

14. SolidWorks Simulation. Rukovodstvo polzovatelya [User Manual]. Dassault Systèmes; 2023.
15. Ziemian R. D. Guide to Stability Design Criteria for Metal Structures. 6th ed. Hoboken : Wiley; 2010, 1088 p.
16. Mazzolani F. M. Aluminium Alloy Structures. 2nd ed. London : CRC Press; 1995, 528 p.
17. Brush D. O., Almroth B. O. Buckling of Bars, Plates, and Shells. New York : McGraw-Hill; 1975, 416 p.
18. Timoshenko S. P., Woinowsky-Krieger S. Theory of Plates and Shells. 2nd ed. New York : McGraw-Hill; 1959, 580 p.
19. Young W. C., Budynas R. G. Roark's Formulas for Stress and Strain. 7th ed. New York : McGraw-Hill; 2002, 832 p.
20. API Standard 620. Design and Construction of Large, Welded, Low-Pressure Storage Tanks. 12th ed. Washington : API; 2013.
21. Fedorov V. S., Lazutkin Yu. V., Kupchikova N. V. Planirovanie eksperimenta po otsenke vliyaniya kompleksnosti sochetaniya dinamicheskikh vozddeystvii ot nazemnogo i podzemnogo transporta [Planning an experiment to assess the impact of the combined effects of dynamic loads from ground and underground transport]. *Stroitelstvo i rekonstruktsiya* [Construction and reconstruction]. 2025, no. 4 (120), pp. 71-81. DOI 10.33979/2073-7416-2025-120-4-71-81.
22. Sapozhnikov A. I., Grigorshev S. M., Kupchikova N. V. Osobennosti raboti balok na uprugom osnovanii [Features of the operation of beams on an elastic foundation]. *Izvestiya visshikh uchebnikh zavedenii. Stroitelstvo* [Proceedings of Higher Educational Institutions. Construction]. 2011, no. 10 (634), pp. 99-107.
23. Kupchikova N. V. Vliyaniye uplotneniya grunta so shchebnyem na zhestkost osnovaniya [The effect of soil compaction with crushed stone on the stiffness of the base]. *Promishlennoe i grazhdanskoe stroitelstvo* [Industrial and civil construction]. 2007, no. 10, pp. 29.

© Э. Р. Бареева

Ссылка для цитирования:

Бареева Э. Р. Методология и алгоритм проектного расчета подвешенного перекрытия криогенного резервуара для хранения сжиженного природного газа // Инженерно-строительный вестник Прикаспия : научно-технический журнал / Астраханский государственный архитектурно-строительный университет. Астрахань : ГАОУ АО ВО «АГАСУ», 2026. № 2 (56). С. 5-13.

УДК 624.014

DOI 10.52684/2312-3702-2026-57-3-13-20

К ВОПРОСУ РАСЧЕТА НА УСТОЙЧИВОСТЬ ПРИ ПРОДОЛЬНО-ПОПЕРЕЧНОМ ИЗГИБЕ ЭЛЕМЕНТОВ ПРОСТРАНСТВЕННЫХ СТЕРЖНЕВЫХ КОНСТРУКЦИЙ

С. А. Лютров, И. А. Терехов

Лютров Сергей Александрович, магистрант, Российский университет транспорта (МИИТ); инженер, Центральный научно-исследовательский и проектно-экспериментальный институт промышленных зданий и сооружений – ЦНИИПромзданий, г. Москва, Российская Федерация; тел.: + 7 (495) 482-44-65; e-mail: lyutrov2016@mail.ru;

Терехов Иван Александрович, кандидат технических наук, доцент кафедры «Строительные конструкции, здания и сооружения», Российский университет транспорта (МИИТ); ведущий научный сотрудник, Центральный научно-исследовательский и проектно-экспериментальный институт промышленных зданий и сооружений – ЦНИИПромзданий, г. Москва, Российская Федерация; тел.: + 7 (495) 482-44-65; e-mail: terekhov-i@mail.ru

В статье представлен обобщенный анализ экспериментальных и численных исследований устойчивости отдельных элементов пространственных стержневых конструкций, выполненных за последние 60 лет. Рассмотрены испытания отдельных стержней из труб, их фрагментов и эквивалентных моделей структур. Систематизированы данные по 67 испытаниям с учетом типов сечений, гибкостей, эксцентриситетов и условий нагружения. Установлено, что существующие методики ориентированы преимущественно на центральное сжатие и не учитывают работу элементов из труб на продольно-поперечный изгиб. Показана необходимость дальнейших исследований в данной области для уточнения расчетных моделей и повышения надежности проектирования пространственных стержневых конструкций.

Ключевые слова: устойчивость, продольно-поперечный изгиб, структурные покрытия, трубы, центральное сжатие, натурный эксперимент, экспериментальные исследования

REGARDING THE ISSUE OF CALCULATING STABILITY UNDER LONGITUDINAL-TRANSVERSE BENDING OF ELEMENTS IN SPATIAL ROD STRUCTURES

S. A. Lyutrov, I. A. Terekhov

Lyutrov Sergey Aleksandrovich, undergraduate student, Russian University of Transport (MIIT); engineer, Central Research and Design-Experimental Institute of Industrial Buildings and Structures – TsNIIPromzdaniy, Moscow, Russian Federation; phone: + 7 (495) 482-44-65; e-mail: lyutrov2016@mail.ru;

Terekhov Ivan Aleksandrovich, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of “Building Structures, Buildings and Structures” Department, Russian University of Transport (MIIT); Leading Researcher, Central Research and Design and Experimental Institute of Industrial Buildings and Structures – TsNIIPromzdaniy, Moscow, Russian Federation, phone: + 7 (495) 482-44-65; e-mail: terekhov-i@mail.ru

The article presents a generalized analysis of experimental and numerical studies on the stability of individual elements of spatial bar structures carried out over the past 60 years. Tests of individual tubular members, their fragments, and equivalent models of structures are considered. Data from 67 tests are systematized taking into account section types, slenderness, eccentricities, and loading conditions. It is established that existing methods are focused primarily on central compression and do not consider the behavior of tubular elements under combined axial and transverse bending. The necessity of further research in this area is shown in order to refine design models and improve the reliability of design of spatial bar structures.

Keywords: *stability, longitudinal-transverse bending, structural roofs, pipes, central compression, experimental studies.*

Введение

Одними из наиболее распространенных и архитектурно выразительных видов покрытий большепролетных зданий являются структурные покрытия.

Широкое распространение структурных покрытий в большепролетных зданиях обусловлено их универсальностью, повышенной надежностью от внезапного обрушения, возможностью облегчения ограждающих конструкций кровли благодаря частой сетке узлов, а также архитектурной выразительностью и применимостью для зданий различного назначения. Не менее важны технологические преимущества: возможность изготовления на поточных технологических линиях, простота перевозки (в том числе доставки в труднодоступные районы) и удобство монтажа, максимальная унификация узлов и стержневых элементов, применение совершенных методов сборки на земле и подъема покрытия крупными блоками, а также сборно-разборность при необходимости [1–3].

В современной практике проектирования и эксплуатации элементы структурных конструкций, преимущественно воспринимают усилия только в крайних своих узлах (узлах сочленения элементов друг с другом).

Структурные конструкции, заимствованные из природы (кристаллическое строение), отличаются унификацией, что для отдельных элементов ведет к перерасходу материала и завышенному запасу устойчивости элементов. В конструкциях из круглых труб применяют шаровые узлы с резьбовыми отверстиями и ввинчиваемыми болтами.

В процессе строительства и эксплуатации зданий и сооружений со структурными покрытиями возникает также необходимость подвески дополнительного технологического оборудования, в пролете элементов структуры, когда места подвески оборудования не совпадают с узлами структуры. Такая необходимость возникла, например, при проектировании крытой пешеходной Галереи-променада со встроенными спортивными объектами в г. Новый Уренгой [4].

Ниже приведен обзор наиболее значимых исследований устойчивости трубчатых элементов пространственных стержневых конструкций, выполненных за последние 60 лет. Рассматриваются как испытания отдельных стержней и их фрагментов, так и эксперименты с эквивалентными моделями структур и их ячеек. Такой анализ позволяет выявить существующие рас-

хождения между экспериментальными и теоретическими данными, а также определить область, требующую дополнительного изучения, – работу трубчатых элементов структурных конструкций на продольно-поперечный изгиб.

Расчетные и экспериментальные исследования устойчивости

В исследовании [1] проведены численные расчеты на ЭЦВМ «Урал-4» и экспериментальные исследования с целью проверки надежности работы элементов 20 образцов из тонкостенных труб при внецентренном сжатии и растяжении. Испытывались электросварные трубы $D/\delta = 168/5$ мм из термообработанной стали 14Г2Ф (не имеющей площадки текучести) с условным пределом текучести 60 кгс/мм², гибкостью $\lambda = 40–80$). Шарнирное закрепление стержней по обоим концам, с жестким защемлением в плоскости, перпендикулярной плоскости изгиба. На сжатие рассчитывались и испытывались образцы длиной 160 мм. Образцы имели эксцентриситеты равные случайным.

Для сжатых стержней, по результатам сравнения были сделаны выводы об удовлетворительном соответствии экспериментальных и теоретических значений критических сил, при этом во всех случаях первые несколько превышают вторые.

Исследования А. М. Ривкина и Г. Е. Бельского [6] показали, что на устойчивость внецентренно-сжатых стержней трубчатого кольцевого сечения из термоупрочненной высокопрочной стали марки 15ГС были исследованы 84 образца сечениями 76×2 и $102 \times 2,25$ мм. С гибкостями $\lambda = 40, 60, 80$ и $m = 0,25; 0,5; 1$. Целью работы было изучение фактической работы внецентренно сжатых стержней трубчатого кольцевого сечения с симметричными упругими защемлениями концов. Образцы нагружались ступенями равными $0,1–0,15N_{ст}$. После достижения предельных нагрузок и при значительном прогибе стержней в прессе наблюдалась потеря местной устойчивости стенок труб среднего сечения. Были проведены численные расчеты на ЭЦВМ «Урал-4».

Авторами были сделаны выводы, что опытные критические нагрузки выше теоретических в среднем: для шарнирно опертых стержней на 6 % ($D = 76$ мм) и 4,5 % ($D = 102$ мм), для упруго защемленных стержней 16 % ($D = 76$ мм) и на 10 % ($D = 102$ мм). Экспериментальные исследования внецентренно-сжатых стержней трубчатого кольцевого сечения из стали показали, что приближенный метод их расчета, основанный

на использовании отвлеченных понятий и безразмерных параметров, обеспечивает достаточную надежность инженерных расчетов для элементов из высокопрочной стали 15ГС.

До достижения критического состояния тонкостенными трубчатыми элементами (при $D/t = 1,38-1,45$ и $\lambda = 40, 60, 80$) не наблюдалось местной потери устойчивости стенок трубы; в ряде случаев выпучивание стенок было отмечено после достижения максимальных нагрузок при дальнейшем изгибе стержней в прессе.

В статье Э. В. Третьяковой и С. И. Аванесова [7] приводятся результаты изучения поведения внецентренно-сжатых стержней трубчатого сечения в докритической и закритической стадиях работы.

Для экспериментального исследования были выбраны образцы длиной 3 м с гибкостями $\lambda = 70-160$ и эксцентриситетами приложения продольной силы 2-10 мм с шарнирным опиранием по обоим концам стержня. Всего было испытано 48 образцов.

Каждые два образца одного сечения испытывались при одном эксцентриситете. Первый образец испытывался при монотонно возрастающей

нагрузке до критического состояния. Второй испытывался аналогично первому с той лишь разницей, что стержни выдерживались под нагрузкой как в докритической, так и в закритической области работы стержня.

В работах Е. В. Горохова, А. В. Мушанова и других в [8] изложены результаты численных и экспериментальных исследований центрально-сжатых стержней из условия устойчивости и с учетом конструктивного оформления узлов пространственной работы стержневых элементов. Было испытано 20 образцов труб сечением 48×3 .

Было проведено также численное и экспериментальное исследование ячейки структурного покрытия из труб сечением 48×3 с узловыми соединениями в виде типовых шаровых коннекторов, объединяющих стержни большой гибкости, с расчетной критической нагрузкой, приложенной в верхний коннектор (223,23 кН). Трубы были изготовлены из стали с расчетным сопротивлением, равным 240 Мпа – наиболее близким к стали С245 (рис. 1).

а)



б)

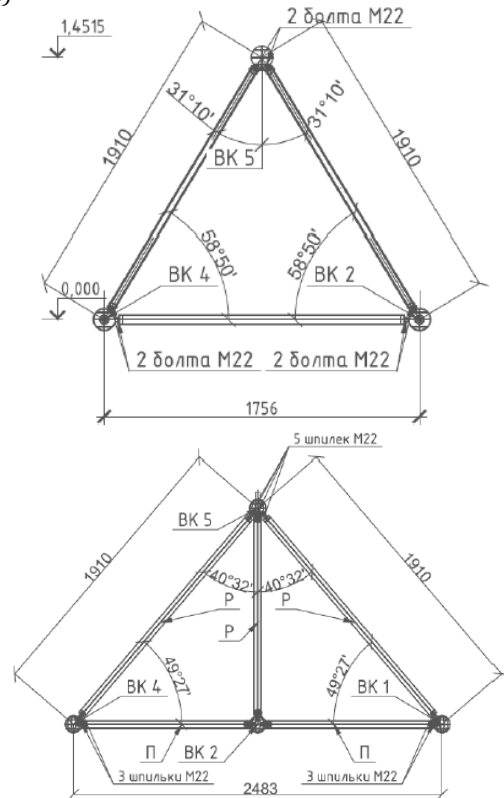


Рис. 1. Схема испытанной модели (а) и чертеж модели (б) ячейки структурного покрытия [8]
Fig. 1. Diagram of the tested model (a) and drawing of the model (b) of the structural coating cell [8]

Было исследовано влияние конструктивных решений узловых соединений структурных конструкций [9] на величину критической силы и форму потери устойчивости центрально сжатых элементов покрытия. Исследования были выполнены статическим методом для элементов большой гибкости ($\lambda = 224$) при потере устойчивости

в упругой стадии работы материала в конечно-элементной постановке с заданием начального несовершенства в форме полуволны синусоиды.

Сделаны выводы о различии между критической силой, найденной по Эйлеру и уточненной ве-

личинной критической силы, полученной в программе SCAD, разница, составившая 1,2 % была вызвана высокой гибкостью исследуемого стержня.

Исследования эквивалентных моделей структур и их элементов

В статье [10] проведена оценка критической и закритической работы элементов ячейки структуры и влиянию конструктивных решений узлов (комбинированные узловые соединения, сферическое тело) на устойчивость системы в целом. Структуры представляют собой правильные октаэдрические пространственные конструкции (рис. 4) с расстоянием между узлами по горизонтали 220 и 330 мм.

По результатам проведенных экспериментальных испытаний и численных расчетов методом перемещений ячейки структурного покрытия при значительном разбросе экспериментальных значений поворотной жесткости узла (от 5,7 до $9,4 \times 10^3$ кгс·мм) изменение критической нагрузки всей системы оказывается сравнительно малым (порядка нескольких процентов). Была предложена расчетная модель, основанная на методе перемещений, позволяющая оценивать работу в упругой стадии структур при моделировании узлов как комбинации жесткого концевой участка и поворотной упругой пружины. Всего был испытан 31 образец. Длины образцов 220–1320 мм.

Значительный вклад в исследование НДС пространственных структур, их элементов и совершенствовании узловых соединений внесли L. C. Schmidt и A. Hanaog. Одним из наиболее значимых было исследование и внедрение FLD узловых соединений, способствовавших повышению устойчивости элементов структуры [11].

Экспериментальные данные и численных расчетов на центральное сжатие по линейно-деформированной схеме аппроксимированной упругопластической модели, построенной в виде кусочно-линейных диаграмм, имели удовлетворительное соответствие экспериментальным данным. Был разработан упрощенный метод расчета стержней структурных конструкций, с учетом ограничений бифуркационной потери устойчивости [3, 4] с использованием эквивалентных сечений конструкций описываемым одноуровневым уравнением устойчивости лишь с одной неизвестной-значением продольной нагрузки N_{cr} , в результате чего данный метод позволил с большей точностью описывать НДС элементов структуры и имел высокую степень соответствия экспериментальным исследованиям.

Исследованием структур в КНР занимались C. Bai, L. Tian, G. Xu, W. Zhong, в частности, в статье [12] было исследовано влияние разных видов раскрепления элементов структур купольных конструкций.

Исследования устойчивости стальных труб круглого сечения

В статьях [13, 14] Д. В. Конины и А. Р. Олуромби представлены исследования о расчетах местной и общей устойчивости стальных труб круглого сечения при внецентренном сжатии в упругопластической постановке в которой на примере труб одного диаметра и разной толщины стенки 530×5 и 530×24 изготовленных из высокопрочной стали с пределом текучести 600 МПа с диапазоном расчетных длин 2,5–17 м условной гибкостью $\bar{\lambda} = 0,7–5$, эксцентриситетами 10, 100 и 300 мм (относительной гибкостью $m = 0,08; 0,8; 2,4$) установлено, что потерю местной устойчивости приближает уменьшение гибкости, увеличение тонкостенности, увеличение эксцентриситета.

Для изучения особенностей работы спиральношовных и прямошовных электросварных труб сечениями от 325×5 до $720 \times 7,5$ и длиной 3,3 м ($\lambda = 16–35$) были проведены испытания на центральное и внецентренное сжатие 23-х стержней [13].

Получена статистически достоверная диаграмма работы стали изученных труб, которая имеет выраженную зону упругопластических деформаций и не имеет участка упрочнения после достижения условного предела текучести. Отмечается, что отклонение между нормативными и КЭ-расчетами с результатами эксперимента возрастает с увеличением тонкостенности (D/t), эксцентриситета и предела текучести. Кроме того, по результатам испытаний установлено, что прямошовным трубам при потере местной устойчивости свойственно выпучивание стенки. Спиральношовным трубам, наоборот, характерны вмятины, что является следствием значительных начальных несовершенств.

Выявлено расхождение результатов испытаний на устойчивость труб с численными расчетами и по формулам СП 16.13330.

В [14] были сделаны выводы о том, что расчет труб по нормам в 69 % случаев дает запас по сравнению с результатами тестов. Трубные стойки, для которых выпучивание наступает раньше предела по нормам (31 %), разрушились по схеме локального выпучивания стенки.

Сводные результаты расчетов и экспериментов

В таблице систематизированы результаты рассмотренных выше численных и экспериментальных исследований устойчивости трубчатых элементов пространственных стержневых конструкций. Сводные данные представлены по количеству испытанных образцов, типам и размерам сечений, гибкостям, критическим нагрузкам и условиям проведения экспериментов представлены в таблице. Обобщение этих сведений позволяет выявить общие закономерности и расхождения между опытными и теоретическими значениями критических сил, а также оценить степень изученности вопроса применительно к работе элементов структур на продольно-поперечный изгиб.

Таблица

Результаты численных расчетов и экспериментальных исследований пространственных структур их элементов, трубчатых сечений

Table

Results of numerical calculations and experimental studies of the spatial structures of their elements and tubular cross-sections

№ п/п	Авторы	Год	Кол-во образцов, шт.	Тип сечения, мм	l, мм	λ	N_{cr} , кН	v_1 , мм	v_2 , мм	Примечание
1	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
2	В. К. Файбишенко [15]	1969	-	тип МЕРО	-	-	-	-	-	Ч. р. и э. и.
3	Г. Е. Бельский [11]	1973	6	168 × 5	2380-4750	41.3-82.4	433.6-1012.4	$v_{cr} = 2.5-8.65$	-	Ч. р. и э. и.
4	Л. Н. Дюнистский [11]	1973	38	76 × 2, 102 × 2.25	1050.2120	40.60.80	122.63; 258	$v_{cr} = 14.5; 16.5$	-	Ч. р. и э. и. сталь 15ГС, $e = 0.25; 0.5; 1$
5	В. Э. Третьякова [7]	1981	48	О	3000	70-160	2697.8	15-43	-	Ч. р. и э. и. $\sigma_s = 295-300$ МПа, $e = 2-10$ мм
6	T. Saka, Y. Taniguchi [9]	1983	15	О	220-330	146-219	1.26-2.78	$v_{cr} = 0.8-2.2$	-	Э. и.
7	A. Hori, K. Shimazaki, A. Wada [16]	1992	1	О 5 × 0.5; 4 × 0.5; 3.5 × 0.5; 2.5 × 0.25; 2 × 0.25	Пролет 2200	-	2246.5-2364	-	-	Ч. р. и э. и. ферм/структур конструкций раздвижной крыши
8	S. Kato, I. Kubodera [17]	1993	6	О 139.8 × 4; 60.5 × 2.3;	3.021; 3.050; 3.1 по три для каждого сечения	-	166.78; 117.7	-	8.5.5	Ч. р. и э. и. пружинные (упругие) опоры
9	J. G. Cai [18]	1998	22	О 10; 13.8;	455.750.580	64.48	161.87	-	12.5	Ч. р. и э. и.
10	Е. В. Горохов, А. В. Мушанов [8]	2016	3	О 48 × 3	3600	224	1771.68	-	40.6	Ч. р. $N_{cr}(48) = 17.5$; $N_{ex}(48) = 17.3$
11	А. В. Мушанов, В. Ф. Мушанов, И. В. Роменский [19]	2016	1	О тип МАРХИ	3000-3600	-	-	-	-	Ч. р. структуры 68.4 × 45 м
12	Е. В. Горохов, А. В. Мушанов [9]	2017	5	О 48 × 3.60 × 3.2; 76 × 3.2; 89 × 3.5; 102 × 3.5	3392; 3392; 3372; 3372; 3302	-	$N_{cr}^{элемент} = 17.2$; 36.9; 77.5; 137.4; 210. $N_{cr} = 25$; 50; 102; 180; 275	$v_{max} = 17.5$; 35; 71.4; 108; 165	-	Ч. р., начальные несовершенства $f/l = 1/700$
13	Д. В. Конин, А. Р. Олуромби [13]	2017	23	О 325 × 5.325 × 9, 530 × 8.530 × 10, 720 × 7.5	3300	16-35	$\sigma_s = 555$; 600; 555; 380; 429-504; 573 МПа	-	-	Ч. р. и э. и. прямостоящие и спиральношовные трубы
14	J. G. Cai, Z. Ye, X. Y. Wang, Y. X. Xu and J. Feng [18]	2018	128	О 90 × 4	3000	-	-	$v_c = 90-95$	-	Ч. р. раздвижная крыша. Структура размерами 24 × 24 м
15	А. В. Мушанов [20]	2020	2	О 48 × 3	1274-1910	80.120	92.77; 96.81	-	-	Ч. р.
16	А. В. Мушанов [20]	2015	1	О 48 × 3	-	-	-	-	-	Ч. р. структуры
17	А. В. Мушанов [20]	2020	20	О 48 × 3; 159 × 12	1402-6462	50.60.70.80, 90.100.110, 120.130.140 для каждого сечения	68.78-102.19; 937.5-1354.69	-	-	Ч. р. и э. и.
18	А. В. Мушанов [20]	2020	1	О 48 × 3	1546.1700	120	-	по $x = 0.438$	по $y = 0.434$	Ч. р. и э. и. ячейки структурного покрытия. Сталь Ст20
19	А. В. Мушанов [20]	2020	2	О 48 × 3	932	120	64.35	-	-	Ч. р. и э. и. $\sigma_{ст} = 155.2$ МПа
20	Д. В. Конин, А. Р. Олуромби [14]	2021	23	О 325 × 5.325 × 9, 530 × 8.530 × 10, 720 × 7.5	3300	16-35	$N_{cr} = 1265.49-2354.4$; 2344.59-4463.55; 3561.03-6680.61; 4375.26-7573.32; 5935.05-9653.04	-	-	Ч. р.
21	C. Bai, L. Tian, G. Xu, W. Zhong [12]	2024	3	О 86 × 3.94 × 4, 94 × 5	-	-	-	-	-	Ч. р. и э. и.

Примечание:

- В столбцах 8 и 9 принято обозначение: " v_1 и v_2 " - прогибы в середине пролета в плоскости и из плоскости соответственно, " v_{cp} и v_{max} " - среднее и максимальное значение прогибов в пролете;
- В столбце 10 принято обозначение: "Ч. р. и э. и." - численный расчет и экспериментальные исследования

Заключение и выводы

Всего авторами настоящей статьи проанализированы данные по 67 испытаниям и численным расчетам трубчатых элементов пространственных стержневых структур, их фрагментов, эквивалентных им уменьшенных моделей, а также масштабной серии испытаний стальных труб, проведенных в ЦНИИСК. С учетом дороговизны экспериментальных исследований полноразмерных элементов структурных конструкций, как правило испытывают небольшое количество, около 5–10 штук, и только в особо редких случаях, при проведении комплексных исследований их число могло достигать 50 штук и более.

Следует обратить внимание на испытания уменьшенных моделей структур (выполненных из стальной проволоки или круглого проката), которые в свою очередь кратно уменьшают затраты на проведение испытаний и обеспечивает точность более 60 % от значений численного расчета.

Поскольку наиболее заметные экспериментальные исследования трубчатых круглых стальных элементов структурных конструкций проводились преимущественно в 1970–1980-х годах, замечена значительная разница в использованном испытательном оборудовании, а также в применении весьма консервативных методик расчета структур (метод перемещений, аппроксимированные методы расчета отдельных ячеек-«кристаллов» и др.) обеспечивающих значительный запас

по устойчивости. Потому разница между экспериментально полученными данными и численными расчетами редко составляла менее 25 %, значения данных полученных по итогам испытаний в большинстве случаев превышали результаты численных расчетов.

Данные обстоятельства значительно затруднили анализ ввиду разницы в использованном оборудовании (либо полного отсутствия информации), в способах наложения граничных условий, наличии/отсутствии эксцентриситетов, скорости нагружения, определении наступления предельного состояния.

По результатам анализа можно сделать вывод, что элементы структурных конструкций, рассчитываются на центральное растяжение/сжатие (с эксцентриситетом или без эксцентриситета) без учета возможности работы круглых стальных элементов структуры трубчатого сечения на продольно-поперечный изгиб.

Проведенный обзор показывает, что, несмотря на значительный объем накопленных экспериментальных данных, единая методика оценки устойчивости трубчатых элементов структур при продольно-поперечном изгибе до настоящего времени не сформирована. Это определяет необходимость дальнейших экспериментальных и численных исследований в данной области, направленных на уточнение расчетных моделей и повышение надежности проектирования пространственных стержневых конструкций.

Список литературы

1. Ereemeev P. G. Suspension Large Span Roofs Structures in Russia / P. G. Ereemeev, I. I. Vedyakov, A. I. Zvezdov // International Journal for Computational Civil and Structural Engineering. – 2021. – Vol. 17, № 2. – P. 34–42. – DOI 10.22337/2587-9618-2021-17-2-34-41. – EDN NBSNNA.
2. Мушанов В. Ф. Анализ степени ответственности элементов для определения характеристик надежности и склонности к лавинообразному разрушению стержневых конструкций / В. Ф. Мушанов, А. Н. Оржеховский // Инженерно-строительный вестник Прикаспия. – 2022. – № 4 (42). – С. 5–10. – DOI 10.52684/2312-3702-2022-42-3-5-10. – EDN KFCXJK.
3. Лютров С. А. Сравнительный анализ методов расчета на устойчивость центрально-сжатых стальных труб / С. А. Лютров, И. А. Терехов // Молодежь и наука: актуальные проблемы фундаментальных и прикладных исследований : материалы IX Всероссийской национальной научной конференции молодых ученых, Комсомольск-на-Амуре, 06–10 апреля 2026 года : в 4 ч. – Комсомольск-на-Амуре : Комсомольский-на-Амуре государственный университет, 2026. – Ч. 2. – С. 112–116. – EDN SDDDNV.
4. Лейкина Д. К. Общественное пространство, интегрированное в многофункциональное здание / Д. К. Лейкина, Г. В. Океанов, С. Р. Мамедова // Промышленное и гражданское строительство. – 2024. – № 6. – С. 21–26. – DOI 10.33622/0869-7019.2024.06.21-26. – EDN EEUDBQ.
5. Бельский Г. Е. Исследование несущей способности стержней кольцевого сечения / Г. Е. Бельский, Л. Н. Дионисиади // Стальные конструкции из труб. Экспериментально-теоретические исследования / под ред. С. А. Ильясевича. – М. : ЦНИИСК им. В. А. Кучеренко, 1973. – С. 84–92.
6. Ривкин А. М. Исследование устойчивости внецентренно сжатых стержней трубчатого кольцевого сечения из стали 15ГС / А. М. Ривкин, Г. Е. Бельский // Стальные конструкции из труб. Экспериментально-теоретические исследования / под ред. С. А. Ильясевича. – М. : ЦНИИСК им. В. А. Кучеренко, 1973. – С. 92–106.
7. Третьякова В. Э. Исследование критического поведения внецентренно сжатых стержней трубчатого сечения / В. Э. Третьякова // Строительная механика и расчет сооружений. – 1981. – № 1. – С. 47–49.
8. Экспериментальное исследование влияния узловых соединений структурных конструкций на устойчивость центрально-сжатых стержней / Е. В. Горохов, В. Н. Васылев, А. В. Мушанов, А. Н. Волчков // Металлические конструкции. – 2020. – Т. 26, № 2. – С. 87–101. – EDN YYLDPF.
9. Горохов Е. В. Анализ влияния конструктивных особенностей узловых соединений на несущую способность центрально сжатых стержней структурных покрытий / Е. В. Горохов, А. В. Мушанов // Металлические конструкции. – 2017. – Т. 23, № 3. – С. 139–151. – EDN YWFIQO.

10. Saka T. Buckling behaviour of space trusses constructed by bolted jointing systems / T. Saka, Y. Taniguchi // Journal of Structural and Construction Engineering (Transactions of AIJ). – 1983. – Vol. 331. – P. 1–9.
11. Schmidt L. C. Force Limiting Devices in Space Trusses / L. C. Schmidt, A. Hanaor // Journal of the Structural Division, ASCE. – 1979. – Vol. 105, № ST5. – P. 939–951.
12. Bai C. Numerical simulation and performance evaluation of compression members in long-span single-layer spatial grid structures constrained by steel bars / C. Bai, L. Tian, G. Xu, W. Zhong // Structures. – 2024. – Vol. 65. – P. 106804.
13. Конин Д. В. Анализ устойчивости прямошовных и спиральношовных труб из высокопрочных сталей при центральном и внецентренном сжатии на примере натурных экспериментов / Д. В. Конин, А. П. Олуромби // Известия высших учебных заведений. Строительство. – 2018. – № 6 (714). – С. 106–116. – EDN TOKNXG.
14. Конин Д. В. Экспериментальные исследования стальных стержней на центральное и внецентренное сжатие / Д. В. Конин // Вестник НИЦ. Строительство. – 2021. – № 1 (28). – С. 16–37. – DOI 10.37538/2224-9494-2021-1(28)-16-37. – EDN JSWWYL.
15. Файбишенко В. К. Экспериментальные исследования квадратных в плане перекрестных систем при различных вариантах опирания / В. К. Файбишенко // Строительная механика. Расчет и конструирование сооружений : труды Московского ордена Трудового Красного Знамени архитектурного института. – М., 1969.
16. Hori A. Static test of a model of a long-span double-layer space truss under unsymmetrical vertical load: Long-span space truss with a rise and a semicircle-connected plan (Part 1) / A. Hori // Journal of Structural and Construction Engineering (Transactions of AIJ). – 1992. – Vol. 436. – P. 105–113.
17. Kato S. Elasto-Plastic Buckling Loads of Latticed Shells with Elastic Springs at Both Ends of Members / S. Kato, I. Kubodera // Journal of Structural and Construction Engineering (Transactions of AIJ). – 1993. – № 448. – P. 47–58.
18. Cai J. G. Static and Kinematic Behaviour of a Foldable Truss Roof Structure / J. G. Cai, Z. Ye, X. Y. Wang, et al. // Advanced Steel Construction. – 2018. – Vol. 14, № 4. – P. 606–619.
19. Мущанов А. В. Влияние податливости опор на напряженно-деформированное состояние элементов структурного покрытия / А. В. Мущанов, В. Ф. Мущанов, И. В. Роменский // Строительство уникальных зданий и сооружений. – 2016. – № 1 (40). – С. 7–19. – EDN VLNKRR.
20. Мущанов А. В. Действительная работа и формообразование стержневых структурных покрытий на нетиповом плане : дис. ... канд. техн. наук / А. В. Мущанов. – Донецк : ДОННАСА, 2020. – С. 30–89.

References

1. Ereemeev P. G., Vedyakov I. I., Zvezdov A. I. Suspension Large Span Roofs Structures in Russia. *International Journal for Computational Civil and Structural Engineering*. 2021, vol. 17, no. 2Б pp. 34–42. DOI 10.22337/2587-9618-2021-17-2-34-41. EDN NBSNNA.
2. Mushchanov V. F., Orzhekhovskiy A. N. Analiz stepeni otvetstvennosti elementov dlya opredeleniya kharakteristik nadezhnosti i sklonnosti k lavinoobraznomu razrusheniyu sterzhnevikh konstruksii [Analysis of the degree of responsibility of elements for determining reliability characteristics and propensity to avalanche-like destruction of bar structures]. *Inzhenerno-stroitelnyy vestnik Prikaspiya* [Engineering and Construction Bulletin of the Caspian Region]. 2022, no. 4 (42), pp. 5–10. DOI 10.52684/2312-3702-2022-42-3-5-10. EDN KFCXJK.
3. Lyutrov S. A., Terekhov I. A. Sravnitelnyy analiz metodov rascheta na ustoychivost tsentralno-szhatikh stalnikh trub [Comparative analysis of stability calculation methods for steel pipes under central compression]. *Molodezh i nauka: aktualnye problemi fundamentalnikh i prikladnikh issledovaniy : materialy IX Vserossiyskoi natsionalnoi nauchnoi konferentsii molodikh uchenikh, Komsomolsk-na-Amure, 06–10 aprelya 2026 goda* [Youth and science: actual problems of fundamental and applied research: proceedings of the IX all-Russian national scientific conference of young scientists, Komsomolsk-on-Amur, April 06–10, 2026]. Komsomolsk-na-Amure : Komsomolskii-na-Amure gosudarstvennii universitet; 2026, part 2, pp. 112–116. EDN SDDDNV.
4. Leikina D. K., Okeanov G. V., Mamedova S. R. Obshchestvennoe prostranstvo, integrirovannoe v mnogofunktsionalnoe zdanie [A public space integrated into a multifunctional building]. *Promyshlennoe i grazhdanskoe stroitelstvo* [Industrial and Civil Engineering]. 2024, no. 6, pp. 21–26. DOI 10.33622/0869-7019.2024.06.21-26. EDN EUDBQ.
5. Belskii G. Ye., Dionisiadi L. N. Issledovanie nesushchei sposobnosti sterzhnei koltseвого secheniya [Study of the bearing capacity of annular section rods]. *Stalnie konstruksii iz trub. Eksperimentalno-teoreticheskie issledovaniya* [Steel structures made of tubes. Experimental and theoretical studies]. Moscow : TsNIISK im. V. A. Kucherenko; 1973, pp. 84–92.
6. Rivkin A. M., Belskii G. Ye. Issledovanie ustoychivosti vnetsentrenno szhatikh sterzhnei trubchatogo koltseвого secheniya iz stali 15GS [Study of stability of eccentrically compressed tubular annular section rods made of 15GS steel]. *Stalnie konstruksii iz trub. Eksperimentalno-teoreticheskie issledovaniya* [Steel structures made of tubes. Experimental and theoretical studies]. Moscow : TsNIISK im. V. A. Kucherenko; 1973, pp. 92–106.
7. Tretyakova V. E. Issledovanie zakriticheskogo povedeniya vnetsentrenno szhatikh sterzhnei trubchatogo secheniya [Study of post-critical behavior of eccentrically compressed tubular section rods]. *Stroitel'naya mekhanika i raschet sooruzhenii* [Structural Mechanics and Analysis of Constructions]. 1981, no. 1, pp. 47–49.
8. Gorokhov Ye. V., Vasilev V. N., Mushchanov A. V., Volchikov A. N. Eksperimentalnoe issledovanie vliyaniya uzlovikh soedinenii strukturnykh konstruksii na ustoychivost tsentralno-szhatikh sterzhnei [Experimental study of the influence of node joints of structural structures on the stability of central compressed rods]. *Metallicheskie konstruksii* [Metal Constructions]. 2020, vol. 26, no. 2, pp. 87–101. EDN YYLDPF.
9. Gorokhov Ye. V., Mushchanov A. V. Analiz vliyaniya konstruktivnykh osobennostei uzlovikh soedinenii na nesushchuyu sposobnost tsentralno szhatykh sterzhney strukturnykh pokrytiy [Analysis of the influence of structural features of nodal connections on the load-carrying capacity of centrally compressed rods of structural coatings]. *Metallicheskie konstruksii* [Metal Constructions]. 2017, vol. 23, no. 3, pp. 139–151. EDN YWFIQO.



10. Saka T., Taniguchi Y. Buckling behaviour of space trusses constructed by bolted jointing systems. *Journal of Structural and Construction Engineering (Transactions of AIJ)*. 1983, vol. 331, pp. 1–9.
11. Schmidt L. C., Hanaor A. Force Limiting Devices in Space Trusses. *Journal of the Structural Division, ASCE*. 1979, vol. 105, no. ST5, pp. 939–951.
12. Bai C., Tian L., Xu G., Zhong W. Numerical simulation and performance evaluation of compression members in long-span single-layer spatial grid structures constrained by steel bars. *Structures*. 2024, vol. 65, pp. 106804.
13. Konin D. V., Olurombi A. R. Analiz ustoychivosti pryamoshovnykh i spiralnoshovnykh trub iz vysokoprochnykh staley pri tsentralnom i vnestsentrennom szhatii na primere naturnykh eksperimentov [The buckling analysis of direct-welding and spiral-welding tubes made of high-strength steels at central and eccentric compression based on experiment]. *Izvestiya visshikh uchebnikh zavedenii. Stroitelstvo* [News of Higher Educational Institutions. Construction]. 2018, no. 6 (714), pp. 106–116. EDN TOKNXG.
14. Konin D. V. Eksperimentalnie issledovaniya stalnykh sterzhnei na tsentralnoe i vnestsentrennoe szhatie [Experimental studies of steel rods for central and eccentric compression]. *Vestnik NITS. Stroitelstvo* [Bulletin of the Research Center. Construction]. 2021, no. 1 (28), pp. 16–37. DOI 10.37538/2224-9494-2021-1(28)-16-3 EDN JSWWYL.
15. Faibishenko V. K. Eksperimentalnie issledovaniya kvadratnykh v plane perekrestnykh sistem pri razlichnykh variantakh opiraniya [Experimental studies of square-in-plan cross systems with various support options]. *Stroitel'naya mekhanika. Raschet i konstruirovaniye sooruzheniy : trudy Moskovskogo ordena Trudovogo Krasnogo Znameni arkhitekturnogo instituta* [Structural mechanics. analysis and design of structures : proceedings of the Moscow Order of the Red Banner of Labour Architectural Institute]. Moscow; 1969.
16. Hori A. Static test of a model of a long-span double-layer space truss under unsymmetrical vertical load: Long-span space truss with a rise and a semicircle-connected plan (Part 1). *Journal of Structural and Construction Engineering (Transactions of AIJ)*. 1992, vol. 436, pp. 113.
17. Kato S., Kubodera I. Elasto-Plastic Buckling Loads of Latticed Shells with Elastic Springs at Both Ends of Members. *Journal of Structural and Construction Engineering (Transactions of AIJ)*. 1993, no. 448, pp. 47–58.
18. Cai J. G., Ye Z., Wang X. Y., et al. Static and Kinematic Behaviour of a Foldable Truss Roof Structure. *Advanced Steel Construction*. 2018, vol. 14, no. 4, pp. 606–619.
19. Mushchanov A. V., Mushchanov V. F., Romenskii I. V. Vliyaniye podatlivosti opor na napryazhenno-deformirovannoe sostoyaniye elementov strukturnogo pokrytiya [The impact of support on the compliance of the stress-strain state of structural elements covering]. *Stroitelstvo unikalnykh zdaniy i sooruzheniy* [Construction of Unique Buildings and Structures]. 2016, no. 1 (40), pp. 7–19. EDN VLNKRR.
20. Mushchanov A. V. *Deistvitelnaya rabota i formoobrazovaniye sterzhnevikh strukturnykh pokrytiy na netipovom plane* [Actual behavior and shaping of bar structural coverings on a non-typical plan]. Donetsk : DONNASA; 2020, pp. 30–89.

© С. А. Лютров, И. А. Терехов

Ссылка для цитирования:

Лютров С. А., Терехов И. А. К вопросу расчета на устойчивость при продольно-поперечном изгибе элементов пространственных стержневых конструкций // Инженерно-строительный вестник Прикаспия: научно-технический журнал / Астраханский государственный архитектурно-строительный университет. Астрахань: ГАОУ АО ВО «АГАСУ», 2026. № 3 (57). С. 13–20.

УДК 711.4:004.9

DOI 10.52684/2312-3702-2026-57-3-20-27

**СОЦИАЛЬНАЯ ИНФРАСТРУКТУРА КРУПНОГО ГОРОДА:
ПРОСТРАНСТВЕННАЯ ДОСТУПНОСТЬ ОБЪЕКТОВ ОБРАЗОВАНИЯ (НА ПРИМЕРЕ Г. РЫБИНСКА)**

И. В. Дмитриюков, О. В. Ладыгина, Н. А. Яманина

Дмитрюков Иван Васильевич, магистрант, Ярославский государственный политехнический университет, г. Ярославль, Российская Федерация, тел.: + 7 (995) 692-70-93; e-mail: ivdmitryukov@mail.ru;

Ладыгина Ольга Викторовна, кандидат технических наук, доцент кафедры «Инфраструктура и транспорт», Ярославский государственный технический университет, г. Ярославль, Российская Федерация, тел.: + 7 (910) 977-58-30; e-mail: o_ladigina@mail.ru;

Яманина Надежда Аркадьевна, главный инженер проектов, Национальное объединение проектировщиков, г. Ярославль, Российская Федерация, тел.: + 7 (903) 822-44-38; e-mail: frauYamanina@yandex.ru

Рассмотрена пространственная доступность объектов образования в городе Рыбинск с учетом распределения жилой застройки. Актуальность работы обусловлена территориальной неравномерностью размещения образовательных учреждений и различиями в охвате жилой застройки нормативными радиусами пешеходной доступности. Систематизированы пространственные данные, классифицированы образовательные учреждения, определена плотность жилой застройки и построены буферные зоны нормативной доступности в геоинформационной системе QGIS. Установлено, что 72 % рассматриваемых объектов образования сосредоточено в Центральном, Западном и Южном районах. Охват жилой застройки нормативными радиусами доступности составляет 18-72 % для детских садов, 15-68 % для школ и 0-85 % для учреждений дополнительного образо-