

УДК 624.04

Устойчивость каркаса при прогрессирующем обрушении и воздействии переменной температуры

А. А. Шульгин

Петербургский государственный университет путей сообщения Императора Александра I, Россия, 190031, Санкт-Петербург, Московский пр., 9

Для цитирования: Шульгин А. А. Устойчивость каркаса при прогрессирующем обрушении и воздействии переменной температуры // Известия Петербургского университета путей сообщения. СПб.: ПГУПС, 2026. Т. 23, вып. 2. С. 456–461. DOI: 10.20295/1815-588X-2026-2-456-461

Аннотация

Цель: исследовать влияние нестационарных (циклических) температурных воздействий на устойчивость стержневой системы каркаса в расчетах на прогрессирующее обрушение. Актуальность работы обусловлена необходимостью обеспечения безопасности зданий, эксплуатирующихся в условиях экстремальных климатических колебаний, в частности в регионах Крайнего Севера. **Методы:** в основе исследования лежит численное моделирование методом конечных элементов в программном комплексе ЛИРА-САПР. Была рассмотрена пространственная кинематическая схема каркаса из перекрестных балок и колонн. Расчет выполнялся квазистатическим методом с учетом комбинированного воздействия постоянной вертикальной нагрузки и циклического температурного поля, заданного симметричным гармоническим законом с заданной амплитудой и периодом. Проведено сравнение результатов для стационарного и нестационарного тепловых режимов, а также для сценариев с тепловым воздействием на все элементы и только на элементы балочной клетки. **Результаты:** установлено, что учет нестационарного (циклического) характера температуры приводит к существенному изменению коэффициента запаса устойчивости формы по сравнению со стационарным режимом. В фазе снижения температуры запас устойчивости в среднем на 12% ниже, а в фазе повышения — на 13% выше, чем при постоянном температурном воздействии. Максимальное снижение общего коэффициента запаса при циклическом воздействии достигает 14–16%. При этом прямое тепловое воздействие на колонны оказывает меньшее влияние (разница до 7%). Минимальное значение коэффициента запаса (64,2) зафиксировано для расчетного сочетания нагрузок № 6 с учетом циклической температуры на всех элементах. **Практическая значимость:** результаты работы доказывают значимость фактора переменных температур для точной оценки устойчивости конструкций при прогрессирующем обрушении. Сделан вывод о необходимости развития и дополнения действующих методов расчета (включая нормативные документы) с учетом нестационарных циклических тепловых воздействий. Это особенно важно для проектирования зданий и сооружений в северных широтах, а также для объектов промышленности с технологическими тепловыми циклами.

Ключевые слова: прогрессирующее обрушение, здания и сооружения, переменное температурное воздействие, устойчивость

В настоящей статье представлены материалы исследования нестационарного теплового воздействия на устойчивость каркаса в расчетах на прогрессирующее обрушение. Предметом исследования является устойчивость стержневой системы в условиях прогрессиру-

ющего обрушения и воздействия стационарной и переменной температуры на стержни. Объектом исследования — стержневая система в условиях прогрессирующего обрушения и воздействия стационарной и переменной температуры на стержни.

Постановка задачи

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. Опираание балок на колонны принято шарнирно-подвижным (рис. 1).

В качестве материала конструкций принят условный бетон марки В25, воспринимающий сжимающие и растягивающие напряжения. Физико-механические характеристики имеют следующие величины [1]:

- модуль упругости $E = 30\,000$ МПа;
- коэффициент линейного температурного расширения $\alpha = 10^{-5}$ 1/град.

Для элементов балочной клетки принято прямоугольное сечение высотой $h = 40$ см, шириной $b = 20$ см, для колонн — $h = 30$ см, шириной $b = 30$ см.

Балочная клетка нагружена вертикальной, равномерно распределенной нагрузкой интенсивностью $q = 6$ кН/м на все стержни балочной клетки. Циклическое изменение температуры задавалось с симметричным циклом с законом изменения:

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

Начальная температура цикла $T = 20^\circ\text{C}$, максимальное изменение температуры $T = 40^\circ\text{C}$, период цикла принимается $t_c = 0,8$.

Метод решения задачи — квазистатический с применением коэффициента динамичности $K_d = 1$ к реакции удаленной опоры и поправочных коэффициентов $k_M(h, t_c)$ при моделировании циклических температурных воздействий [3].

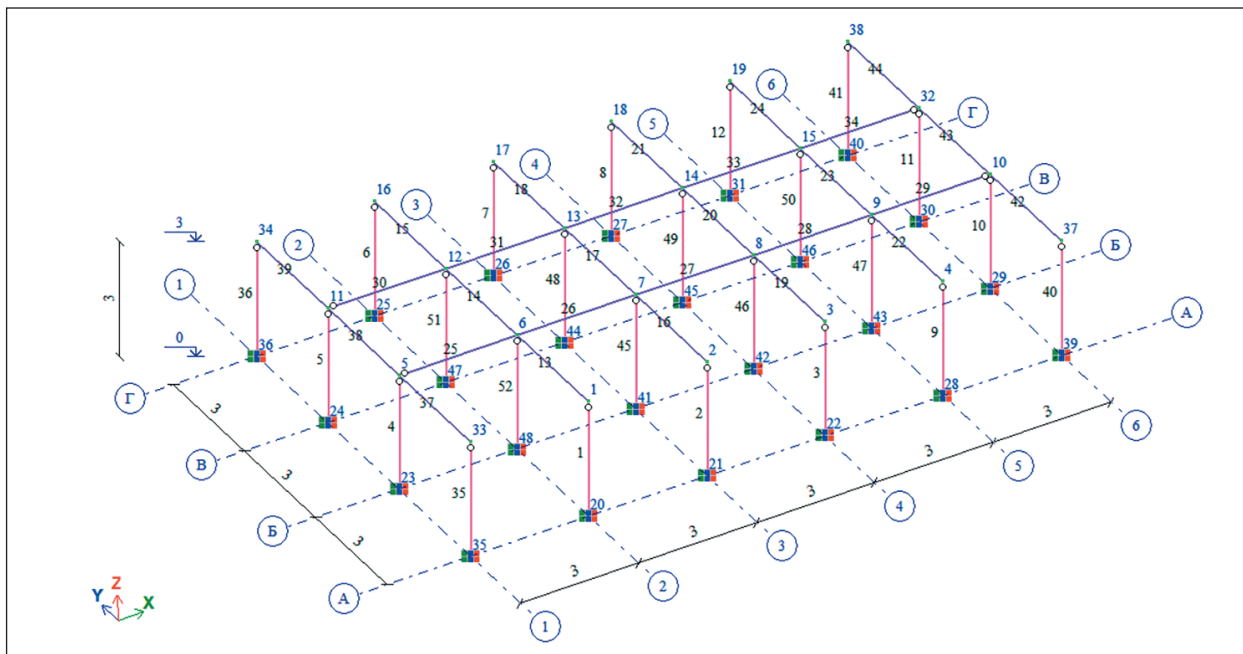


Рис. 1. Пространственная схема каркаса с нумерацией узлов и цветовым отображением типов элементов

Результаты расчетов

Проведен анализ устойчивости элементов системы после удаления элемента № 52 и моделировании температурного воздействия на окружающие элементы внутри помещения. При учете нестационарного температурного воздействия в начале цикла, когда температура на гранях уменьшается, коэффициент запаса устойчивости формы меньше в среднем на 12% по сравнению со стационарным воздействием, с увеличением

температуры коэффициент запаса становится больше в среднем на 13%, чем при соответствующем стационарном воздействии. Разница между коэффициентами запаса при учете температурного воздействия на колонны и без учета такого воздействия составляет не более 7%. Минимальный коэффициент запаса устойчивости формы обнаружен в сценарии, которому соответствует расчетное сочетание нагрузок № 6, и составляет значение 64,2 (см. таблицу).

ТАБЛИЦА. Сравнительная таблица значений коэффициентов запаса устойчивости формы

№ РСН	Форма устойчивости											X, %
	1		2		3		4		\bar{X}_{1-4} , %	5		
	КЗУ	%	КЗУ	%	КЗУ	%	КЗУ	%		КЗУ	%	
без теплового воздействия на колонны												
1 3	120,8 107,3	-11	120,8 107,3	-11	133,8 112,1	-16	133,8 112,1	-16	-14	139,6 137,5	-2	-11
2 4	72,4 87,3	+21	72,4 87,3	+21	76,0 88,4	+16	76,0 88,4	+16	+18	122,4 129,2	+6	+16
с тепловым воздействием на колонны												
5 7	113,1 100,9	-11	113,1 100,9	-11	120,0 103,3	-14	120,0 103,3	-14	-12	120,8 134,8	+12	-8
6 8	64,2 81,9	+28	64,2 81,9	+28	68,8 84,0	+22	68,8 84,0	+22	+25	117,6 126,9	+8	+21

Примечание.

В числителе указаны значения стационарного режима; в знаменателе — нестационарного.

РСН (расчетные сочетания нагрузок):

РСН 1 — постоянная нагрузка (6 кН/м) + реакция опоры мгновенного удаления (40 кН) + температурная нагрузка на балки (-40 °С);

РСН 2 — постоянная нагрузка (6 кН/м) + реакция опоры мгновенного удаления (40 кН) + температурная нагрузка на балки (+40 °С);

РСН 3 — постоянная нагрузка (6 кН/м) + реакция опоры мгновенного удаления (40 кН) + температурная нагрузка на балки (-40 °С) · кМ = 0,35;

РСН 4 — постоянная нагрузка (6 кН/м) + реакция опоры мгновенного удаления (40 кН) + температурная нагрузка на балки (+40 °С) · кМ = 0,35;

РСН 5 — постоянная нагрузка (6 кН/м) + реакция опоры мгновенного удаления (40 кН) + температурная нагрузка на балки и колонны (-40 °С);

РСН 6 — постоянная нагрузка (6 кН/м) + реакция опоры мгновенного удаления (40 кН) + температурная нагрузка на балки и колонны (+40 °С);

РСН 7 — постоянная нагрузка (6 кН/м) + реакция опоры мгновенного удаления (40 кН) + температурная нагрузка на балки · кМ = 0,35 и колонны (-40 °С);

РСН 8 — постоянная нагрузка (6 кН/м) + реакция опоры мгновенного удаления (40 кН) + температурная нагрузка на балки · кМ = 0,35 и колонны (+40 °С);

КЗУ — коэффициент запаса устойчивости (формы).

Заключение

Проведенное исследование демонстрирует значимое влияние переменных температурных воздействий на устойчивость каркасных систем в условиях прогрессирующего обрушения. Коэффициент запаса устойчивости формы незначительно зависит от температурного воздействия на колонны (не более 7%), но значительно — при учете нестационарного режима и может уменьшаться на 14–16%.

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

Список источников

1. СП 63.13330.2018. Бетонные и железобетонные конструкции. Основные положения. Актуализированная редакция СНиП 52-01-2003.
2. Дарков А.В., Шапошников Н.Н. Строительная механика: учебник для строит. спец. вузов. 8-е изд., перераб. и доп. М.: Высшая школа, 1986. 607 с.
3. 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.
4. 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.

5. Pegin P. A., Shulgin A. A. Modern methods for calculating transport infrastructure objects for progressive collapse // BRICS Transport. 2023. Vol. 2, no. 3.

6. Шульгин А. А. Расчет упругих стержней и стержневых систем при циклических тепловых воздействиях: выпускная квалификационная работа. СПб.: ГАСУ, 2018. 119 с.

7. Шульгин А.А. Исследование напряженного состояния упругого стержня при циклических тепловых воздействиях // Наука и инновации в технических университетах: материалы XIII Всероссийского форума студентов, аспирантов и молодых ученых (Санкт-Петербург, 23–25 октября 2019 г.). СПб.: Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, 2019. С. 27–28.

8. Шульгин А.А. О некоторых особенностях напряженного состояния упругого стержня при циклическом тепловом воздействии // Современное строительство: сборник статей магистрантов и аспирантов. Т. 1, вып. 2. СПб.: Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет, 2019. С. 161–172.

9. Шульгин А.А., Абу-Хасан М.С. Повышение эффективности каркасов зданий и сооружений для северных районов РФ в условиях прогрессирующего разрушения // Транспорт: проблемы, идеи, перспективы: сборник трудов LXXXII Всероссийской научно-технической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых (Санкт-Петербург, 18–25 апреля 2022 г.): в 2 т. Т. 1. СПб.: ПГУПС, 2022. С. 303–307.

Дата поступления: 02.02.2026

Решение о публикации: 14.04.2026

Контактная информация:

ШУЛЬГИН Алексей Александрович – аспирант;
aashulgin.workstudy@gmail.com

Stability of the Frame During Progressive Collapse and Exposure to Variable Temperature

A. A. Shul'gin

Emperor Alexander I Petersburg State Transport University, 9 Moskovsky ave., Saint Petersburg, 190031, Russia

For citation: *Shul'gin A. A. Stability of the Frame During Progressive Collapse and Exposure to Variable Temperature // Proceedings of Petersburg State Transport University, 2026. Vol. 23, iss. 2. Pp. 456–461. DOI: 10.20295/1815-588X-2026-2-456-461 (In Russian)*

Abstract

Objective: to investigate the influence of non-stationary (cyclic) temperature exposures on the stability of a frame rod system in progressive collapse calculations. The relevance of the work is driven by the need to ensure the safety of buildings operating under extreme climatic fluctuations, particularly in the Far North regions. **Methods:** the study is based on numerical modeling using the finite element method in the LIRA-SAPR software package. A spatial kinematic scheme of a frame consisting of cross beams and columns was analyzed. The calculation was performed using a quasi-static method, considering the combined effect of a constant vertical load and a cyclic temperature field defined by a symmetric harmonic law with specified amplitude and period. A comparison of results for steady-state and non-steady-state thermal regimes was conducted, as well as for scenarios with thermal exposure on all elements and only on the beam grid elements. **Results:** it was found that accounting for the non-stationary (cyclic) nature of temperature leads to a significant change in the stability safety factor compared to the steady-state regime. During the cooling phase, the stability margin is on average 12% lower, and during the heating phase, it is 13% higher than under constant temperature exposure. The maximum overall reduction in the safety factor under cyclic exposure reaches 14-16%. Meanwhile, direct thermal exposure on the columns has a lesser effect (difference up to 7%). The minimum safety factor value (64.2) was recorded for load combination No. 6, considering cyclic temperature on all elements. **Practical significance:** the results demonstrate the significance of variable temperature factors for the accurate assessment of structural stability in progressive collapse. A conclusion is drawn about the necessity to develop and supplement current calculation methodologies (including regulatory documents) to account for non-stationary cyclic thermal exposures. This is particularly important for designing reliable buildings and structures in northern latitudes, as well as for industrial facilities with technological thermal cycles.

Keywords: progressive collapse, buildings and structures, variable temperature effects, stability

References

1. SP 63.13330.2018. *Betonnnye i zhelezobetonnye konstruktsii. Osnovnyepolozheniya. Aktualizirovannaya [Concrete and Reinforced Concrete Structures. The Main Provisions]. Updated edition of SNiP 52-01-2003. (In Russian)*
2. Darkov A.V., Shaposhnikov N.N. *Stroitel'naya mekhanika: uchebnik dlya stroit. spets. vuzov [Construction Mechanics: A Textbook for Builders. Spec. Universities], 8th ed., revised and add., Moscow, Vysshaya shkola [Higher School], 1986, 607 p. (In Russian)*
3. Pegin P.A., Shul'gin A.A., Pavlovets N.V. *Opreделение maksimal'nykh rastyagivayushchikh i szhimayushchikh napryazhenij staticheskoi neopredelimykh sterzhnej pri otnulevom tsikle izmeneniya temperatury [Determination of the Maximum Tensile and Compressive Stresses of Statically Indeterminate Rods During a Zero-Point Temperature Change Cycle], BST: Byulleten' stroitel'noj tekhniki [BST: Bulletin of Construction Machinery], 2025, no. 9 (1093), pp. 26–30. (In Russian)*

4. Pegin P.A., Shul'gin A.A. Osobennosti rascheta progressiruyushchego obrusheniya karkasnoj skhemy sooruzheniya pri tayanii gruntov [Features of Calculating the Progressive Collapse of the Frame Scheme of a Structure During Soil Melting], *BST: Byulleten' stroitel'noj tekhniki* [*BST: Bulletin of Construction Machinery*], 2023, no. 8 (1068), pp. 12–14. (In Russian)
5. Pegin P. A., Shul'gin A. A. Modern Methods for Calculating Transport Infrastructure Objects for Progressive Collapse, *BRICS Transport*, 2023, vol. 2, no. 3.
6. Shul'gin A.A. Raschet uprugikh sterzhnej i sterzhnevnykh sistem pri tsiklicheskih teplovykh vozdeystviyakh: vypusknaya kvalifikatsionnaya rabota [Calculation of Elastic Rods and Rod Systems under Cyclic Thermal Effects: Final Qualifying Work], Saint Petersburg, *GASU* [*State Automated Information System "Management"*], 2018, 119 p. (In Russian)
7. Shul'gin A.A. Issledovanie napryazhennogo sostoyaniya uprugogo sterzhnya pri tsiklicheskih teplovykh vozdeystviyakh [Investigation of the Stress State of an Elastic Rod Under Cyclic Thermal Influences], Science and Innovation in Technical Universities: Proceedings of the Thirteenth All-Russian Forum of Students, Postgraduates and Young Scientists, St. Petersburg, October 23–25, 2019, Saint Petersburg, *Sankt-Peterburgskij politekhnicheskij universitet Petra Velikogo* [*Federal State Autonomous Educational Institution of Higher Education Peter the Great Saint Petersburg Polytechnic University*], 2019, pp. 27–28. (In Russian)
8. Shul'gin A.A. O nekotorykh osobennostyakh napryazhennogo sostoyaniya uprugogo sterzhnya pri tsiklicheskom teplovom vozdeystvii [On Some Features of the Stress State of an Elastic Rod Under Cyclic Thermal Action], *Sovremennoe stroitel'stvo: sb. statej magistrantov i aspirantov* [*Series "Modern construction": Collection of Articles by Undergraduates and Postgraduates*], vol. 1, iss. 2, Saint Petersburg State University of Architecture and Civil Engineering, 2019, pp. 161–172. (In Russian)
9. Shul'gin A.A., Abu-Hassan M.S. Povyshenie effektivnosti karkasovzdanij i sooruzhenij dlya severnykh rajonov RF v usloviyakh progressiruyushchego razrusheniya [Improving the Efficiency of Building Frames and Structures for the Northern Regions of the Russian Federation in Conditions of Progressive Destruction], *Transport: problems, ideas, prospects: Proceedings of the LXXXII All-Russian Scientific and Technical Conference of Students, Postgraduates and Young Scientists, in two volumes, St. Petersburg, April 18–25, 2022*, Saint Petersburg State University of Railways of Emperor Alexander I, 2022, vol. 1, pp. 303–307. (In Russian)

Received: February 02, 2026

Accepted: April 14, 2026

Author's information:

Aleksei A. SHUL'GIN — Postgraduate Student;
aashulgin.workstudy@gmail.com