

СТРОИТЕЛЬНЫЕ КОНСТРУКЦИИ, ЗДАНИЯ И СООРУЖЕНИЯ

BUILDING AND CONSTRUCTION

Вестник Томского государственного
архитектурно-строительного университета.
2026. Т. 28. № 2. С. 212–225.

ISSN 1607-1859 (для печатной версии)
ISSN 2310-0044 (для электронной версии)

Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo
arkhitekturno-stroitel'nogo universiteta –
Journal of Construction and Architecture.
2026; 28 (2): 212–225.
Print ISSN 1607-1859
Online ISSN 2310-0044

НАУЧНАЯ СТАТЬЯ

УДК 693.22:624.04

<https://doi.org/10.31675/1607-1859-2026-28-2-212-225>

EDN: EOWVHS

ОЦЕНКА УСТОЙЧИВОСТИ ПРОГРЕССИРУЮЩЕМУ ОБРУШЕНИЮ МЕТАЛЛИЧЕСКОГО КАРКАСА ПРОИЗВОДСТВЕННОГО КОРПУСА

**Иван Иванович Подшивалов, Сергей Васильевич Ющубе,
Александр Александрович Тарасов**

*Томский государственный архитектурно-строительный университет,
г. Томск, Россия*

Аннотация. Актуальность исследования заключается в оценке устойчивости металлического каркаса корпуса фильтрации песка обогатительной фабрики с уровнем ответственности КС-3.

Цель работы – оценить возможность прогрессирующего обрушения металлического каркаса при различных сценариях исключения колонн из работы. Для этого выполняется моделирование напряженно-деформированного состояния конструктивной схемы каркаса с учетом пространственной системы «основание – фундамент – здание».

Методы. Моделирование напряженно-деформированного состояния металлического каркаса выполнено в ПВК Ing+2021 MicroFe с использованием методики защиты зданий от прогрессирующего обрушения кинематическим методом теории предельного равновесия.

Результаты. Выявлено, что при существующем уровне нагружения особого сочетания нагрузок в случае выключения любой одной колонны каркаса аварийная ситуация не наступит и прогрессирующего обрушения корпуса не произойдет.

Расчетом установлено, что при превышении существующего уровня нагружения особого сочетания нагрузок на 39 % в случае выключения угловой колонны и на 34 % в случае выключения рядовой колонны металлический каркас превратится в кинематически изменяемый механизм и его несущая способность будет исчерпана.

Ключевые слова: металлический каркас, прогрессирующее обрушение, моделирование, выключение колонны, напряженно-деформированное состояние

Для цитирования: Подшивалов, И.И., Ющубе, С.В., Тарасов, А.А. Оценка устойчивости прогрессирующему обрушению металлического каркаса производственного корпуса // Вестник Томского государственного архитектурно-строительного университета. 2026. Т. 28. № 2. С. 212–225. <https://doi.org/10.31675/1607-1859-2026-28-2-212-225>. EDN: EOWVHS

ORIGINAL ARTICLE

EVALUATION OF PROGRESSIVE COLLAPSE RESISTANCE OF STEEL FRAME OF INDUSTRIAL BUILDING

Ivan I. Podshivalov, Sergei V. Yushchube, Aleksandr A. Tarasov
Tomsk State University of Architecture and Building, Tomsk, Russia

Abstract. This work evaluates the steel frame stability of the sand sleeve filter of the processing plant of the consequence class KS-3.

Purpose: The aim of the work is to consider all possible scenarios of the removal of steel frame columns leading to a possible progressive collapse using the stress-strain state simulation in a three-dimensional model of the base–foundation–building system.

Methodology: The stress-strain state of the steel frame is simulated in Ing+ 2021 MicroFe software package using the kinematic method of the limit equilibrium theory for building protection from progressive collapse.

Research findings: It is found that at the specific load combination and the removal of any one column of the steel frame, an emergency situation does not occur and progressive building collapse does not occur also. According to calculations, at the load level exceeded by 39% at the removed corner column and by 34% at the removed serial column, the steel frame transmits to a kinematically variable mechanism, while its load-bearing capacity is exhausted.

Keywords: steel frame, progressive collapse, modelling, column shutdown, stress-strain state

For citation: Podshivalov, I.I., Yushchube, S. V., Tarasov, A. A. Evaluation of Progressive Collapse Resistance of Steel Frame of Industrial Building. Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo arkhitekturno-stroitel'nogo universiteta – Journal of Construction and Architecture. 2026; 28 (2): 212–225. <https://doi.org/10.31675/1607-1859-2026-28-2-212-225>. EDN: EOWVHS

Необходимость в анализе напряженно-деформированного состояния конструкций промышленных зданий может возникнуть на различной стадии их эксплуатации, например при реконструкции с заменой технологического оборудования или при повышении уровня ответственности сооружения [1, 2]. Кроме того, при реконструкции промышленных предприятий следует учитывать изменение эксплуатационных нагрузок на существующие конструкции и необходимость в последующей оценке их технического состояния [3].

Отказы отдельных элементов или всего здания обусловлены совокупностью причин, вызванных как ошибками при проектировании, так и нарушениями правил производства работ при строительстве и отступлениями от правил безопасной эксплуатации зданий и сооружений [4].

Анализ надежности металлических конструкций показывает, что минимизация ущерба возможна путем регулирования взаимодействия несущих эле-

ментов между собой. Например, для стропильных ферм достаточно реализовать конструктивные мероприятия по связевым элементам покрытий [5].

Отказы отдельных конструктивных элементов не должны приводить к такому напряженно-деформированному состоянию производственного здания, когда нависает опасность его частичного или полного разрушения [6]. В статье А.Р. Туснина и М.П. Бергера [7] представлены результаты экспериментальных исследований металлических ферм при повреждении отдельных стержней, получено перераспределение усилий от поврежденных элементов на соседние элементы фермы.

Живучесть, по определению В.Д. Райзера [8], – это свойство конструкций сохранять при аварийных воздействиях способность к выполнению одной из основных функций – не допускать лавинообразного (каскадного) разрушения. Здание и сооружение следует проектировать таким образом, чтобы в случае разрушения любого элемента весь объект или его наиболее ответственные части сохраняли работоспособность в течение периода времени, достаточного для принятия срочных мер [9].

С целью повышения безопасности зданий и сооружений необходимо учитывать запроектные нагрузки [10]. Одним из способов повышения устойчивости зданий при отказе несущих конструкций является более полный учет работы элементов и узлов их сопряжения исходя из изменения статической схемы работы несущей системы здания [11]. При этом допускается развитие прогибов и частичное разрушение некоторых сечений элементов [12].

Для защиты одноэтажных промышленных зданий от прогрессирующего обрушения разрабатываются конструктивные решения, основанные на принципе включения их в работу только при возникновении запроектных перемещений несущих конструкций здания [13]. При расчете зданий от прогрессирующего обрушения следует рассматривать все возможные сценарии выключения из работы несущих конструкций [14], например удаление крайней колонны и колонны в пролете [15].

В статье О.А. Тусниной и С.А. Павлова [16] путем анализа устойчивости к прогрессирующему обрушению каркаса конверторного цеха рассмотрены различные сценарии локального разрушения несущих конструкций цеха. Установлено, что отсутствуют варианты аварийной ситуации лавинообразного разрушения сооружения.

Для стабилизации деформаций и усилий в аварийной ситуации могут использоваться регуляторы, представляющие собой предварительное напряжение конструкций с заданным усилием натяжения стальных тросов [17]. Задача решалась в ВК «Лира-САПР» путем оценки устойчивости конструктивной системы по коэффициенту общей устойчивости, равному 1,3.

При выключении одной из колонн каркаса использование динамического расчета приводит к более точной оценке напряженно-деформированного состояния каркаса по сравнению со статическим расчетом [18]. Учет мгновенного выключения колонны вызывает собственные колебания каркаса и динамический эффект [19]. В результате динамического расчета во временной области определяются динамические максимумы усилий, которые вместе со статическими нагрузками в расчетном сочетании усилий используются в конструктивном расчете элементов системы [20].

Как известно, для расчета зданий и сооружений на прогрессирующее обрушение следует использовать пространственные расчетные схемы, учитывающие взаимодействие с грунтовым основанием¹. При обеспечении пластичной работы материалов конструктивной системы в предельном состоянии для расчета зданий от прогрессирующего обрушения используется кинематический метод предельного равновесия [21].

В настоящей статье рассматривается корпус фильтрации песка обогатительной фабрики с уровнем ответственности сооружения КС-3. Здание корпуса фильтрации представляет собой полный металлический каркас, выполненный по рамно-связевой схеме, с размерами в плане 24×36 м. Пролет рам – 24 м, шаг рам – 6 м, высота – 16,2 м. Продольная устойчивость каркаса обеспечивается вертикальными связями по колоннам, а поперечная устойчивость – за счет статической схемы работы рам. Сопряжение с фундаментом двухветвевых колонн рам, выполненных в виде стоек из прокатного широкополочного двутавра I40Ш2, жесткое. Стойки фахверка смонтированы из двутавра I35Б2. Покрытие корпуса фильтрации образовано стальными фермами с параллельными поясами пролетом 24 м, высотой 2,25 м. Пояса и элементы решетки ферм выполнены из спаренных уголков (рис. 1).

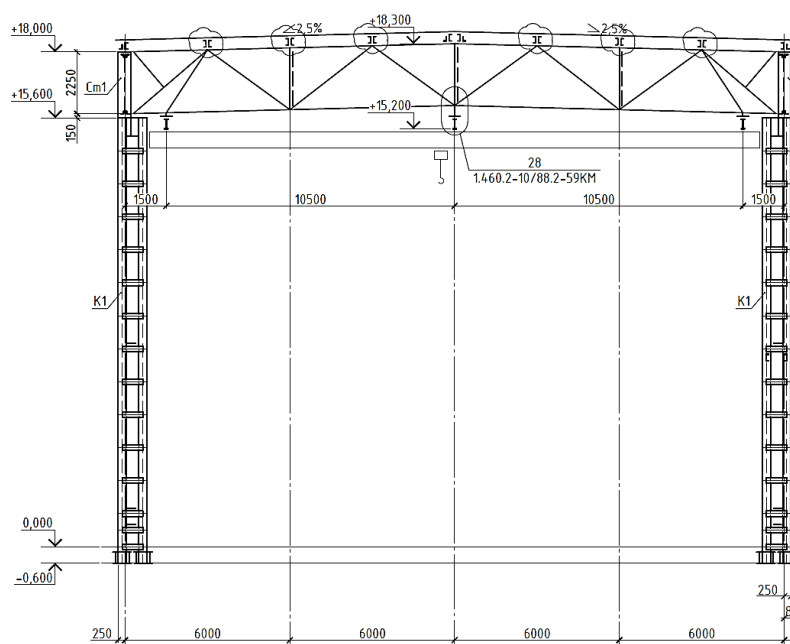


Рис. 1. Характерный поперечный разрез здания корпуса фильтрации
Fig. 1. Typical cross-section of the filtration building

¹ СП 385.1325800.2018. Защита зданий и сооружений от прогрессирующего обрушения с изменением № 1: утвержден приказом Министерства строительства и жилищно-коммунального хозяйства Российской Федерации от 5 июля 2018 г. № 393/пр и введен в действие с 6 января 2019 г.: дата введения 2019-01-06. URL: <https://nav.tn.ru/cloud/iblock/4c9/4c9fe6faca92c9331783b330da76dff/SP-385.1325800.2018-Zashchita-zdaniy-i-sooruzheniy-ot-progressiruyushchego-obrusheniya.-Pravila-proektirovaniya.-Osnovnye-polozheniya.pdf> (дата обращения: 12.02.2026).

Тип фундамента – отдельно стоящие фундаменты на свайном основании. Сваи имеют сечение 300×300 мм и длину 8 м. Плитная часть отдельно стоящих ростверков имеет высоту 600 мм, сверху располагается подколонник высотой 1300 мм. Сопряжение свай с ростверком жесткое. По данным инженерно-геологических изысканий, допускаемая расчетная нагрузка на сваю $N_p = 50$ тс.

Расчет металлического каркаса здания корпуса фильтрации выполнен с помощью ПК Ing+2021 MicroFe. В разработанной расчетной модели (рис. 2) плитная часть ростверков моделировалась конечным элементом типа «плоский прямоугольный элемент оболочки», сваи и металлические элементы моделировались конечным элементом типа «стержень». Грунтовое слоистое основание моделировалось объемными конечными элементами.

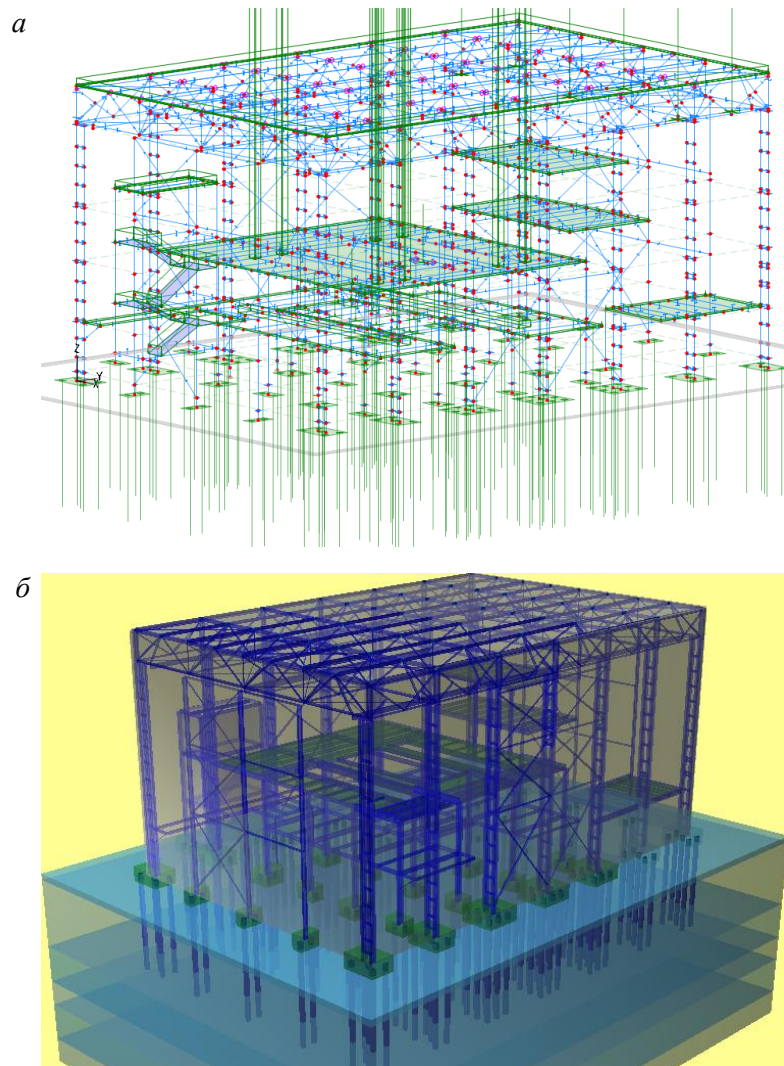


Рис. 2. Расчетная конечно-элементная модель (а) и ее визуализации (б)
Fig. 2. FEM (a) and visualization (b) of filtration building

Расчет на прогрессирующее обрушение выполнялся в два этапа.

Первый этап – первичная расчетная схема (ПРС) – эксплуатационное состояние, в котором все нагрузки расчетные. Сочетание нагрузок основное.

Второй этап – вторичная расчетная схема (ВРС) – рассмотрены два сценария выключения угловой и рядовой колонн. Задавались нормативные значения постоянных и временных длительно действующих нагрузок – особое сочетание нагрузок. Для металлических конструкций принимались нормативные значения сопротивления стали. Расчет выполнялся с использованием поверхностей предельных усилий N - M_y - M_z , определяемых соотношениями².

Расчет от прогрессирующего обрушения выполнялся кинематическим методом предельного равновесия, где принято, что в предельном равновесии разрушается вся конструкция, а не ее отдельные элементы. Параметры прогрессирующего обрушения определяются путем учета нагрузки от выключенного из работы конструктивного элемента. Так, реакция от выключенной колонны принимается следующим образом: мгновенное удаление в ПРС выключаемой колонны моделируется внутренними усилиями, определенными в этом элементе в ПРС и прикладываемыми в ВРС с обратным знаком – коэффициент моделирования усилий $K = 1$. Это соответствует состоянию мгновенного удаления колонны, когда динамический коэффициент $K_d = 2$. В этом случае реакция от выключенной колонны направлена сверху вниз.

В расчетной модели рассматривались три расчетные схемы:

- расчетная схема № 1 – первичная расчетная схема;
- расчетная схема № 2 – вторичная расчетная схема при выключении из работы угловой колонны;
- расчетная схема № 3 – вторичная расчетная схема при выключении из работы рядовой колонны.

Расчетная схема № 1. Изополя коэффициентов использования конструктивных элементов, определяемых по их предельным поверхностям, приведены на рис. 3, из которого следует, что наибольшее значение коэффициента использования $\text{Max } k = 0,860269 < 1$. Так прочность/устойчивость конструктивных элементов каркаса обеспечена, и условие по первой группе предельных состояний выполнено.

Изополя вертикальных перемещений каркаса показаны на рис. 4, из которого видно, что наибольшие вертикальные перемещения $f_{\text{max}} = 66,73$ мм, что значительно меньше предельно допустимых значений $f_u = 150$ мм. Условие по второй группе предельных состояний также выполнено.

Расчетная схема № 2. Изополя коэффициентов использования конструктивных элементов приведены на рис. 5, из которого следует, что наибольшее значение коэффициента использования $\text{Max } k = 7,63725 > 1$. Данное обстоятельство указывает на появление зон пластичных деформаций (изображены красным цветом) в конструктивных элементах каркаса, расположенных в области выключенной крайней колонны. При этом максимальные вертикальные перемещения $f_{\text{max}} = 53,14$ мм находятся в допустимых пределах (рис. 6). В этом случае возможность прогрессирующего обрушения каркаса отсутствует.

² СП 16.13330–2017. Стальные конструкции: утвержден приказом Министерства строительства и жилищно-коммунального хозяйства Российской Федерации от 27 февраля 2017 г. № 126/пр и введен в действие с 28 августа 2017 г.: дата введения 2017-08-28. URL: <https://steel-fabrication.ru/upload/iblock/08b/СП%2016.13330.2017%20изм1.pdf> (дата обращения: 12.02.2026).

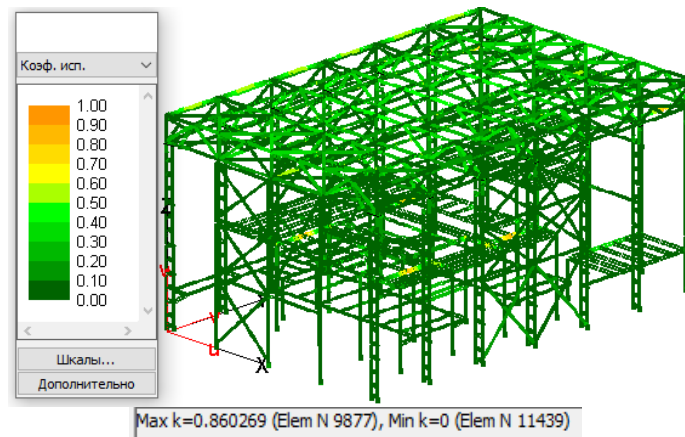


Рис. 3. Изополя коэффициента использования конструктивных элементов в расчетной схеме № 1
 Fig. 3. Isofields of use factor of structure members in design model 1.

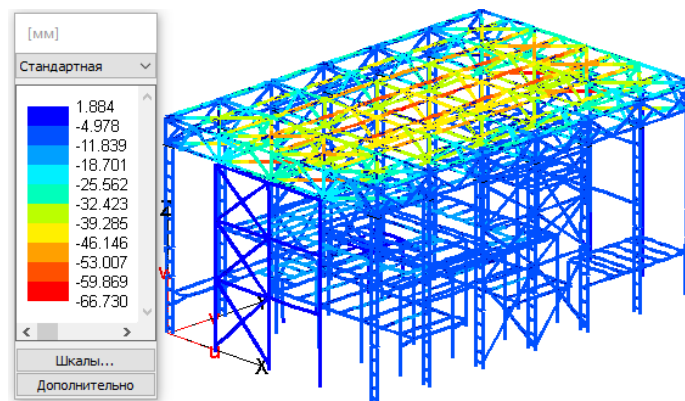


Рис. 4. Изополя вертикальных перемещений каркаса в расчетной схеме № 1
 Fig. 4. Isofields of steel frame vertical displacement in design model 1.

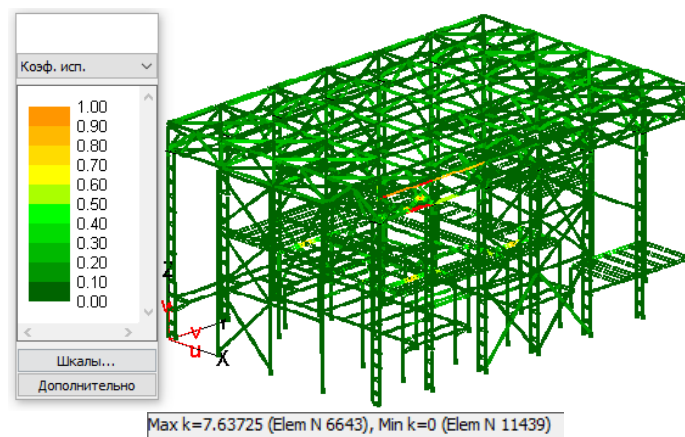


Рис. 5. Изополя коэффициента использования конструктивных элементов в расчетной схеме № 2
 Fig. 5. Isofields of use factor of structure members in design model 2.

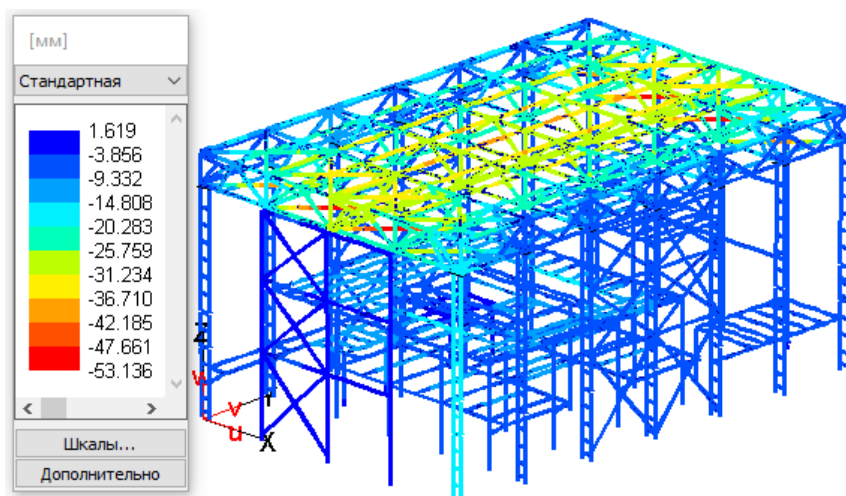


Рис. 6. Изополя вертикальных перемещений каркаса в расчетной схеме № 2

Fig. 6. Isofields of steel frame vertical displacement in design model 2

На рис. 7 показаны изополя коэффициентов использования конструктивных элементов при исчерпании несущей способности каркаса и превращении его в механизм. Такое состояние каркаса появляется, когда выключается крайняя колонна, при превышении существующего уровня нагружения особого сочетания нагрузок на 39 %. При этом деформированная схема каркаса приобретает огромные перемещения (рис. 8). Конструктивная схема «рассыпается», в расчете итерационный процесс не сходится.

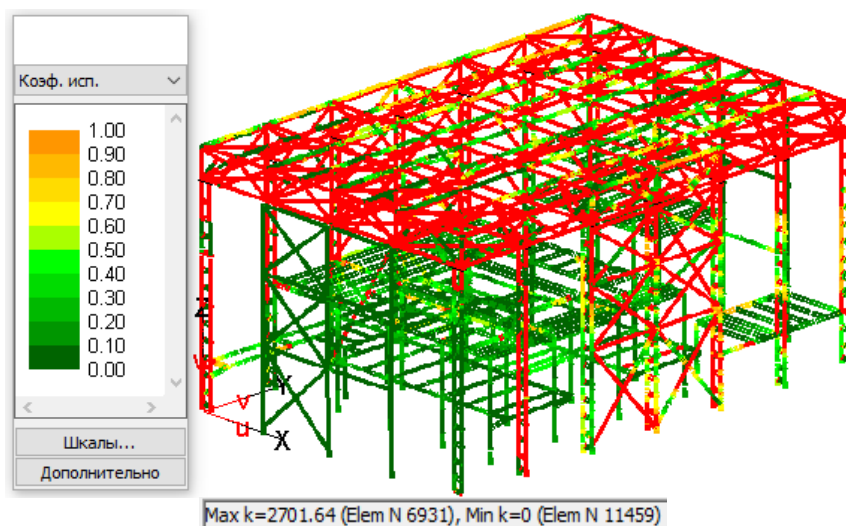


Рис. 7. Изополя коэффициента использования конструктивных элементов в момент превращения каркаса в механизм в расчетной схеме № 2

Fig. 7. Isofields of use factor of structure members at steel frame transmission to a mechanism in design model 2

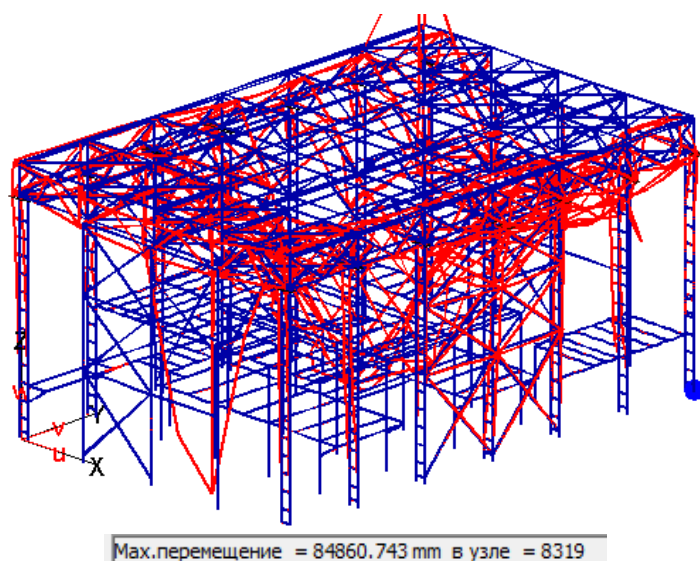


Рис. 8. Деформированная схема при превращении каркаса в механизм в расчетной схеме № 2
 Fig. 8. FEM of deformation during steel frame transmission to a mechanism in design model 2

Расчетная схема № 3. Изополя коэффициентов использования конструктивных элементов приведены на рис. 9, из которого видно, что наибольшее значение коэффициента использования $\text{Max } k = 2,49022 > 1$. Так, в конструктивных элементах покрытия, расположенных в области выключенной рядовой колонны, появляются зоны пластических деформаций стали. Максимальные вертикальные перемещения $f_{\text{max}} = 53,3$ мм находятся в допустимых пределах (рис. 10).

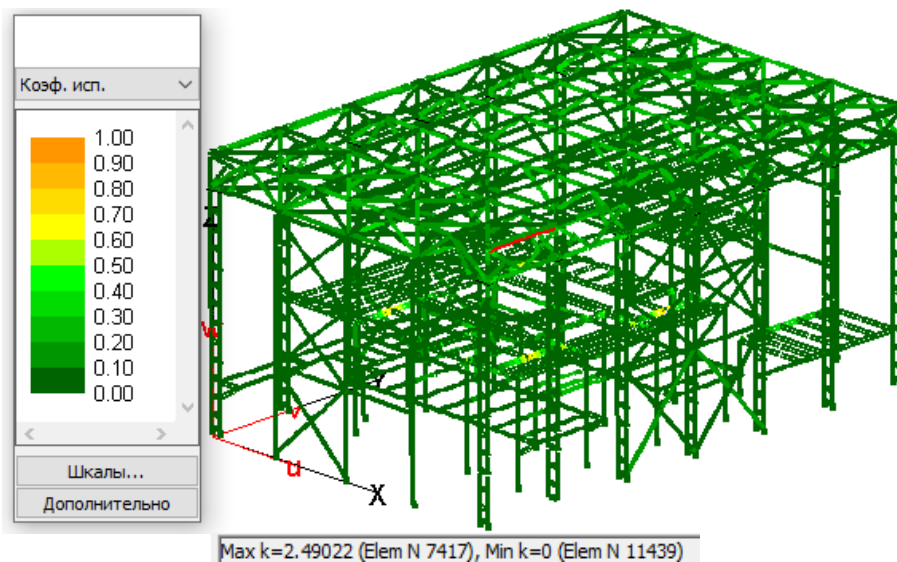


Рис. 9. Изополя коэффициента использования конструктивных элементов в расчетной схеме № 3
 Fig. 9. Isofields of use factor of structure members in design model 3

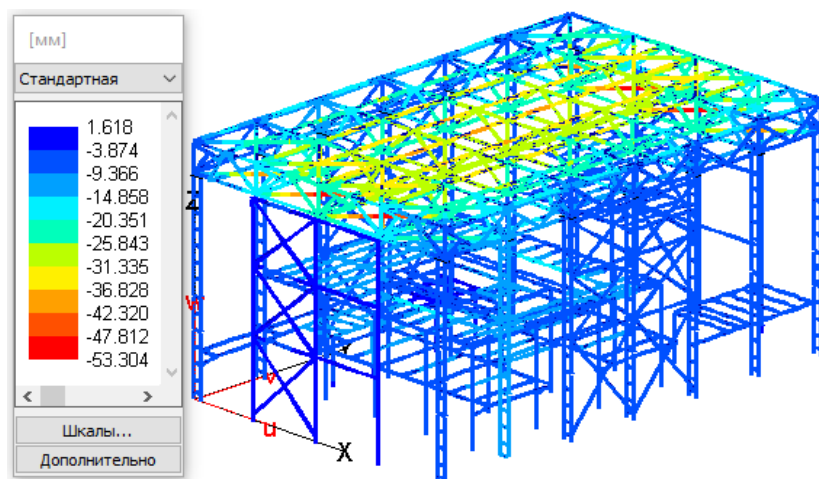


Рис. 10. Изополя вертикальных перемещений каркаса в расчетной схеме № 3
 Fig. 10. Isofields of steel frame vertical displacement in design model 3

На рис. 11 приведены изополя коэффициентов использования конструктивных элементов в состоянии превращения каркаса в кинематически изменяемый механизм, когда происходит исчерпание его несущей способности. Такое состояние каркаса появляется, когда выключается рядовая колонна, при превышении существующего уровня нагружения особого сочетания нагрузок на 34 %. При этом деформированная схема каркаса приобретает значительные перемещения (рис. 12). Конструктивная схема каркаса становится неустойчивой, итерационный процесс в расчете не сходится.

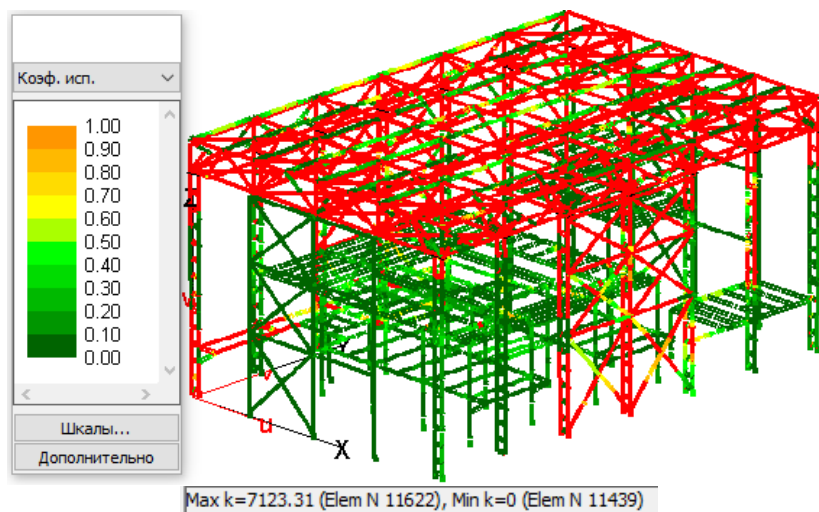


Рис. 11. Изополя коэффициента использования конструктивных элементов в момент превращения каркаса в механизм в расчетной схеме № 3
 Fig. 11. Isofields of use factor of structure members at steel frame transmission to a mechanism in design model 3

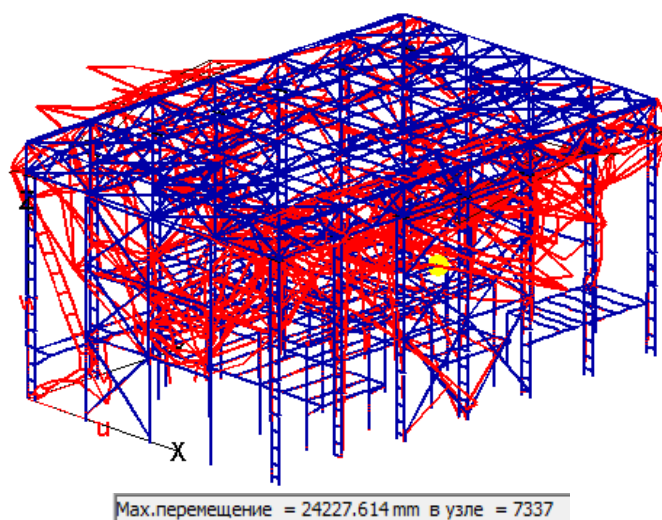


Рис. 12. Деформированная схема при превращении каркаса в механизм в расчетной схеме № 3
 Fig. 12. FEM of deformation during steel frame transition to a mechanism in design model 3

Выводы

При выполнении оценки устойчивости прогрессирующему обрушению металлического каркаса корпуса фильтрации возникла необходимость в создании пространственной конечно-элементной модели в системе «основание – фундамент – здание».

Расчетным путем выполнена оценка напряженно-деформированного состояния каркаса корпуса фильтрации от прогрессирующего обрушения путем рассмотрения двух сценариев выключения угловой и рядовой колонн с использованием кинематического метода теории предельного равновесия.

Выявлено, что при существующем уровне нагружения особого сочетания нагрузок в случае выключения любой одной колонны каркаса аварийная ситуация не наступит и прогрессирующего обрушения корпуса не произойдет.

Установлено, что при превышении существующего уровня нагружения особого сочетания нагрузок на 39 % при выключении угловой колонны и на 34 % при выключении рядовой колонны металлический каркас превратится в кинематически изменяемый механизм и его несущая способность будет исчерпана.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Золина, Т.В., Туснин, А.Р. Увеличение срока эксплуатации промышленного объекта введением конструктивных мер // Вестник МГСУ. 2015. № 6. С. 41–49. EDN: TYCWVV
2. Золина, Т.В. Порядок проведения обследования здания с целью последующей оценки его остаточного ресурса // Вестник МГСУ. 2014. № 11. С. 98–108. EDN: SZCFGR
3. Боровский, Д.С. Расчет на прочность усиливаемых под нагрузкой стержневых элементов стальных конструкций при многопараметрическом нагружении // Вестник гражданских инженеров. 2021. № 2 (85). С. 36–41. DOI: 10.23968/1999-5571-2021-18-2-36-41. EDN: AWDJXY
4. Гукова, М.И., Искендеров, В.Г., Фарфель, М.И. Ошибки проектирования, изготовления и монтажа, приводящие к аварийному состоянию строительных конструкций производ-

- ственных зданий и сооружений // Промышленное и гражданское строительство. 2013. № 10. С. 25–28. EDN: RIUMRP
5. Еремин, К.А., Матвеевский, С.А. Анализ риска несущих конструкций покрытий стальных каркасов одноэтажных промышленных зданий // Промышленное и гражданское строительство. 2011. № 3. С. 16–18. EDN: NDXZTL
 6. Карпенко, Н.И., Колчунов, В.И. О концептуально-методологических подходах к обеспечению конструктивной безопасности // Строительная механика и расчет сооружений. 2007. № 1. С. 4–8. EDN: VUFJPI
 7. Туснин, А.Р., Бергер, М.П. Расчет металлической фермы с поврежденными элементами // Промышленное и гражданское строительство. 2018. № 11. С. 35–41. EDN: YOGUNB
 8. Райзер, В.Д. К проблеме живучести зданий и сооружений // Строительная механика и расчет сооружений. 2012. № 5. С. 77–78. EDN: PHSFXL
 9. Травуш, В.И., Колчунов, В.И., Леонтьев, Е.В. Защита зданий и сооружений от прогрессирующего обрушения в рамках законодательных и нормативных требований // Промышленное и гражданское строительство. 2019. № 2. С. 46–54. EDN: YXLQNV
 10. Травуш, В.И., Федорова, Н.В. Расчет параметра живучести рамно-связевых конструктивных систем // Научный журнал строительства и архитектуры. 2017. № 1 (45). С. 21–28. EDN: YOSIBT
 11. Кодыш, Э.Н. Проектирование защиты зданий и сооружений от прогрессирующего обрушения с учетом возникновения особого предельного состояния // Промышленное и гражданское строительство. 2018. № 10. С. 95–101. EDN: YNRBNJ
 12. Трекин, Н.Н., Кодыш, Э.Н. Особое предельное состояние железобетонных конструкций и его нормирование // Промышленное и гражданское строительство. 2020. № 5. С. 4–9. EDN: LMCXHX
 13. Келасьев, Н.Г., Трекин, Н.Н., Кодыш, Э.Н., Леонтьев, Е.В., Терехов, И.А., Шмаков, С.Д. Конструктивные решения защиты одноэтажных каркасных зданий от прогрессирующего обрушения // Промышленное и гражданское строительство. 2021. № 3. С. 17–22. EDN: HZUMIM
 14. Алмазов, В.О., Плотников, А.И., Расторгуев, Б.С. Проблема сопротивления зданий прогрессирующему разрушению // Вестник МГСУ. 2015. № 3. С. 4–9. EDN: OUVYJV
 15. Кодыш, Э.Н., Трекин, Н.Н., Чесноков, Д.А. Защита многоэтажных зданий от прогрессирующего обрушения // Промышленное и гражданское строительство. 2016. № 6. С. 8–13. EDN: WAIEHN
 16. Туснина, О.А., Павлов, С.А. Оценка устойчивости к прогрессирующему обрушению каркаса конверторного цеха // Вестник гражданских инженеров. 2019. № 6 (77). С. 114–122. EDN: VXJOYJ
 17. Москалев, М.Б., Горюнов, М.В. К вопросу о регулировании НДС конструкций с учетом прогрессирующего обрушения // Вестник гражданских инженеров. 2020. № 6 (83). С. 70–76. DOI: 10.23968/1999-5571-2020-17-6-70-76. EDN: ECFSSC
 18. Григорьев, С.М. Исследование механизмов формирования напряженно-деформированного состояния элементов каркаса многоэтажного здания при локальном повреждении несущих конструкций // Строительная механика инженерных конструкций и сооружений. 2011. № 3. С. 31–44.
 19. Кравченко, Г.М., Труфанова, Е.В., Цуриков, С.Г., Лукьянов, В.И. Расчет железобетонного каркаса здания с учетом аварийного воздействия во временной области // Инженерный вестник Дона. 2015. № 2. С. 44. EDN: UGRUSN
 20. Подшивалов, И.И. Анализ результатов моделирования напряженного состояния колонн и связей экспериментального здания от прогрессирующего обрушения // Вестник Томского государственного архитектурно-строительного университета. 2022. Т. 24. № 3. С. 180–190. <https://doi.org/10.31675/1607-1859-2022-24-3-180-190>
 21. Гвоздев, А.А. Расчет несущей способности конструкций по методу предельного равновесия. Москва : Стройиздат, 1949. 280 с.

REFERENCES

1. Zolina, T.V., Tusnin, A.R. Extending of Operation Life of Industrial Building. *Vestnik MGSU*. 2015; (6): 41–49. EDN: TYCWVV (In Russian)

2. Zolina, T.V. Examination Procedure for Building Residual Operation Life. *Vestnik MGSU*. 2014; (11): 98–108. EDN: SZCFRC (In Russian)
3. Borovskiy, D.S. Strength Analysis of Rod Elements of Steel Structures under Multiparameter Loading. *Vestnik grazhdanskikh inzhenerov*. 2021; 2(85): 36–41. DOI: 10.23968/1999-5571-2021-18-2-36-41. EDN: AWDJXY (In Russian)
4. Gukova, M.I., Iskendirov, V.G., Farfel, M.I. Design, Manufacturing and Installation Errors Leading to Emergency Condition of Industrial Buildings. *Promyshlennoe i grazhdanskoe stroitel'stvo*. 2013; (10): 25–28. EDN: RIUMRP (In Russian)
5. Eremin, K.A., Matveyushkin, S.A. Risk Analysis of Bearing Structures of Steel Frame Coverings of One-Storey Industrial Buildings. *Promyshlennoe i grazhdanskoe stroitel'stvo*. 2011; (3): 16–18. EDN: NDXZTL (In Russian)
6. Karpenko, N.I., Kolchunov, V.I. Conceptual-Methodological Approach to Structural Safety Provision. *Stroitel'naya mekhanika i raschet sooruzhenii*. 2007; (1): 4–8. EDN: VUFJPI (In Russian)
7. Tusnin, A.R., Berger, M.P. Strength Analysis of Metal Truss with Damaged Elements. *Promyshlennoe i grazhdanskoe stroitel'stvo*. 2018; (11): 35–41. EDN: YOGUHB (In Russian)
8. Raizer, V.D. Toward the Building Robustness. *Stroitel'naya mekhanika i raschet sooruzhenii*. 2012; (5): 77–78. EDN: PHSFXL (In Russian)
9. Travush, V.I., Kolchunov, V.I., Leont'ev, E.V. Building Protection Against Progressive Collapse in Terms of Legal and Regulatory Documents. *Promyshlennoe i grazhdanskoe stroitel'stvo*. 2019; (2): 46–54. EDN: YOSIBT (In Russian)
10. Travush, V.I., Fedorova N.V. Calculation of Failure Survival of Frame-Truss Structural Systems. *Nauchnyi zhurnal stroitel'stva i arkhitektury*. 2017; 1 (45): 21–28. EDN: YOSIBT (In Russian)
11. Kodysh, E.N. Design Protection of Buildings Against Progressive Collapse, with Respect to Limit State. *Promyshlennoe i grazhdanskoe stroitel'stvo*. 2018; (1): 95–101. EDN: YNRBNJ (In Russian)
12. Trekin, N.N., Kodysh, E.N. Special Limit State of Reinforced Concrete Structures and its Standardisation. *Promyshlennoe i grazhdanskoe stroitel'stvo*. 2020; (5): 4–9. EDN: LMCXHX (In Russian)
13. Kelas'ev, N.G., Trekin, N.N., Kodysh, E.N., Leont'ev, E.V., Terekhov, I.A., Shmakov, S.D. Design Solutions for Protecting Single-Storey Frame Buildings from Progressive Collapse. *Promyshlennoe i grazhdanskoe stroitel'stvo*. 2021; (3): 17–22. EDN: HZUMIM (In Russian)
14. Almazov, V.O., Plotnikov, A.I., Rastorguev, B.S. The Problem of Buildings Resistance to Progressive Collapse. *Vestnik MGSU*. 2015; (3): 4–9. EDN: OUVYJV (In Russian)
15. Kodysh, E.N., Trekin, N.N., Chesnokov D.A. Protection of Multi-Floor Buildings from Progressive Collapse. *Promyshlennoe i grazhdanskoe stroitel'stvo*. 2016; (6): 9–13. EDN: WAIEHN (In Russian)
16. Tusnina, O.A., Pavlov, S.A. Assessment of Resistance to Progressive Collapse of Converter Shop Frame. *Vestnik grazhdanskikh inzhenerov*. 2019; 6 (77): 114–122. EDN: BXJOYJ (In Russian)
17. Moskalev, M.B., Goryunov, M.V. Toward Regulation of VAT of Structures with Respect to Progressive Collapse. *Vestnik grazhdanskikh inzhenerov*. 2020; 6 (83): 70–76. DOI: 10.23968/1999-5571-2020-17-6-70-76. EDN: ECFSSC (In Russian)
18. Grigorshev, S.M. Stress-Strain State Formation Mechanisms in Frame Elements of Multi-Storey Building at Local Damage of Load-Bearing Structures. *Stroitel'naya mekhanika inzhenernykh konstruktiv i sooruzhenii*. 2011; (3): 31–44. (In Russian)
19. Kravchenko, G.M., Trufanova, E.V., Tsurikov, S.G., Luk'yanov, V.I. Strength Analysis of Reinforced Concrete Frame of the Building, with Respect to Possible Collapse Impact. *Inzhenernyi vestnik Dona*. 2015; (2): 44. EDN: UGRUSN (In Russian)
20. Podshivalov, I.I. Three Methods of Progressive Collapse Analysis of Experimental Building Skeleton based on Stress-Strain State of Columns and Joints. *Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo arkhitekturno-stroitel'nogo universiteta – Journal of Construction and Architecture*. 2022; 24 (2): 180–190. <https://doi.org/10.31675/1607-1859-2022-24-3-180-190> (In Russian)
21. Gvozdev, A.A. Strength Analysis of Structures using the Limit Equilibrium Method. Moscow: Stroizdat. 1949. 280 p. (In Russian)

Сведения об авторах

Подшивалов Иван Иванович, канд. техн. наук, доцент, Томский государственный архитектурно-строительный университет, 634003, г. Томск, пл. Соляная, 2, ivanpodchivalov@list.ru

Ющубе Сергей Васильевич, канд. техн. наук, доцент, Томский государственный архитектурно-строительный университет, 634003, г. Томск, пл. Соляная, 2, sv@tsuab.ru

Тарасов Александр Александрович, канд. техн. наук, Томский государственный архитектурно-строительный университет, 634003, г. Томск, пл. Соляная, 2, tar.a.a@mail.ru

Authors Details

Ivan I. Podshivalov, PhD, A/Professor, Tomsk State University of Architecture and Building, 2, Solyanaya Sq., 634003, Tomsk, Russia, ivanpodchivalov@list.ru

Sergei V. Yushchube, PhD, A/Professor, Tomsk State University of Architecture and Building, 2, Solyanaya Sq., 634003, Tomsk, Russia, sv@tsuab.ru

Aleksandr A. Tarasov, PhD, Tomsk State University of Architecture and Building, 2, Solyanaya Sq., 634003, Tomsk, Russia, tar.a.a@mail.ru

Вклад авторов

Все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации.
Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Authors contributions

The authors contributed equally to this article.
The authors declare no conflicts of interests.

Статья поступила в редакцию 15.12.2025
Одобрена после рецензирования 29.12.2025
Принята к публикации 01.04.2026

Submitted for publication 15.12.2025
Approved after review 29.12.2025
Accepted for publication 01.04.2026