



(18)-0380-1

ОЦЕНКА УСТОЙЧИВОСТИ ЦЕНТРАЛЬНО-СЖАТЫХ СТЕРЖНЕЙ СТРУКТУРНЫХ ПОКРЫТИЙ С УЧЁТОМ КОНСТРУКТИВНЫХ ОСОБЕННОСТЕЙ УЗЛОВЫХ СОЕДИНЕНИЙ И НЕЛИНЕЙНОЙ РАБОТЫ МАТЕРИАЛА

Е. В. Горохов¹, А. В. Танасогло², А. В. Мушанов³

ГОУ ВПО «Донбасская национальная академия строительства и архитектуры»,
2, ул. Державина, г. Макеевка, ДНР, 86123.

E-mail: ¹ mailbox@donnasa.ru, ² a.v.tan@mail.ru, ³ mushhanov93@gmail.com

Получена 27 августа 2018; принята 21 сентября 2018.

Анотация. В работе представлен анализ устойчивости центрально-сжатых стержней с учётом конструктивных особенностей узловых соединений, для которых выполнены модели объёмных конечно-элементных стержней, проведен анализ напряженно-деформированного состояния шести типоразмеров трубчатых элементов по ГОСТ 10704-91 «Трубы стальные электросварные прямошовные» (в диапазоне от 114×4 до 159×12 мм) в программном комплексе семейства ЛИРА-САПР. Расчёт выполнен в физически нелинейной постановке в упруго-пластической стадии работы материала. При анализе устойчивости проанализированы коэффициенты запаса устойчивости по результатам нелинейного расчёта ($k_{\text{з}}$). Представлены уточненные значения критической силы ($N_{\text{кр, ул.с}}$). Полученные данные сравнивались со значениями критической силы, определенной по ДБН.В.2.6-198:2014 «Стальные конструкции» ($N_{\text{кр, ДБН}}$). С помощью множественной линейной регрессии в программе Microsoft Excel установлена обобщенная аппроксимирующая зависимость между значимыми факторами, влияющими на уточнённое значение критической силы ($N_{\text{кр}}$), и значения суммарного отклонения ($y_{\text{нач}} + y_{\text{max}}/l$).

Ключевые слова: структурное покрытие, центрально-сжатый стержень, устойчивость, метод конечных элементов, физическая нелинейность, упруго-пластическая работа материала.

ОЦІНКА СТІЙКОСТІ ЦЕНТРАЛЬНО-СТИСНУТИХ СТЕРЖНІВ СТРУКТУРНИХ ПОКРИТТІВ З УРАХУВАННЯМ КОНСТРУКТИВНИХ ОСОБЛИВОСТЕЙ ВУЗЛОВИХ З'ЄДНАНЬ І НЕЛІНІЙНОЇ РОБОТИ МАТЕРІАЛУ

Є. В. Горохов¹, А. В. Танасогло², О. В. Мушанов³

ДОНУ ВПО «Донбаська національна академія будівництва і архітектури»,
2, вул. Державіна, м. Макіївка, ДНР, 86123.

E-mail: ¹ mailbox@donnasa.ru, ² a.v.tan@mail.ru, ³ mushhanov93@gmail.com

Отримана 27 серпня 2018; прийнята 21 вересня 2018.

Аннотація. У роботі представлено аналіз стійкості центрально-стиснутих стержнів з урахуванням конструктивних особливостей вузлових з'єднань, для яких виконані моделі об'ємних кінцево-елементних стержнів, проведено аналіз напружено-деформованого стану шести типорозмірів трубчастих елементів за ГОСТ 10704-91 «Труби сталеві електросварні прямошовні» (в діапазоні від 114×4 до 159×12 мм) в програмному комплексі сімейства ЛІРА-САПР. Розрахунок виконаний в фізично нелінійній постановці в пружно-пластичній стадії роботи матеріалу. При аналізі стійкості проаналізовані коефіцієнти

запасу стійкості за результатами нелінійного розрахунку ($k_{\text{зв}}$). Представлені уточнені значення критичної сили ($N_{\text{кр, ул.с}}$). Отримані дані порівнювалися зі значеннями критичної сили, визначеної за ДБН.В.2.6-198:2014 «Сталеві конструкції» ($N_{\text{кр, ДБН}}$). За допомогою множинної лінійної регресії в програмі Microsoft Excel встановлена узагальнена апроксимувальна залежність між значущими факторами, що впливають на уточнене значення критичної сили ($N_{\text{кр}}$), і значення сумарного відхилення ($y_{\text{поч}} + y_{\text{max}}/l$).

Ключові слова: структурне покриття, центрально-стиснутий стержень, стійкість, метод кінцевих елементів, фізична нелінійність, пружно-пластична робота матеріалу.

ESTIMATION OF STABILITY OF CENTRAL COMPRESSED RODS OF STRUCTURAL COATINGS TAKING INTO ACCOUNT STRUCTURAL FEATURES OF KNOT CONNECTIONS AND NONLINEAR WORK OF MATERIAL

Yevgen Gorokhov¹, Anton Tanasoglo², Alexandr Mushchanov³

Donbas National Academy of Civil Engineering and Architecture,
2, Derzhavina Str., Makeyevka, DPR, 86123.

E-mail: ¹ mailbox@donnasa.ru, ² a.v.tan@mail.ru, ³ mushchanov93@gmail.com

Received 27 August 2018; accepted 21 September 2018.

Abstract. The paper presents the analysis of the stability of centrally compressed rods, taking into account the structural features of the node joints for which the models of volume finite element rods are made, the analysis of the stress-strain state of 6 standard sizes of tubular elements according to GOST 10704-91 «Electrically welded steel welded pipes» (in the range from 114×4 to 159×12 mm) in the software package of the LIRA-CAD family. The calculation is performed in a physically nonlinear setting in the elasto-plastic stage of the material. In the analysis of stability, the stability factor was analyzed from the results of nonlinear calculation ($k_{\text{лс}}$). Refined values of the critical force ($N_{\text{кр, е.п.с}}$) are presented. The obtained data were compared with the values of the critical force determined by ДБН В.2.6-198:2014 «Steel structures» ($N_{\text{кр, ДБН}}$). With the help of multiple linear regression, a generalized approximating relationship between significant factors influencing the refined value of the critical force ($N_{\text{кр}}$) and the value of the total deviation ($y_{\text{пр}} + y_{\text{max}}/l$) is established in the Microsoft Excel program.

Keywords: structural coverage, centrally compressed rod, stability, finite element method, physical nonlinearity, elastic-plastic material work.

Введение

Широкие масштабы использования структурных покрытий на сегодняшний день подтверждаются их применением практически в любой отрасли строительства, позволяя перекрывать как большепролетные промышленные объекты, так и конструкции над трибунами многотысячных стадионов. Это объясняется несколькими факторами:

- во-первых, небольшим расходом материала на всё покрытие при использовании типовых решений для проектирования структурных конструкций [1, 11];
- во-вторых, надёжностью при эксплуатации (за последние 50 лет не было ни одного случая обрушения такого вида конструкций,

связанного с отказом системы [2]). Этому способствует многосвязность регулярных систем, благодаря чему даже при выходе из строя какого-либо элемента усилия перераспределяются на соседние элементы.

Одной из самых распространённых структурных систем на территории СНГ является система, предложенная Московским архитектурным институтом (МАРХИ) (рис. 1). Система практически является аналогом МЭРО (MERO-TSK) [18] по своему конструктивному решению узлового соединения (рис. 2). Покрытие типа МАРХИ очень хорошо зарекомендовало себя в строительной практике и по сей день пользуется большим спросом.



Рисунок 1. Деловой центр «Алкон» (Россия).

Для проектирования структурных конструкций разработаны определённые методики проектирования, предложенные в трудах А. Г. Трущева [3] и Р. Хисамова [4]. Под управляющими параметрами в разработанных методиках понимались две составляющие:

- 1) геометрия ячейки структурного покрытия;
- 2) размер перекрываемой части в плане.

Стандартная высота ячейки варьируется в пределах от 1,2 до 3,0 м. Типовым для такого рода конструкций считается квадратный план с размерами от 12×12 до 48×48 м и прямоугольный, например 12×24 м [3, 4, 14].

Однако при перекрытии планов, превышающих размеры 48×48 м, большая часть исследуемого покрытия представлена трубчатыми элементами сечениями от 114×4 до 159×12 мм. Как показал анализ, при выполнении этих элементов из стали С245 гибкость этих элементов находится в диапазоне от 69,0 до 92,5, что свидетельствует о возможной потере устойчивости в упруго-пластической стадии работы материала. Но для подобного диапазона гибкостей до сих пор не исследован процесс потери устойчивости

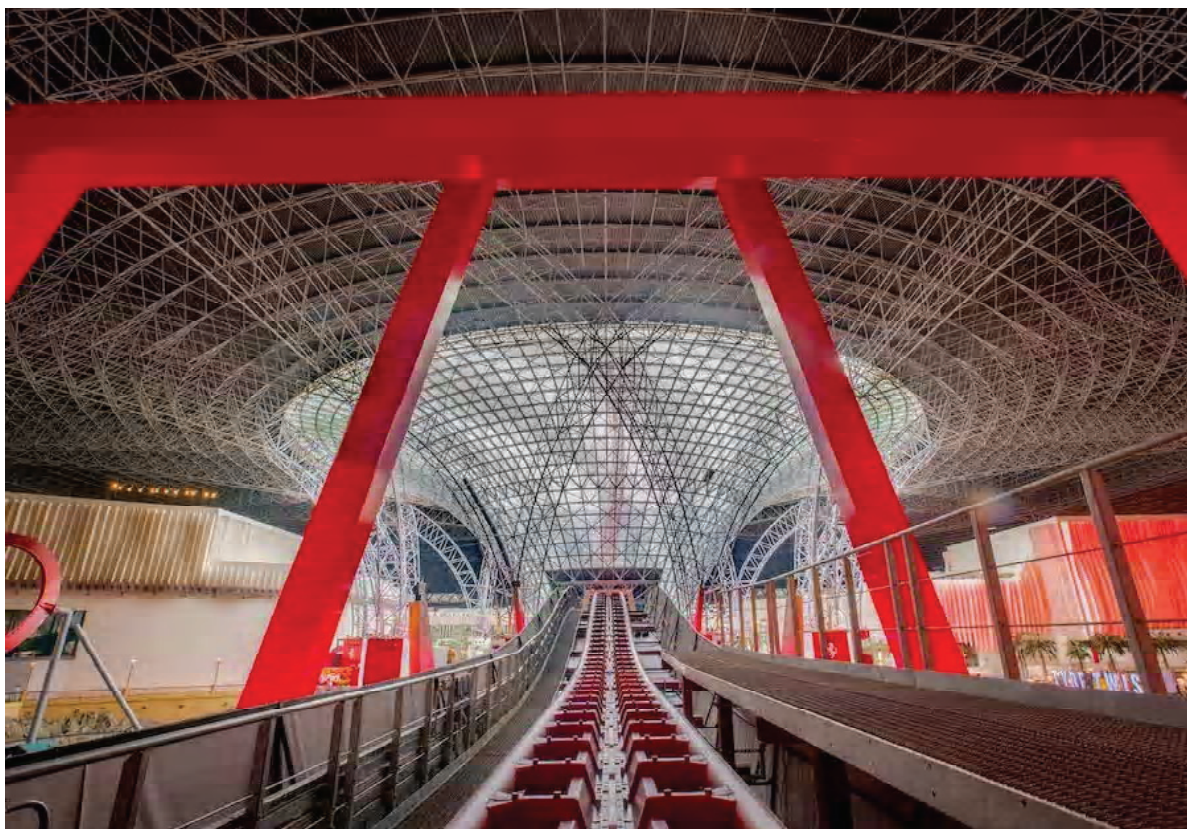


Рисунок 2. Le Ferrari World Theme Park (ОАЭ).

с учётом конструктивных особенностей узловых соединений.

Общий подход в решении задачи в упругой стадии работы материала был представлен в предыдущей работе авторов [17].

Основная часть

Исходя из вышесказанного, сформирована основная цель работы — установление обобщённой зависимости влияния конструктивных особенностей узловых соединений (на примере системы МАРХИ) на несущую способность центрально-сжатых стержней структурных покрытий в упруго-пластической стадии работы материала.

Для достижения поставленной цели вся работа была разделена на 2 этапа.

Этап 1. Анализ особенностей НДС

Формирование расчётной модели в программном комплексе семейства ЛИРА-САПР реализовывалось в несколько шагов:

- 1) создание объёмной конечно-элементной (КЭ) модели трубы (для всех шести типоразмеров);
- 2) задание для модели трубы начального геометрического несовершенства в виде общей погиби полуволны синусоиды с максимальным отклонением в центре стержня ($f/l = 1/700$);
- 3) моделирование узлового соединения с помощью объёмных элементов;
- 4) задание внешней сжимающей нагрузки, превышающей значение критической нагрузки, вычисленной по ДБН, на 100 % ($N_{\text{п}}$).

Все шесть типоразмеров исследуемых стержней моделировались с помощью КЭ 244 (физически нелинейный универсальный четырёхугольный КЭ оболочки). Исследуемая труба моделировалась с помощью функции «Поверхности вращения», в которой КЭ сетка относительно вертикальной оси разбивалась на 200 элементов, а касемо поверхности вращения на 20 элементов.

В идеализированной расчётной схеме геометрическая длина всех стержней (от узла до узла) принималась равной 3 600 мм. Однако с учётом уточнённого моделирования узловых соединений фактическая длина стержней принималась между геометрическими центрами коннекторов и варьировалась в зависимости от сечения трубы и соответствующего условия закрепления (табл. 1, рис. 3). Для всех типоразмеров труб задавалось начальное отклонение от вертикальной оси стержня, т. е. геометрические несовершенства, допускаемые при моделировании центрально-сжатых элементов $h/l = 1/700$ [8]. Таким образом, в центральных узлах стержня максимальное отклонение от вертикальной оси составило 5 мм. С помощью формульного описания удалось описать отклонение для каждого узла в 200 элементах сетки:

$$y = 5 \frac{\sin x\pi}{200l},$$

где x — порядковый номер элемента ($x = 1 \dots 100$);
 l — геометрическая длина стержня ($l = 3\,600$ мм).

Для корректного моделирования узловых соединений в расчётную схему для каждого стержня введены свои размеры конструктивных элементов

Таблица 1. Геометрические характеристики сечений элементов и их узловых соединений

№ п/п	Сеч. труб, мм	Радиус коннектора (\bar{l}_k), мм	Длина выступ. части болта (l_b), мм	Толщина заглушки (t_3), мм	Длина трубы (l_T), мм	Эскиз
1	Ø114×4	75	24	50	3 302	
2	Ø127×4,5	85	24	50	3 282	
3	Ø127×6	85	24	50	3 282	
4	Ø133×8	100	24	60	3 232	
5	Ø146×10	100	24	60	3 232	
6	Ø159×12	100	24	60	3 232	

узлового соединения (табл. 1) наряду с их соответствующей маркировкой (табл. 2). Все элементы узлового соединения структурного покрытия (заглушка, болт, коннектор) моделировались с помощью объёмных 6- и 8-узловых КЭ 234 и 236.

Наложение связей (граничных условий) в схеме осуществлялось путём закрепления верхнего и нижнего коннектора (рис. 4), как для статически определимого элемента.

Поскольку прямых указаний по нормированию коэффициента запаса устойчивости ($k_{\text{з}}$) в нормативных документах (ДБН, СНиП, СП, Еврокод) не представлено, воспользуемся соотношением критических нагрузок, вычисленных по формуле Эйлера и ДБН при упругой работе материала в диапазоне гибкостей от 103 до 226 (табл. 3).

$$\frac{N_{\text{кр,Эйлер}}}{N_{\text{кр,ДБН}}} = k_{\text{з}}$$

В дальнейших расчётах принимаем значение $k_{\text{з}}$ по отношению к найденной из расчётов критической силы — 1,35.

В расчётной схеме нагрузка прикладывалась как сосредоточенная узловая нагрузка в узел верхнего коннектора с видом нагрузки «постоянная» с коэффициентом длительности 1,0.

Расчёт проводился в физически нелинейной постановке с фиксацией номера коэффициента нагружения, при котором элементы в схеме теряют устойчивость, что соответствует достижению значений критических сил по нелинейному расчёту. За основу бралась классическая 3-ветвевая диаграмма Прандтля. На рисунке 5

Таблица 2. Геометрические размеры конструктивных элементов узлового соединения

№ п/п	Сечение труб	Маркировка болта	Сечение коннектора	Сечение заглушки
1	Ø114×4	M30	Ø150	Ø114×50
2	Ø127×4,5	M30	Ø170	Ø127×50
3	Ø127×6	M36	Ø170	Ø127×50
4	Ø133×8	M48	Ø200	Ø133×60
5	Ø146×10	M48	Ø200	Ø146×60
6	Ø159×12	M48	Ø200	Ø159×60

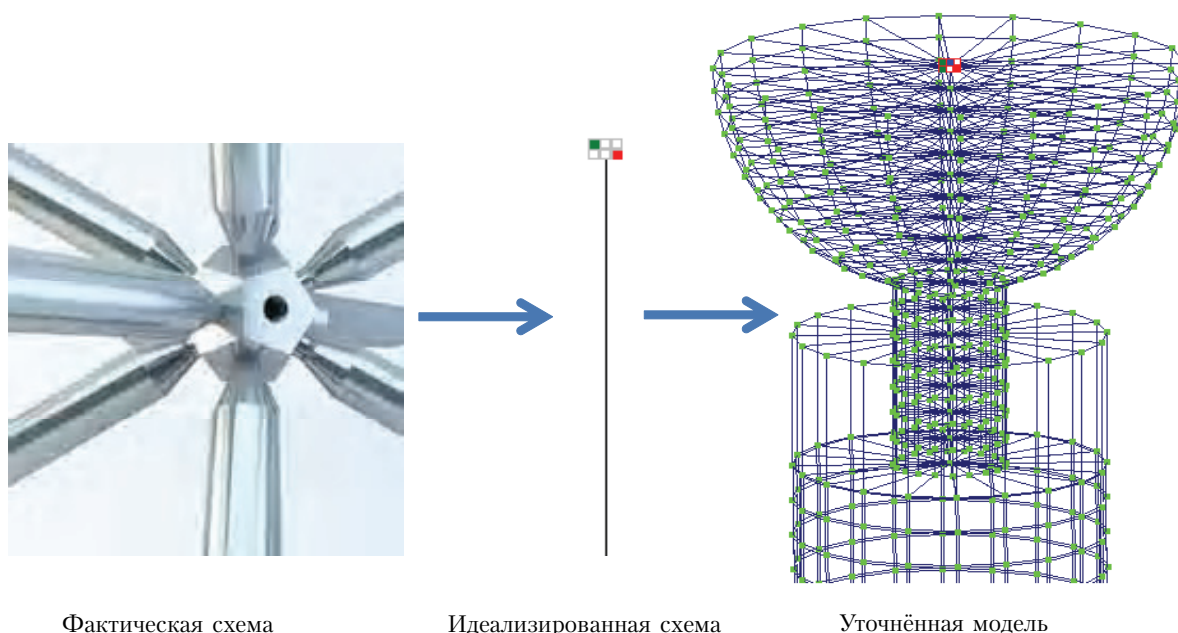


Рисунок 3. Переход от фактической схемы к модели.

показаны заданные параметры материала для узловых соединений (А) и для элементов трубы (Б). Результаты полученных критических сил и перемещений указаны в таблице 4 и на рисунках

6—12, где N — продольная сила в стержне, соответствующая шагу нагружения, x — суммарное максимальное перемещение узла расчетной схемы в горизонтальной плоскости.

Таблица 3. Значения критической и расчётной нагрузок

№ п/п	Сечение труб	λ	$N_{кр}$, кН	$N_{кр, ДБН}$, кН	k_{zy}	$k_{zy}^{ср}$
1	Ø48x3	226,4150	17,2	12,97	1,325 895	1,353 296
2	Ø60x3,2	179,1045	36,9	27,91	1,322 192	
3	Ø76x3,2	139,5350	77,5	58,93	1,315 023	
4	Ø89x3,5	118,8200	137,4	96,32	1,426 512	
5	Ø102x3,5	103,4500	210,0	152,52	1,376 859	

$N_{кр}$ по ДБН+100%



$N_{кр}$ по ДБН+100%

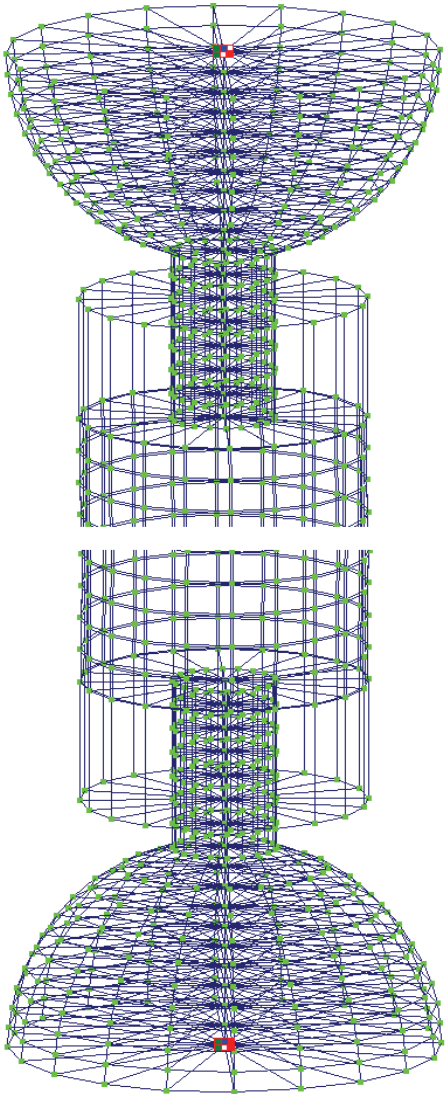
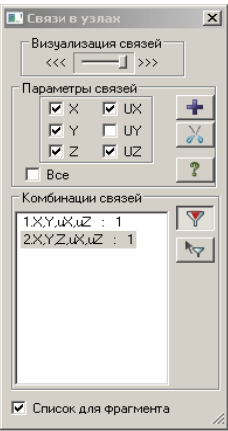
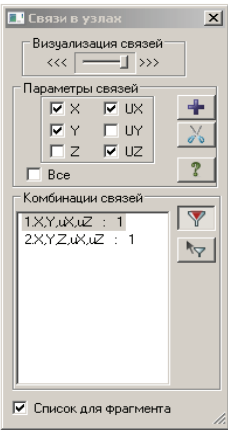


Рисунок 4. Моделирование связей в узлах схемы.

а)

Законы нелинейного деформирования материалов

Основной материал

Закон нелинейного деформирования: 14 - кусочно-линейный закон деформирования

№ записи: 3

Учитывать армирующий материал: ☐

Учитывать ползучесть бетона: ☐

Загрузить закон из файла

Комментарий

Параметры закона нелинейного деформирования

Деформация	Напряжение
-0.065	-1100
-0.0012	-900
0	0
0.0012	900
0.065	1100

Нарисовать

σ — МПа

Сохранить закон в файл

Текущий закон: ☒ Все законы проекта: ☐

Подтвердить Отменить Справка

Теории прочности (для КЭ пластин): ☐

б)

Законы нелинейного деформирования материалов

Основной материал

Закон нелинейного деформирования: 14 - кусочно-линейный закон деформирования

№ записи: 1

Учитывать армирующий материал: ☐

Учитывать ползучесть бетона: ☐

Загрузить закон из файла

Комментарий

Параметры закона нелинейного деформирования

Деформация	Напряжение
-0.23	-370
-0.025	-250
-0.0012	-240
0	0
0.0012	240
0.025	250
0.23	370

Нарисовать

σ — МПа

Сохранить закон в файл

Текущий закон: ☒ Все законы проекта: ☐

Подтвердить Отменить Справка

Теории прочности (для КЭ пластин): ☐

Наибольших главных

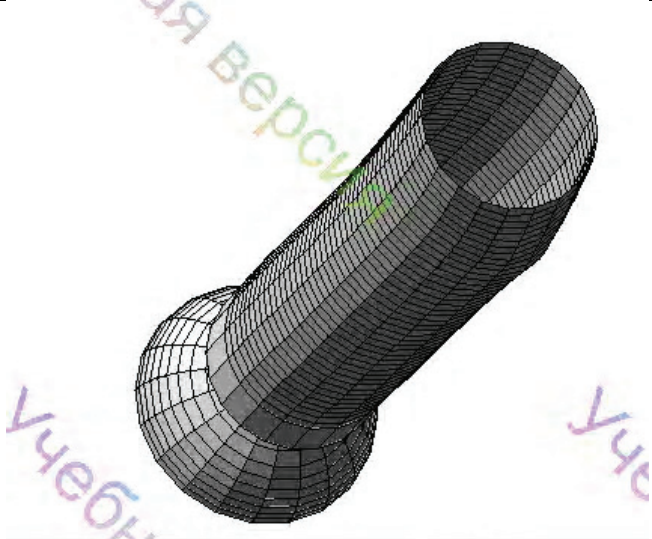
Предел. напряжение

Растяжение:

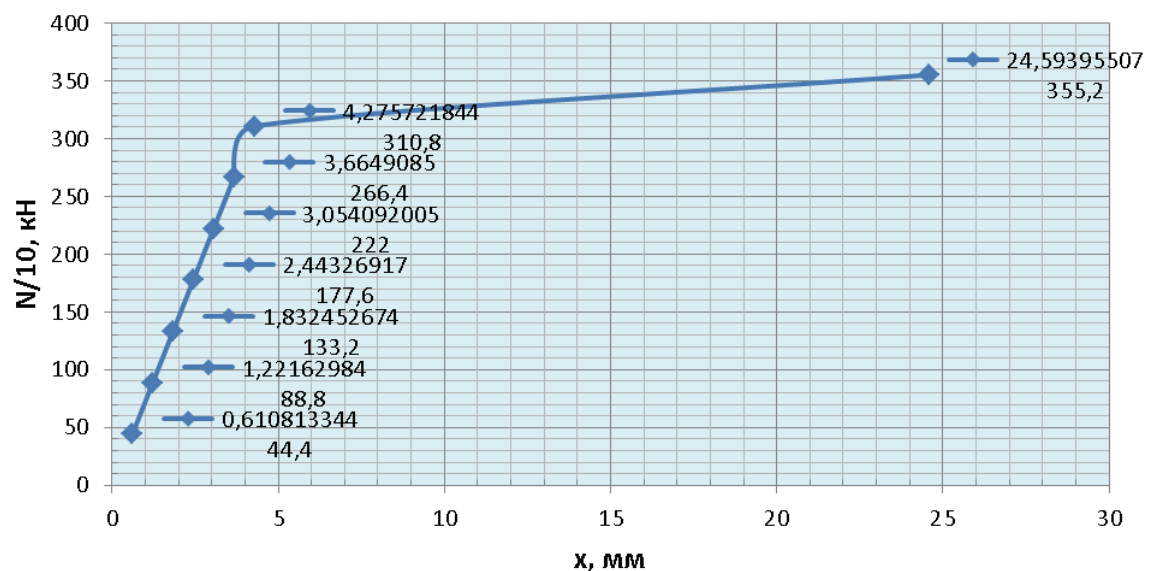
Сжатие:

Рисунок 5. Диаграмма растяжения материала: а) для узловых соединений; б) для элементов трубы.

Таблица 4. Результаты расчёта в ПК ЛИРА-САПР 2017

№ п/п	Сечение	Критическая нагрузка по результатам расчёта	Графическое отображение потери устойчивости (на примере модели Ø146×10)
1	Ø114×4	$0,8 N_{кр, п} = 355,2 \text{ кН}$	
2	Ø127×4,5	$0,8 N_{кр, п} = 491,2 \text{ кН}$	
3	Ø127×6	$0,8 N_{кр, п} = 641,6 \text{ кН}$	
4	Ø133×8	$0,8 N_{кр, п} = 907,2 \text{ кН}$	
5	Ø146×10	$0,7 N_{кр, п} = 1\,302,4 \text{ кН}$	
6	Ø159×12	$0,7 N_{кр, п} = 1\,540 \text{ кН}$	

Нкр по результатам нелинейного расчёта в ПК ЛИРА-САПР 2017

Рисунок 6. Зависимость «N-x» для трубы Ø114×4 ($k_{з\text{у}}^{\text{нелин.расчёт}} = 0,8$).

Нкр по результатам нелинейного расчёта в ПК ЛИРА-САПР 2017

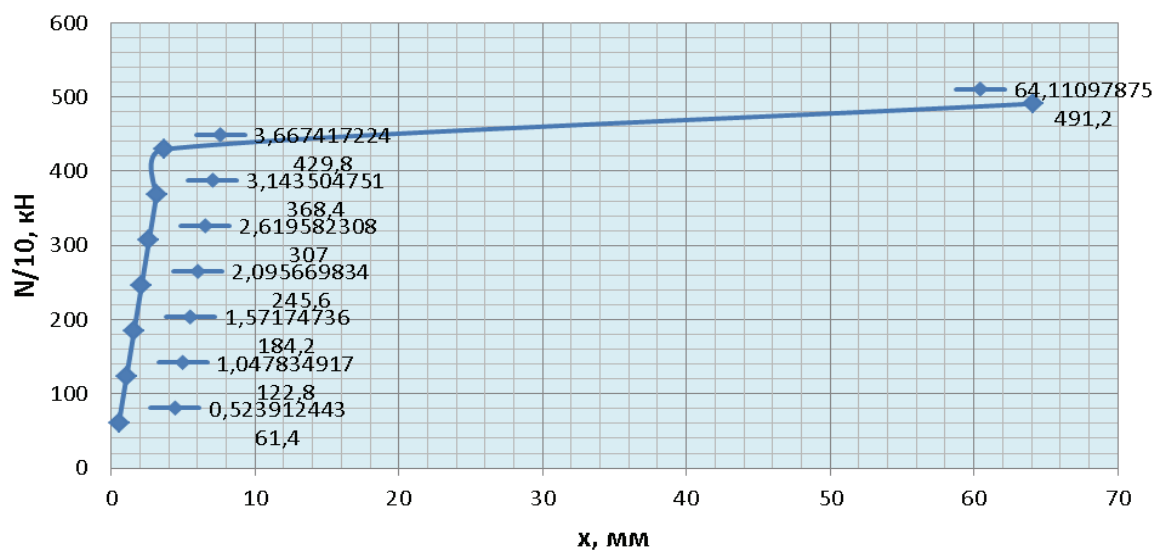


Рисунок 7. Зависимость «N-x» для трубы Ø127×4,5 ($k_{\text{нелин.расчёт}} = 0,8$).

Нкр по результатам нелинейного расчёта в ПК ЛИРА-САПР 2017

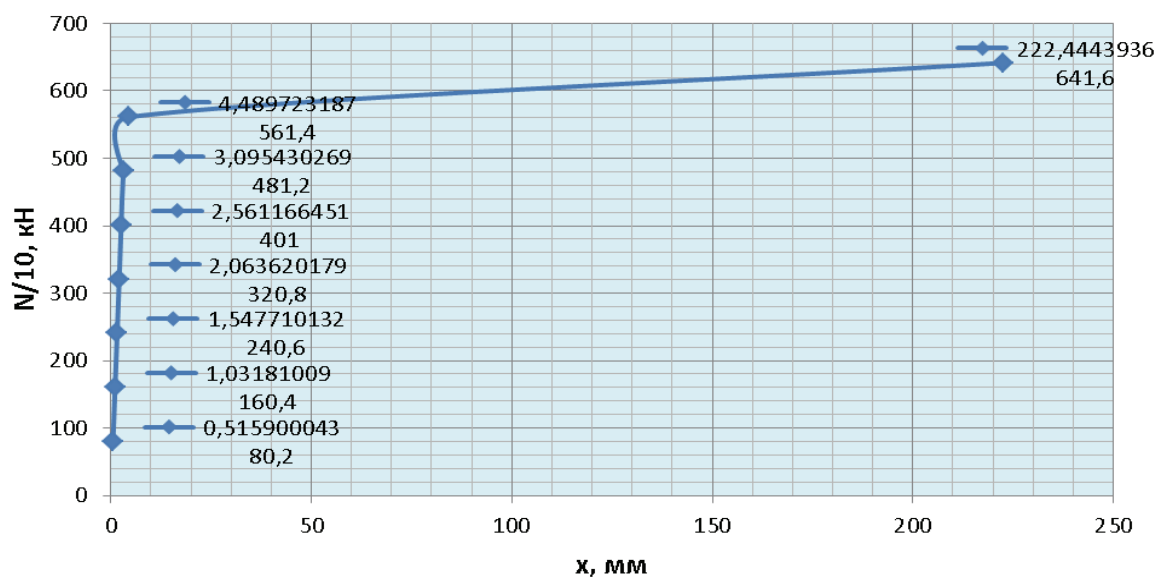


Рисунок 8. Зависимость «N-x» для трубы Ø127×6 ($k_{\text{нелин.расчёт}} = 0,8$).

Graph showing the dependence of $N/10, \kappa H$ on x, MM for various concentrations. The y-axis ranges from 0 to 1000 κH , and the x-axis ranges from 0 to 300 MM . The curves represent different concentrations, with values labeled next to the curves.

Concentration	Approximate $N/10, \kappa H$ at $x=0$
245,3431508	~800
907,2	~780
4,798490124	~720
793,8	~680
2,814590484	~600
680,4	~560
2,3454904	~450
567	~400
1,876390322	~340
453,6	~300
1,407290239	~226,8
340,2	~180
0,938190161	~113,4
0,469090078	~100

Рисунок 9. Зависимость «N-х» для трубы $\varnothing 133 \times 8$ ($k_{\text{зу}}^{\text{нелин.расчёт}} = 0,8$).

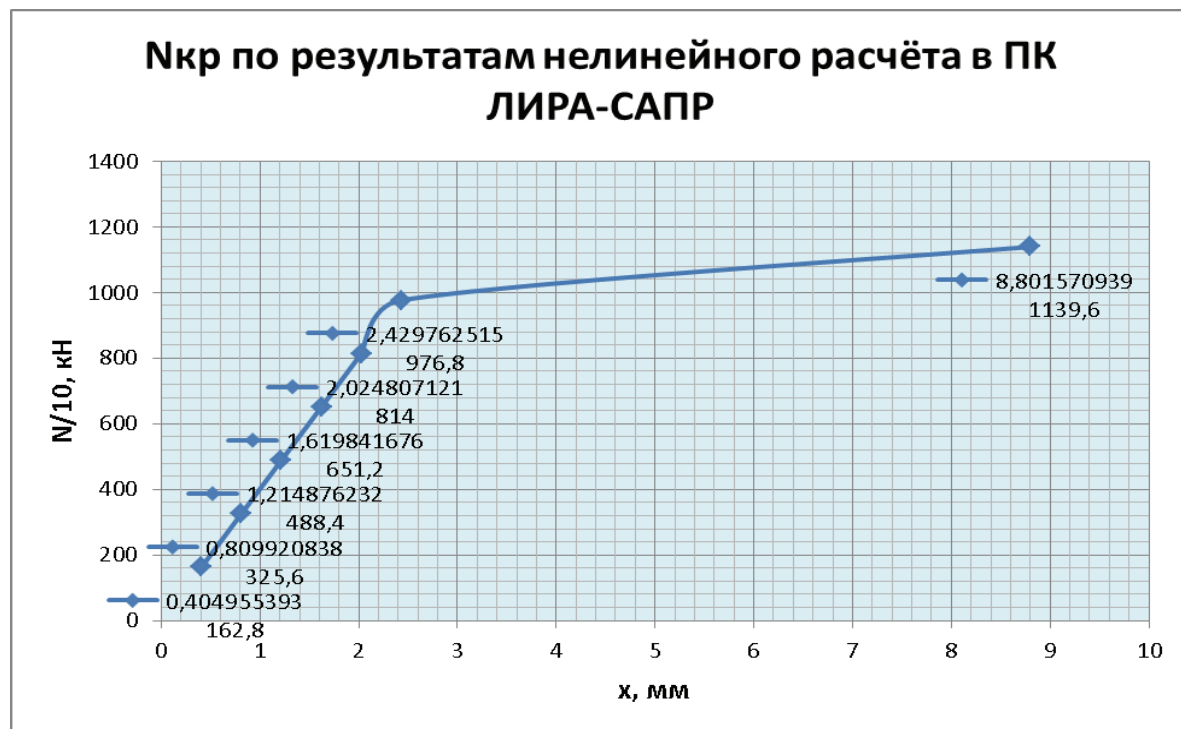


Рисунок 10. Зависимость «N-х» для трубы $\varnothing 146 \times 10$ ($k_{\text{зу}}^{\text{нелин.расчёт}} = 0,7$).

Нкр по результатам нелинейного расчёта в ПК ЛИРА-САПР 2017

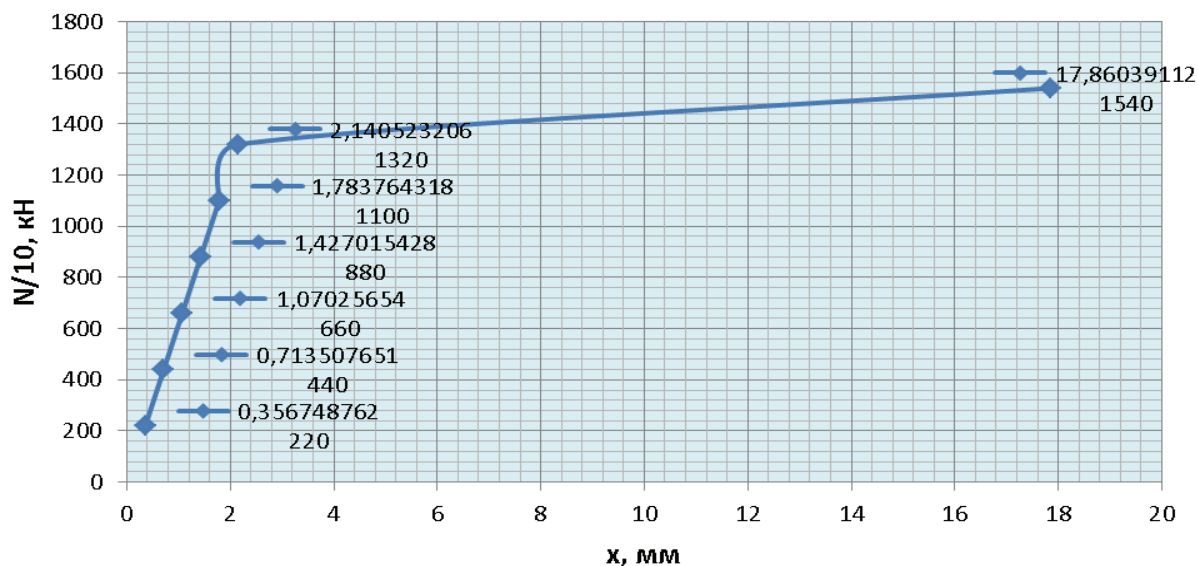


Рисунок 11. Зависимость «N-x» для трубы $\varnothing 159 \times 12$ ($k_{3y}^{\text{нелин. расчёт}} = 0,7$).

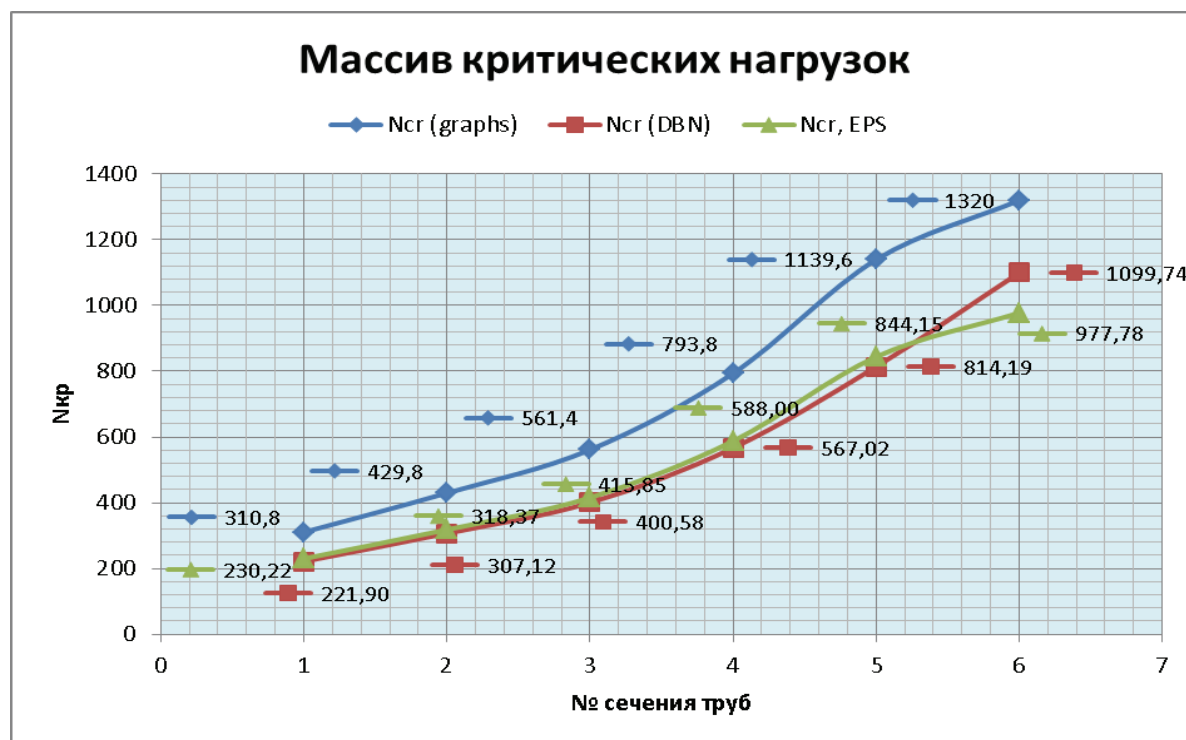


Рисунок 12. Массив критических нагрузок.

Полученные результаты критической силы по нелинейному расчёту сравнивались со значениями критической силы по ДБН В.2.6—198:2014 «Стальные конструкции» [16]. Сравнительный анализ приведен в таблице 5.

Анализируя данные таблицы 5, можно отметить следующие общие закономерности:

- общая форма потери устойчивости по половине синусоиды соответствует общетеоретическим положениям и данным ДБН В.2.6-198:2014 [11], кроме трубы $\varnothing 114 \times 4$, которая теряет устойчивость по изгибно-крутильной форме как тонкостенная труба большой гибкости;
- уточнение значений критической силы, обусловленное моделированием стержня в виде трубы-оболочки и характерных особенностей узловых соединений составляет в пределах:
 - 3,66 ... — 11,09 % для расчётных значений критических нагрузок, вычисленных с учётом принятого в нормах значения коэффициента устойчивости $k_{\text{з}} = 1,35$;
 - 40,06 ... 20,03 % для расчётных значений критических нагрузок, вычисленных без $k_{\text{з}}$.

Этап 2. Установление обобщённой зависимости расчётного значения критической силы и максимального отклонения

По полученным результатам расчёта был сформирован массив данных для установления обобщённой зависимости между значимыми факторами, которые влияют на уточнённое расчётное значение критической силы ($N_{\text{кр}}$) (рис. 12) и суммарного отклонения стержней под нагрузкой ($y_{\text{нач}} + y_{\text{max}}$). Эта зависимость описана с помощью множественной линейной регрессии в программе Microsoft Excel. Значение коэффициента

корреляции 0,971 (для критической силы) и 0,7979 (для суммарного отклонения) подтверждает адекватность выбранных показателей между искомыми функциями и значениями, вычисляемыми с помощью предлагаемой аппроксимационной зависимости. В таблице 6 приведены исходные данные для выполнения регрессионного анализа, в таблице 7 — результаты регрессионного анализа.

На основании проведенных теоретических исследований сформулированы основные выводы по работе, приведенные в разделе заключение.

Заключение

1. В рамках проведенных исследований предложена методика, позволяющая на основе конечно-элементного анализа уточнить значение критических нагрузок для центрально-сжатых стержней структурных покрытий, реализованное в данной работе с учётом конструктивных особенностей выполнения узловых соединений и сортамента стержневых элементов, используемого в системе МАРХИ.
2. Установленные уточнённые значения критической силы позволяют зафиксировать отличия от предполагаемых теоретических значений, обусловленные влиянием указанных в пункте 1 факторов, в пределах:
 - 3,6...11 % для расчётных значений критических нагрузок, вычисленных с учётом принятого в нормах значения коэффициента устойчивости $k_{\text{з}} = 1,35$;
 - 20...40 % для расчётных значений критических нагрузок, вычисленных без $k_{\text{з}}$.
3. Анализ форм потери устойчивости свидетельствует о том, что отношение жесткостей стержня и узлового соединения оказывает существенное влияние на форму потери

Таблица 5. Результаты сравнительного анализа критической силы

№ п/п	Сечение труб	$N_{\text{кр}}$, ДБН, кН	$N_{\text{кр}}$, П, кН	$N_{\text{кр}}$, граф, кН	$k_{\text{з}}$	$N_{\text{кр}}$, УПС, кН	$\Delta k_{\text{з}}$ ДБН, (%)	$\Delta_{\text{ДБН}}$ (%)
1	$\varnothing 114 \times 4$	221,90	443,800	310,8	1,35	230,22	3,75	40,06
2	$\varnothing 127 \times 4,5$	307,12	614,234	429,8		318,37	3,66	39,95
3	$\varnothing 127 \times 6$	400,58	801,157	561,4		415,85	3,81	40,15
4	$\varnothing 133 \times 8$	567,02	1 134,050	793,8		588,00	3,70	39,99
5	$\varnothing 146 \times 10$	814,19	1 628,370	1 139,6		844,15	3,68	39,97
6	$\varnothing 159 \times 12$	1 099,74	2 199,470	1 320		977,78	–11,09	20,03

Таблица 6. Исходные данные для проведения множественной линейной регрессии

ДАННЫЕ ДЛЯ РЕГРЕССИОННОГО АНАЛИЗА

№ Сечения	A (см ²)	Ry (кН/см ²)	lp (см)	ix=iy (см)	E (кН/см ²)	α	β	a (см)	l/t
48х3	4,241	24	360	1,59	20600	0,03	0,06	10,4	8
60х3.2	5,710	24	360	2,01	20600	0,03	0,06	10,4	9,375
76х3.2	7,319	24	360	2,58	20600	0,03	0,06	11,4	11,875
89х3.5	9,401	24	360	3,03	20600	0,03	0,06	11,4	12,715
102х3.5	10,830	24	360	3,48	20600	0,03	0,06	14,9	14,57
114х4	13,820	24	360	3,89	20600	0,03	0,06	14,9	14,25
127х4.5	17,320	24	360	4,33	20600	0,03	0,06	15,9	14,11
127х6	22,810	24	360	4,28	20600	0,03	0,06	15,9	10,5835
133х8	31,420	24	360	4,43	20600	0,03	0,06	18,4	8,3-25
146х10	42,730	24	360	4,82	20600	0,03	0,06	18,4	7,3
159х12	55,420	24	360	5,215	20600	0,03	0,06	18,4	6,625
№ Сечения	φ по ЛБН	φ	λ	λ _{кр}	δ	γ _{max} (см)	γ _{max} (см)	k _y	k _y (λγ)
48х3	0,12745	0,049241	226,4151	7,728183	203,3817	0,5	0,59	0,7	0,486
60х3.2	0,20365	0,065554	179,1045	6,113339	153,0125	0,5	0,57	0,7	0,257
76х3.2	0,33551	0,087417	139,5349	4,762717	114,8899	0,5	0,58	0,7	0,505
89х3.5	0,4269	0,104262	118,8119	4,055383	96,38043	0,5	0,59	0,6	0,469
102х3.5	0,5868	0,120661	103,4483	3,53098	83,30379	0,5	0,59	0,6	0,4335
114х4	0,66902	0,13519	92,5499	3,15882	74,35719	0,5	0,4275	0,3	0,391
127х4.5	0,73883	0,150337	83,14088	2,837832	66,86322	0,5	0,3667	0,5	0,36
127х6	0,73173	0,148639	84,11215	2,870984	67,62766	0,5	0,4189	0,4	0,291
133х8	0,75194	0,153715	81,26411	2,773772	65,39232	0,5	0,4798	0,3	0,19
146х10	0,793925	0,166665	74,6888	2,549338	60,30373	0,5	0,243	0,3	0,12
159х12	0,82682	0,179421	69,03164	2,356244	56,00632	0,5	0,214	0,3	0,35
№ Сечения	N _{кр} (по анкету)	N _{полное}	N _{кр} (двп)	N _{критер. расч.}	N _{крит}	γ _{max} γ _{max} /l	N _{кр} (graphs)	K _{sy}	N _{кр} , LPS
48х3	17,2	25	12,97237	17,5	12,15	0,003028		1,325895	
60х3.2	36,9	50	27,9082	35	12,85	0,002972		1,322192	
76х3.2	77,5	102	58,93434	71,4	51,51	0,003		1,315023	1,353296
89х3.5	137,4	180	96,31889	108	84,42	0,003028		1,426512	
102х3.5	210	275	152,5211	165	119,2125	0,003028		1,376859	
114х4	334,2	435	221,9006	130,5	170,085	0,002576	310,8	1,35	23022
127х4.5	519,3	677	307,1169	338,5	243,72	0,002408	429,8	1,35	31837
127х6	668	870	400,5783	348	253,17	0,002636	561,4	1,35	41585
133х8	985,5	1280	567,0279	384	243,2	0,002772	793,8	1,35	588,00
146х10	1585,5	2065	814,186	619,5	247,8	0,002064	1135,6	1,35	844,15
159х12	2405,6	3130	1095,737	939	422,55	0,001983	1320	1,35	977,78

устойчивости: тонкостенная труба большой гибкости ($\varnothing 114 \times 4$ мм), с $\bar{\lambda} = 3,159$ теряет устойчивость по изгибно-крутильной форме, стержни с меньшей гибкостью (от 2,838 до 2,356) теряют устойчивость по классической форме потери устойчивости 1 рода, характерной для центрально-сжатых стержней.

4. Для стержней с относительно меньшей жёсткостью ($114 \times 4 \dots 133 \times 8$ мм) потеря устойчивости происходит в диапазоне отклонений

($1/350 \div 1/400$)/ l , а для стержней с большей жёсткостью ($146 \times 10 \dots 159 \times 12$ мм) потеря устойчивости происходит при малой стрелке отклонения ($1/500 \div 1/550$)/ l .

5. Для рассматриваемого диапазона типоразмеров трубчатых элементов предложены аппроксимирующие зависимости для уточнённого вычисления:

- $N_{кр}$ в зависимости от $\bar{\lambda}$, соотношения a/l и r/t .
- y_{max} в зависимости от $\bar{\lambda}$, соотношения a/l и r/t .

Литература

1. ООО «Монтаж ПК» [Электронный ресурс]. — Режим доступа : http://www.monpk.ru/system_marhi/html.
2. Файбишенко, В. К. Система МАРХИ [Электронный ресурс] / В. К. Файбишенко // Научно-проектный центр Виктория. — Режим доступа : <http://www.sistems-marhi.ru/marhi/html>.
3. Трущев, А. Г. Пространственные металлические конструкции : учебное пособие / А. Г. Трущев. — М. : Стройиздат, 1983. — 216 с.
4. Хисамов, Р. И. Расчет и конструирование структурных покрытий / Р. И. Хисамов. — Киев : Будівельник, 1981. — 48 с.
5. Роменский, И. В. Основные подходы к назначению пространственных и жесткостных характеристик покрытия системы МАРХИ при регулировании параметров его напряженно-деформированного состояния / И. В. Роменский, Т. И. Загоруйко, А. В. Муцанов // Металлические конструкции, 2015. Т. 21, № 1. С. 5—14.
6. Муцанов, В. Ф. Рациональные геометрические и жесткостные параметры большепролетного структурного покрытия / В. Ф. Муцанов, И. В. Роменский, А. В. Муцанов // Строительство уникальных зданий и сооружений, 2016. № 2(41). С. 18—29. ISSN 2304—6295.
7. Лейтес, С. Д. Устойчивость сжатых стальных стержней / С. Д. Лейтес. — М. : Госстройиздат, 1954. — 312 с.
8. Стрелецкий, Н. С. Металлические конструкции / Н. С. Стрелецкий. — М. : Госстройиздат, 1962. — 769 с.
9. Перельмутер, А. В. Расчетные модели сооружений и возможность их анализа / А. В. Перельмутер, В. И. Сливкер. — 4-е изд., перераб. — М. : SKAD Soft, 2011. — 736 с.
10. Горохов, Е. В. Учёт конструктивных особенностей узловых соединений в расчетах устойчивости центрально сжатых стержней структурных покрытий / Е. В. Горохов, А. В. Муцанов // Металлические конструкции, 2016. Т. 22. № 3. С. 125—137.

Reference

1. Limited liability company «Installation of a PC» [Electronic resource]. — Mode of access : http://www.monpk.ru/system_marhi/html. (in Russian)
2. Faibishenko, V. K. MARHI System [Electronic resource] / V. K. Faibishenko // Victoria Research and design center. — Access mode : <http://www.sistems-marhi.ru/marhi/html>.
3. Trushchev, A. G. Spatial metal structures: textbook. — Moscow : Stroyizdat, 1983. — 216 p. (in Russian)
4. Khisamov, R. I. Calculation and design of structural coatings. — Kyiv: Budivelnik, 1981. — 48 p. (in Russian)
5. Romenskiy, I. V. The Main Approaches to the Appointment of Spatial and Stiffness Characteristics of the MARHI System roofs when Regulating the Parameters of its Stress-Strain State / I. V. Romenskiy, T. I. Zagoruiko, A. V. Mushchanov. In: *Metal constructions*, 2015. Vol. 21, № 1, P. 5—14. (in Russian)
6. Mushchanov, V. Ph. Rational geometric and stiffness parameters of long-span structural coating / V. Ph. Mushchanov, I. V. Romenskiy, A. V. Mushchanov. In: *Construction of unique buildings and structures*, 2016. № 2(41). P. 18—29. ISSN 2304—6295. (in Russian)
7. Leithes, S. D. Stability of compressed steel bars. Moscow: Gosstroyizdat, 1954. — 312 p. (in Russian)
8. Streletsky, N. C. Metal structures. Moscow : Gosstroyizdat, 1962. — 769 p. (in Russian)
9. Perelmutter, A. V. Design models of structures and possibility of their analysis / A. V. Perelmutter, V. I. Slivker. 4th ed. Moscow : SKAD Soft, 2011. — 736 p. (in Russian)
10. Gorokhov, E. V. Accounting of Constructive Features Nodes Compound Based Stable Central Compressed Rods Structural Coverage / E. V. Gorokhov, A. V. Mushchanov. In: *Metal constructions*, 2016. Vol. 22, № 3. P. 125—137. ISSN 1993-3517 online. (in Russian)
11. Bujisen, M. Dynamic Space Frame Structure [Electronic resource]. Mode of access : <http://>

11. Buijsen, M. Dynamic Space Frame Structures [Electronic resource] / M. Buijsen. — System requirements: Adobe Acrobat Reader. — Mode of access: http://homepage.tudelft.nl/x4x4j/saddbtreports/1011nj/Dynamic_Space_Frame_Structures_Michel_Buijsen.pdf
12. Rosen, A. A general nonlinear structural model of a multirod (multibeam) system-I. Theoretical derivations / A. Rosen, M. Sabag, M. Givoli // *Computers & Structures*. Vol. 61. Issue 4. 1996. — P. 617–632.
13. Antonioua, N. Designing long-span steel girders by applying displacement control concepts / N. Antonioua, Th. Nikolaidisb, C. C. Baniotopoulou. In: *Engineering Structures*. Vol. 59. February 2014. — P. 21–27.
14. Gaylord, E. Structural engineering / E. Gaylord, Gaylord Charles, Stallmeyer James. — New York : The McGraw Hill Companies, 1997. — 1024 p. — ISBN 0070237247.
15. ГОСТ 10704-91 Трубы стальные электросварные прямошовные. Сортамент (с Изменением N 1) / Министерство металлургии СССР. — Введ. 1993-01-01. — М. : ИПК Изд-во стандартов, 1991. — С. 1–14.
16. ДБН В.2.6-198:2014 Сталеві конструкції. Норми проектування / УкрНДІпроектстальконструкція ім. В. М. Шимановського. — Чинні з 2015-01-01 — К. : ДП Укрархбудінформ, 2014. — 199 с.
17. Горохов, Е. В. Анализ влияния конструктивных особенностей узловых соединений на несущую способность центрально сжатых стержней структурных покрытий / Е. В. Горохов, А. В. Муцанов // *Металлические конструкции*. 2017. Т. 23. Номер 3. С. 139–151. ISSN 1993-3517 online.
18. MERO [Electronic resource] // MERO Structures Inc. — Mode of access : <http://www.mero-structures.com>.
- homepage.tudelft.nl/x4x4j/sadd/saddbtreports/1011nj/Dynamic_Space_Frame_Structures_Michel_Buijsen.pdf (date of redearence 14.05.2015)
12. Rosen, A. A general nonlinear structural model of a multirod (multibeam) system-I. Theoretical derivations / A. Rosen, M. Sabag; M. Givoli. In: *Computers & Structures*, 1996, Vol. 61, Issue 4. — P. 617–632.
13. Antonioua, N. T. Designing long-span steel girders by applying displacement control concepts / N. T. Antonioua, Th. Nikolaidisb, C. C. Baniotopoulou. In: *Engineering Structures*, February 2014, Vol. 59. — P. 21–27.
14. Gaylord, Edwin Structural engineering / Edwin Gaylord, Gaylord Charles, James Stallmeyer. New York : The McGraw Hill Companies, 1997. — 1024 p. ISBN 0070237247.
15. GOST 10704-91 Electrically welded steel line-weld tubes. Range (with a Change No. 1). 1993-01-01 date of entry. Moscow : IPC Publishing House of Standards, 1991. P. 1–14. (in Russian)
16. SBC V.2.6-198:2014 Steel structure. Design standards. / UkrRDEproektstalkonstruktziya etc. V. M. Shimanovsky. — Effective from 2015-01-01. - Kyiv : State Enterprise of Ukhrahbudinorm, 2014. — 199 p. (in Russian)
17. Gorokhov, E. V. Analysis of the influence of structural features of nodal connections on the load-carrying capacity of centrally compressed rods of structural coatings / E. V. Gorokhov, A. V. Mushchanov. In: *Metal constructions*, 2017. Vol. 23, Number 3. P. 139–151. (in Russian)
18. MERO [Electronic resource]. MERO Structures Inc. Mode of access : <http://www.mero-structures.com>.

Горохов Евгений Васильевич — доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой металлических конструкций и сооружений ГОУ ВПО «Донбасская национальная академия строительства и архитектуры». Президент Украинской ассоциации по металлическим конструкциям, Иностранный член Российской Академии архитектурно-строительных наук, академик Академии Высшей школы и Академии строительства Украины. Член Международного комитета по изучению воздействия ветра на здания и сооружения. Научные интересы: эксплуатационная надежность строительных металлических конструкций, климатические нагрузки на строительные конструкции.

Танасогло Антон Владимирович — кандидат технических наук, доцент кафедры металлических конструкций и сооружений ГОУ ВПО «Донбасская национальная академия строительства и архитектуры». Научные интересы: эксплуатационная надежность и оптимальное проектирование конструкций воздушных линий электропередачи и антенных опор. Изучение действительной работы металлических решетчатых конструкций башенного типа.

Муцанов Александр Владимирович — ассистент кафедры металлических конструкций и сооружений ГОУ ВПО «Донбасская национальная академия строительства и архитектуры». Научные интересы: расчет и проектирование пространственных металлических конструкций.

Горохов Євген Васильович – доктор технічних наук, професор, завідувач кафедри металевих конструкцій і споруд ДОНУ ВПО «Донбаська національна академія будівництва і архітектури». Президент Української асоціації з металевих конструкцій, Закордонний член Російської Академії архітектурно-будівельних наук, академік Академії Вищої освіти та Академії будівництва України. Член Міжнародного комітету з вивчення впливу вітру на будівлі та споруди. Наукові інтереси: експлуатаційна надійність будівельних металевих конструкцій, кліматичні впливи на будівельні конструкції.

Танасогло Антон Володимирович – кандидат технічних наук, доцент кафедри металевих конструкцій і споруд ДОНУ ВПО «Донбаська національна академія будівництва і архітектури». Наукові інтереси: експлуатаційна надійність та оптимальне проектування конструкцій повітряних ліній електропередавання та антенних опор. Вивчення дійсної роботи металевих ґратчастих конструкцій баштового типу.

Мушанов Олександр Володимирович – асистент кафедри металевих конструкцій і споруд ДОНУ ВПО «Донбаська національна академія будівництва і архітектури». Наукові інтереси: розрахунок і проектування просторових металевих конструкцій.

Gorokhov Yevgen – DSc (Engineering), Professor; Head of the Metal Structures and Constructions Department, Donbas National Academy of Civil Engineering and Architecture. President of the Ukrainian Association of Metal Structures, a foreign member of the Russian Academy of Architectural and Building Science, an academician of the Higher School Academy and the Academy of Civil Engineering of Ukraine. A member of the International Committee on studying wind influence on buildings and structures. Scientific interests: operational reliability of building metal structures, climatic loads on building structures.

Tanasoglo Anton – Ph.D. (Eng.), Associate Professor, Metal Structures and Constructions Department, Donbas National Academy of Civil Engineering and Architecture. Scientific interests: operational reliability and optimal design of overhead power transmission line and antenna support structures. Studying of the valid work of metal lattice tower supports.

Mushchanov Alexandr – assistant, Metal Structures and Constructions Department, Donbas National Academy of Civil Engineering and Architecture. Scientific interests: analysis and design of spatial metal structures.