

УДК 69.04

© М. О. Лобовский, аспирант
(Санкт-Петербургский государственный
архитектурно-строительный университет,
Санкт-Петербург, Россия)
E-mail: lobovskiy.m@mail.ru

DOI 10.23968/1999-5571-2024-21-1-23-29

© М. О. Lobovskiy, post-graduate student
(Saint Petersburg State University
of Architecture and Civil Engineering,
St. Petersburg, Russia)
E-mail: lobovskiy.m@mail.ru

ВЛИЯНИЕ ДЕФЕКТОВ И ПОВРЕЖДЕНИЙ НА ОБЩУЮ УСТОЙЧИВОСТЬ РЕШЕТЧАТОГО ЭЛЕМЕНТА

THE EFFECT OF DEFECTS AND DAMAGES ON THE OVERALL STABILITY OF THE LATTICE ROD ELEMENT

По результатам множества технических экспертиз эксплуатируемых стальных двухветвевых элементов были выделены различного рода дефекты и повреждения, оказывающие существенное влияние на характер работы и общую устойчивость решетчатого элемента. Наиболее распространенными из них являются: расцентровка узлов решетки, отсутствие отдельных элементов решетки, повреждения и искривления отдельных ветвей, общее искривление решетчатой колонны в плоскости параллельной решетке и т. д. В действующих нормативных документах отсутствуют рекомендации по расчету дефектных конструкций, поэтому был предложен метод проверки общей устойчивости решетчатого стержня, который позволяет учитывать влияние различных дефектов и повреждений. На основании данного метода и моделирования конечно-элементной модели был выполнен анализ общей устойчивости решетчатого стержня и определена величина снижения устойчивости элемента при наличии в нем различных дефектов и повреждений.

Ключевые слова: решетчатый стержневой элемент, общая устойчивость, дефекты и повреждения, плоскость, параллельная решетке.

Based on the results of many technical examinations of in-service steel double-branch elements, there have been identified various kinds of defects and damages which have a significant impact on the nature of operation and overall stability of the lattice element. The most common of these are the following: misalignment of lattice nodes, missing of individual lattice elements, damage and curvature of individual branches, general curvature of the lattice column in the parallel lattice plane, etc. The currently valid normative documents lack recommendations for the calculation of defective structures, so a method for checking the overall stability of a lattice rod is proposed, which allows taking into account the impact of various defects and damages. Based on this method and modeling of the finite element model, an analysis of the overall stability of the lattice rod was performed and the magnitude of the stability decrease of the element in the presence of various defects and damages was determined.

Keywords: lattice rod element, overall stability, defects and damages, plane parallel to the lattice.

Особенности работы сквозных (решетчатых) сжато-изогнутых элементов стальных конструкций изложены в работах [1–3] и заключаются в следующем: решетка колонны воспринимает сдвигающие усилия, обеспечивая совместную работу отдельных ветвей это приводит к тому, что распределение усилий в решетчатых конструкциях между от-

дельными элементами зависит от множества факторов.

Многолетний опыт выполнения технических экспертиз эксплуатируемых стальных двухветвевых колонн, наиболее часто встречающихся в промышленном строительстве, показал, что в конструкциях присутствуют различного рода дефекты и повреждения,

которые оказывают влияние на характер работы и несущую способность конструкции. К наиболее распространенным дефектам и повреждениям¹ относятся следующие: расцентровка узлов решетки; отсутствие отдельных элементов решетки как с одной, так и с обеих сторон колонны; повреждения и искривления отдельных ветвей; общее искривление решетчатой колонны в плоскости, параллельной решетке, и др., которые не учитываются в СП16.13330.2017² при анализе устойчивости составных элементов.

Для разрешения этого вопроса В. В. Горевым [1, 2], а позже Г. И. Белым [4–6] были предложены проверки устойчивости составных элементов, которые выполняются без разделения их на общую и местную (отдельных ветвей) устойчивость, как этого требуют действующие нормы². Предложенная В. В. Горевым методика приводит к существенному занижению устойчивости элемента, что было замечено Г. И. Белым.

Проверка устойчивости согласно [4–6] выполняется по формуле

$$\frac{N}{\varphi_{ed} A R_y \gamma_c} \leq 1, \quad (1)$$

¹ Пособие по проектированию усиления стальных конструкций (к СНиП II-23-81*). М.: Стройиздат, 1989. 159 с.

² СП 16.13330.2017. Стальные конструкции. Актуализированная редакция СНиП II-23-81 (с поправками, с Изменениями № 1, 2, 3, 4, 5). М.: Стандартинформ, 2017. 139 с.

где

$$\varphi_{ed} = \frac{b}{2a} - \sqrt{\frac{b^2}{4a^2} - \frac{1}{a}};$$

$$a = \frac{\bar{\lambda}_{ef}^2}{\pi^2 \varphi_{ув}} \left[1 - \left(m_y^0 + m_{y\varphi}^0 \frac{\varphi_{ув} - 0,8}{0,2} \right) 0,2337 \right];$$

$$b = \left[1 + \left(m_y^0 + m_{y\varphi}^0 \frac{\varphi_{ув} - 0,8}{0,2} \right) \right] \varphi_{ув}^{-1} + \frac{\bar{\lambda}_{ef}^2}{\pi^2};$$

$m_{y\varphi}^0 = 0,008 + 0,03\bar{\lambda}_{ef}$ — относительный эксцентриситет, компенсирующий физическую нелинейность, которая проявляется от предела пропорциональности $\bar{\sigma}_{п.п} = \sigma_{п.п} / R_y = 0,8$ до предела текучести $\bar{\sigma}_T = 1,0$ (рис. 1); $\varphi_{ув}$ — коэффициент устойчивости ветви.

1. Предлагаемый метод использовался при анализе устойчивости решетчатых колонн [7–14], в которых присутствовала симметричная (равная с обеих сторон элемента) расцентровка узлов решетки. Наличие несоосного сопряжения элементов приводит к образованию дополнительного эксцентриситета силы $m_{хв} = 0,5...1,0$, влияющего на устойчивость отдельных ветвей колонны $\varphi_{ув}$.

На графиках (рис. 2 и 3) показана зависимость отношения коэффициента устойчивости, определяемого при наличии в решетчатой колонне расцентровки узлов решетки, к коэффициенту в бездефектной колонне в зависимости от конечного относительного

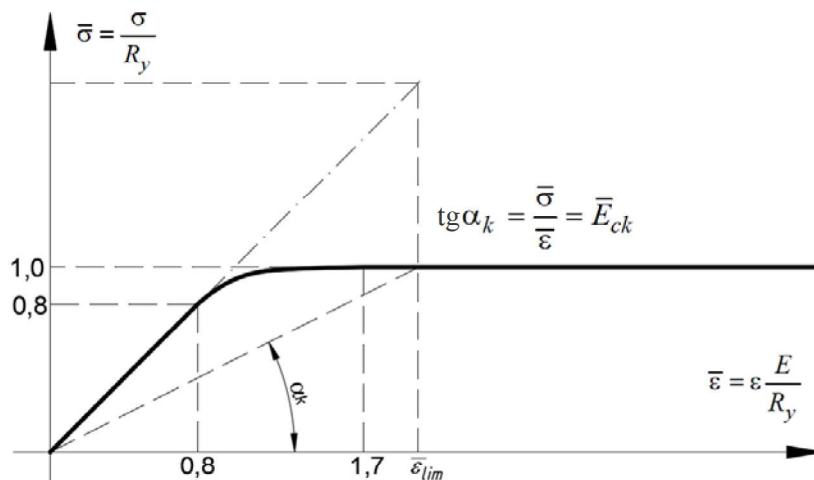


Рис. 1. Унифицированная диаграмма работы стали

эксцентриситета $m_y^0 = 0,25 \dots 8,0$ составной колонны, при различных значениях гибкости отдельной ветви $\bar{\lambda}_{xв}$ и относительного эксцентриситета ветви $m_{xв}$, образующегося в результате расцентровки узлов решетки.

На графике (рис. 2) сплошными линиями обозначены отношения при наличии в ветви дополнительного эксцентриситета $m_{xв} = 0,5$, а штрихпунктирными — $m_{xв} = 1,0$, при гибкости ветви $\bar{\lambda}_{xв} = 1$, в зависимости от раз-

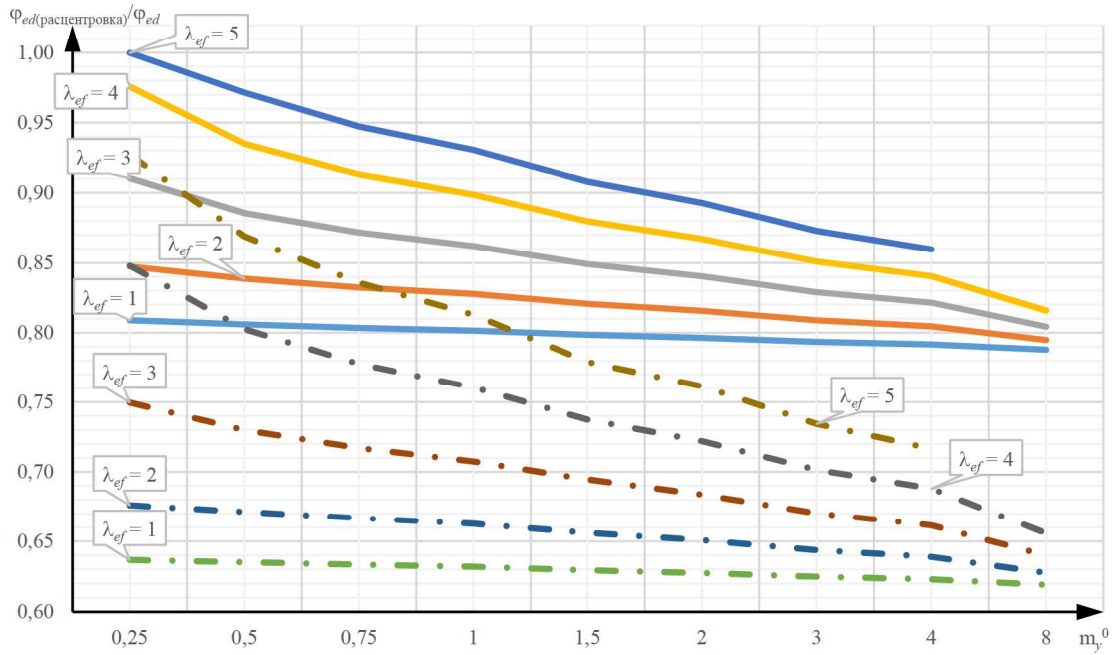


Рис. 2. Сопоставление коэффициентов общей устойчивости $\varphi_{ed(расцентровка)}$ и φ_{ed} при $\lambda_{xв} = 1, m_{xв} = 0,5; 1,0$

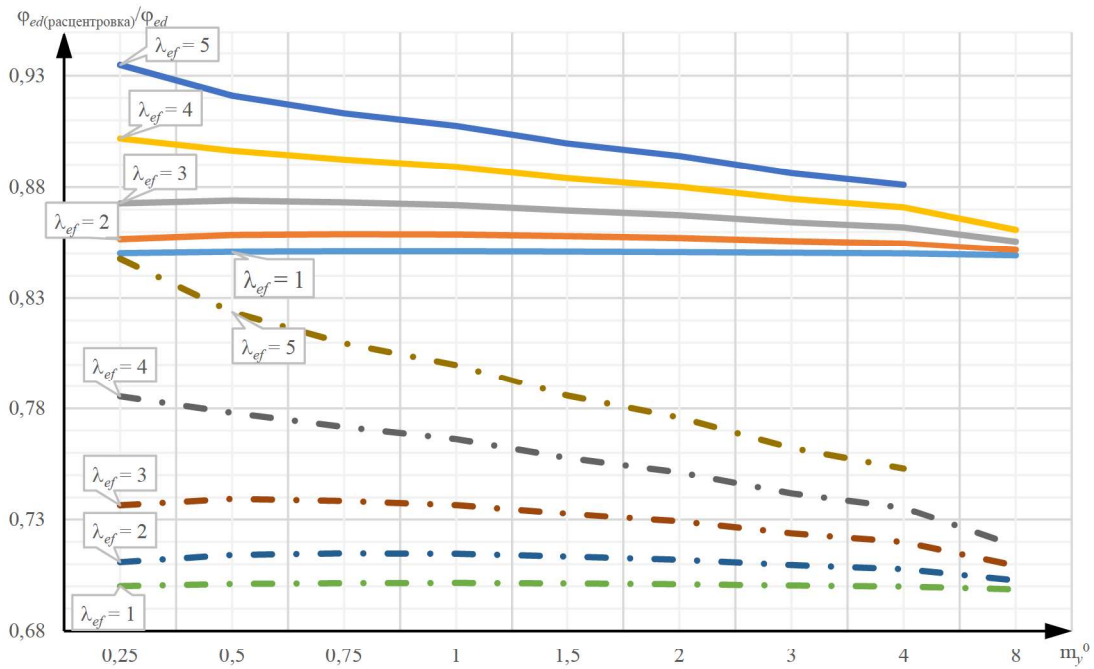


Рис. 3. Сопоставление коэффициентов общей устойчивости $\varphi_{ed(расцентровка)}$ и φ_{ed} при $\lambda_{xв} = 3, m_{xв} = 0,5; 1,0$

Снижение общей устойчивости решетчатого стержня при отсутствии отдельных элементов решетки

№ п/п	Плоскость потери устойчивости	Отсутствует элемент решетки посередине	Отсутствует элемент решетки сверху	Отсутствуют элементы решетки посередине с двух сторон	Отсутствуют элементы решетки сверху с двух сторон
1	Из плоскости	0,9999	0,9988	0,9998	0,9986
2	Из плоскости	0,9994	0,9994	0,9993	0,9993
3	Из плоскости	0,9998	0,9999	0,9998	0,9999
4	В плоскости	0,9954	0,9895	0,5322	0,8275
5	В плоскости	0,8966	0,9726	0,8054	0,9025

личных значений общей условной гибкости решетчатого стержня $\bar{\lambda}_{ef} = 1 \dots 5$.

На графике (рис. 3) показаны аналогичные предыдущему графику (см. рис. 2) зависимости, но уже с гибкостью ветви $\bar{\lambda}_{хв} = 3$.

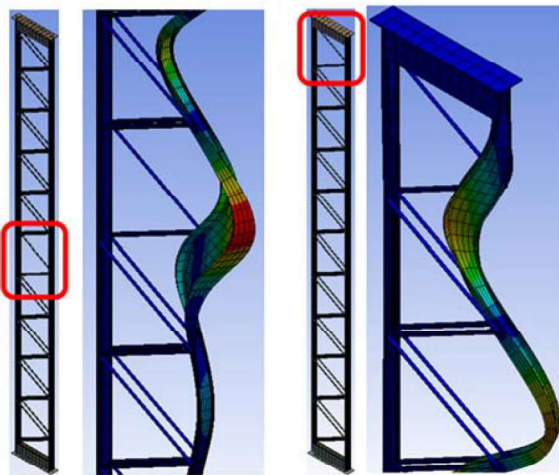


Рис. 4. Отсутствие элементов решетки с одной стороны колонны (посередине и в верхней части колонны)

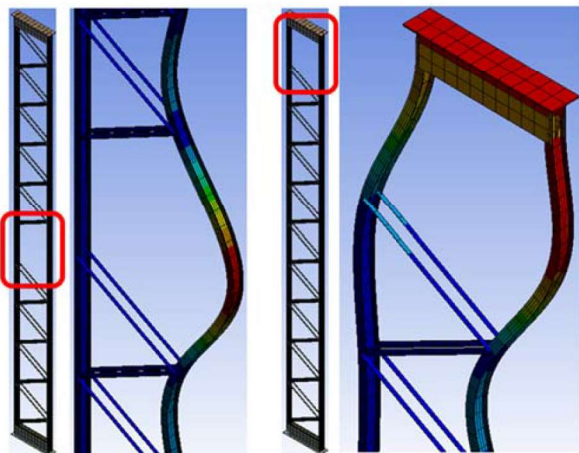


Рис. 5. Отсутствие элементов решетки с двух сторон колонны (посередине и в верхней части колонны)

По результатам анализа было получено, что снижение общей устойчивости решетчатого стержня при малой гибкости ветви ($\bar{\lambda}_{хв} = 1, m_{хв} = 1,0$) доходило до 38 %, при увеличении гибкости ветви ($\bar{\lambda}_{хв} = 3, m_{хв} = 1,0$) — до 30 %.

2. Проверка общей устойчивости решетчатого стержня в случаях отсутствия отдельных элементов решетки как с одной, так и с обеих сторон проводилась с применением конечно-элементной (КЭ) модели в программном комплексе Ansys Mechanical. Рассматривались три варианта потери устойчивости из плоскости соединительной решетки и два — в плоскости, параллельной решетке.

В качестве исследуемого образца выступала двухветвевая решетчатая колонна, ветви которой выполнялись из двутавров, а решетка — из равнополочных уголков.

В таблице представлены результаты анализа, согласно которым отсутствие элементов решетки с одной стороны не оказывает значительного влияния на общую устойчивость составного элемента (снижение не более 1 %). Однако стоит отметить, что при потере устойчивости в плоскости решетки в местах отсутствия элемента в ветви возникала деформация кручения (изгибно-крутильная форма потери устойчивости) (рис. 4), хотя при наличии всех элементов решетки такого эффекта не происходило.

При отсутствии элементов решетки с двух сторон было получено, что при потере устойчивости из плоскости решетки данный дефект не оказывает никакого влияния (см. таблицу), в то время как при потере

устойчивости в плоскости решетки (изгибная форма потери устойчивости) (рис. 5) наблюдалось ее существенное снижение.

На основании выполненных расчетов снижение устойчивости в плоскости, параллельной решетке, при отсутствии элементов с двух сторон в середине колонны доходило до 47 %; в верхней части колонны — до 17,3 %. Данное снижение объясняется тем, что при выключении из работы отдельных элементов решетки расчетная длина ветви значительно увеличивается.

3. Общее искривление в плоскости, параллельной соединительной решетке (рис. 6), согласно пособию по усилению стальных конструкций, приведем к общему эквивалентному эксцентриситету приложения силы:

$$m_{ef} = km_{искр} + m_y^0, \quad (2)$$

где $k = 0,8 + 0,25 \frac{\sqrt{m_{искр}}}{\bar{\lambda}_{ef}}$ — коэффициент перехода от максимальной стрелки искривления к эквивалентному эксцентриситету; $\bar{\lambda}_{ef} = 1...5$ — общая условная гибкость решетчатого стержня; $m_{искр}$ — относительный эксцентриситет, образующийся от искривления

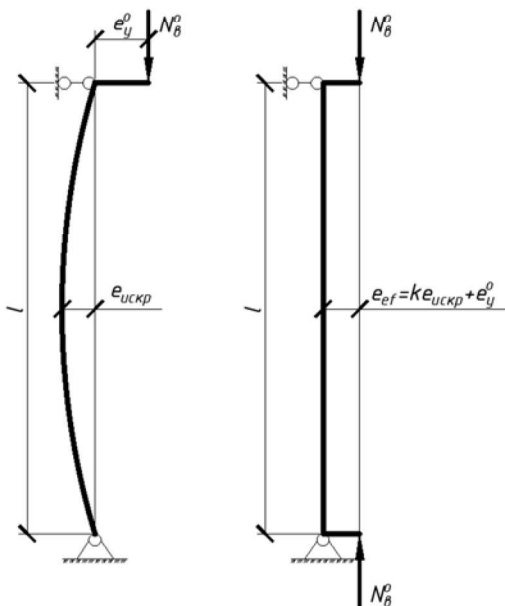


Рис. 6. Схема общего искривления решетчатой колонны в плоскости, параллельной решетке

элемента; $m_y^0 = 0,25...8,0$ — концевой относительный эксцентриситет решетчатой колонны.

Для анализа влияния искривления оси на общую устойчивость составного элемента было выполнено сравнение результатов, получаемых с применением метода (1), при расчете бездефектной колонны φ_{ed} — и колонны при наличии в ней общего искривления в плоскости решетки $\varphi_{ed,д}$, приводящего к образованию дополнительного эксцентриситета $m_{искр} = 0,25...0,5$.

На графиках (рис. 7) показано отношение коэффициентов $\varphi_{ed,д}$ и φ_{ed} в зависимости от относительного эксцентриситета общей силы, действующей в составной колонне m_y^0 , при различных значениях общей условной гибкости решетчатого стержня $\bar{\lambda}_{ef}$.

По результатам выполненного анализа было выявлено снижение общей устойчивости элемента: при малом искривлении ($m_{искр} = 0,25$) оно составило 16,6 %, при увеличении искривления (до $m_{искр} = 0,5$) снижение достигало 28,1 %.

Выводы

Проведенные исследования, направленные на анализ общей устойчивости стальных решетчатых колонн с различными дефектами и повреждениями, показали, что даже на первый взгляд незначительные несовершенства конструкций могут приводить к существенному снижению работоспособности элемента, а предлагаемый метод проверки общей устойчивости решетчатых стержней и моделирование КЭ модели позволили определить величину этого снижения.

Библиографический список

1. Горев В. В. Общая устойчивость сжатых сквозных стержней // Изв. вузов. Строительство и архитектура. 1983. № 1. С. 39–40.
2. Горев В. В. Разработка общей методики статического расчета сжатых решетчатых металлических конструкций и совершенствование их конструктивной формы: дис. ... д-ра техн. наук. Липецк, 1985. 403 с.

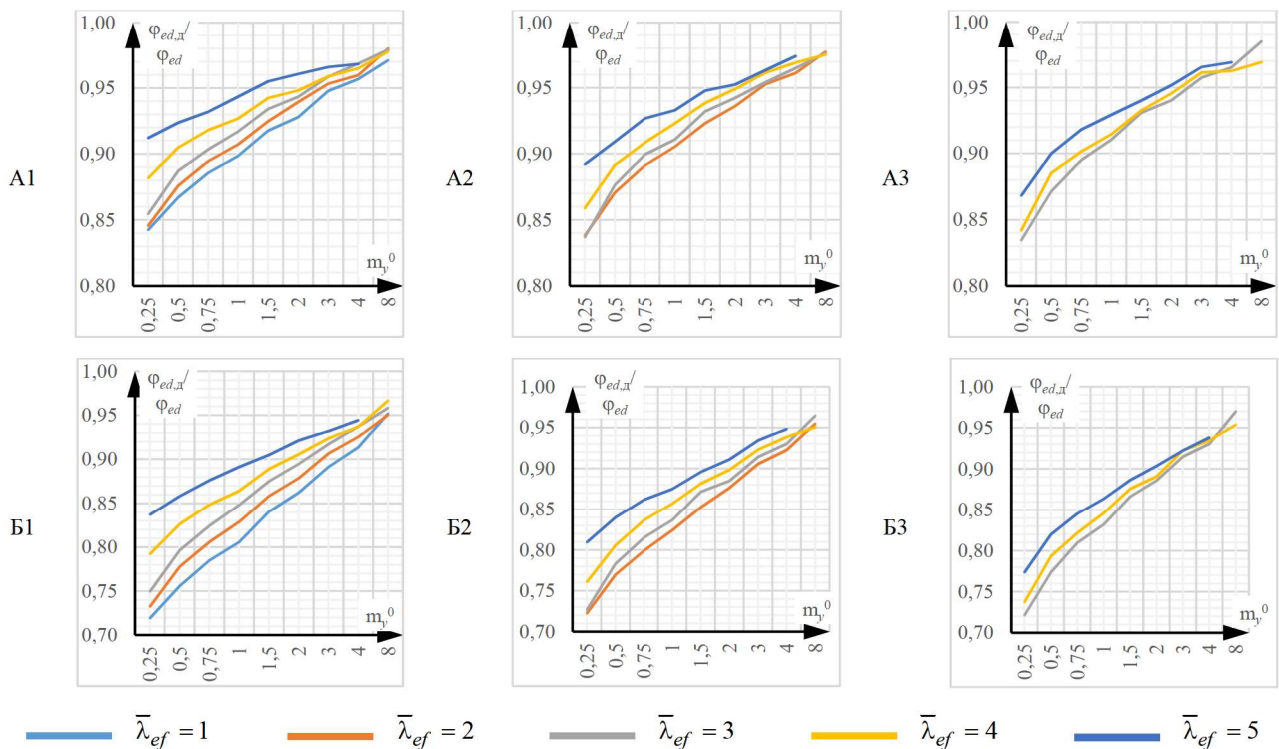


Рис. 7. Сопоставление коэффициентов общей устойчивости $\Phi_{ed,x}$ и Φ_{ed} : А1 — при $\bar{\lambda}_{xв} = 1$; $\varphi_b = 0,948$; $m_{искр} = 0,25$; А2 — при $\bar{\lambda}_{xв} = 2$; $\varphi_b = 0,826$; $m_{искр} = 0,25$; А3 — при $\bar{\lambda}_{xв} = 3$; $\varphi_b = 0,643$; $m_{искр} = 0,25$; Б1 — при $\bar{\lambda}_{xв} = 1$; $\varphi_b = 0,948$; $m_{искр} = 0,5$; Б2 — при $\bar{\lambda}_{xв} = 2$; $\varphi_b = 0,826$; $m_{искр} = 0,5$; Б3 — при $\bar{\lambda}_{xв} = 3$; $\varphi_b = 0,643$; $m_{искр} = 0,5$

3. Ведеников Г. С., Беленя Е. И., Игнатъева В. С. и др. Металлические конструкции: Общий курс / под ред. Г. С. Веденикова. 7-е изд., перераб. и доп. М.: Стройиздат, 1998. 760 с.

4. Белый Г. И. Расчет на устойчивость решетчатых элементов стальных конструкций // Вестник МГСУ. 2022. Т. 17. Вып. 10. С. 1347–1357. DOI: 10.22227/1997-0935.2022.10.1347-1357.

5. Белый Г. И. О расчете упругих стержней по деформированной схеме при действии активных и параметрических нагрузок. Механика стержневых систем и сплошных сред // Сб. науч. тр. ЛИСИ. 1980. № 32. С. 41–48.

6. Белый Г. И., Лобовский М. О. Устойчивость ветвей решетчатых элементов стальных конструкций // Вестник гражданских инженеров. 2023. № 2 (97). С. 18–29. DOI 10.23968/1999-5571-2023-20-2-18-29. EDN YWGOEA.

7. Тимошенко С. П. Устойчивость стержней, пластин и оболочек. М.: Наука, 1971. 807 с.

8. Тимошенко С. П. Устойчивость упругих систем. Изд. 2-е. М.: Гос. изд-во технико-теоретической литературы, 1955. 567 с.

9. Горев В. В. Общая устойчивость сжатых сквозных стержней // Изв. вузов. Строительство и архитектура. 1983. № 1. С. 39–40.

10. Горев В. В. Устойчивость центрально сжатых составных стержней при упругой работе // Исследования по строительным конструкциям: сб. науч. тр. Томск: Томский ИСИ, 1964. Т. XI. С. 71–82.

11. Броуде Б. М. Об устойчивости составных стержней с планками // Строительная механика и расчет сооружений. 1966. № 6. С. 24–26.

12. Стрелецкий Н. С. Материалы к курсу стальных конструкций. Вып. 2. М.: Госстройиздат, 1959. Т. 1. Работа сжатых стоек. 284 с.

13. Ржаницын А. Р. Расчет составных стержней в состоянии предельного равновесия // Строительная механика и расчет сооружений. 1967. № 5. С. 27–30.

14. Трофимов В. И. Исследование и расчет элементов стальных опор линий электропередачи. М.; Л.: Госэнергоиздат, 1959. 103 с.

References

1. Gorev V. V. *Obshchaya ustoychivost' szhatykh skvozykh stержней* [General stability of compressed through rods]. *Izv. vuzov. Stroitel'stvo i arkhitektura – Bulletin of Higher Schools. Construction and Architecture*, 1983, no. 1, pp. 39–40.

2. Gorev V. V. *Razrabotka obshchey metodiki staticheskogo rascheta szhatykh reshchatykh*

metallicheskikh konstruktsiy i sovershenstvovanie ikh konstruktivnoy formy. Diss. dokt. tekhn. nauk [Development of the general methodology of static calculation of compressed lattice metal structures and improvement of their structural form. Dr. Sci. Tech. diss.]. Lipetsk, 1985, 403 p.

3. Vedenikov G. S., et al. *Metallicheskie konstruktsii. Obshchiy kurs* [Metal structures. General course]. Ed. by Vedenikov G. S. 7-th. ed., revised. Moscow, Stroyizdat Publ., 1998, 760 p.

4. Belyi G. I. *Raschet na ustoychivost' reshetchatykh elementov stal'nykh konstruktsiy* [Calculation of stability of lattice elements of steel structures]. *Vestnik MGSU – Bulletin of MGSU*, 2022, vol. 17, iss. 10, pp. 1347–1357. DOI: 10.22227/1997-0935.2022.10.1347-1357.

5. Belyi G. I. *O raschete uprugikh sterzhney po deformirovannoy skheme pri deystvii aktivnykh i parametricheskikh nagruzok. Mekhanika sterzhnevnykh sistem i sploshnykh sred* [Regarding the calculation of elastic rods by deformed scheme under the action of active and parametric loads. Mechanics of rod systems and continuous media]. *Trudy LISI – Bulletin of LISI*, 1980, no. 32, pp. 41–48.

6. Belyi G. I., Lobovskiy M. O. *Ustoychivost' vetvey reshetchatykh elementov stal'nykh konstruktsiy* [Stability of branches of lattice elements of steel structures]. *Vestnik grazhdanskikh inzhenerov – Bulletin of Civil Engineers*, 2023, no. 2 (97), pp. 18–29. DOI 10.23968/1999-5571-2023-20-2-18-29. EDN YWGOEA

7. Timoshenko S. P. *Ustoychivost' sterzhney, plastin i obolochek* [Stability of rods, plates and shells]. Moscow: Nauka Publ., 1971, 807 p.

8. Timoshenko S. P. *Ustoychivost' uprugikh sistem* [Stability of elastic systems]. 2-nd ed. Moscow, Gos.

izdatel'stvo tekhniko-teoreticheskoy literatury Publ., 1955, 567 p.

9. Gorev V. V. *Obshchaya ustoychivost' szhatykh skvoznykh sterzhney* [General stability of compressed through bars]. *Izv. vuzov. Stroitel'stvo i arkhitektura – Bulletin of Higher Schools. Construction and Architecture*, 1983, no. 1, pp. 39–40.

10. Gorev V. V. *Ustoychivost' tsentral'no szhatykh sostavnykh sterzhney pri uprugoy rabote* [Stability of centrally compressed composite rods at elastic work]. *Trudy ISI «Issledovaniya po stroitel'nykh konstruktsiyam»* [Proceedings of Tomsk ISI «Research works on building constructions»]. Tomsk, Tomskiy ISI Publ., 1964, vol. XI, pp. 71–82.

11. Broude B. M. *Ob ustoychivosti sostavnykh sterzhney s plankami* [About stability of composite rods with bars]. *Stroitel'naya mekhanika i raschet sooruzheniy – Structural mechanics and calculation of structures*, 1966, no. 6, pp. 24–26.

12. Streletskiy N. S. *Materialy k kursu stal'nykh konstruktsiy* [Materials for the course of steel structures]. Iss. 2. Moscow, Gosstroyizdat Publ., 1959, vol. 1. *Rabota szhatykh stoek* [Performance of compressed support pillars], 284 p.

13. Rzhantsyn A. R. *Raschet sostavnykh sterzhney v sostoyanii predel'nogo ravnovesiya* [Calculation of composite rods in the state of limit equilibrium]. *Stroitel'naya mekhanika i raschet sooruzheniy – Construction mechanics and calculation of structures*, 1967, no. 5, pp. 27–30.

14. Trofimov V. I. *Issledovanie i raschet elementov stal'nykh opor liniy elektroperedachi* [Investigation and calculation of elements of steel supports of power transmission lines]. Moscow, Leningrad, Gosenergoizdat Publ., 1959, 103 p.