

ВЛИЯНИЕ ПЕРЕМЕННОЙ ТЕМПЕРАТУРЫ НА НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОЕ СОСТОЯНИЕ КАРКАСА В РАСЧЕТАХ НА ПРОГРЕССИРУЮЩЕЕ ОБРУШЕНИЕ

INFLUENCE OF VARIABLE TEMPERATURE ON THE STRESS-STRAIN STATE OF THE FRAME IN CALCULATIONS FOR PROGRESSIVE COLLAPSE

На примере пространственной стержневой системы, рассчитанной в ПК «ЛИРА», проведен сравнительный анализ напряженно-деформированного состояния для стационарных и циклических температурных воздействий. Установлено, что переменный температурный режим приводит к значительному перераспределению внутренних усилий и деформаций. В наиболее неблагоприятных случаях наблюдается увеличение прогибов и продольных усилий в колоннах более чем в два раза по сравнению со стационарным режимом. Показана необходимость учета нестационарности температурного воздействия для достоверной оценки устойчивости каркасов к прогрессирующему обрушению.

Ключевые слова: температурное воздействие, прогрессирующее обрушение, напряженно-деформированное состояние, каркасные здания.

Using the example of a spatial rod system calculated in the LIRA-CAD PC, a comparative analysis of the stress-strain state for stationary and cyclic temperature effects is carried out. It has been established that the variable temperature regime leads to a significant redistribution of internal forces and deformations. In the most unfavorable cases, there is an increase in deflections and longitudinal forces in the columns by more than two times compared with stationary mode. It is shown that it is necessary to take into account the unsteadiness of the temperature effect in order to reliably assess the stability of the frames to progressive collapse.

Keywords: temperature effects, progressive collapse, stress-strain state, frame buildings.

Введение

В современной практике проектирования зданий и сооружений повышенного уровня ответственности расчет на прогрессирующее (лавинообразное) обрушение является обязательным этапом обеспечения механической безопасности. Под прогрессирующим обрушением понимается цепной характер разрушения несущих конструкций, возникающий вследствие локального отказа одного или нескольких элементов, приводящий к непропорционально масштабному разрушению всего здания или его значительной части. Согласно действующим нормативным документам (СП 385.1325800.2018), при рас-

четах учитываются особые сочетания нагрузок, включающие силовые воздействия: постоянные и временные нагрузки, а также условные динамические воздействия, моделирующие внезапный отказ несущего элемента.

Однако анализ реальных техногенных аварий и катастроф последних десятилетий показывает, что во многих случаях обрушения происходят не только под действием гравитационных сил, но и при изменении температурного режима [1–4]. Пожары, техногенные взрывы с последующим тепловым воздействием, резкое охлаждение строительных конструкций при нарушении теплового

контура здания в зимний период — все эти факторы создают сложную картину температурного нагружения [5–8].

Как правило, в инженерной практике температурный режим принимается установившимся (стационарным). Расчет выполняется на линейное изменение температуры по сечению или на равномерный нагрев/охлаждение всего элемента. Тем не менее, процесс изменения температуры воздуха в реальных условиях имеет ярко выраженный нелинейный циклический характер. К таким случаям относятся:

1. Суточные и сезонные колебания температуры наружного воздуха, которые могут вызывать знакопеременные деформации в ограждающих и несущих конструкциях.

2. Аварийные сценарии, связанные с нарушением герметичности оболочки здания. Например, локальное разрушение стенового ограждения в зимний период приводит к мгновенному поступлению холодного воздуха в теплое помещение, что вызывает резкое неравномерное охлаждение колонн и перекрытий.

3. Технологические процессы с циклическим тепловыделением (цеха горячего проката, котельные, объекты энергетики).

Переменное (нестационарное) температурное воздействие принципиально отличается от стационарного. Оно способно вызывать волны напряжений и деформаций, которые могут суммироваться с напряжениями от внешней нагрузки. Более того, динамическая природа такого воздействия (изменение во времени), а также воздействие отрицательных температур могут приводить к эффектам накопления повреждений и снижению прочностных характеристик материала [9–12].

В контексте расчетов на прогрессирующее обрушение игнорирование нестационарной составляющей теплового удара может привести к существенному занижению реальных усилий в элементах каркаса, что ставит

под угрозу живучесть здания. Особенно это актуально для регионов с холодным климатом, где перепад температур между внутренним (+20 °С) и наружным воздухом (–30...40 °С) значителен и время развития аварии сопоставимо со временем промерзания конструкций.

В настоящей статье представлены материалы исследования влияния нестационарного температурного воздействия на напряженно-деформированное состояние каркаса в расчетах на прогрессирующее обрушение. Предмет исследования — напряженное состояние стержневой системы в условиях прогрессирующего обрушения и воздействия переменной температуры на стержни. Объект исследования — стержневая система в условиях прогрессирующего обрушения и воздействия переменной температуры на стержни.

Описание расчетной схемы и метода расчета

Рассматривается система перекрестных балок прямоугольного поперечного сечения, которая служит аутригерной несущей конструкцией перекрытия, опертой на колонны, и может располагаться на любом из этажей многоэтажного здания, а также в качестве перекрытия технологических помещений без опоры в промежуточных узлах для создания большей площади помещения. Соединение балок в местах их пересечения — жесткое. Опираемость балок на колонны принята шарнирно-подвижной (рис. 1). Размеры балочной клетки $L_1 \times L_2 = 9 \times 15$ м, где L_1 — длина балочной клетки в продольном направлении (в направлении оси y), L_2 — длина в поперечном направлении (в направлении оси x). Шаг балок в продольном и поперечном направлениях одинаковый, $l = 3$ м.

Сечения элементов балочной клетки приняты 40×20 мм, колонн — 30×30 мм.

В качестве материала конструкций принимается условный бетон марки В25. Физико-механические характеристики приня-

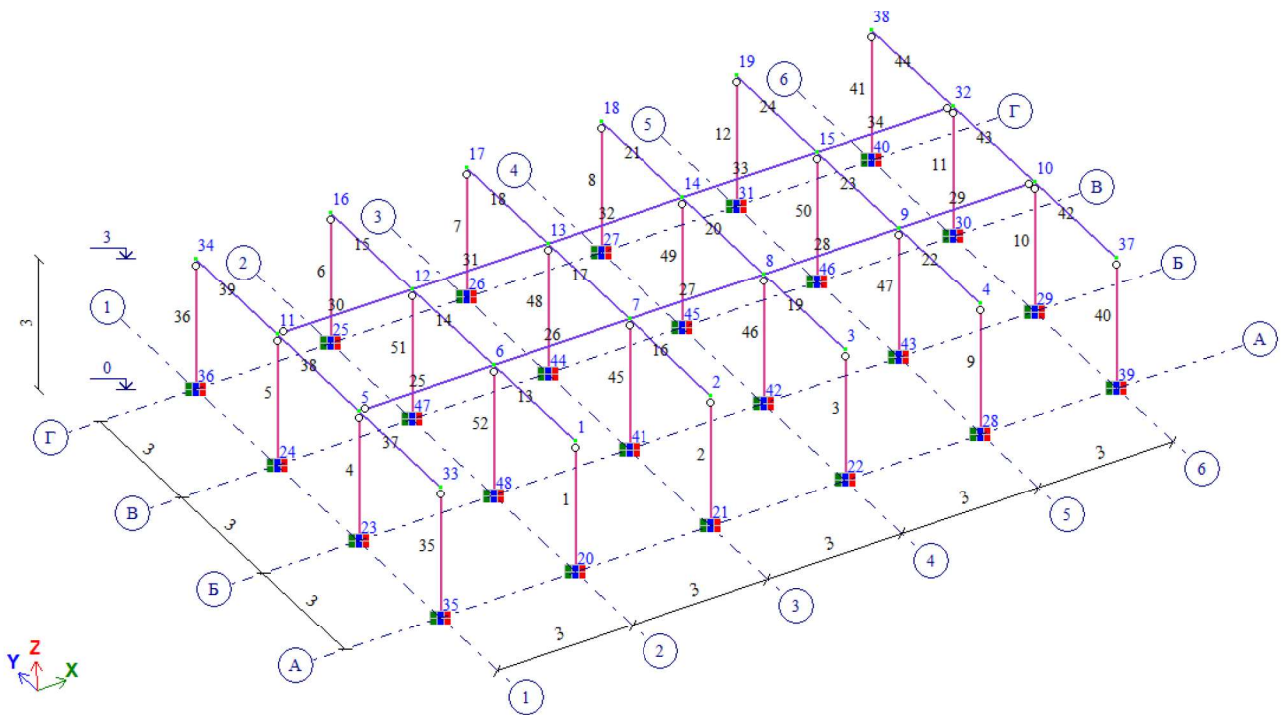


Рис. 1. Пространственная схема каркаса с нумерацией узлов и цветовым отображением типов элементов

того материала имеют следующие величины по СП 63.13330.2018: модуль упругости $E = 30\,000$ МПа, коэффициент линейного температурного расширения $\alpha = 10^{-5}$ 1/град, плотность $\rho = 2470$ кг/м³, коэффициент теплопроводности $\lambda = 1,86$ Вт/(м · °С), удельная теплоемкость $c = 0,92$ кДж/(кг · °С).

Нестационарное циклическое изменение температуры принято с законом изменения

$$T_1(t) = T \cos \frac{2\pi}{t_c} t. \quad (1)$$

Начальная температура цикла $T = 20$ °С, максимальное изменение температуры 40 °С, период цикла $t_c = 0,8$ ч. Такое изменение характерно для конструкций здания, эксплуатировавшегося в условиях положительных температур внутреннего воздуха, после обрушения и при дальнейшем воздействии отрицательных температур наружного воздуха вследствие нарушения целостности ограждающих конструкций (обрушение стены, перекрытия). При этом моделируется

сценарий, при котором начальная внутренняя температура здания составляет +20 °С, а наружная равна –20 °С. Помещение, в котором происходит обрушение колонны, охлаждается наружным воздухом до температуры –20 °С, максимальное изменение температуры помещения и граней конструкций при этом составляет 40 °С. Далее происходит нагрев помещения и конструкций до температуры +20 °С, максимальное изменение температуры также составляет 40 °С.

Нестационарный процесс моделируется с помощью поправочных коэффициентов $k_M(h, t_c)$ к опорным моментам при стационарном температурном воздействии, определенных на этапе анализа циклических режимов (табл. 1).

Расчет пространственной системы на прогрессирующее обрушение произведен в программно-вычислительном комплексе «ЛИРА-САПР» на основе метода конечных элементов с использованием КЭ простран-

Таблица 1

Значения коэффициентов k_M для максимальных моментов

											
$h, \text{см}$	$t_c, \text{ч}$	0,8	2,0	4,0	8,0	20,0	0,8	2,0	4,0	8,0	20,0
10		0,87	0,99	1,00	1,01	1,01	0,86	0,99	1,00	1,01	1,01
20		0,58	0,82	0,91	0,99	1,01	0,58	0,82	0,91	0,99	1,01
30		0,46	0,65	0,73	0,89	0,99	0,43	0,65	0,73	0,89	0,99
40		0,36	0,53	0,57	0,77	0,95	0,35	0,53	0,56	0,77	0,95
50		0,31	0,46	0,47	0,68	0,90	0,30	0,45	0,46	0,68	0,90

ственно-стержневого типа. Проверка расчетов осуществлена методом перемещений [13]. Постановка задачи — квазистатическая с применением коэффициента динамичности $K_d = 2$ к реакции удаленной опоры и поправочных коэффициентов к тепловому воздействию $k_M(h, t_c)$.

На первичную схему действовала только распределенная нагрузка на все элементы балочной клетки интенсивностью $q = 6 \text{ кН/м}$. Проводится статический расчет, определяются усилия в стержнях и выбирается ключевой элемент с максимальными усилиями — элемент 52 (см. рис. 1). На вторичную схему (после удаления опоры) в месте удаленной опоры была приложена ее реакция по первичной схеме с обратным знаком (согласно СП 385.1325800.2018, приложение Б), а также комбинации нагрузки в зависимости от температурного воздействия (рис. 2).

Результаты

В результате расчета на прогрессирующее обрушение были получены данные, которые сведены в табл. 2. Значения максимальных перемещений и усилий в зависимости от наличия теплового воздействия на колонны в сочетаниях нагрузок сравниваются в табл. 3.

Обозначим постоянную нагрузку как q_{const} (здесь $q_{\text{const}} = 6 \text{ кН/м}$), реакцию опоры при мгновенном удалении колонны как $q_{\text{мгн}}$ (здесь $q_{\text{мгн}} = 40 \text{ кН}$), температурную нагрузку на балки как $f_6(\Delta T)$, на колонны — $f_k(\Delta T)$.

При нагреве нижнего торца балки наблюдаются намного большие по сравнению с его охлаждением деформации и усилия. Если температурное воздействие стационарное и нагрев оказывается только на балки, то перемещения больше на 315 % по сравнению с режимом охлаждения, если нестационарное — на 55 %. При стационарном температурном режиме нагрева колонн и балок разница между перемещениями составляет 130 %, при этом сжимающие усилия на колонны возрастают более чем в два раза (на 107 %) по сравнению с их охлаждением. Если учитывать циклическое температурное воздействие, то разница между нагревом и охлаждением конструкций практически отсутствует и даже уменьшается на 3 % при нагреве, но усилия в колоннах возрастают на 51 %.

В схемах, когда происходит охлаждение нижней грани балок (РСН 1 и РСН 3), наблюдается увеличение прогибов в месте удаления колонны более чем в два раза и максимальных поперечных сил на 12 %, но изгибающие моменты уменьшаются на 19 % при учете нестационарного температурного воздействия с применением коэффициентов. При этом максимальные продольные усилия в колоннах больше на 18 % по сравнению со стационарным режимом. При увеличении времени цикла и уменьшении высоты сечения эти значения перемещений и поперечных сил будут уменьшаться и приходить

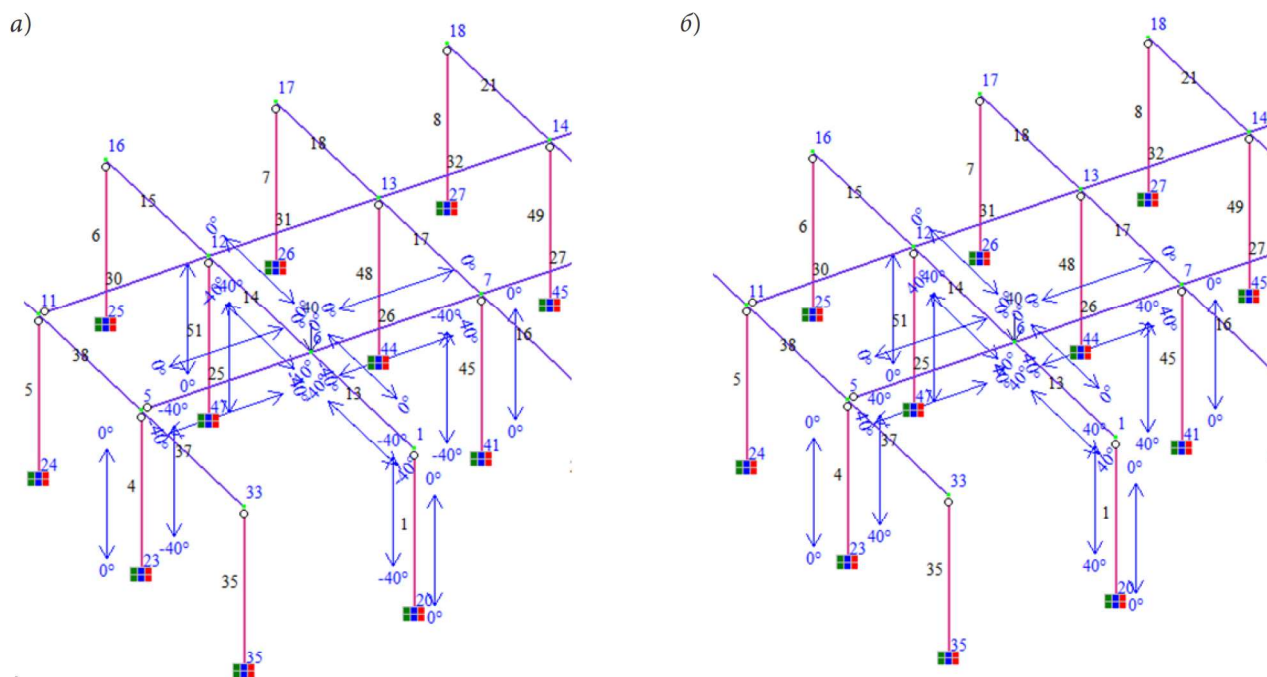


Рис. 2. Вторичная схема каркаса с температурным воздействием на грани элементов внутри помещения. Фрагмент схемы: а — охлаждение; б — нагрев

Таблица 2

Сводная таблица максимальных перемещений и усилий

№ РСН	Расчетные сочетания нагрузок (РСН)	Максимальные перемещения и усилия			
		$f_{\max}$, мм	$M_{y \max}$, кН · м	$Q_{\max}$, кН	$N_{\max}$, кН
Без теплового воздействия на колонны					
1	$q_{\text{const}} + q_{\text{мгн}} + f_6 (-40\text{ }^{\circ}\text{C})$	1,36	56,0	-28,7	-58,7
2	$q_{\text{const}} + q_{\text{мгн}} + f_6 (+40\text{ }^{\circ}\text{C})$	5,65 (+315 %)	-71,4 (+28 %)	-40,6 (-41 %)	-95,8 (+63 %)
3	$q_{\text{const}} + q_{\text{мгн}} + f_6 (-40\text{ }^{\circ}\text{C}) \cdot (k_M = 0,35)^*$	2,75	45,1	-32,2	-69,0
4	$q_{\text{const}} + q_{\text{мгн}} + f_6 (+40\text{ }^{\circ}\text{C}) \cdot (k_M = 0,35)^*$	4,25 (+55 %)	-48,8 (+8 %)	-36,5 (+13 %)	-82,8 (+20 %)
С тепловым воздействием на колонны					
5	$q_{\text{const}} + q_{\text{мгн}} + f_6 (-40\text{ }^{\circ}\text{C}) + f_{\kappa} (-40\text{ }^{\circ}\text{C})$	2,11	57,4	-28,9	-51,2
6	$q_{\text{const}} + q_{\text{мгн}} + f_6 (+40\text{ }^{\circ}\text{C}) + f_{\kappa} (+40\text{ }^{\circ}\text{C})$	4,86 (+130 %)	-74,4 (+30 %)	-41,2 (+43 %)	-106,0 (+107 %)
7	$q_{\text{const}} + q_{\text{мгн}} + f_6 (+40\text{ }^{\circ}\text{C}) \cdot (k_M = 0,35)^* + f_{\kappa} (-40\text{ }^{\circ}\text{C})$	3,56	46,3	-31,9	-61,5
8	$q_{\text{const}} + q_{\text{мгн}} + f_6 (+40\text{ }^{\circ}\text{C}) \cdot (k_M = 0,35)^* + f_{\kappa} (+40\text{ }^{\circ}\text{C})$	3,47 (-3 %)	-51,9 (+12 %)	-37,2 (+17 %)	-92,8 (+51 %)

Примечание. * См. табл. 1.

к значениям стационарного температурного воздействия, а значения изгибающих моментов — увеличиваться.

При нагреве нижней грани балки (РСН 2 и РСН 4) наблюдается уменьшение прогибов

на 25 %, максимальных поперечных сил на 10 % и изгибающих моментов на 32 % при учете нестационарного температурного воздействия с применением коэффициентов. При увеличении времени цикла и уменьше-

Таблица 3

Сравнительная таблица максимальных перемещений и усилий в зависимости от стационарности/нестационарности теплового воздействия

№ РСН	Максимальные перемещения и усилия							
	$f_{\max}$, мм	%	$M_{y \max}$, Н · м	%	$Q_{\max}$, кН	%	$N_{\max}$, кН	%
Без теплового воздействия на колонны								
1 3	<u>-1,36</u> -2,75	+102	<u>56,0</u> 45,1	-19	<u>-28,7</u> -32,2	+12	<u>-58,7</u> -69,0	+18
2 4	<u>-5,65</u> 4,25	-25	<u>-71,4</u> -48,8	-32	<u>-40,6</u> -36,5	-10	<u>-95,8</u> -82,8	-14
С тепловым воздействием на колонны								
5 7	<u>-2,11</u> -3,56	+69	<u>57,4</u> 46,3	-19	<u>-28,9</u> -31,9	+10	<u>-51,2</u> -61,5	+20
6 8	<u>-4,86</u> -3,47	-29	<u>-74,4</u> -51,9	-30	<u>-41,2</u> -37,2	-10	<u>-106</u> -92,8	-12

Примечание. В числителе указаны значения стационарного режима, в знаменателе — нестационарного.

нии высоты сечения эти значения будут увеличиваться и приходиться к значениям стационарного температурного воздействия.

В сценариях, когда происходит охлаждение колонн и охлаждение нижней грани балок (РСН 5 и РСН 7), наблюдается увеличение прогибов в месте удаления колонны на 69 % и максимальных поперечных сил на 10 %, но изгибающие моменты уменьшаются на 19 % при учете нестационарного температурного воздействия. Максимальные продольные усилия в колоннах больше на 20 % по сравнению со стационарным режимом.

При нагреве колонн и нижней грани балки (РСН 6 и РСН 8) наблюдаются похожие со сценариями РСН 1 и РСН 3 различия в значениях перемещений и усилий. Происходит уменьшение прогибов на 29 %, максимальных поперечных сил на 30 % и изгибающих моментов на 30 %, если учесть нестационарность температурного режима.

Закключение

Проведенное исследование демонстрирует значимое влияние переменных температурных воздействий на напряженно-деформированное состояние и устойчивость каркасных систем в условиях прогрессирующего обрушения.

Установлено, что циклический характер изменения температуры, моделирующий возможные аварийные ситуации с нарушением теплового контура, приводит к существенному перераспределению внутренних усилий и деформаций по сравнению со стационарным тепловым режимом. Неучет нестационарности процесса может приводить как к занижению, так и к завышению расчетных значений, при этом в наиболее неблагоприятных случаях прогибы и продольные усилия в колоннах могут возрастать более чем в два раза.

Использование поправочных коэффициентов $k_M(h, t_c)$ позволяет эффективно учитывать сложные тепловые процессы без проведения прямых динамических термостойкостных расчетов, что упрощает внедрение методики в практику проектирования.

Таким образом, для повышения достоверности расчетов на прогрессирующее обрушение зданий, особенно расположенных в регионах с суровым климатом или подверженных технологическим тепловым воздействиям, необходимо развитие и внедрение в нормативную базу методик, учитывающих нестационарные циклические температурные воздействия на элементы конструкции каркасов.

Библиографический список

1. Ужик Г. В. Прочность и пластичность металлов при низких температурах. М.: Изд-во АН СССР, 1957. 192 с.
2. Тавкин А. А. Основные причины аварий зданий и сооружений // Предотвращение аварий зданий и сооружений. 23.06.2009. URL: <http://www.pamag.ru/pressa/prichina-avarii> (дата обращения: 22.06.2024).
3. Аварии и катастрофы. Предупреждение и ликвидация последствий. Кн. 5 / под ред. В. А. Котляревского, А. В. Забегаяева. М.: АСВ, 2001. 415 с.
4. Леденёв В. В., Скряльов В. И. Аварии, разрушения и повреждения. Причины, последствия и предупреждения. Тамбов: Изд-во ТГТУ, 2017. 439 с.
5. Пегин П. А., Шульгин А. А., Павловец Н. В. Определение максимальных растягивающих и сжимающих напряжений статически неопределимых стержней при отнулевом цикле изменения температуры // БСТ: Бюллетень строительной техники. 2025. № 9 (1093). С. 26–30.
6. Пегин П. А., Шульгин А. А. Особенности расчета прогрессирующего обрушения каркасной схемы сооружения при таянии грунтов // БСТ: Бюллетень строительной техники. 2023. № 8 (1068). С. 12–14.
7. Истомин А. Д., Петрова В. А. Усилия в статически неопределимых железобетонных конструкциях при силовых и температурных воздействиях // Безопасность строительного фонда России. Проблемы и решения: материалы Междунар. академических чтений, Курск, 15 ноября 2019 г. Курск: Курский гос. ун-т, 2019. С. 60–68.
8. Истомин А. Д., Петрова В. А. Напряженно-деформированное состояние статически неопределимых балок в условиях отрицательных температур // Строительство и реконструкция. 2019. № 1 (81). С. 3–9.
9. Попов В. М., Плюснин М. Г., Белов В. В., Хегай О. Н. Влияние армирования изгибаемых железобетонных элементов на их несущую способность в условиях переменного замораживания и оттаивания // Вестник гражданских инженеров. 2023. № 4 (99). С. 32–39.
10. Попов В. М., Унжаков С. Н., Унжакова Л. В. Особенности работы железобетонных конструкций в условиях низких и знакопеременных температур // Строительство, дизайн, архитектура: проектные решения XXI века: сб. материалов междунар. науч. е-симпозиума. Москва, 27–28 декабря 2014 г. / под ред. И. К. Данилова. Краснодар: Международный центр научно-исследовательских проектов, 2015. С. 16–24.
11. Попов В. М., Плюснин М. Г., Белов В. В., Савин С. Н., Мерзлякова Е. В. Использование стале-

фибробетона для усиления изгибаемых железобетонных элементов при воздействии циклов замораживания и оттаивания // Вестник гражданских инженеров. 2023. № 6 (101). С. 23–30.

12. Попов В. М., Плюснин М. Г. Экспериментальное исследование диаграмм σ – ϵ бетона при одноосном сжатии и влияния на их форму циклов замораживания и оттаивания // Вестник гражданских инженеров. 2020. № 4 (81). С. 80–88.

13. Дарков А. В., Шапошников Н. Н. Строительная механика. 8-е изд., перераб. и доп. М.: Высшая школа, 1986. 606 с.

References

1. Uzhik G. V. *Prochnost' i plastichnost' metallov pri nizkikh temperaturakh* [Strength and plasticity of metals at low temperatures]. Moscow, Izd-vo AN SSSR Publ., 1957, 192 p.
2. Tavkin' A. A. *Osnovnye prichiny avariyy zdaniy i sooruzheniy. Predotvrashchenie avariyy zdaniy i sooruzheniy* [The main causes of accidents in buildings and structures. Prevention of buildings' and structures' accidents]. 23.06.2009. Available at: <http://www.pamag.ru/pressa/prichina-avarii> (accessed: 22.06.2024).
3. *Avarii i katastrofy. Preduprezhdenie i likvidatsiya posledstviy* [Accidents and catastrophes. Prevention and elimination of consequences]. Book 5. Ed. by. Kotlyarevskiy V. A., Zabegaev A. V. Moscow, ASV Publ., 2001, 415 p.
4. Ledenyov V. V., Skrylyov V. I. *Avarii, razrusheniya i povrezhdeniya. Prichiny, posledstviya i preduprezhdeniya* [Accidents, destruction and damage. Causes, consequences and prevention]. Tambov, Izd-vo TGTU, 2017, 439 p.
5. Pegin P. A., Shul'gin A. A., Pavlovets N. V. *Opredelenie maksimal'nykh rastyagivayushchikh i szhimayushchikh napryazheniy staticheski neopredelimykh stержney pri otnulevom tsikle izmeneniya temperatury* [Determination of maximum tensile and compressive stresses of statically indeterminate rods at a zero temperature change cycle]. *BST: Byulleten' stroitel'noy tekhniki – BST: Bulletin of Construction Machinery*, 2025, no. 9 (1093), pp. 26–30.
6. Pegin P. A., Shul'gin A. A. *Osobennosti rascheta progressiruyushchego obrusheniya karkasnoy skhemy sooruzheniya pri tayanii gruntov* [Peculiarities of calculation of progressive collapse of the structure frame scheme during soil melting]. *BST: Byulleten' stroitel'noy tekhniki – BST: Bulletin of Construction Machinery*, 2023, no. 8 (1068), pp. 12–14.
7. Istomin A. D., Petrova V. A. *Usiliya v staticheski neopredelimykh zhelezobetonnykh konstruktsiyakh pri silovykh i temperaturnykh vozdeystviyakh* [Forces in statically indeterminate reinforced concrete structures

under power and temperature impacts]. *Bezopasnost' stroitel'nogo fonda Rossii. Problemy i resheniya. Trudy Mezhdunar. akademicheskikh chteniy, Kursk, 15 noyabrya 2019 g.* [Safety of the Russian construction fund. Problems and solutions. Proceedings of the International academic readings, Kursk, November 15, 2019]. Kursk, Kurskiy gos. un-t, 2019, pp. 60–68.

8. Istomin A. D., Petrova V. A. *Napryazhenno-deformirovannoe sostoyanie staticheski neopredelimykh balok v usloviyakh otritsatel'nykh temperatur* [Stress-strain state of statically indeterminate beams under conditions of negative temperatures]. *Stroitel'stvo i rekonstruktsiya – Construction and Reconstruction*, 2019, no. 1 (81), pp. 3–9.

9. Popov V. M., Plyusnin M. G., Belov V. V., Khgay O. N. *Vliyanie armirovaniya izgibaemykh zhelezobetonnykh elementov na ikh nesushchuyu sposobnost' v usloviyakh peremennogo zamorazhivaniya i ottaivaniya* [Influence of reinforcement of bent reinforced concrete elements on their bearing capacity under conditions of variable freezing and thawing]. *Vestnik grazhdanskikh inzhenerov – Bulletin of Civil Engineers*, 2023, no. 4 (99), pp. 32–39.

10. Popov V. M., Unzhakov S. N., Unzhakova L. V. *Osobennosti raboty zhelezobetonnykh konstruktsiy v usloviyakh nizkikh i znakoperemennykh temperatur* [Peculiarities of operation of reinforced concrete structures in conditions of low and alternating temperatures].

Stroitel'stvo, dizayn, arkhitektura: proektnye resheniya XXI veka. Trudy mezhdunar. nauch. e-simpoziuma. Moskva, 27–28 dekabrya 2014 g. [Construction, design, architecture: design solutions of the XXI century. Proceedings of the international scientific e-symposium. Moscow, December 27–28, 2014]. Ed. by Danilov I. K. Krasnodar, Mezhdunarodniy tsentr nauchno-issledovatel'skikh projektov Publ., 2015, pp. 16–24.

11. Popov V. M., Plyusnin M. G., Belov V. V., Savin S. N., Merzlyakova E. V. *Ispol'zovanie stalefibrobetona dlya usileniya izgibaemykh zhelezobetonnykh elementov pri vozdeystvii tsiklov zamorazhivaniya i ottaivaniya* [Use of steel fibre concrete to strengthen bent reinforced concrete elements under the influence of freezing and thawing cycles]. *Vestnik grazhdanskikh inzhenerov – Bulletin of Civil Engineers*, 2023, no. 6 (101), pp. 23–30.

12. 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 σ diagrams - concrete ϵ under uniaxial compression and the effect on their shape of freezing and thawing cycles]. *Vestnik grazhdanskikh inzhenerov – Bulletin of Civil Engineers*, 2020, no. 4 (81), pp. 80–88.

13. Darkov A. V., Shaposhnikov N. N. *Stroitel'naya mekhanika* [Construction mechanics]. 8-th. ed., revised. Moscow, Vysshaya shkola Publ., 1986, 606 p.