



(17)-0366-1

АНАЛИЗ ВЛИЯНИЯ КОНСТРУКТИВНЫХ ОСОБЕННОСТЕЙ УЗЛОВЫХ СОЕДИНЕНИЙ НА НЕСУЩУЮ СПОСОБНОСТЬ ЦЕНТРАЛЬНО СЖАТЫХ СТЕРЖНЕЙ СТРУКТУРНЫХ ПОКРЫТИЙ

Е. В. Горохов¹, А. В. Мушанов²*ГОУ ВПО «Донбасская национальная академия строительства и архитектуры»,**2, ул. Державина, г. Макеевка, ДНР, 86123.**E-mail: ¹mailbox@donnasa.ru, ²mushhanov93@gmail.com**Получена 14 сентября 2017; принята 22 сентября 2017.*

Анотация. В статье представлен анализ устойчивости центрально сжатых стержней с начальными геометрическими несовершенствами, выполненный с помощью объёмного конечно-элементного моделирования стержней с учётом конструктивных особенностей узловых соединений. Проведен анализ пяти типоразмеров трубчатых элементов по ГОСТ 10704-91 «Трубы стальные электросварные прямошовные» (в диапазоне от 48,0×3,0 до 102,0×3,5 мм) в программном комплексе семейства ЛИРА-САПР. Расчёт выполнен в геометрически нелинейной постановке в упругой стадии работы материала. При анализе устойчивости проанализированы коэффициенты запаса устойчивости по результатам нелинейного расчёта ($k_{y,н.р.}$) и при непосредственном анализе устойчивости (k_y). Представлены уточнённые значения критической силы по данным нелинейного расчёта ($N_{кр,н.р.}$) и из анализа устойчивости ($N_{кр,А.У.}$). Полученные данные сравнивались со значениями критической силы, определенной по ДБН.В.2.6-198:2014 «Сталеві конструкції» ($N_{кр,ДБН}$), и Эйлеровой критической силой ($N_{кр,Э}$). С помощью множественной линейной регрессии в программе Microsoft Excel установлена обобщенная аппроксимирующая зависимость между значимыми факторами, влияющими на уточнённое значение критической силы ($N_{кр}$).

Ключевые слова: структурное покрытие, центрально сжатый стержень, устойчивость, метод конечных элементов.

АНАЛІЗ ВПЛИВУ КОНСТРУКТИВНИХ ОСОБЛИВОСТЕЙ ВУЗЛОВИХ З'ЄДНАНЬ НА НЕСУЧУ ЗДАТНІСТЬ ЦЕНТРАЛЬНО СТИСНУТИХ СТЕРЖНІВ СТРУКТУРНИХ ПОКРИТТІВ

Є. В. Горохов¹, О. В. Мушанов²*ДОНУ ВПО «Донбаська національна академія будівництва і архітектури»,**2, вул. Державіна, м. Макіївка, ДНР, 86123.**E-mail: ¹mailbox@donnasa.ru, ²mushhanov93@gmail.com**Отримана 14 вересня 2017; прийнята 22 вересня 2017.*

Аннотация. У статті представлено аналіз стійкості центрально стиснутих стержнів з початковими геометричними недосконаlostями, виконаний за допомогою об'ємного кінцево-елементного моделювання стержнів з урахуванням конструктивних особливостей вузлових з'єднань. Проведено аналіз п'яти типорозмірів трубчастих елементів за ГОСТ 10704-91 «Трубы стальные электросварные прямошовные» (в діапазоні від 48,0×3,0 до 102,0×3,5 мм) в програмному комплексі сімейства ЛІРА-САПР. Розрахунок виконано в геометрично нелінійній постановці в пружній стадії роботи матеріалу. При аналізі стійкості проаналізовані коефіцієнти запасу стійкості за результатами нелінійного розрахунку ($k_{y,н.р.}$) і при безпосередньому аналізі стійкості (k_y). Представлено уточнені значення критичної сили за даними

нелінійного розрахунку ($N_{кр, Н.Р}$) і з аналізу стійкості ($N_{кр, А.У}$). Отримані дані порівнювалися зі значеннями критичної сили, визначеної за ДБН.В.2.6.-198:2014 «Сталеві конструкції» ($N_{кр, ДБН}$), і Ейлеровою критичною силою ($N_{кр, Е}$). За допомогою множинної лінійної регресії в програмі Microsoft Excel встановлено узагальнено апроксимувальну залежність між значущими факторами, що впливають на уточнене значення критичної сили ($N_{кр}$).

Ключові слова: структурне покриття, центрально стиснутий стержень, стійкість, метод скінченних елементів.

ANALYSIS OF THE INFLUENCE OF STRUCTURAL FEATURES OF NODAL CONNECTIONS ON THE LOAD-CARRYING CAPACITY OF CENTRALLY COMPRESSED RODS OF STRUCTURAL COATINGS

Yevgen Gorokhov¹, Alexandr Mushchanov²

Donbas National Academy of Civil Engineering and Architecture,

2, Derzhavina Str., Makeyevka, DPR, 86123.

E-mail: ¹ mailbox@donnasa.ru, ² mushchanov93@gmail.com

Received 14 September 2017; accepted 22 September 2017.

Abstract. The article presents the analysis of the stability of centrally compressed rods with initial geometric imperfections, performed with the help of volumetric finite element modeling of rods taking into account the design features of nodal connections. The analysis of 5 standard sizes of tubular elements in accordance with GOST 10704-91 «Electrically welded steel welded pipes» (in the range from 48.0×3.0 to 102.0×3.5 mm) in the software package of the family LIRA-CAD. The calculation is performed in a geometrically nonlinear setting in the elastic stage of the material. In the analysis of stability, the stability factors of stability are analyzed from the results of nonlinear calculation ($k_{y, np}$) and in the direct analysis of stability (k_y). Refined values of the critical force from the nonlinear calculation data ($N_{cr, NR}$) and from the stability analysis ($N_{cr, A}$) are presented. The obtained data were compared with the values of the critical force, determined from DBN V.2.6-198: 2014 «Steel structures» ($N_{cr, DBN}$) and Euler critical force ($N_{cr, E}$). With the help of multiple linear regression, Microsoft Excel has established a generalized approximating relationship between the significant factors affecting the refined value of the critical force (N_{cr}).

Keywords: structural coverage, centrally compressed rod, stability, finite element method.

Введение

Перекрестно-стержневые пространственные системы (или просто структурные конструкции) на сегодняшний день находят применение практически в любой отрасли строительства, начиная от покрытия большепролетных промышленных объектов вплоть до конструкций над трибунами многотысячных стадионов (рис. 1а). Это объясняется несколькими факторами:

- во-первых, достаточно небольшим расходом материала на всё покрытие при использовании типовых решений для проектирования структурных конструкций [1, 11];
- во-вторых, надёжностью в эксплуатации (за последние 40 лет не было ни одного случая обрушения такого рода конструкций в связи

с отказом системы [2]). Этому способствует многосвязность структурных покрытий, благодаря чему даже при выходе из строя какого-либо стержня усилия перераспределяются на соседние элементы.

Одной из самых распространённых структурных систем на территории СНГ является система, предложенная Московским архитектурным институтом (МАРХИ) (рис. 1б). Система очень схожа с немецким аналогом МЭРО по своему конструктивному решению узла. Покрытие типа МАРХИ очень хорошо зарекомендовало себя в строительной практике и по сей день пользуется большим спросом.

Для проектирования структурных конструкций разработаны определённые типовые пара-

метры, предложенные в трудах А. Г. Трущева [3] и Р. И. Хисамова [4]. Под этими параметрами 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].

При проектировании структурных конструкций на нетиповых планах, например с соотношением сторон $a/b = 1/1,6...1/2,4$ и пролётами более 60 м, и/или с нетиповыми размерами ячеек, возникает специфическое напряжённо-деформированное состояние (НДС) конструкции. Такого рода вопросы рассматривались в предыдущих трудах авторов данной статьи [5, 6].

Одним из ключевых вопросов при проектировании элементов структурного покрытия является обеспечение устойчивости центрально сжатых элементов системы. Эти вопросы достаточно широко исследовались, как с использованием аналитических [7, 8, 13], так и численных методов, в том числе – методом конечных элементов (МКЭ) [9, 12]. И в обоих случаях исследование проводилось на идеализированной модели в виде стержневого элемента без учёта характерных особенностей узловых соединений. В связи с этим до сих пор остаются не решёнными вопросы уточнения несущей способности центрально сжатых стержней из условия устойчивости за счёт уточнённого анализа на базе объемного конечно-элементного моделирования как стержней структурного покрытия, так и узловых соединений [10].

Основная часть

Исходя из вышесказанного, сформирована основная цель работы – установление обобщённой зависимости влияния особенностей исполнения узловых соединений (на примере системы МАРХИ) на несущую способность центрально сжатых стержней структурных покрытий.

Для достижения поставленной цели вся работа была разбита 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 пяти типоразмеров);
- 2) задание для модели трубы начального геометрического несовершенства в виде общей погиби в виде полуволны синусоиды с максимальным отклонением в центре стержня ($f/l = 1/700$);
- 3) моделирование узлового соединения с помощью стержневых элементов;
- 4) задание внешней сжимающей нагрузки, превышающей прогнозируемое критическое значение на 30 %.

Все пять типоразмеров исследуемых стержней моделировались с помощью КЭ 344 (геометрически 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 относительно поверхности вращения на 20 элементов.

а)



б)



Рисунок 1. а) Саяно-Шушенская ГЭС (Россия); б) стадион «Лужники» (Россия).

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 (таблица 1). Так для труб сечением 48,0×3,0 и 60,0×3,2 мм их фактическая длина равна 3 392 мм. Для труб сечением 76,0×3,2 и 89,0×3,5 мм длина стержня равна 3 372 мм. А для трубы сечением 102,0×3,5 длина равна 3 302 мм (рис. 2).

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 узлового соединения (табл. 1) наряду с их соответствующей маркировкой (табл. 2). Все элементы узлового соединения структурного

Таблица 1. Геометрические характеристики сечений элементов и их узловых соединений

№ п/п	Сечение труб, мм	Длина коннектора (l_k), мм	Длина выступ. части болта (l_b), мм	Толщина заглушки (t_s), мм	Длина трубы (l_r), мм	Эскиз
1	Ø48,0×3,0	60	24	20	3 392	
2	Ø60,0×3,2	60	24	20	3 392	
3	Ø76,0×3,2	60	24	30	3 372	
4	Ø89,0×3,5	60	24	30	3 372	
5	Ø102,0×3,5	75	24	50	3 302	

Фактическая схема



Идеализированная схема



Уточнённая модель

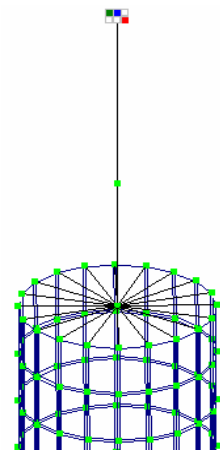


Рисунок 2. Переход от фактической схемы к модели.

Таблица 2. Геометрические размеры конструктивных элементов узлового соединения

№ п/п	Сечение труб	Маркировка болта	Сечение коннектора	Сечение заглушки
1	Ø48,0×3,0	M22	120×120	Ø48×20
2	Ø60,0×3,2	M22	120×120	Ø60×20
3	Ø76,0×3,2	M22	120×120	Ø76×30
4	Ø89,0×3,5	M22	120×120	Ø89×30
5	Ø102,0×3,5	M30	150×150	Ø102×50

покрытия (заглушка, болт, коннектор) были созданы в препроцессоре «Конструктор сечений» с последующим автоматическим расчётом геометрических и жесткостных характеристик. Элементы в расчётной схеме моделировались с помощью КЭ 309 (универсальный пространственный сильно изгибаемый стержневой геометрически нелинейный КЭ).

Наложение связей (граничных условий) в схеме осуществлялось путём закрепления верхнего и нижнего коннектора (рис. 3), как для статически определимого элемента.

Критическая продольная нагрузка ($N_{\text{п}}$) вычислялась классическим подходом Эйлера, как для центрально-сжатого элемента:

$$N_{\text{кр,Э}} = \frac{\pi^2 EI}{\mu l^2},$$

но для максимально эффективной фиксации потери устойчивости конструкции значение $N_{\text{кр,Э}}$ увеличивалось на 30 %. Таким образом были получены значения полной расчётной нагрузки $N_{\text{п}}$ для каждого типоразмера (табл. 3).

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 геометрически нелинейной постановке (расчёт по деформированной схеме) с фиксацией номера коэффициента нагружения, при котором элементы в схеме теряют устойчивость, что соответствует значению коэффициента запаса устойчивости по нелинейному расчёту $k_{\text{у,нр}}$. Также, параллельно с геометрически нелинейным расчётом, выполнялся анализ устойчивости заданных схем с отысканием коэффициента запаса устойчивости $k_{\text{у,ав}}$ – коэффициента устойчивости по данным анализа устойчивости. Все расчёты выполнялись в упругой стадии работы материалов. Результаты расчёта приведены в таблице 4.

Полученные результаты критической силы по анализу устойчивости и по нелинейному расчёту сравнивались со значениями критической силы по ДБН В.2.6-198:2014 «Сталеві конструкції». Сравнительный анализ значений критической силы по Эйлеру $N_{\text{кр,Э}}$, по ДБН $N_{\text{кр,ДБН}}$

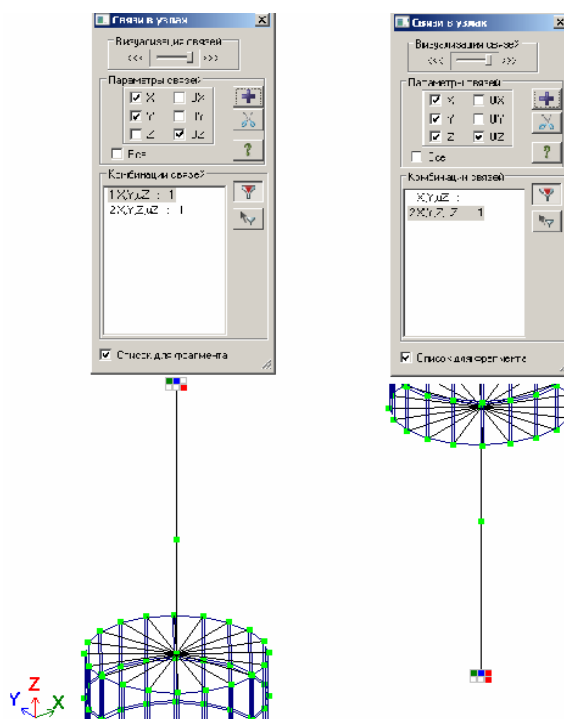


Рисунок 3. Моделирование связей в узлах схемы.

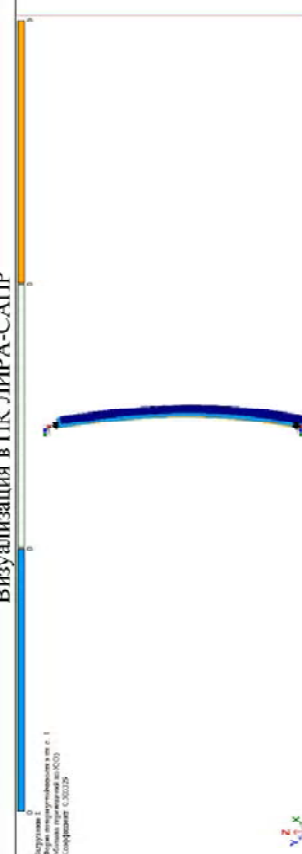
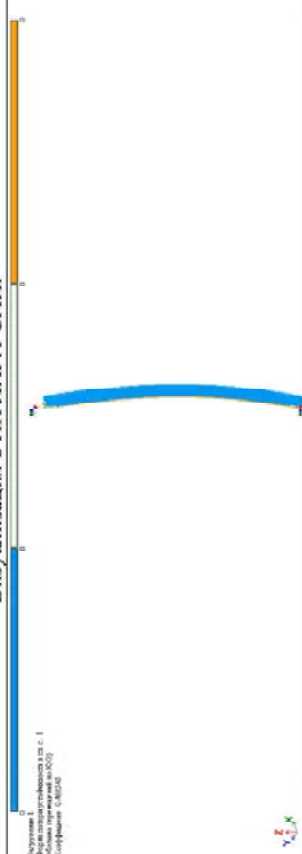
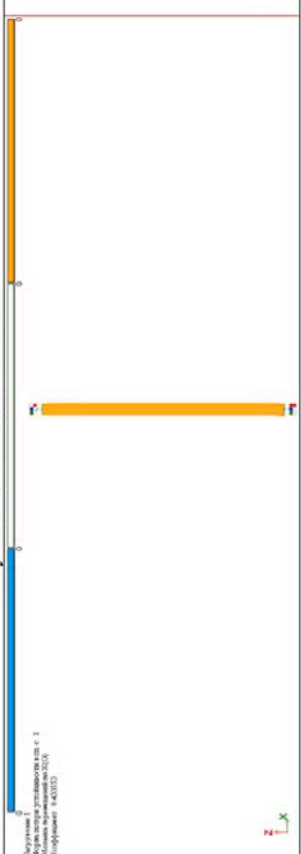
Таблица 3. Значения критической и расчётной нагрузок

№ п/п	Сечение труб	$N_{\text{кр,Э}}$, кН	$N_{\text{кр,П}}$, кН
1	Ø48,0×3,0	17,2	25
2	Ø60,0×3,2	36,9	50
3	Ø76,0×3,2	77,5	102
4	Ø89,0×3,5	137,4	180
5	Ø102,0×3,5	210,0	275

Таблица 4. Результаты расчёта в ПК ЛИРА-САПР 2017

№ п/п	Геометрические характеристики труб				Коэфф. запаса устойчивости		тах. отклонение U_{max} (мм)	N_{cr} (кН)	N_{total} (кН)	№ шага потери устойчивости, (коэфф.)	№ узла, потерявшего устойчивость					
	Сечение	Коннектор	Болт	Заглушка t, (мм)	№ формы ПУ	Знач. k										
1	Ø48,0×3,0	120×120	M22	4	5	20	1	6	7	0,4860	8	9	10	11	12	2 019
Визуализация в ПК ЛИРА-САПР 																
1	Ø60,0×3,2	120×120	M22	20	1	0,2570	5,7	36,9	50	0,4	2 020					
Визуализация в ПК ЛИРА-САПР 																

окончание таблицы 4.

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
	Ø76,0×3,2	120×120	M22	30	1	0,5050	5,8	77,5	102	0,7	2 020
3	<p>Визуализация в ПК ЛИРА-САПР</p>  <p>Получено: Модель: 3D-модель стержня с 1 Материал: бетон (класс прочности В40) Коэффициент: 0,5050</p> <p>LIRA</p>										
	Ø89,0×3,5	120×120	M22	30	1	0,4690	5,9	137,4	180	0,6	2 020
4	<p>Визуализация в ПК ЛИРА-САПР</p>  <p>Получено: Модель: 3D-модель стержня с 1 Материал: бетон (класс прочности В40) Коэффициент: 0,4690</p> <p>LIRA</p>										
	Ø102,0×3,5	150×150	M30	50	1	0,4335	5,9	210,0	275	0,2	2 020
5	<p>Визуализация в ПК ЛИРА-САПР</p>  <p>Получено: Модель: 3D-модель стержня с 1 Материал: бетон (класс прочности В40) Коэффициент: 0,4335</p> <p>LIRA</p>										

по данным нелинейного расчёта $N_{кр, НР}$, по данным анализа устойчивости $N_{кр, АУ}$ приведен в таблице 5.

Анализируя данные таблиц 4 и 5 можно отметить следующие общие закономерности:

- общая форма потери устойчивости по полуwave синусоиды (табл. 4) соответствует общетеоретическим положениям и данным ДБН В.2.6-198:2014 [16];
- уточнение значений критической силы, обусловленное моделированием стержня в виде трубы-оболочки и характерных особенностей узловых соединений, составляет в пределах:
 - 1,75...–21,43 % для расчётных значений критических нагрузок;
 - –6,32...–21,84% для значений критических нагрузок, вычисленных с учётом принятого в нормах значения коэффициента устойчивости $k_y = 1,33...1,43$.

Этап 2. Установление обобщённой зависимости расчётного значения критической силы

По полученным результатам был сформирован массив данных для установления обобщенной зависимости между значимыми факторами, влияющими на уточнённое расчётное значение критической силы ($N_{кр}$) (рис. 4). Эта зависимость описана с помощью множественной линейной регрессии в программе Microsoft Excel. Значение коэффициента корреляции 0,989 подтверждает сильную прямую взаимосвязь между опытными показателями критической силы и значениями, вычисляемыми с помощью предлагаемой аппроксимирующей зависимости. В таблице 6 приведены исходные данные для выполнения регрессионного анализа, в таблице 7 – результа-

ты анализа для уточнённого значения критической силы и значения y_{max} , величины отклонения центрально сжатого стержня, при котором происходит потеря устойчивости в упругой стадии работы материала.

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:
 - 1,75...–21,43 % столбик для расчётных значений критических нагрузок;
 - –6,32...–21,84% столбик для значений критических нагрузок, вычисленных с учётом принятого в нормах значения коэффициента устойчивости $k_y = 1,33...1,43$.
3. Для рассматриваемого диапазона типоразмеров трубчатых элементов предложены аппроксимирующие зависимости для уточнённого вычисления:
 - $N_{кр}$ в зависимости от λ , соотношения a/l и r/t .
 - y_{max} в зависимости от λ , соотношения a/l и r/t .

Таблица 5. Результаты сравнительного анализа критической силы

№ п/п	Сечение труб	$N_{кр, Э}$	$N_{П}$	$N_{кр, ДБН}$	$N_{кр, НР}$	$N_{кр, АУ}$	$\Delta_{3-6}, (\%)$	$\Delta_{5-7}, (\%)$
1	Ø48,0×3,0	17,2	25	12,97	17,5	12,15	1,75	–6,32
2	Ø60,0×3,2	36,9	50	27,91	35,0	24,30	–5,15	–12,93
3	Ø76,0×3,2	77,5	102	58,93	71,4	51,51	–7,87	–12,59
4	Ø89,0×3,5	137,4	180	96,32	108,0	84,42	–21,40	–12,35
5	Ø102,0×3,5	210,0	275	152,52	165,0	119,21	–21,43	–21,84

Таблица 6. Исходные данные для проведения множественной линейной регрессии

№ Сечения	A (см ²)	Ry (кн/см ²)	Ip (см ⁴)	ix=iy (см)	E (кн/см ²)	α	β	a (см)	r/t
48x3	4,241	24	360	1,59	20500	0,03	0,06	10,4	8
60x3.2	5,710	24	360	2,01	20500	0,03	0,06	10,4	9,375
76x3.2	7,319	24	360	2,58	20500	0,03	0,06	11,4	11,875
89x3.5	9,401	24	360	3,03	20500	0,03	0,06	11,4	12,715
102x3.5	10,830	24	360	3,48	20500	0,03	0,06	14,9	14,57
114x4	13,820	24	360	3,89	20500	0,03	0,06	14,9	14,25
127x4.5	17,320	24	360	4,33	20500	0,03	0,06	15,9	14,11
127x6	22,810	24	360	4,28	20500	0,03	0,06	15,9	10,5835
133x8	31,420	24	360	4,43	20500	0,03	0,06	18,4	8,3125
146x10	42,730	24	360	4,82	20500	0,03	0,06	18,4	7,3
159x12	55,420	24	360	5,215	20500	0,03	0,06	18,4	6,625
№ Сечения	Ф по ДБН	φ	λ	λ _{усл}	δ	У _{нпк}	У _{пак}	k _y	k _{y(ав)}
48x3	0,12745	0,049241	226,4151	7,728183	203,3817	0,5	0,59	0,7	0,486
60x3.2	0,20365	0,065554	179,1045	6,113339	153,0125	0,5	0,57	0,4	0,257
76x3.2	0,33551	0,087417	139,5349	4,762717	114,8899	0,5	0,58	0,7	0,505
89x3.5	0,4269	0,104262	118,8119	4,055383	96,38043	0,5	0,59	0,6	0,469
102x3.5	0,5868	0,120661	103,4483	3,53098	83,30379	0,5	0,59	0,6	0,4335
114x4	0,66902	0,13519	92,54499	3,15882	74,35719	0,5	0,5935	0,3	0,391
127x4.5	0,73883	0,150337	83,14088	2,837832	66,86322	0,5	0,587	0,5	0,36
127x6	0,73173	0,148639	84,11215	2,870984	67,62766	0,5	0,566	0,4	0,291
133x8	0,75194	0,153715	81,26411	2,773772	65,39232	0,5	0,579	0,3	0,19
146x10	0,793925	0,166665	74,6888	2,549338	60,30373	0,5	0,524	0,3	0,12
159x12	0,82682	0,179421	69,03164	2,356244	56,00632	0,5	0,576	0,3	0,135
№ Сечения	N _{кр(по Эйлера)}	N _{критичес}	N _{кр(ДБН)}	N _{критичес(расч.)}	N _{эф(расч.)}	У _{нпк} ·У _{пак} /I			
48x3	17,2	25	12,97237	17,5	12,15	0,003028			
60x3.2	36,9	50	27,9062	20	12,85	0,002972			
76x3.2	77,5	102	58,93434	71,4	51,51	0,003			
89x3.5	137,4	180	96,31889	108	84,42	0,003028			
102x3.5	210	275	152,5211	165	119,2125	0,003028			
114x4	334,2	435	221,9006	130,5	170,085	0,003038			
127x4.5	519,3	677	307,1169	336,5	243,72	0,003019			
127x6	668	870	400,5783	348	253,17	0,002961			
133x8	983,5	1280	567,0229	384	243,2	0,002997			
146x10	1585,5	2065	814,186	619,5	247,8	0,002844			
159x12	2405,6	3130	1099,737	939	422,55	0,002989			

Таблица 7. Результаты множественной линейной регрессии для $N_{кр}$ и $U_{рас}$

ЭКСПЕРИМЕНТ

Статистическая обработка массива данных выполняется с помощью функции ЛИНЕЙН (множественная линейная регрессия). По полученным данным с помощью функции "КОРРЕЛ" сравниваем полученные результаты с заданными значениями.		Отыскание искомой функции для значения критической силы ($N_{кр}$)							
$y = b_0 + b_1x_1 + b_2x_2 + b_3x_3$		$y = b_0 + b_1x_1 + b_2x_2 + b_3x_3$							
где "y" - значение критической силы по результатам нелинейного расчёта ($N_{кр}$);		где "y" - значение максимального отклонения ($U_{рас} + U_{max}$);							
"x ₁ " - значение условной гибкости ($\lambda_{усл}$);		"x ₁ " - значение условной гибкости ($\lambda_{усл}$);							
"x ₂ " - соотношение закрепл. участка (центр коннектора) до половины стержня (2а/1);		"x ₂ " - соотношение закрепл. участка (центр коннектора) до половины стержня (2а/1);							
"x ₃ " - соотношение радиуса стержня к толщине стержня (r/t)		"x ₃ " - соотношение радиуса стержня к толщине стержня (r/t)							
Данные для регрессионного анализа		Данные для регрессионного анализа							
№ Сечения	x ₁	x ₂	x ₃	y	b ₀	b ₁	b ₂	b ₃	Результаты расчёта
48x3	7,728	0,057778	8	17,5	15,84244	1,786827	-240,835		
60x3.2	6,113	0,057778	9,375	35	38,41592	3054,073	46,23778	504,8217	
76x3.2	4,763	0,063333	11,875	71,4	0,978908	17,19147	#Н/Д	#Н/Д	#Н/Д
89x3.5	4,055	0,063333	12,715	108	15,47048	1	#Н/Д	#Н/Д	#Н/Д
102x3.5	3,531	0,082778	14,57	165	13716,74	295,5456	#Н/Д	#Н/Д	#Н/Д
Подставив полученные значения в формулу получаем значение $U_{рас}$		Подставив полученные значения в формулу получаем значение $U_{рас}$							
С помощью встроенной функции "КОРРЕЛ" находим коэффициент корреляции для значений y и $U_{рас}$		С помощью встроенной функции "КОРРЕЛ" находим коэффициент корреляции для значений y и $U_{рас}$							
$U_{рас}$	14,75191 п	0,003024 п	0,002972	0,895958					
35,02454	0,989398	0,003018	0,003015	0,003027					
85,00951									
97,89209									
164,2219									
Значения критических нагрузок		Значения суммарных отклонений							

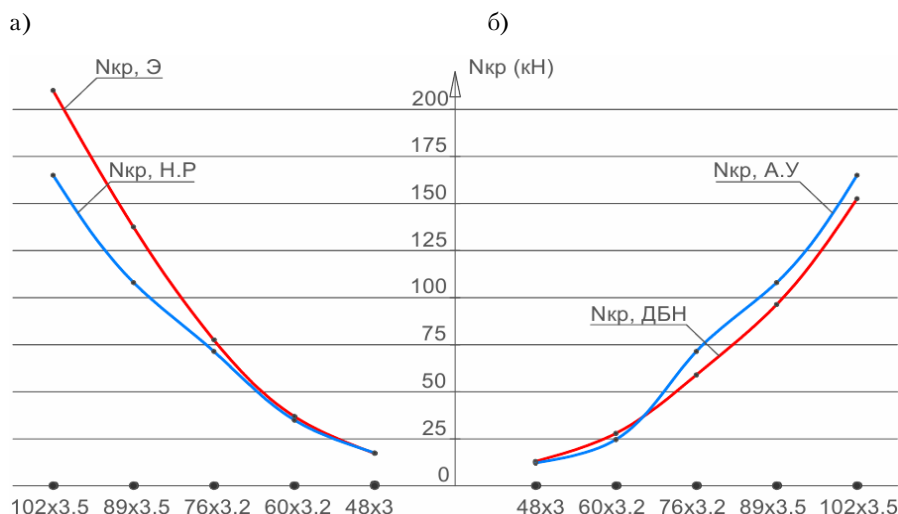


Рисунок 4. Массив критических нагрузок: а) расчётные значения критических нагрузок; б) значения критических нагрузок с учётом коэффициента запаса устойчивости.

Литература

1. Информация о системе Мархи [Электронный ресурс] // ООО «Монтаж ПК» / ООО «Монтаж ПК». – Электрон. дан. – Режим доступа : http://www.monpk.ru/system_marhi.html. – Загл. с экрана.
2. Система МАРХИ [Электронный ресурс] // Виктория Научно-проектный центр. – Электрон. дан. – Режим доступа : <http://www.sistems-marhi.ru/marhi/html>. – Загл. с экрана.
3. Трущев, А. Г. Пространственные металлические конструкции [Текст] : учебное пособие / А. Г. Трущев. – М. : Стройиздат, 1983. – 216 с.
4. Хисамов, Р. И. Расчет и конструирование структурных покрытий [Текст] / Р. И. Хисамов. – Киев : Будивельник, 1981. – 48 с.
5. Romenskiy, Igor. The main approaches to the appointment of spatial and stiffness characteristics of the MARCHI system roofs when regulating the parameters of its stress-strain state [Текст] / Igor Romenskiy, Tamara Zagoruiko, Alexander Mushchanov // *Metal Constructions*. 2015. Volume 21, Number 1. P. 5–14.
6. Муцанов, А. В. Рациональные геометрические и жесткостные параметры большепролетного структурного покрытия [Текст] / А. В. Муцанов, строение уникальных зданий и сооружений. 2016. № 2(41). С. 18–29.
7. Лейтес, С. Д. Устойчивость сжатых стальных стержней [Текст] / С. Д. Лейтес. – М. : Госстройиздат, 1954. – 312 с.
8. Стрелецкий, Н. С. Металлические конструкции [Текст] / Н. С. Стрелецкий. – М. : Госстройиздат, 1962. – 769 с.

References

1. Information of the Marchi system. Mode of access: http://www.monpk.ru/system_marhi.html. (in Russian)
2. System of MARCHI. Mode of access: <http://www.sistems-marhi.ru/marhi/>. (in Russian)
3. Trushchev, A. G. Space metal structures. Textbook. Moscow: Stroiizdat, 1983. 216 p. (in Russian)
4. Hisamov, R. I. Design and construction of structural coatings. Kiev: Budivelnik, 1981. 48 p. (in Russian)
5. Romenskiy, Igor; Zagoruiko, Tamara; Mushchanov, Alexander. The main approaches to the appointment of spatial and stiffness characteristics of the MARCHI system roofs when regulating the parameters of its stress-strain state. In: *Metal Constructions*, 2015, Volume 21, Number 1, pp. 5–14.
6. Mushchanov, A. V.; Mushchanov, V. F.; Romenskiy, I. V. Rational geometric and stiffness parameters of long-span structural roof. In: *Construction of Unique Buildings and Structures*, 2016, No. 2(41), pp. 18–29. (in Russian)
7. Leytes, S. D. Stability of stressed steel rods. Moscow: Gosstroyizdat, 1954. 312 p. (in Russian)
8. Streltskiy, N. S. Metal constructions. Moscow: Gosstroyizdat, 1962. 769 p. (in Russian)
9. Perelmutter, A. V.; Slivker, V. I. Design models of structures and a possibility of their analysis. Fourth edition, revised. Moscow: Publisher SKAD SOFT, 2011. 736 p. (in Russian)
10. Gorokhov, Yevgen; Mushchanov, Alexander. Accounting of Constructive Features Nodes Compound Based Stable Central Compressed Rods Structural Coverage. In: *Metal Constructions*, 2016, Volume 22, Number 3, pp. 125–137. (in Russian)

9. Перельмутер, А. В. Расчетные модели сооружений и возможность их анализа [Текст] / А. В. Перельмутер, В. И. Сливкер. – 4-е изд., перераб. – М. : СКАД СОФТ, 2011. – 736 с.
10. Горохов, Е. В. Учет конструктивных особенностей узловых соединений в расчетах устойчивости центрально сжатых стержней структурных покрытий [Текст] / Е. В. Горохов, А. В. Муцанов // Металлические конструкции. 2016. Том 22, № 3. С. 125–137.
11. Buijisen, Michel. Dynamic Space Frame Structures [Электронный ресурс] / Michel Buijisen. – Электрон. дан. – Delft : [б. и.], 2011. – 95 p. – Режим доступа : http://homepage.tudelft.nl/x4x4j/sadbtreports/1011nj/Dynamic_Space_Frame_Structures_Michel_Buijisen.pdf. – Загл. с экрана.
12. Rosen, A. A general nonlinear structural model of a multirod (multibeam) system – I. Theoretical derivations [Текст] / A. Rosen, M. Sabag, M. Givoli // Computers & Structures. 1996. Volume 61, Issue 4. P. 617–632.
13. Antoniou, N. Designing long-span steel girders by applying displacement control concepts [Текст] / N. Antoniou, Th. Nikolaidis, C. C. Baniotopoulos // Engineering Structures. 2014. Volume 59. P. 21–27.
14. Gaylord, Edwin. Structural engineering [Текст] / Edwin Gaylord, Charles Gaylord, James Stallmeyer. – New York : The McGraw-Hill Companies, 1997. – 1024 p. – ISBN 0070237247.
15. ГОСТ 10704-91. Трубы стальные электросварные прямошовные. Сортамент [Текст]. – Взамен ГОСТ 10704-76 ; введ. 01.01.93. – М. : Издательство стандартов, 1991. – 14 с.
16. ДБН В.2.6-198:2014. Сталеві конструкції. Норми проектування [Текст]. – На заміну ДБН В.2.6-163:2010 у частині розділу 1 та ДСТУ Б В.2.6-194:2013 ; чинні від 2015-01-01. – К. : Мінрегіон України, 2014. – 199 с.
11. Buijisen, Michel. Dynamic Space Frame Structures. Delft, 2011. 95 p. Mode of access: http://homepage.tudelft.nl/x4x4j/sadbtreports/1011nj/Dynamic_Space_Frame_Structures_Michel_Buijisen.pdf.
12. Rosen, A.; Sabag, M.; Givoli, M. A general nonlinear structural model of a multirod (multibeam) system – I. Theoretical derivations. In: *Computers & Structures*, 1996, Volume 61, Issue 4, pp. 617–632.
13. Antoniou, N.; Nikolaidis, Th.; Baniotopoulos, C. C. Designing long-span steel girders by applying displacement control concepts. In: *Engineering Structures*, 2014, Volume 59, pp. 21–27.
14. Gaylord, Edwin; Gaylord, Charles; Stallmeyer, James. Structural engineering. New York: The McGraw Hill Companies, 1997. 1024 p. ISBN 0070237247.
15. GOST 10704-91. Electrically welded steel line-weld tubes. Range. Moscow: Publishing house of standards, 1991. 14 p. (in Russian)
16. DBN V.2.6-198:2014. Steel structures. Design code. Kyiv: Ministry of Regional Development of Ukraine, 2014. 199 p. (in Ukrainian)

Горохов Евгений Васильевич – доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой металлических конструкций и сооружений, ректор 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.

Муцанов Александр Владимирович – стажер-преподаватель 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, ректор ДОУ 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.

Мушчанов Олександр Володимирович – стажист-викладач ДООУ 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 Department, Rector of the 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.

Mushchanov Alexander – graduate associate, Donbas National Academy of Civil Engineering and Architecture. Scientific interests: analysis and design of spatial metal structures.