

СТРОИТЕЛЬНЫЕ КОНСТРУКЦИИ, ЗДАНИЯ И СООРУЖЕНИЯ

BUILDING CONSTRUCTIONS, BUILDINGS AND ENGINEERING STRUCTURES




УДК 69.07

Оригинальное эмпирическое исследование

<https://doi.org/10.23947/2949-1835-2026-5-2-41-48>

К вопросу определения расчетных длин элементов в структурных конструкциях типа «Кисловодск»

С.В. Щуцкий  , А.А. Лиманцев 

Донской государственный технический университет, г. Ростов-на-Дону, Российская Федерация

 sypike1@rambler.ru



EDN: OHXFLF

Аннотация

Введение. В статье рассмотрен вопрос определения расчетных длин стержней структурной конструкции типа «Кисловодск». При обследовании существующей конструкции покрытия торгового центра в проектной документации на объект авторами статьи выявлено, что в расчетах конструкции для стержней применяется коэффициент расчетной длины, равный 0,8. Значение 0,8 обусловлено результатами проведенных испытаний в ЦНИИСК им. Кучеренко в 1987 г. Однако действующие нормативные документы предписывают использовать коэффициент расчетной длины, равный 1. Целью данной статьи является обоснование значения коэффициента расчетной длины в расчетах подобных конструкций.

Материалы и методы. Рассмотрен стандартный узел крепления стержней к узловому коннектору. Принято решение об изучении работы как отдельного узла структурной конструкции, так и стержней совместно при помощи моделирования в программном комплексе Femap with Nastran. В работе рассматривается влияние узлового соединения на устойчивость отдельного стержня. Для этого выполнено моделирование узлового элемента конструкции с опиранием при контактном соединении сжатого стержня и расчет отдельного стержня на устойчивость. Затем рассматривается система стержней для определения критической силы с учетом влияния соседних элементов. Схема представляет собой четыре стержня нижнего пояса и четыре стержня раскосов, соединенных в одном узле и нагруженных сжимающей или растягивающей нагрузкой.

Результаты исследования. Рассмотренный отдельный узел стыка стержня с коннектором, в котором сжимающие усилия передаются через плотный контакт, по характеру работы при проверке устойчивости стержня весьма близок к жесткому креплению.

Коэффициент расчетной длины для сжатых элементов находится в пределах от 0,77 до 0,88 в зависимости от значений усилий в элементах и их сечений. Из чего можно сделать однозначный вывод о том, что применение коэффициента 0,8 для всех сжатых стержней не может быть теоретически обосновано.

Обсуждение и заключение. Проведенные исследования покрытия показывают правильность применения требований СП 16.13330.2011 «Стальные конструкции» в части определения расчетной длины сжатого стержня равной 1, а использование коэффициента равного 0,8 не может быть теоретически обосновано. Снижение металлоемкости при использовании в расчетах пониженных коэффициентов расчетной длины не приводит к значимой экономии для конструкции в целом и не является целесообразной.

Ключевые слова: пространственная решетчатая система, структурная конструкция, расчетная длина, устойчивость

Для цитирования: Щуцкий С.В., Лиманцев А.А. К вопросу определения расчетных длин элементов в структурных конструкциях типа «Кисловодск». *Современные тенденции в строительстве, градостроительстве и планировке территорий*. 2026;5(2):41–48. <https://doi.org/10.23947/2949-1835-2026-5-2-41-48>

On the Issue of Determining the Design Lengths of Elements in Structural Constructions of the Kislovodsk Type

Sergey V. Shchutsky ✉, Aleksey A. Limantsev 

Don State Technical University, Rostov-on-Don, Russian Federation

✉ svpikel@rambler.ru

Abstract.

Introduction. The article looks at the issue of determining the design lengths of rods of the structural construction of the Kislovodsk type. While examining the existing structure of the coating of the shopping center, in the design documentation for the object, the authors found that the design length coefficient equal to 0.8 was used in the calculations of the rod structure. The value of 0.8 is due to the results of the tests performed at Kucherenko Central Research Institute in 1987. However, according to the current regulations, a coefficient of design length equal to one is to be used. The aim of the article is to justify the value of the design length coefficient in calculations of such structures.

Materials and Methods. A standard unit of attaching rods to a nodal connector is considered. It was decided to study the work of both a separate structural unit and rods together by modeling in the Femap with Nastran software package. The paper considers the effect of a nodal joint on the stability of an individual rod. To this end, a nodal structural element with a support at the contact connection of a compressed rod and a calculation of a separate rod for stability was modelled. A system of rods is then considered in order to determine the critical force, taking into account the influence of adjoining elements. The scheme consists of four rods of the lower belt and four rods of the braces connected in one node and loaded with a compressive or tensile load.

Research Results. The considered separate joint of the rod with the connector, where compressive forces are transmitted through a tight contact, is very close to rigid fastening by the nature of the work when checking the stability of the rod. The design length coefficient for compressed elements ranges from 0.77 to 0.88, depending on the force values in the elements and their cross sections. Based on this, it can be unambiguously concluded that the application of a coefficient of 0.8 for all compressed rods cannot be theoretically justified.

Discussion and Conclusion. The coating studies show that the requirements of SP 16.13330.2011 "Steel Structures" are correctly applied in terms of determining the design length of a compressed rod equal to 1, and the use of a coefficient equal to 0.8 cannot be theoretically justified. Reducing the metal consumption while using reduced design length coefficients in calculations does not lead to significant savings for the overall structure and is not feasible.

Keywords: spatial lattice system, structural design, design length, stability

For citation. Shchutsky SV, Limantsev AA On the Issue of Determining the Design Lengths of Elements in Structural Constructions of the Kislovodsk Type. *Modern Trends in Construction, Urban and Territorial Planning*. 2026;5(2):41–48. <https://doi.org/10.23947/2949-1835-2026-5-2-41-40>

Введение. Пространственные решетчатые системы получили свое активное развитие со второй половины XX века, и за это время было построено большое количество различных зданий и сооружений, в покрытии которых использованы структурные конструкции¹ [1–3]. Одной из наиболее распространенных решетчатых конструкций покрытия из труб в России является структура типа «Кисловодск» [4–5], разработанная в рамках государственной программы и предназначенная для решения задач организации производства и комплектной поставки легких металлических конструкций промышленных зданий.

Основное свойство как плоских, так и пространственных стержневых систем заключается в том, что все элементы подвержены одноосному напряженно-деформированному состоянию (сжатию или растяжению). Растянутые элементы рассчитываются на прочность, а сжатые — на устойчивость. В свою очередь, устойчивость элемента напрямую зависит от его расчетной или приведенной длины. Нормативные документы как в текущей редакции, так и действовавшие в прошлом, предписывают в расчетах элементов пространственных структурных конструкций за расчетную длину принимать полную геометрическую длину стержня, или, другими словами, применять коэффициент расчетной длины, равный 1 (за исключением случаев, когда элементы прикрепляются в узлах сваркой впритык к шаровым или цилиндрическим узловым элементам — в этом случае коэффициент принимается равным 0,85).

¹ Дыховичный Ю.А., Жуковский Э.З. *Современные пространственные конструкции (железобетон, металл, дерево, пластмассы)*. М.: Высш. шк.; 1991. 543 с.

В ходе обследования покрытия торгового центра, запроектированного в 2004 году, в процессе анализа исходной документации и сбора исходных данных для выполнения поверочного расчета обследуемой структурной конструкции было обнаружено, что при ее проектировании для стержней с сечением из труб $48 \times 2,8$, $57 \times 3,2$ и 76×3 использовался коэффициент расчетной длины, равный 0,8. Такое значение коэффициента было принято разработчиками проектной документации в результате проведенных испытаний в ЦНИИСК им. Кучеренко в 1987 г. Целью данной статьи является моделирование работы узлового элемента структурной конструкции типа «Кисловодск» и обоснование значения коэффициента расчетной длины в расчетах подобных конструкций.

Материалы и методы. Рассмотрим конструкцию узла крепления элементов к узловому коннектору. В качестве соединительного элемента выступает узловой коннектор, который представляет собой стальной многогранник с резьбовыми отверстиями (рис. 1). Все стержни системы имеют одинаковую номинальную длину и состоят из электросварных или горячекатаных труб с приваренными к торцу шайбами. В отверстия шайб пропущены стержни высокопрочных болтов с закрепленными на них муфтами из шестигранника (рис. 2). Резьбовые отверстия сориентированы по направлению сходящихся в узле поясов и раскосов. Грани узлового элемента нормальны к осям отверстий и равнорасположены от центра узла. Таким образом, в случае с растянутыми стержнями усилие передается через высокопрочные болты, а при сжатом стержне усилие передается через контакт муфты с гранью коннектора².

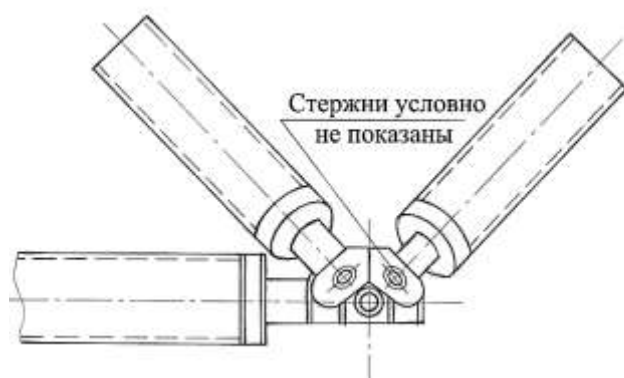


Рис. 1. Узел крепления стержневой системы «Кисловодск».

URL: <https://meganorm.ru/Index2/1/4293830/4293830102.htm> (дата обращения: 17.04.2026)

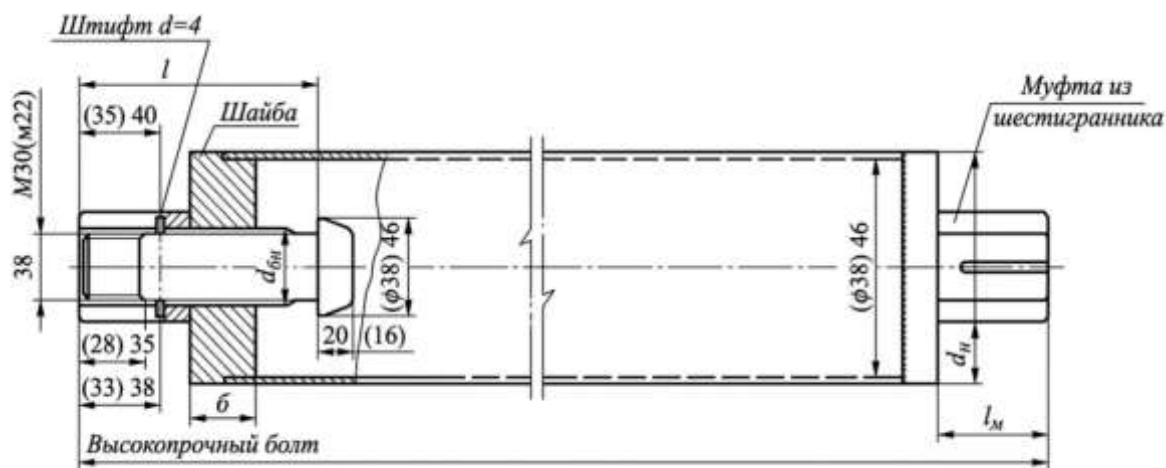


Рис. 2. Стержневой элемент системы «Кисловодск».

URL: <https://meganorm.ru/Index2/1/4293830/4293830102.htm> (дата обращения: 17.04.2026)

На первый взгляд, такое соединение представляется скорее «шарнирным», чем «жестким». Однако коэффициент меньше 1 может быть получен только при «жестком» соединении стержней. Поэтому для проверки обоснованности применения коэффициента, равного 0,8, необходимо ответить на два вопроса: какой коэффициент устойчивости у стержневых элементов решетки при жестком соединении и насколько принятый узел соединения можно считать близким к жесткому с точки зрения устойчивости стержней.

² Пространственные решетчатые конструкции из труб типа «Кисловодск». Рабочие чертежи. Серия 1.466-2. Гипромонтажиндустрия; 1973. URL: <https://meganorm.ru/Index2/1/4293830/4293830102.htm> (дата обращения: 16.03.2026).

В рамках текущего исследования было принято решение изучить работу элементов структурной конструкции с помощью компьютерного моделирования. Современные системы инженерного анализа (или системы автоматизации инженерных расчетов) — САЕ (англ. computer-aided engineering) — обеспечивают решение большого числа разнообразных задач линейного и нелинейного статического анализа с большой точностью [6–10].

Для выполнения расчетов в рамках данной работы был выбран программный комплекс Femap with Nastran как мощный и гибкий инструмент для решения различного рода задач.

Результаты исследования. Исследовательская часть работы разбита на две отдельные задачи. Во-первых, рассматривается влияние описанного выше узлового соединения на устойчивость одного стержня. Во-вторых, рассматривается система стержней для определения критической силы с учетом влияния соседних элементов.

Задача 1. Femap with Nastran предоставляет возможность соединения двух тел из объемных конечных элементов, которые соприкасаются друг с другом, но не имеют общих узлов, с помощью соединения типа «contact» и «glued» (соответственно «контакт» и «склейка»). Соединение типа «склейка» ограничивает перемещение узлов во всех направлениях по всей области соединения, и фактически два тела становятся одним целым. Соединение типа «контакт» запрещает взаимное проникновение тел и позволяет смоделировать свободное опирание одного тела на другое без соединения.

Выполним моделирование узлового соединения в системе Femap with Nastran. Коннектор условно представлен в виде параллелепипеда, шестигранная муфта заменена на цилиндр. Основной стержень представлен в виде стержневого элемента и соединен с муфтой с помощью жесткой связи. Соединение муфты и коннектора в модели выполнено как «контакт», что наиболее близко к реальной конструкции узла. Для сравнения также выполнен расчет на устойчивость при соединении «склейка», что соответствует жесткому соединению (рис. 3).

Основной стержень в структурной конструкции имеет сечение в виде круглой трубы 80×3 и общую длину 300 см. Сила Эйлера для такого стержня составляет:

$$P_3 = \frac{\pi^2 EI_x}{l^2} = \frac{\pi^2 \cdot 20600 \cdot 53,87}{300^2} = 121,7 \text{ кН.}$$

Значения усилий, при которых произошла потеря устойчивости такого стержня, составили: при соединении типа «склейка» — 240,1 кН, при соединении типа «контакт» — 216,1 кН (рис. 4). В этом случае коэффициенты расчетной длины равны 0,712 и 0,75 соответственно.

Сравнение полученных результатов однозначно показывает, что реальная работа узла с точки зрения устойчивости весьма близка к жесткому соединению стержня с коннектором. Значение коэффициента продольного изгиба при этом увеличивается на 5 %.

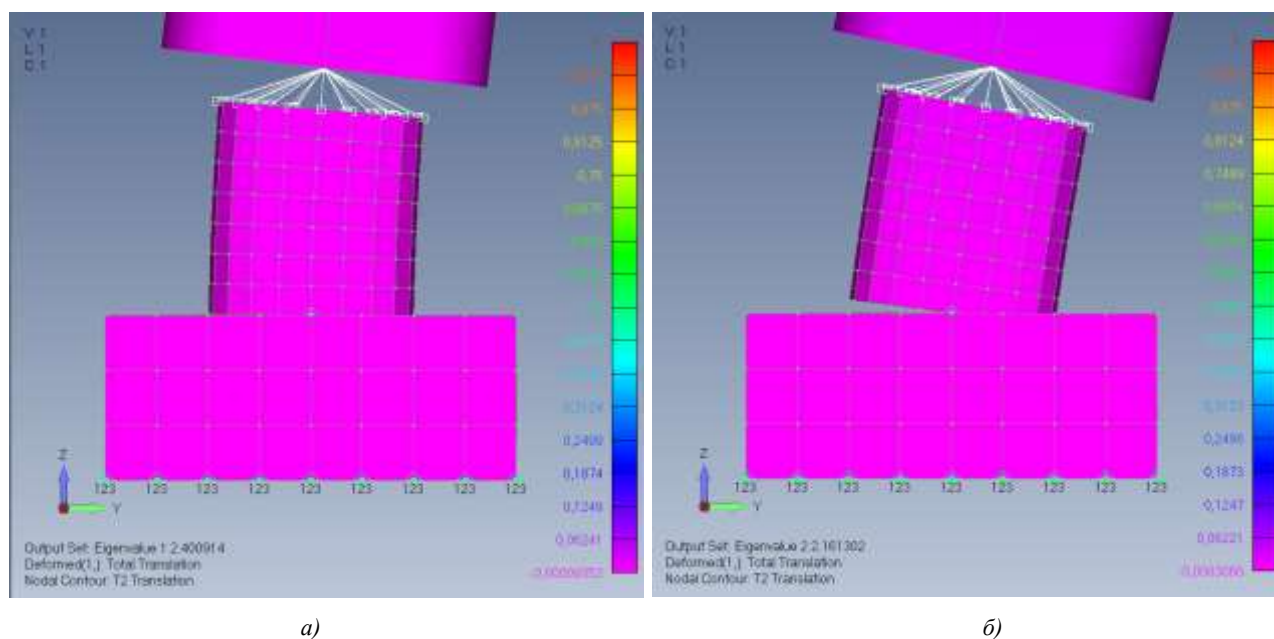


Рис. 3. Варианты моделирования узлового соединения: а — соединение типа «склейка»; б — соединение типа «контакт»

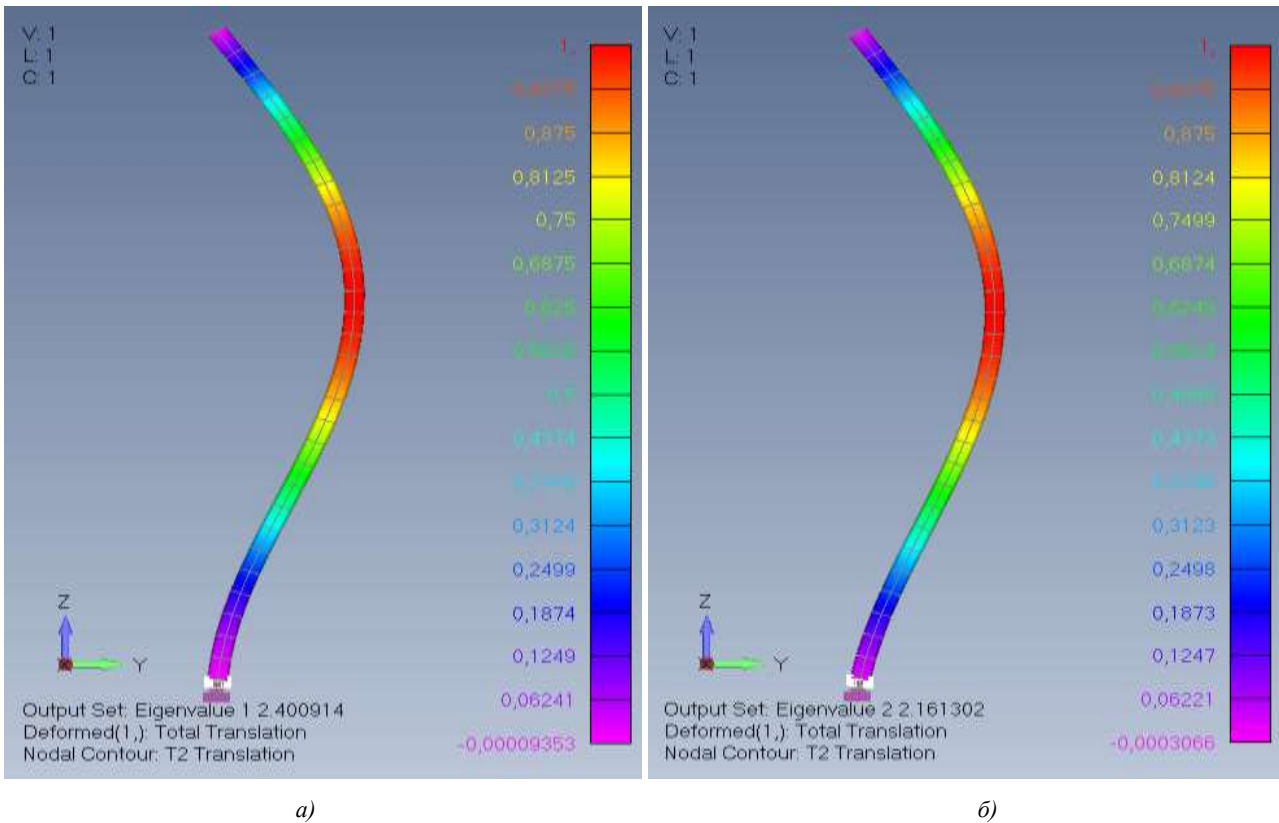


Рис. 4. Потеря устойчивости при соединении типа: *а* — «склейка»; *б* — «контакт»

Задача 2. Для определения критической силы для сжатых элементов выбрана следующая расчетная схема: рассматриваются четыре элемента нижнего пояса и четыре элемента решетки, соединенные в одном узле [11–14]. Противоположный конец каждого из элементов схемы имеет шарнирное закрепление. Длина всех стержней составляет 3 метра. Следует заметить, что при добавлении в расчетную модель элементов верхнего пояса стержень раскоса будет иметь два конца с той или иной степенью защемления от потери устойчивости. Однако предполагается, что элементы верхнего пояса преимущественно находятся в сжатом состоянии, поэтому оказывают меньший закрепляющий эффект, которым обычно пренебрегают.

Для начала приведем в качестве примера идеализированный вариант нагружения расчетной схемы, где все элементы нижнего пояса растянуты единичной силой, а элементы раскосов попарно растянуты и сжаты так же единичной силой (рис. 5). Сечение всех элементов — труба 60×3.

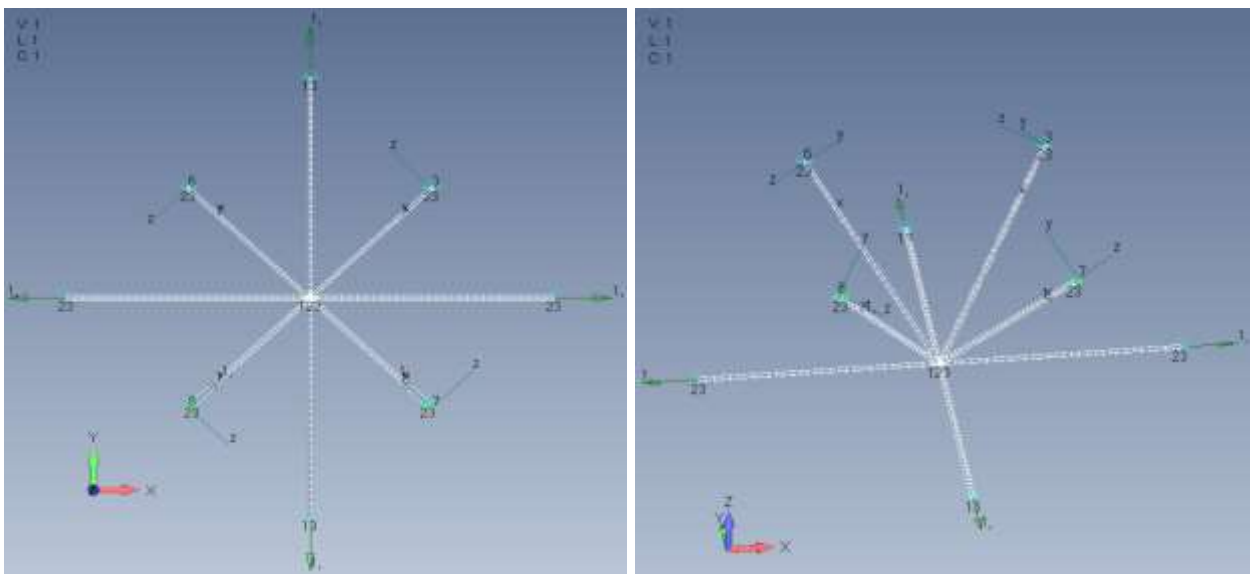


Рис. 5. Расчетная схема

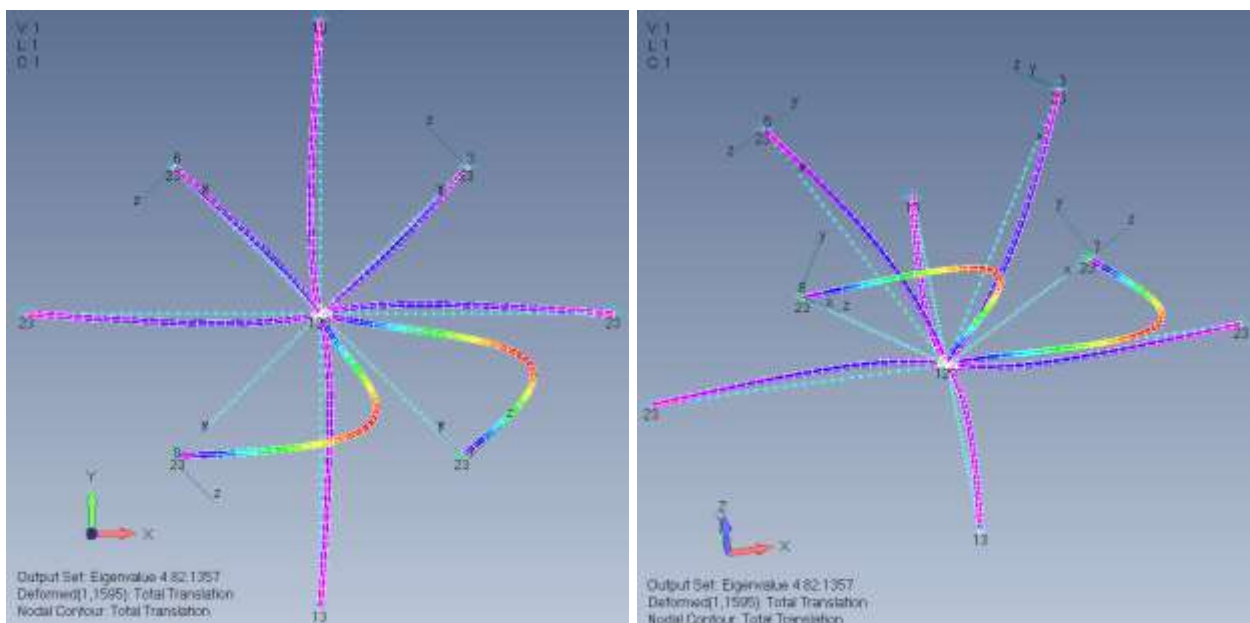


Рис. 6. Деформированная схема при потере устойчивости вариант 1

Сжатые стержни потеряли устойчивость при усилии в 82,14 кН (рис. 6), что дает коэффициент устойчивости, равный 0,776.

Далее приведен пример с расчетом при соотношениях сил, взятых из реальной конструкции. Потеря устойчивости сжатого стержня происходит при значении усилия 143,88 кН (рис. 7), что дает коэффициент устойчивости 0,849. Другие варианты сочетаний усилий и сечений элементов, которые были рассчитаны при подготовке данной работы, давали в результате коэффициент расчетной длины в пределах от 0,77 до 0,88.

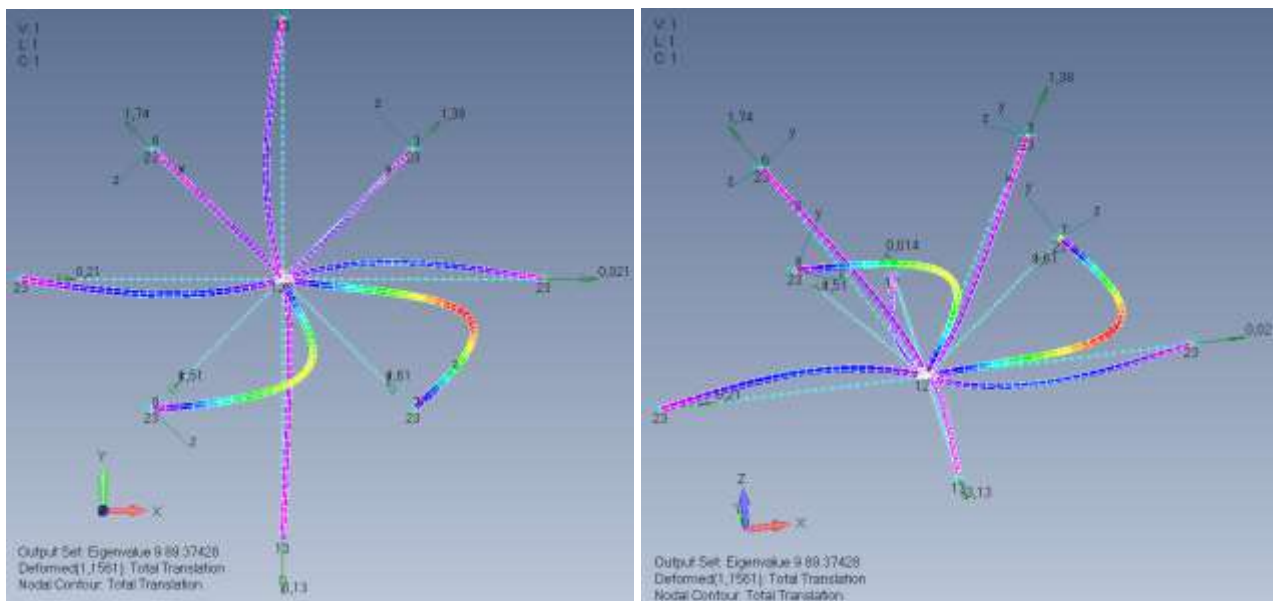


Рис. 7. Деформированная схема при потере устойчивости вариант 2

В результате проведенных вычислений можно сделать следующие выводы:

1. Узел стыка стержня с коннектором, в котором сжимающие усилия передаются через плотный контакт, по характеру работы при проверке устойчивости стержня весьма близок к жесткому закреплению.
2. Коэффициент расчетной длины для сжатых элементов находится в пределах от 0,77 до 0,88 в зависимости от значений усилий в элементах и их сечений. Из чего можно сделать однозначный вывод о том, что применение коэффициента 0,8 для всех сжатых стержней не может быть теоретически обосновано.

Обсуждение и заключение. Проведенные исследования покрытия в виде структурной конструкции типа «Кисловодск» показывают правильность применения требования СП 16.13330.2011 «Стальные конструкции» в части определения расчетной длины сжатого стержня равной 1, а использование коэффициента равного 0,8 не может быть теоретически обосновано. Кроме того, при расчете и конструировании подобных конструкций

следует обратить внимание на то, что в системе такого типа присутствует большое число стержней с различными усилиями, и рассмотрение всех возможных сочетаний представляет объемную и сложную задачу. При этом повышение металлоемкости при рассмотрении одного элемента и при учете только сечения трубы составляет 20–30 %, однако, если учесть металлоемкость и стоимость изготовления всей конструкции, данная экономия существенно нивелируется и не является целесообразной.

Список литературы /References

1. Abramczyk J. Building Structures Roofed with Multi-Segment Corrugated Hyperbolic Paraboloid Steel Shells. *Procedia Engineering*. 2016;161:1545–1550. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2016.08.624>
2. Joseph E. Bowles. *Structural Steel Design*. New York: McGraw-Hill; 2007. 536 p.
3. Кривошапко С.Н. Оболочки и стержневые структуры в форме аналитически незадаваемых поверхностей в современной архитектуре. *Строительство и реконструкция*. 2020;3(89):20–30. URL: <https://oreluniver.ru/public/file/archive/2073-7416-2020-89-3-20-30.pdf> (дата обращения: 17.04.2026).
Krivoshapko SN Shells and Rod Structures in the Form of Analytically Non-Given Surfaces in Modern Architecture. *Building and Reconstruction*. 2020;3(89):20–30. URL: <https://oreluniver.ru/public/file/archive/2073-7416-2020-89-3-20-30.pdf> (accessed: 17.04.2026).
4. Еремеев П.Г., Ведяков И.И., Королева Е.А. Светопрозрачные крыши с использованием стекла для большепролетных покрытий. *Промышленное и гражданское строительство*. 2019;6:23–28. <https://doi.org/10.33622/0869-7019.2019.06.23-28>
5. Еремеев П.Г. *Современные стальные конструкции большепролетных покрытий уникальных зданий и сооружений*. М.: АСВ; 2009. 336 с.
Eremeev PG, Vedyakov II, Koroleva EA Translucent Roofs Using Glass for Large-Span Coverings. *Industrial and Civil Construction*. 2019;6:23–28. <https://doi.org/10.33622/0869-7019.2019.06.23-28>
6. Свентиков А.А., Кузнецов Д.Н. Автоматизированное проектирование пространственных решетчатых стальных конструкций покрытий сложной формы. *Строительство и реконструкция*. 2021;1:38–49. URL: https://oreluniver.ru/public/file/archive/sir_2073-7416-2021-93-1-38-49.pdf (дата обращения: 17.04.2026).
7. Карпунин В.Г., Голубева Е.А. Компьютерное моделирование строительных конструкций зданий и сооружений. *Архитектон: известия вузов*. 2019;4(68):1–11. URL: https://archvuz.ru/2019_4/16/ (дата обращения: 16.03.2026).
Karpunin VG, Golubeva EA Computer Modeling of Building Structures. *Architecton. Proceedings of Higher Education*. 2019;4(68):1–11. URL: https://archvuz.ru/2019_4/16/ (accessed: 16.03.2026).
8. Jirasek M., Bazant Z.P. *Inelastic analysis of structures*. Chichester: JohnWiley & Sons Ltd; 2008. 734 p. URL: https://www.researchgate.net/publication/37427387_Inelastic_Analysis_of_Structures (дата обращения: 16.03.2026).
9. Thakore D. *Finite Element Analysis with Open Source Software*. Moonish Enterprises Pty Ltd; 2014. 92 p. <https://doi.org/10.13140/2.1.4322.0808>
10. Levy S. M. *Construction Calculations Manual*. Elsevier; 2012. 692 p. <https://doi.org/10.1016/C2009-0-64499-8>
11. Пушкин Б.А. К расчету сжатого стержня пространственной фермы по СП 53-102-2004. *Строительная механика и расчет сооружений*. 2010;1:34–38. URL: https://stroy-mex.narod.ru/index/2010_1/0-155 (дата обращения: 16.03.2026).
Pushkin BA The Fixed Column Calculation of Spatial Frame Using Building by-Law 53-102-2004. *Structural Mechanics and Analysis of Constructions*. 2010;1:34–38. URL: https://stroy-mex.narod.ru/index/2010_1/0-155 (accessed: 16.03.2026).
12. Aghayere A., Vigil J. *Structural steel design: a practice-oriented approach*. Prentice Hall; 2009. 692 p.
13. Алфутов Н.А. *Основы расчета на устойчивость упругих систем*. М.: Машиностроение; 1978. 312 с.
Alfutov NA *Fundamentals of Calculation for the Stability of Elastic Systems*. Moscow: Mashinostroenie; 1978. 312 p.
14. Грудев И.Д. *Устойчивость стержневых элементов в составе стальных конструкций*. М.: МИК; 2005. 320 с.
Grudev ID *Stability of Core Elements in Steel Structures*. Moscow: MIK; 2005. 320 p.

Об авторах:

Щуцкий Сергей Викторович, кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры металлических, деревянных и пластмассовых конструкций Донского государственного технического университета (344003, Российская Федерация, г. Ростов-на-Дону, пл. Гагарина, 1), [ORCID](https://orcid.org/0000-0001-9152-1000), svpikel@rambler.ru

Лиманцев Алексей Алексеевич, старший преподаватель кафедры металлических, деревянных и пластмассовых конструкций Донского государственного технического университета (344003, Российская Федерация, г. Ростов-на-Дону, пл. Гагарина, 1), [ORCID](https://orcid.org/0000-0001-9152-1000), alimantsev@gmail.com

Заявленный вклад соавторов:

С.В. Щуцкий: формирование основной концепции, цели и задачи исследования, доработка текста, корректировка выводов.

А.А. Лиманцев: подготовка текста, расчеты, формирование выводов.

Конфликт интересов: авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи

About the Authors:

Sergey V. Shchutsky, Cand.Sci. (Eng.), Associate Professor, Associate Professor of the Department of Metal, Wood and Plastic Structures, Don State Technical University (1 Gagarin Square, Rostov-on-Don, 344003, Russian Federation), [ORCID](#), svpike1@rambler.ru

Aleksey A. Limantsev, Senior Lecturer at the Department of Metal, Wood and Plastic Structures, Don State Technical University (1 Gagarin Square, Rostov-on-Don, 344003, Russian Federation), [ORCID](#), alimantsev@gmail.com

Claimed contributorship:

SV Shchutsky: formation of the basic concept, aims of the study, revision of the manuscript, correction of the conclusions.

AA Limantsev: preparation of the manuscript, calculations, formation of the conclusions.

Conflict of interest statement: the authors do not have any conflict of interest.

All authors have read and approved the final version of manuscript.

Поступила в редакцию / Received 20.03.2026

Поступила после рецензирования / Reviewed 02.04.2026

Принята к публикации / Accepted 16.04.2026