye sostoyaniye staticheski neopredelimykh balok v usloviyakh otritsatel'nykh temperatur [Stress-strain state of statically indeterminate beams in conditions of negative temperatures]. *Stroitel'stvo i rekonstruktsiya* [Construction and reconstruction]. 2019. No. 1. Pp. 3–9. (in Russian)
7. *Tamrazyan A.G.* Beton i zhelezobeton: problemy i perspektivy [Concrete and reinforced concrete: problems and prospects]. *Promyshlennoye i grazhdanskoye stroitel'stvo* [Industrial and civil construction]. 2014. No. 8. Pp. 30–33. (in Russian)
8. *Istomin A.D., Aleksandrov E.N., Ogurtsova L.P.* Vliyanie sposoba vodonasyshtcheniya betona i otritsatel'noy temperatury na ego deformativno-prochnostnye kharakteristiki [Influence of the method of water saturation of concrete and negative temperature on its deformation and strength characteristics]. *Nauka i tekhnika v dorozhnoy otrasli* [Science and technology in the road industry]. 2018. No. 4. Pp. 40–42. (in Russian)
9. *Klamer E.L., Hordijk D.A., Kleinman C.S.* Debonding of cfrp laminates externally bonded to concrete specimens at low and high temperatures. *Third International Conference on FRP Composites in Civil Engineering (CICE 2006)* December 13–15 2006. Miami, Florida, USA, 2006.
10. *Niu H., Wang Y., Zhang X., Yin X.* Compressive strength study on the freeze-thaw resistance of recycled aggregate concrete members. *The Open Civil Engineering Journal*. 2017. Vol. 11. Pp. 270–280.
11. *Li J.Y., Peng X.P., Deng Z.G. et al.* Quantitative design on the frost-resistance of concrete. *Concrete*. 2000. Vol. 9. Pp. 61–65.
12. *Moskvin V.M., Kapkin M.M., Savitskiy A.N., Yarmakovskiy V.N.* Beton dlya stroitel'stva v surovyykh klimaticheskikh usloviyakh [Concrete for construction in harsh climatic conditions]. Leningrad, Stroyizdat, 1973. 172 p. (in Russian)
13. *Durcheva V.N., Mayorova M.A.* Tenzometricheskiye izmereniya svobodnykh deformatsiy betona plotin [Strain gauge measurements of free deformations of concrete in dams]. *Gidrotekhnicheskoye stroitel'stvo* [Hydraulic engineering]. 2002. No. 11. Pp. 6–9. (in Russian)



14. *Koval S.B., Molodtsov M.V.* Temperaturnye deformatsii betona [Thermal deformations of concrete]. Vestnik YuUrGU [Papers of the YuUrGU]. 2012. No. 38. Pp. 23–25. (in Russian)
15. *Istomin A.D., Kudryavtsev A.V.* Rabota staticheski neopredelimykh zhelezobetonnykh elementov v usloviyakh otritsatel'nykh temperatur [Work of statically indeterminate reinforced concrete elements in conditions of negative temperatures]. Promyshlennoye i grazhdanskoye stroitel'stvo [Industrial and civil construction]. 2016. No. 7. Pp. 51–55. (in Russian)
16. *Pinus B.I., Pinus Zh.N., Homyakova I.V.* Izmeneniye konstruktivnykh svoystv betonov pri okhlazhdenii i zamorazhivanii [Changes in the structural properties of concrete during cooling and freezing]. Vestnik IGTU [Papers of the ISTU]. 2015. No. 2. Pp. 111–116. (in Russian)
17. *Milovanov A.F., Samoilenko V.N.* Uchet vozdeystviya nizkikh temperatur pri raschete konstruktsey [Taking into account the effect of low temperatures in the design of structures]. Beton i zhelezobeton [Concrete and reinforced concrete]. 1980. No. 3. Pp. 25–26. (in Russian)
18. *Meshkov V.Z.* Osobennosti raboty sterzhnevoy goryachekatanoy armatury v zhelezobetonnykh konstruktseyakh pri nizkikh temperaturakh: dis. ... kand. tekhn. nauk [Features of the operation of hot-rolled bar reinforcement in reinforced concrete structures at low temperatures: candidate's thesis]. Moscow, 1975. 229 p. (in Russian)
19. *Rzhanitsyn A.R.* Stroitel'naya mekhanika [Structural mechanics]. Moscow, 1982. 400 p. (in Russian)
20. *Istomin A.D., Istomin A.S.* Temperaturnye usiliya v staticheski neopredelimom zhelezobetonnom bruse pri ego zamorazhivanii do  $-50\text{ }^{\circ}\text{C}$  [Temperature forces in a statically indeterminate reinforced concrete beam when it is frozen to  $-50\text{ }^{\circ}\text{C}$ ]. Nauchnoye obozreniye [Scientific Review]. 2015. No. 24. Pp. 88–91. (in Russian)

---