

Вестник Томского государственного
архитектурно-строительного университета.
2025. Т. 27. № 5. С. 174–184.

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

Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo
arkhitekturno-stroitel'nogo universiteta –
Journal of Construction and Architecture.
2025; 27 (5): 174–184.
Print ISSN 1607-1859
Online ISSN 2310-0044

НАУЧНАЯ СТАТЬЯ

УДК 693.22:624.04

DOI: 10.31675/1607-1859-2025-27-5-174-184

EDN: QTVHRS

МОДЕЛИРОВАНИЕ НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ МЕТАЛЛИЧЕСКИХ КОНСТРУКЦИЙ ТРАМПЛИНА ЛЕТАЮЩИХ ЛЫЖНИКОВ В УСЛОВИЯХ РЕКОНСТРУКЦИИ

Иван Иванович Подшивалов

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

Аннотация. Объектом исследования являются металлические конструкции трамплина летающих лыжников в условиях реконструкции с заданным уровнем нагружения и с анализом статической схемы работы трамплина до и после усиления нижних поясов ферм напрягаемыми стальными тросами.

Цель работы состоит в расчетном обосновании необходимого уровня усиления металлических ферм при реконструкции трамплина, чтобы обеспечить нормативную прочность/устойчивость и жесткость трамплина летающих лыжников.

Поверочный расчет выполнен с учетом фактической конструктивной схемы трамплина летающих лыжников и его реальными прочностными характеристиками стали с разработкой пространственной расчетной конечно-элементной модели в программном комплексе Ing+2021 MicroFe.

Результаты. Для трамплина как системы повышенной деформативности расчетным путем обоснован способ повышения его недостаточной жесткости с помощью усиления нижних поясов ферм с применением напрягаемых стальных тросов с конкретным усилием их натяжения. Выполнен анализ изменившегося напряженно-деформированного состояния усиленных металлических конструкций и проведен конструктивный расчет элементов трамплина летающих лыжников с целью оценки прочности/устойчивости и жесткости металлических конструкций в условиях реконструкции.

Ключевые слова: трамплин, металлические фермы, поверочный расчет, расчетная модель, жесткость, усиление, конструктивный расчет

Для цитирования: Подшивалов И.И. Моделирование напряженно-деформированного состояния металлических конструкций трамплина летающих лыжников в условиях реконструкции // Вестник Томского государственного архитектурно-строительного университета. 2025. Т. 27. № 5. С. 174–184. DOI: 10.31675/1607-1859-2025-27-5-174-184. EDN: QTVHRS

ORIGINAL ARTICLE

FINITE ELEMENT MODELING OF STRESS-STRAIN STATE OF SKI-JUMP METAL STRUCTURES UNDER RECONSTRUCTION

Ivan I. Podshivalov

Tomsk State University of Architecture and Building, Tomsk, Russia

Abstract. Purpose: The aim of this work is to calculate the required level of reinforcement of ski-jump metal structures under reconstruction in order to provide its referenced strength/stability and rigidity.

Methodology/approach: The stress-strain state of the ski-jump structure and its real strength properties is performed by the finite element method using the verified software package Ing+2021 MicroFe.

Research findings: The ski-jump rigidity is improved by reinforcement of bottom chords using tensile steel flexible cables with the certain tension force. The strength analyses are given to a changed stress-strain state of strengthened structures and ski-jump elements.

Keywords: ski-jump, metal structure; check analysis; computational model; rigidity, reinforcement, strength analysis

For citation: Podshivalov I.I. Finite Element Modeling of Stress-Strain State of Ski-Jump Metal Structures under Reconstruction. Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo arkhitekturno-stroitel'nogo universiteta – Journal of Construction and Architecture. 2025; 27 (5): 174–184. DOI: 10.31675/1607-1859-2025-27-5-174-184. EDN: QTVHRS

В настоящее время металлические сооружения, возведенные в период 1950–1980 гг., как правило, требуют реконструкции по различным причинам, в том числе в связи с изменением условий работы сооружения и действующих на него нагрузок по сравнению с теми нагрузками, на которые оно было запроектировано [1]. При выполнении пространственных расчетов необходимо учитывать требования действующих нормативных документов, которые во многом стали жестче, чем те, по которым сооружение проектировалось [2, 3]. Частично удовлетворить эти требования позволяет методика расчета из статьи Д.С. Боровского [4]. Данная методика оценивает прочность стержневых элементов (открытого профиля) стальных конструкций, усиленных под нагрузкой, в условиях многопараметрического нагружения. При усилении стальных конструкций, находящихся под эксплуатационной нагрузкой, следует также учитывать начальные напряжения, деформативность элементов под нагрузкой и др. [5]

Исследования устойчивости решетчатых стержней [6, 7] позволили обобщить метод их расчета, когда влияние сдвиговых деформаций учитывается увеличением расчетной длины стержня, по которой определяется его приведенная гибкость. В статье Г.И. Белого [8] в аналитической форме оценено влияние дефектов, повреждений, а также расцентровки узлов решетчатых элементов на общую устойчивость сквозного стержня. В этой работе также учитывается обеспечение устойчивости ветвей между узлами решетки.

Исследование напряженно-деформированного состояния узлов рам в упруго-пластической стадии работы податливых узлов стальных каркасов многоэтаж-

ных зданий выполнено на основе методов расчета с использованием вычислительного комплекса ABAQUS [9]. В работе А.Р. Туснина [10] представлены результаты экспериментальных исследований плоских ферм при повреждении отдельных их стержней. По полученным данным было определено перераспределение усилий на соседние элементы фермы.

Моделирование действительной работы решетчатых опор башенного типа в вычислительном комплексе SCAD выполнено в разработанной пространственной модели опоры высоковольтной линии электропередачи [11], где проведено сравнение полученных внутренних усилий с аналогичными усилиями в элементах типовой анкерно-угловой опоры.

На основе анализа существующего опыта создания конструктивной формы башенных сооружений А.В. Голиков и И.Р. Ситников [12] предложили конструктивное решение для башни, состоящей из центрального ствола с параллельно расположенными по внешней окружности предварительно напряженными затяжками. Указаны направления совершенствования конструктивной формы башен предложенного конструктивного решения.

Обобщенные исследования, выполненные Е.И. Беленей [13], показали, что предварительное напряжение позволяет повысить несущую способность металлических конструкций, их жесткость, общую устойчивость. В то же время, начиная с 1990-х гг., в России наблюдается снижение теоретических и экспериментальных исследований, а также практики внедрения стальных предварительно напряженных конструкций [14].

Распространение получили тросовые системы, которые имеют как преимущество, позволяющее перекрывать значительные пролеты, так и недостаток – повышенную деформативность под внешним воздействием. В связи с этим расчет тросовых систем по второй группе предельных состояний становится определяющим [15]. При этом большое значение имеет не только эффективное использование высокопрочных тросов, но и оптимальное конструктивное решение для элементов тросовой системы [16].

В настоящей статье объектом исследования является трамплин летающих лыжников (далее трамплин), который был введен в эксплуатацию в 1958 г. (рис. 1). Трамплин состоит из двух конструктивно независимых сооружений – собственно трамплина и лифтовой шахты. Трамплин включает в себя дорожку разгона, переходную кривую и прыжковый стол. Размеры трамплина по габаритным осям: длина – 73,9 м; ширина – 4,5 м; высота – 42,8 м (рис. 2). В качестве опор используются три столбчатых железобетонных фундамента на естественном основании.

Дорожка разгона имеет следующие габаритные размеры: длина – 72,76 м, ширина – 4,5 м, высота – 4,37 м. Несущими конструкциями дорожки разгона являются две вертикальные металлические фермы с параллельными поясами из спаренных уголков – $2\angle 200\times 16$. Стойки ферм – $2\angle 150\times 12$; раскосы – $2\angle 80\times 8$, $2\angle 125\times 10$. Фермы между собой раскреплены связями.

Несущими конструкциями переходной кривой и прыжкового стола являются также две вертикальные металлические фермы переменной высоты от 6,75 до 1,3 м, длина – 22,0 м, ширина – 4,5 м. В каждой металлической ферме имеются следующие конструктивные элементы: верхний пояс – $2\angle 100\times 10$;

нижний пояс – $2\angle 75\times 9$; стойки – $2\angle 200\times 16$ (над промежуточной опорой трамплина), $2\angle 100\times 16$, $2\angle 90\times 8$, $2\angle 75\times 9$; раскосы – $2\angle 100\times 10$, $2\angle 75\times 9$. Фермы также раскреплены между собой связями.



Рис. 1. Общий вид трамплина и лифтовой шахты
Fig. 1. General view of the ski-jump and lift shaft

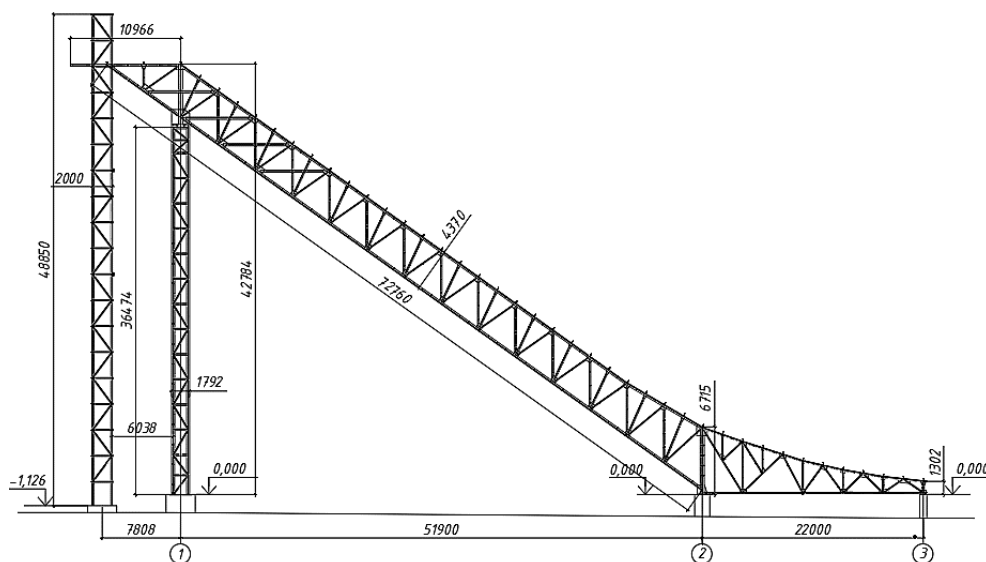


Рис. 2. Геометрическая схема трамплина и лифтовой шахты
Fig. 2. Geometry of the ski-jump and lift shaft

Вертикальная опора дорожки разгона высотой 36,474 м – пространственная решетчатая конструкция переменного сечения по высоте, в состав которой входят следующие конструктивные элементы: четыре стойки – $2\angle 150\times 12$; горизонтальные продольные распорки на 16 уровнях – тавр Т150; горизонтальные поперечные распорки на 8 уровнях – $2\angle 90\times 9$. Вертикальные поперечные связи: горизонтальные распорки – $2\angle 100\times 10$; раскосы – $2\angle 100\times 10$. Горизонтальные крестовые связи – $2\angle 100\times 10$.

Поверочный расчет выполнен с помощью программного комплекса Ing+2021 MicroFe. В разработанной расчетной модели (рис. 3) столбчатые фундаменты трамплина моделировались конечным элементом типа «плоский прямоугольный элемент оболочки», металлические элементы моделировались конечным элементом типа «стержень». Грунтовое слоистое основание моделировалось объемными конечными элементами.

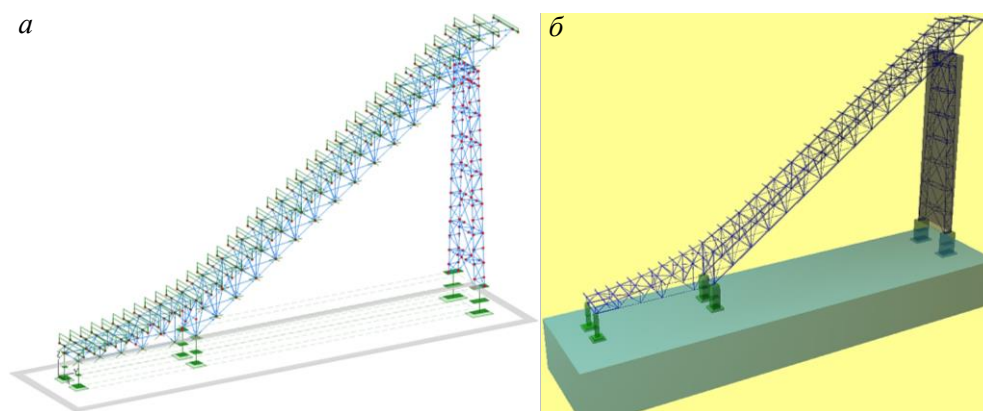


Рис. 3. Разработанная модель:

a – расчетная конечно-элементная модель; *б* – визуализация расчетной конечно-элементной модели

Fig. 3. Computational FEM (a) and visualization (b)

В расчетной модели при заданном уровне нагружения трамплина в условиях реконструкции были рассмотрены две расчетные схемы:

- расчетная схема № 1 – фактическое конструктивное решение трамплина по результатам обследования;
- расчетная схема № 2 – конструктивное решение трамплина в условиях реконструкции с учетом изменения статической схемы работы трамплина путем усиления нижних поясов ферм дорожки разгона напрягаемыми стальными тросами [17, 18].

Расчетная схема № 1. Изополя продольных сил в элементах трамплина приведены на рис. 4, где видно, что наибольшие сжимающие и наибольшие растягивающие продольные силы возникают в верхнем и нижнем поясах ферм дорожки разгона и соответственно равны $N_{с.вп\ max} = -1861,5$ кН и $N_{р.нп\ max} = 1839,2$ кН. В элементах решетки – стойки, раскосы – продольные силы знакопеременны и находятся в интервале от $N_{с.реш\ max} = -751,3$ кН до $N_{р.реш\ max} = 358,9$ кН.

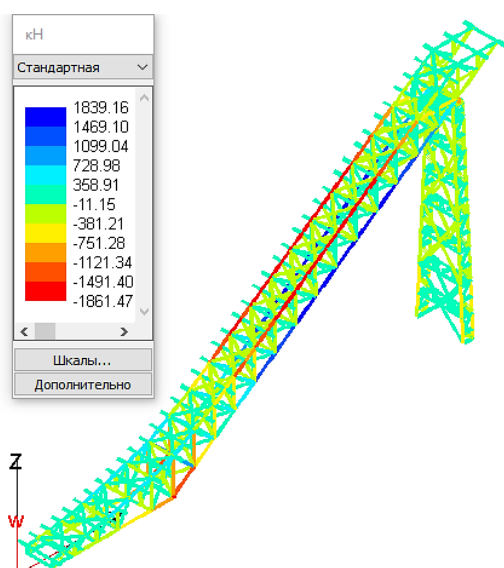


Рис. 4. Изополя продольных сил в металлических элементах трамплина в расчетной схеме № 1
Fig. 4. Isofields of longitudinal forces in metal elements of ski-jump in calculation diagram 1

Изополя вертикальных перемещений трамплина представлены на рис. 5, откуда следует, что максимальные прогибы возникли в пролетной части дорожки разгона и составляют $f_{\max} = 277,3$ мм, которое превышает предельно допустимое значение $f_{\text{иверт}} = L_s/300 = 63\,730 / 300 = 212,4$ мм, где $L_s = 63\,730$ мм – длина пролета дорожки разгона. Таким образом, условие по второй группе предельных состояний для пролетного строения дорожки разгона не выполняется, и необходимо повысить его жесткость.

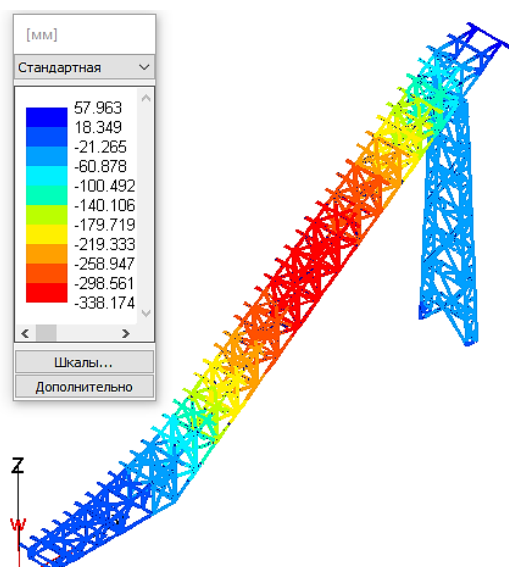


Рис. 5. Изополя вертикальных перемещений металлических конструкций в расчетной схеме № 1
Fig. 5. Isofields of vertical displacements in metal elements of ski-jump in calculation diagram 1

Расчетная схема № 2. Повышение жесткости пролетного строения дорожки разгона осуществляется с помощью стальных напрягаемых тросов, расположенных в нижних поясах ферм. Напряжение тросов выполняется с помощью натяжных устройств, расположенных в опорных узлах ферм. Величина силы натяжения на каждый нижний пояс двух ферм составляет $P_{\text{нат.нп}} = 1500$ кН.

Изополя продольных сил в элементах трамплина приведены на рис. 6, из которого следует, что напряженное состояние в элементах ферм трамплина существенно изменилось по сравнению с расчетной схемой № 1. Так, в верхних поясах ферм дорожки разгона наибольшие сжимающие продольные силы увеличились на 15 % и составили $N_{\text{с.вп.нат max}} = -2183,5$ кН, а в нижних поясах ферм дорожки разгона максимальные растягивающие продольные силы, наоборот, уменьшились на 59 % и стали равны $N_{\text{р.нп.нат max}} = 754,8$ кН.

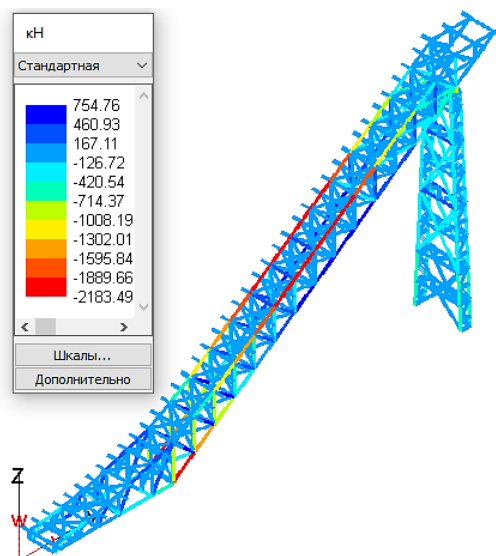


Рис. 6. Изополя продольных сил в металлических элементах трамплина в расчетной схеме № 2
Fig. 6. Isofields of longitudinal forces in metal elements of ski-jump in calculation diagram 2

В элементах решетки продольные силы, так же как и в предыдущем случае, знакопеременны и находятся в интервале от $N_{\text{с.реш max}} = -1302,0$ кН до $N_{\text{р.реш max}} = 167,1$ кН. При этом наибольшие сжимающие продольные силы в элементах решетки увеличились на 42 %, а максимальные растягивающие силы в элементах решетки, наоборот, уменьшились на 53 %.

Изополя вертикальных перемещений трамплина представлены на рис. 7, где показано, что максимальное значение прогибов установлено в пролетной части дорожки разгона и составляет $f_{\text{max}} = 179,9$ мм, которое не превышает предельно допустимое значение $f_{\text{верт}} = 212,4$ мм. Таким образом, за счет обжатия нижних поясов ферм дорожки разгона напрягаемыми стальными тросами изменилась статическая схема работы металлических конструкций трамплина и условие по второй группе предельных состояний стало выполняться, необходимая жесткость трамплина при его реконструкции будет обеспечена.

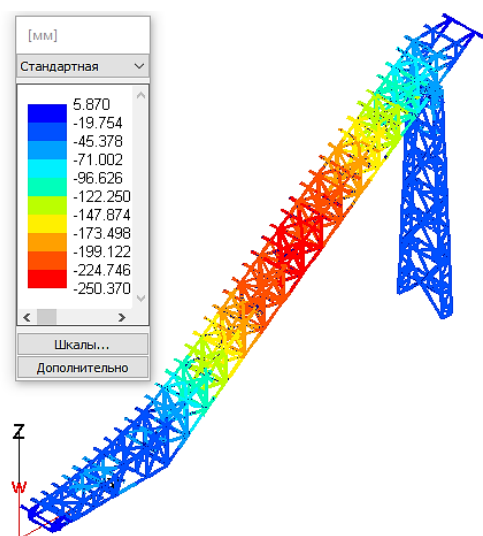


Рис. 7. Изополя вертикальных перемещений металлических конструкций в расчетной схеме № 2
Fig. 7. Isofields of vertical displacements in metal elements of ski-jump in calculation diagram 2

Итоговые результаты конструктивного расчета металлических конструкций трамплина в условиях реконструкции представлены на рис. 8. Наибольшее значение коэффициента использования сечения конструктивных элементов трамплина составляет $K_{ly} = 0,97 < 1$. Следовательно, прочность/устойчивость металлических элементов трамплина после проведения его реконструкции будет обеспечена.

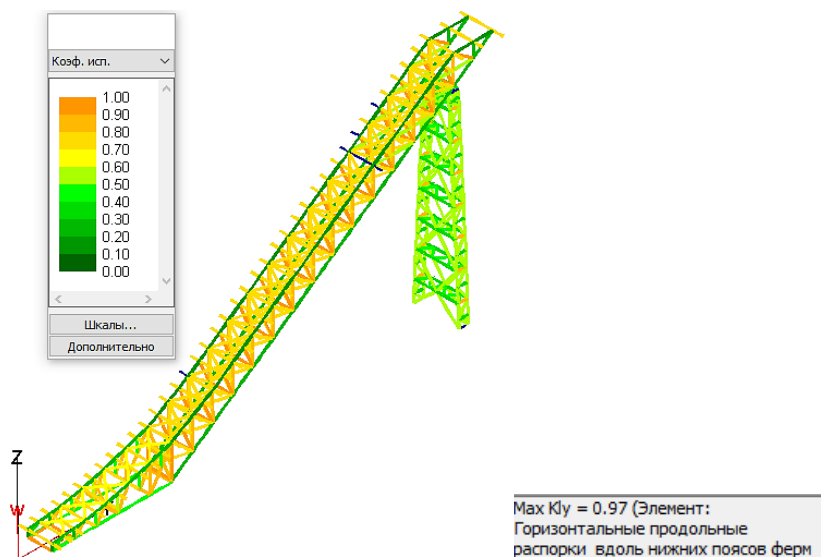


Рис. 8. Изополя коэффициентов использования сечения конструктивных элементов трамплина в расчетной схеме № 2
Fig. 8. Isofields of use factor of structural element cross-sections of ski-jump in calculation diagram 2

В заключение необходимо отметить, что за длительный период эксплуатации трамплина (с 1958 г.) изменились нормативные климатические нагрузки по сравнению с климатическими, на которые трамплин был запроектирован. В связи с этим в условиях реконструкции возникла необходимость в оценке технического состояния трамплина, в том числе и в определении напряженно-деформированного состояния его металлических конструкций.

Из поверочного расчета было установлено, что вследствие повышенной деформативности трамплина условие по второй группе предельных состояний не выполняется. Для обеспечения нормативной жесткости трамплина было предложено выполнить усиление металлических ферм дорожки разгона напрягаемыми стальными тросами в нижних поясах ферм, что привело к существенному изменению напряженно-деформированного состояния металлических элементов трамплина.

Выполненный конструктивный расчет элементов трамплина с учетом усиления нижних поясов ферм дорожки разгона напрягаемыми стальными тросами показал, что прочность/устойчивость металлических конструкций трамплина обеспечена. Таким образом, после проведения усиления металлических конструкций трамплина на заданный уровень нагружения при его реконструкции условия по первой и по второй группам предельных состояний для трамплина выполняются.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Туснина О.А. Расчетное сопровождение реконструкции каркасов действующих металлургических цехов // Вестник МГСУ. 2023. Т. 18. Вып. 2. С. 241–253. DOI: 10.22227/1997-0935.2023.2.241-253. EDN: PUYOWX
2. Золина Т.В. Порядок проведения обследования здания с целью последующей оценки его остаточного ресурса // Вестник МГСУ. 2014. № 11. С. 98–108. EDN: SZCFRC
3. Золина Т.В., Туснин А.Р. Увеличение срока эксплуатации промышленного объекта введением конструктивных мер // Вестник МГСУ. 2015. № 6. С. 41–49. EDN: TYCWVV
4. Боровский Д.С. Расчет на прочность усиливаемых под нагрузкой стержневых элементов стальных конструкций при многопараметрическом нагружении // Вестник гражданских инженеров. 2021. № 2. С. 36–41. DOI: 10.23968/1999-5571-2021-18-2-36-41
5. Михаськин В.В., Астахов И.В. К усилению изгибаемых элементов стальных конструкций, находящихся под нагрузкой // Вестник гражданских инженеров. 2023. № 2. С. 30–36. DOI: 10.23968/1999-5571-2023-20-2-30-37
6. Тимошенко С.П. Устойчивость стержней, пластин и оболочек. Москва : Наука, 1971. 807 с.
7. Стрелецкий Н.С. Материалы к курсу стальных конструкций. Москва : Госстройиздат, 1959. 283 с.
8. Белый Г.И., Лобовский М.О. Устойчивость ветвей решетчатых элементов стальных конструкций // Вестник гражданских инженеров. 2023. № 2. С. 18–29. DOI: 10.23968/1999-5571-2023-20-2-18-29. EDN: YWGOEA
9. Туснина В.М., Коляго А.А. К вопросу действительной работы податливых узлов стальных каркасов многоэтажных зданий // Промышленное и гражданское строительство. 2018. № 2. С. 28–34. EDN: YTCEAU
10. Туснин А.Р., Бергер М.П. Расчет металлической фермы с поврежденными элементами // Промышленное и гражданское строительство. 2018. № 11. С. 35–41. EDN: YOGUHB
11. Гаранжа И.М., Танасогло А.В. Анализ напряженно-деформированного состояния анкерно-угловой воздушной линии электропередачи 110 кВ // Вестник Томского государственного архитектурно-строительного университета. 2018. Т. 20. № 4. С. 74–85. DOI: 10.31675/1607-1859-2018-20-4-74-85. EDN: XWCDBB

12. Голиков А.В., Ситников И.Р. Напряженно-деформированное состояние башен с решетчатыми поясами // Промышленное и гражданское строительство. 2018. № 7. С 43–50.
13. Беленя Н.Е. Предварительно напряженные металлические конструкции. Москва : Стройиздат, 1963. 324 с.
14. Кравчук В.А., Кравчук Е.В. Развитие исследований предварительно напряженных строительных металлических конструкций // Вестник гражданских инженеров. 2019. № 6. С. 86–92. DOI: 10.23968/1999-5571-2019-16-6-86-92. EDN: IWTGOI
15. Чесноков А.В., Михайлов В.В., Сабитов Л.С. Двухпоясная предварительно напряженная тросовая система с конструктивным зазором // Известия КазГАСУ. 2010. № 2. С. 137–142.
16. Гарифуллин М.Р., Семенов С.А., Беляева С.В., Порываев И.А., Сафиуллин М.Н., Семенов А.А. Поиск рациональной геометрической схемы пространственной металлической конструкции покрытия большепролетного спортивного сооружения // Строительство уникальных зданий и сооружений. 2014. № 2. С. 107–124. EDN: RWGNQF
17. Беленя Е.И. Предварительно напряженные металлические несущие конструкции. Москва : Стройиздат, 1963. 324 с.
18. Москалев М.Б., Горюнов М.В. К вопросу о регулировании НДС конструкций с учетом прогрессирующего обрушения // Вестник гражданских инженеров. 2020. № 6. С.70–76. EDN: ECFSSC

REFERENCES

1. Tusnina O.A. Calculation of Framework Reconstruction in Operating Metallurgical Workshops. *Vestnik MGSU*. 2023; 18 (2): 241–253. (In Russian)
2. Zolina T.V. Examination Procedure for Building Residual Service Life. *Vestnik MGSU*. 2014; (11): 98–108. (In Russian)
3. Zolina T.V., Tusnin A.R. Extending of Operation Life of Industrial Building. *Vestnik MGSU*. 2015; (6): 41–49. (In Russian)
4. Borovskiy D.S. Strength Analysis of Rod Elements of Steel Structures under Multiparameter Loading. *Vestnik grazhdanskikh inzhenerov*. 2021; 2 (85): 36–41. (In Russian)
5. Mikhaskin, V.V., Astakhov, I.V. Reinforcement of Bending Elements of Steel Structures under Load. *Vestnik grazhdanskikh inzhenerov*. 2023; 97 (2): 30–36. (In Russian)
6. Timoshenko S.P. Stability of Rods, Plates and Shells. Moscow: Nauka, 1971. 807 p. (In Russian)
7. Streletskii N.S. Course on Steel Structures. Vol. 1: Work of Compressed Vertical Rods. Moscow: Gosstroyizdat, 1959. 284 p. (In Russian)
8. Belyi G.I., Lobovskii M.O. Stability of Lattice Branch Elements of Steel Structures. *Vestnik grazhdanskikh inzhenerov*. 2023; 97 (2): 18–29. (In Russian)
9. Tusnina V.M., Kolyago A.A. Toward Actual Work of Pliable Nodes of Steel Frames of Multi-story Buildings. *Promyshlennoe i grazhdanskoe stroitel'stvo*. 2018; (2): 28–34. (In Russian)
10. 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)
11. Garanzha I.M., Tanasoglo A.V. Stress-Strain State Analysis of Angle-Tension, Two-Circuit 110 kV Suspension Tower. *Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo arkhitekturno-stroitel'nogo universiteta – Journal of Construction and Architecture*. 2018; 20(4): 74–85. DOI: 10.31675/1607-1859-2018-20-4-74-85. EDN: XWCDBB (In Russian)
12. Golikov A.V., Sitnikov I.R. Stress-strain State of Towers with Lattice Belts. *Promyshlennoe i grazhdanskoe stroitel'stvo*. 2018; (7), 43–50. (In Russian)
13. Belenya N.E. Prestressed Metal Structures. Moscow: Stroyizdat, 1963. 324 p. (In Russian)
14. Kravchuk V.A., Kravchuk E.V. Development of Research on Prestressed Building Metal Structures. *Vestnik grazhdanskikh inzhenerov*. 2019; 77 (6): 86–92. (In Russian)
15. Chesnokov A.V., Mikhailov V.V., Sabitov L.S. Two-Belt Prestressed Cable System with a Structural Gap. *Izvestiya KazGASU*. 2010; 2 (14): 137–142. (In Russian)
16. Garifullin M.R., Semyonov S.A., Belyaeva S.V., Poryvaev I.A., Safiullin M.N., Semyonov A.A. Search for Rational Geometry of Spatial Metal Structure of Large-Span Sports Facility Cover. *Stroitel'stvo unikal'nykh zdaniy i sooruzhenii*. 2014; 2 (17): 107–124. (In Russian)
17. Belenya E.I. Prestressed Metal Bearing Structures. Moscow: Stroyizdat, 1963. 324 p. (In Russian)

18. *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. (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 03.12.2024
Одобрена после рецензирования 19.12.2024
Принята к публикации 05.05.2025

Submitted for publication 03.12.2024
Approved after review 19.12.2024
Accepted for publication 05.05.2025