

Вестник Томского государственного
архитектурно-строительного университета.
2024. Т. 26. № 1. С. 118–126.

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

Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo
arkhitekturno-stroitel'nogo universiteta –
Journal of Construction and Architecture.
2024; 26 (1): 118–126.
Print ISSN 1607-1859
Online ISSN 2310-0044

НАУЧНАЯ СТАТЬЯ

УДК 693.22:624.04

DOI: 10.31675/1607-1859-2024-26-1-118-126

EDN: OKFRNK

МОДЕЛИРОВАНИЕ НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ МЕТАЛЛИЧЕСКОГО КАРКАСА ПРОМЫШЛЕННОГО ЗДАНИЯ ИЗ ТРУБЧАТЫХ ФЕРМ И РЕШЕТЧАТЫХ ПРОГОНОВ ПОКРЫТИЯ С УЧЕТОМ НЕСОВЕРШЕНСТВ

Иван Иванович Подшивалов

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

Аннотация. Актуальность работы заключается в том, что при реконструкции металлического каркаса промышленного здания возникла необходимость в оценке влияния несовершенств в виде неравномерных геометрических отклонений от вертикального положения решетчатых прогонов покрытия на их напряженно-деформированное состояние и в проверке условий выполнения первого и второго предельных состояний.

Цель работы состоит в расчетном обосновании допустимого значения горизонтального отклонения из плоскости решетчатых прогонов покрытия.

Методы. Расчетное обоснование возможности использования решетчатых прогонов покрытия с учетом установленных геометрических несовершенств при реконструкции промышленного здания выполнено моделированием напряженно-деформированного состояния металлического каркаса в программном комплексе Inq+2021 MicroFe с разработкой расчетной конечно-элементной пространственной модели.

Результаты. Расчетным путем обосновано предельное значение геометрического отклонения из плоскости решетчатых прогонов покрытия, при котором не требуется их возвращения в вертикальное положение или замена.

Ключевые слова: металлический каркас, трубчатые фермы, решетчатые прогоны покрытия, геометрические несовершенства

Для цитирования: Подшивалов И.И. Моделирование напряженно-деформированного состояния металлического каркаса промышленного здания из трубчатых ферм и решетчатых прогонов покрытия с учетом несовершенств // Вестник Томского государственного архитектурно-строительного университета. 2024. Т. 26. № 1. С. 118–126. DOI: 10.31675/1607-1859-2024-26-1-118-126. EDN: OKFRNK

ORIGINAL ARTICLE

STRESS-STRAIN STATE MODEL OF BUILDING METAL FRAME MADE OF TUBE TRUSSES AND BAR JOISTS WITH REGARD TO GEOMETRICAL IMPERFECTIONS**Ivan I. Podshivalov***Tomsk State University of Architecture and Building, Tomsk, Russia*

Abstract. The paper studies the metal frame industrial building during the reconstruction of its bar joists having imperfections in the form of non-uniform geometric deviations from the vertical position.

Purpose: The aim of this work is to calculate the allowable value of horizontal deviation of bar joists from the vertical position.

Methodology: The computational justification of using roof bar joists with regard to geometric imperfections in the reconstruction of the industrial building, is provided by modeling the stress-strain state of the metal frame in Ing + 2021, MicroFe software using the finite element model.

Research findings: The limiting value of the geometric deviation from the bar joist plane, at which their vertical position or replacement is not required, is justified by calculation.

Keywords: metal frame, tubular truss, bar joist, geometrical imperfections

For citation: Podshivalov I.I. Stress-strain state model of building metal frame made of tube trusses and bar joists with regard to geometrical imperfections. Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo arkhitekturno-stroitel'nogo universiteta – Journal of Construction and Architecture. 2024; 26 (1): 118–126. DOI: 10.31675/1607-1859-2024-26-1-118-126. EDN: OKFRNK

Анализ напряженно-деформированного состояния металлических каркасов промышленных зданий при выполнении их реконструкции обусловлен необходимостью оценки несущей способности конструкций с учетом фактического их состояния и соответствия современным нормам проектирования [1, 2].

Реконструкция промышленных предприятий, как правило, связана с изменением эксплуатационных нагрузок на существующие конструкции и с необходимостью оценки их технического состояния [3]. Отказы отдельных элементов или всего здания обусловлены, как правило, ошибками при проектировании и дефектами при изготовлении и монтаже конструкций [4, 5].

Анализ надежности несущих металлоконструкций покрытий показывает, что минимизация ущерба возможна путем регулирования взаимодействия несущих элементов покрытия между собой. Например, для стропильных ферм достаточно реализовать конструктивные мероприятия применительно к связевым элементам покрытий [6, 7].

Как известно, основной задачей связей в покрытиях каркасных зданий является восприятие и передача горизонтальных нагрузок, а также обеспечение требуемого закрепления поясов ферм из плоскости. Горизонтальные связи по верхним поясам ферм необходимы для предотвращения смещения сжатого верхнего пояса из плоскости и обеспечения его требуемой расчетной длины [8]. От этих связей можно отказаться, если применить жесткий диск покрытия из профилированного настила, закрепленного к прогонам в каждой гофре [9].

Учет несовершенств реальных конструкций, имеющих, как правило, технологическую природу (неточности изготовления и монтажа), имеет большое практическое значение. В настоящее время учет несовершенств выполняется путем придания некоторого искривления всем элементам в расчетной стержневой системе, после чего выполняется ее расчет по деформированной схеме [10].

Значительный практический интерес представляет расчет несущей способности большепролетных ферм покрытия, у которых в процессе эксплуатации из-за скрытых дефектов, ошибок проектирования, изготовления, монтажа, эксплуатации возможно повреждение отдельных конструкций, в том числе выход из строя некоторых стержней. В работе [11] представлена методика расчета покрытия с поврежденными стальными стержневыми элементами.

В рассматриваемой статье объектом исследования является покрытие металлического каркаса промышленного здания, находящегося в стадии реконструкции. Размеры здания в плане – 60×168 м, номинальная высота до низа конструкций покрытия – 10,8 м (рис. 1). Каркас здания выполнен по рамно-связевой схеме. Продольная устойчивость каркаса обеспечивается вертикальными связями по колоннам, а поперечная устойчивость – за счет статической работы двух пролетных рам. Пролет рам – 30 м, высота рам – 10,8 м. Сопряжение с фундаментом стоек рам, выполненных из прокатного широкополочного двутавра I70Ш4, жесткое. Покрытие промышленного здания образовано стальными бесфасоночными фермами с параллельными поясами пролетом 30 м, высотой 2,9 м. Шаг ферм в продольном направлении здания – 12 м. Пояса и элементы решетки ферм выполнены из труб. Уклон двухскатной крыши в 10° обеспечивается установкой стоек разной высоты в узлах верхних поясов ферм.

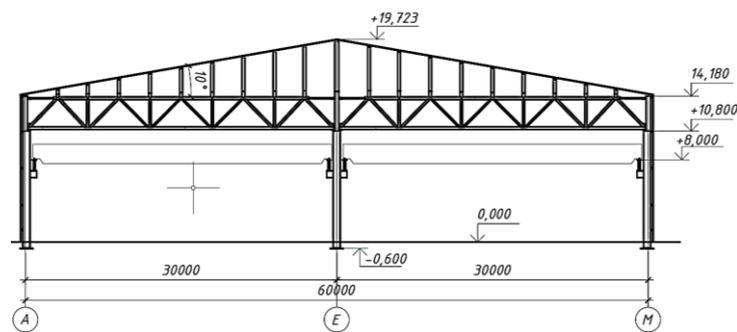


Рис. 1. Схема поперечного разреза
Fig. 1. Schematic view of cross-section

В покрытии стальные решетчатые прогоны пролетом 12 м представляют собой плоские трехпанельные треугольные фермы высотой 1,5 м (рис. 2). Верхний пояс прогонов состоит из двух спаренных швеллеров U14, а решетка – из одиночных холодногнутых швеллеров Гн160×60(70)×5. На прогоны уложен профилированный лист Н60-782-1,0, который «развязывает» верхний пояс прогонов из плоскости по всей его длине. В расчетной схеме прогоны приняты как разрезные свободно опертые конструкции. Сопряжение решетки с верхним поясом прогонов жесткое.

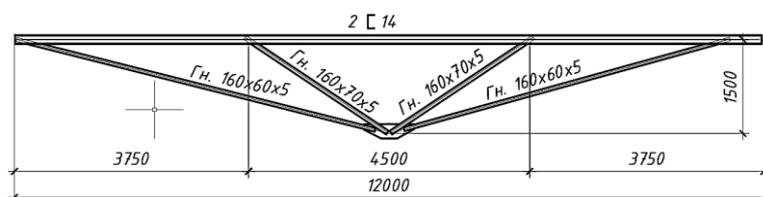


Рис. 2. Решетчатый прогон покрытия
 Fig. 2. Schematic of bar joists

При обследовании металлического каркаса были зафиксированы геометрические несовершенства отдельных решетчатых прогонов, которые заключались в их наклонном положении из плоскости за счет горизонтального смещения нижнего узла решетчатых прогонов относительно его верхнего пояса. Эти горизонтальные смещения оказались разными, наибольшее значение составило 11,2 см. В связи с этим была поставлена задача по оценке влияния установленных геометрических несовершенств отдельных решетчатых прогонов на их напряженно-деформированное состояние в составе пространственной системы покрытия металлического каркаса производственного здания в стадии реконструкции.

В программном комплексе Ing+2021 MicroFe с использованием стержневых конечных элементов была разработана конечно-элементная модель металлического каркаса промышленного здания (рис. 3).

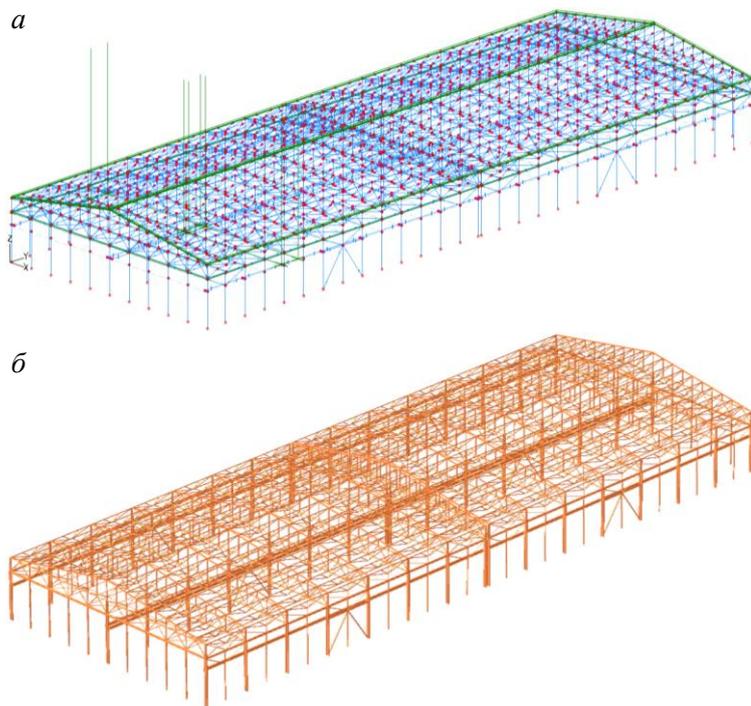


Рис. 3. Расчетная конечно-элементная модель (а) и ее визуализация (б)
 Fig. 3. FEM (a) and model visualization (b)

В расчетной модели были рассмотрены две расчетные схемы:
 – расчетная схема № 1 – вертикальное положение решетчатых прогонов покрытия;

– расчетная схема № 2 – наклонное положение из плоскости решетчатых прогонов покрытия за счет горизонтального смещения нижнего узла прогонов относительно его верхнего пояса. Здесь величина горизонтального смещения принята равной $\delta_{см} = 11,5$ см. В программе наклонное положение из плоскости прогонов задается в опции несовершенства через эксцентриситеты.

Расчетная схема № 1. В условиях плоского изгиба эпюра изгибающих моментов и значения вертикальных перемещений решетчатого прогона приведены на рис. 4. Наибольшие пролетный и опорный изгибающие моменты равны: $M_{пр} = 14,6$ кНм и $M_{оп} = -18,4$ кНм соответственно. Прогиб верхнего пояса решетчатого прогона составил $f = 22,6$ мм, что меньше предельного значения $[f] = (1/200)L = (1/200) \times 12000 = 60$ мм.

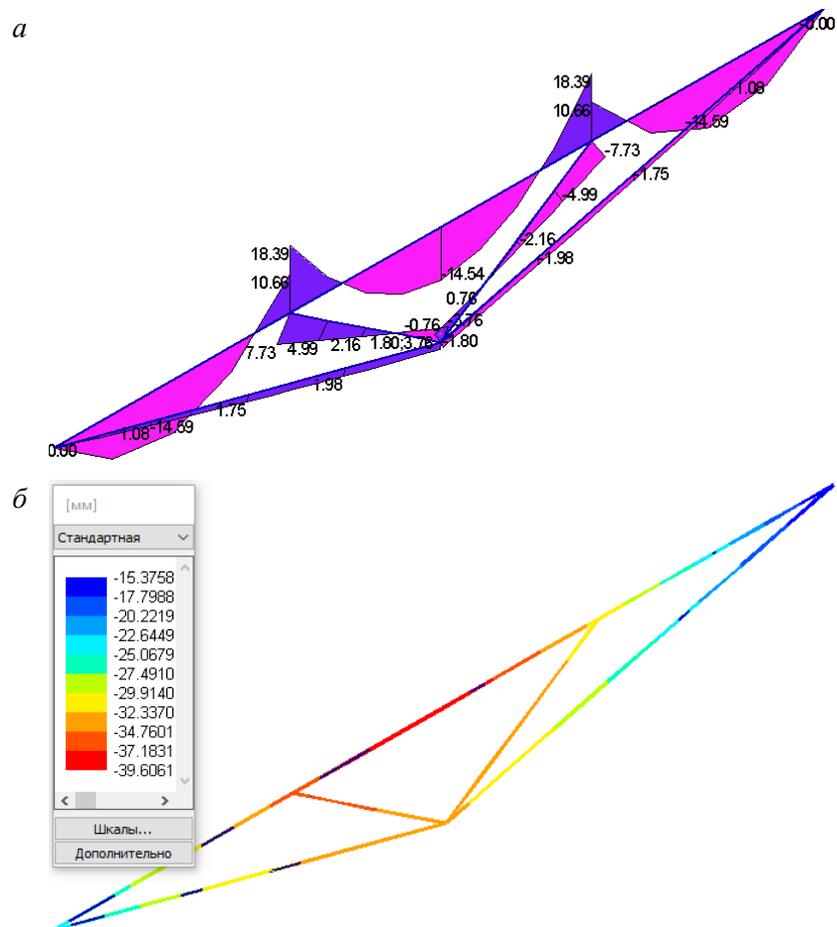


Рис. 4. Решетчатый прогон расчетной модели по схеме № 1:

a – эпюра изгибающих моментов; *b* – изополя вертикальных перемещений

Fig. 4. Model 1 of bar joists:

a – bending-moment curve; *b* – isofields of vertical displacement

Расчетная схема № 2. Эпюра изгибающих моментов и значения вертикальных перемещений при косом изгибе решетчатого прогона даны на рис. 5. По сравнению с расчетной схемой № 1 в верхнем поясе решетчатого прогона пролетный изгибающий момент увеличился на 33 %, а опорный изгибающий момент, наоборот, уменьшился на 39 % – $M_{пр} = 21,6$ кНм, $M_{оп} = -11,3$ кНм. Прогиб верхнего пояса решетчатого прогона увеличился на 63 % и составил $f = 60,8$ мм, что немного превысило предельно допустимое значение $[f] = (1/200)L = (1/200) \times 12000 = 60$ мм.

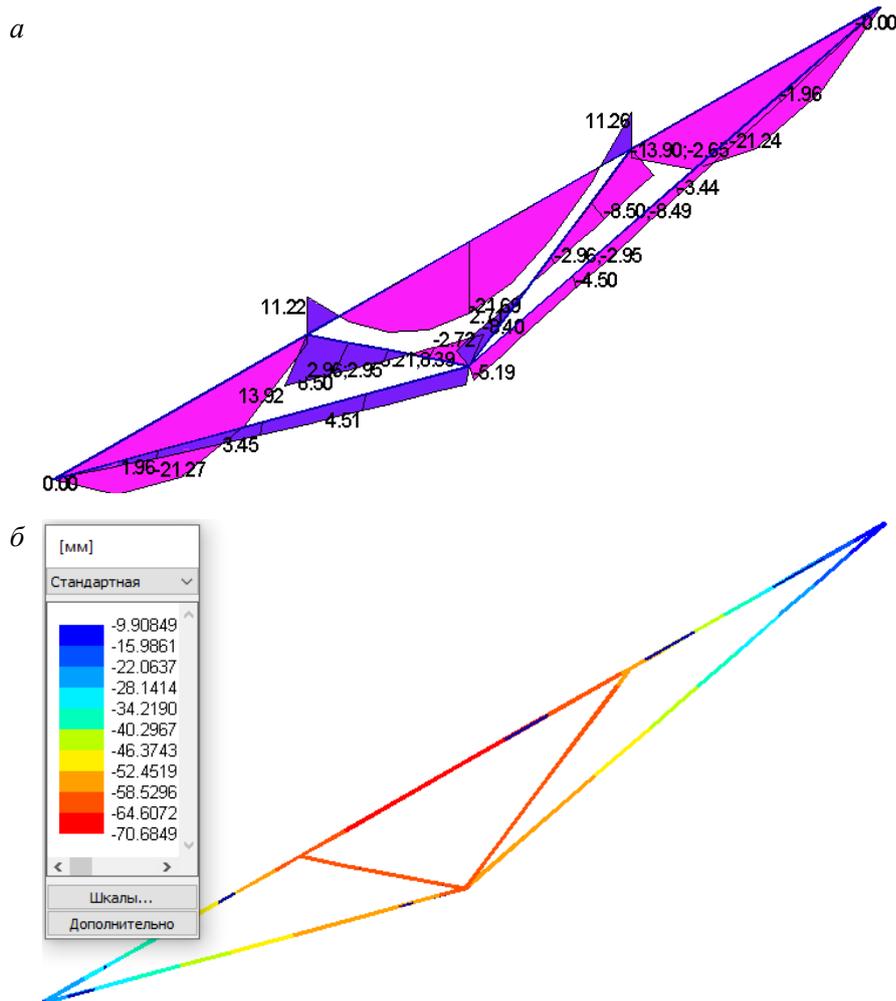


Рис. 5. Решетчатый прогон расчетной модели по схеме № 2:
 а – эпюра изгибающих моментов; б – изополя вертикальных перемещений
 Fig. 5. Model 2 of bar joists:
 a – bending-moment curve; b – isofields of vertical displacement

Конструктивный расчет решетчатых прогонов показал следующие результаты (рис. 6):

– при вертикальном (проектном) положении прогонов наибольший коэффициент использования сечения по условию устойчивости плоской формы изгиба $K_{ик} = 0,8$;

– при наклонном (из плоскости) положении прогонов со значением горизонтального смещения нижнего узла относительно верхнего пояса $\delta_{см} = 11,5$ см коэффициент использования сечения по условию устойчивости в плоскости момента M_z превысил единицу и составил $K_z = 1,07$.

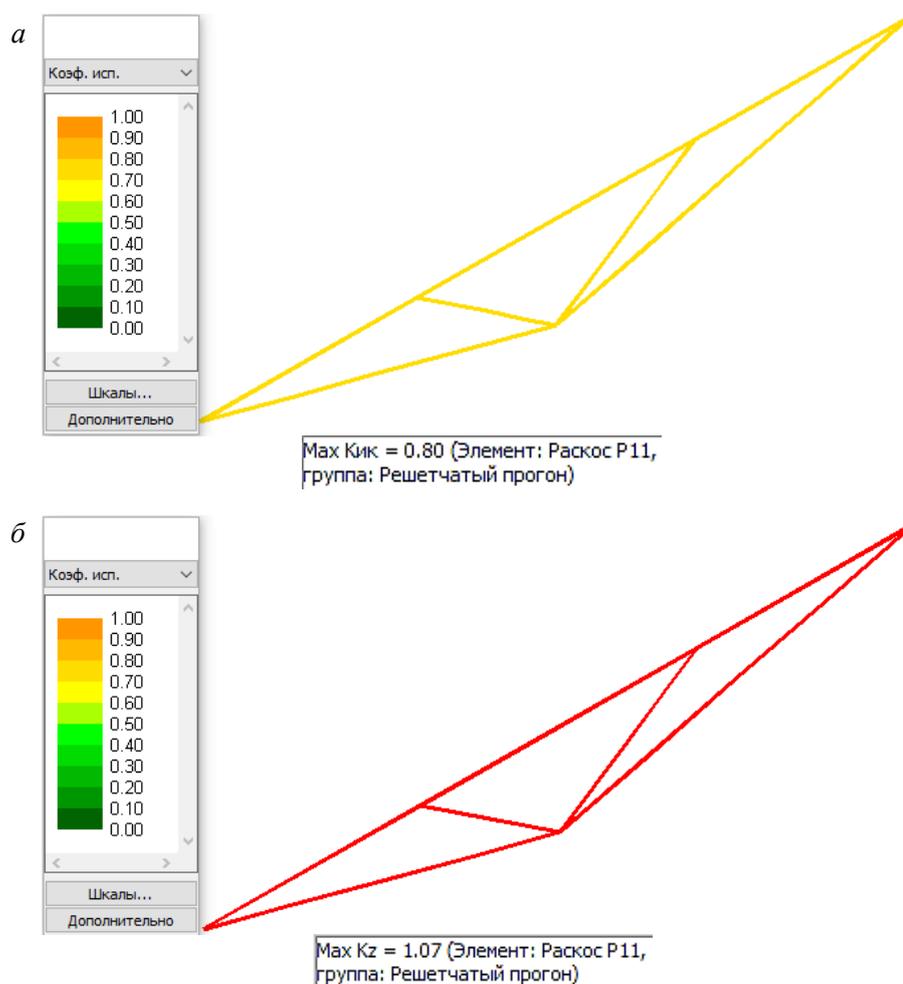


Рис. 6. Значения коэффициентов использования сечения:
a – в расчетной схеме № 1; *b* – в расчетной схеме № 2

Fig. 6. Use factor values:
a – model 1; *b* – model 2

В заключение можно отметить, что максимально зафиксированное при обследовании горизонтальное смещение нижнего узла решетчатых прогонов относительно его верхнего пояса составляет $\delta_{см} = 11,2$ см и является допустимым, выверка или замена решетчатых прогонов покрытия не требуется.

В этом случае в решетчатых прогонах покрытия промышленного здания максимальные значения коэффициента использования сечений $\text{Max } K_z = 1,07$ незначительно превышает единицу. После реконструкции промышленного здания дальнейшая эксплуатация решетчатых прогонов покрытия с такими несовершенствами возможна, т. к. условие по первой группе предельных состояний практически выполнено, а условие выполнения второй группы предельных состояний будет обеспечено.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Золина Т.В., Туснин А.Р. Увеличение срока эксплуатации промышленного объекта введением конструктивных мер // Вестник МГСУ. 2015. № 6. С. 41–49.
2. Золина Т.В. Порядок проведения обследования здания с целью последующей оценки его остаточного ресурса // Вестник МГСУ. 2014. № 11. С. 98–108.
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.
4. Гукова М.И., Искендиоров В.Г., Фарфель М.И. Ошибки проектирования, изготовления и монтажа, приводящие к аварийному состоянию строительных конструкций производственных зданий и сооружений // Промышленное и гражданское строительство. 2013. № 10. С. 25–28.
5. Лебедь Е.В., Григорян А.А. Влияние монтажных расчетных схем ребер двухъясного металлического купола на начальные усилия при устранении погрешностей // Вестник МГСУ. 2015. № 8. С. 66–79.
6. Еремин К.А., Матвеюшкин С.А. Анализ риска несущих конструкций покрытий стальных каркасов одноэтажных промышленных зданий // Промышленное и гражданское строительство. 2011. № 3. С. 16–18.
7. Еремин К.А., Матвеюшкин С.А. Анализ надежности несущих конструкций покрытий стальных каркасов одноэтажных промышленных зданий // Промышленное и гражданское строительство. 2010. № 10. С. 19–21.
8. Туснина О.А. Работа связей в покрытии промышленного здания со стальным каркасом // Промышленное и гражданское строительство. 2019. № 1. С. 37–42.
9. Рекомендации по применению стальных профилированных настилов нового сортамента в утепленных покрытиях производственных зданий. Москва : Госстрой СССР. ЦНИИ-Проектстальконструкция им. Мельникова, 1985. 33 с.
10. Кудишин Ю.И. К вопросу учета начальных несовершенств при расчете стальных стержневых систем по деформированной схеме // Промышленное и гражданское строительство. 2011. № 3. С. 6–9.
11. Туснин А.Р., Бергер М.П. Расчет металлической фермы с поврежденными элементами // Промышленное и гражданское строительство. 2018. № 11. С. 35–41.

REFERENCES

1. Zolina T.V., Tushnin A.R. Extending of operation life of industrial building. *Vestnik MGSU*. 2015; (6): 41–49. (In Russian)
2. Zolina T.V. Examination procedure for building residual operation life. *Vestnik MGSU*. 2014; (11): 98–108. (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. (In Russian)
4. Gukova M.I., Iskenderov V.G., Farfel M.I. Design, manufacture and construction errors leading to emergency of industrial buildings. *Promyshlennoe i grazhdanskoe stroitel'stvo*. 2013; (10): 25–28. (In Russian)
5. Lebed E.V., Grigoryan A.A. Influence of analytical rib models of a double metal dome on initial forces at error elimination. *Vestnik MGSU*. 2015; (8): 66–79. (in Russian)

6. Eremin K.A., Matveyushkin S.A. Risk analysis of bearing structures of steel frame covering of one-storey industrial buildings. *Promyshlennoe i grazhdanskoe stroitel'stvo*. 2011; (3): 16–18. (In Russian)
7. Eremin K.A., Matveyushkin S.A. Reliability analysis of load-bearing structures of steel frame coverings of one-storey industrial buildings. *Promyshlennoe i grazhdanskoe stroitel'stvo*. 2010; (10): 19–21. (In Russian)
8. Tushina O.A. Performance of covering bonds of industrial building with steel frame. *Promyshlennoe i grazhdanskoe stroitel'stvo*. 2019; (1): 37–42. (In Russian)
9. Recommendations on the use of steel profiled decks of a new grade in insulated coverings of industrial buildings: Moscow: Gosstroy, 1985. 33 p. (in Russian)
10. Kudishin Yu.I. The problem of initial imperfections in steel rod system analysis according to deformed scheme. *Promyshlennoe i grazhdanskoe stroitel'stvo*. 2011; (3): 6–9. (In Russian)
11. Tusnin A.R., Berger M.P. Strength analysis of metal truss with damaged elements. *Promyshlennoe i grazhdanskoe stroitel'stvo*. 2018; (11): 35–41. (In Russian)

Сведения об авторе

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

Author Details

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

Статья поступила в редакцию 04.12.2023
Одобрена после рецензирования 14.12.2023
Принята к публикации 16.01.2024

Submitted for publication 04.12.2023
Approved after review 14.12.2023
Accepted for publication 16.01.2024