



(20)-0410-1

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ УЗЛОВЫХ СОЕДИНЕНИЙ СТРУКТУРНЫХ КОНСТРУКЦИЙ НА УСТОЙЧИВОСТЬ ЦЕНТРАЛЬНО-СЖАТЫХ СТЕРЖНЕЙ

Е. В. Горохов¹, В. Н. Васылев², А. В. Мущанов³, А. Н. Волчков⁴

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

E-mail: ¹ mailbox@donnasa.ru, ² wnp1951@mail.ru, ³ mushhanov93@gmail.com, ⁴ a.n.volchikov@donnasa.ru

Получена 29 апреля 2020; принята 22 мая 2020.

Аннотация. В работе представлены результаты экспериментальных исследований потери устойчивости центрально-сжатых стержней ячейки структурного покрытия. Материал стержней – Ст2, гибкость $\lambda = 120$. Предпосылками для исследования послужило конечно-элементное моделирование как одиночного стержня с фактическими условиями закрепления [10], так и стержней в составе ячейки структурного покрытия в масштабе 1:1. Уровень расчетной нагрузки на экспериментальную и на численную модель составил 30,525 т. Проведенный анализ численных исследований указал на потерю устойчивости стержней в упругой стадии. Экспериментальные исследования подтвердили потерю устойчивости в упругой стадии, однако показали развитие локальных пластических деформаций в наиболее напряженном сечении стержня. На основании зафиксированных результатов экспериментального и численного исследований предлагается ввести значение корректирующего коэффициента k_e по отношению к результатам, получаемым с использованием регрессионной зависимости, приведенной в работе [10].

Ключевые слова: центрально-сжатые стержни, потеря устойчивости, экспериментальные исследования, ЛИРА-САПР, моделирование, напряженно-деформированное состояние.

ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНЕ ДОСЛІДЖЕННЯ ВПЛИВУ ВУЗЛІВ З'ЄДНАННЯ СТРУКТУРНИХ КОНСТРУКЦІЙ НА СТІЙКІСТЬ ЦЕНТРАЛЬНО-СТИСНУТИХ СТЕРЖНІВ

Є. В. Горохов¹, В. М. Васи́лев², О. В. Мущанов³, О. М. Волчков⁴

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

E-mail: ¹ mailbox@donnasa.ru, ² wnp1951@mail.ru, ³ mushhanov93@gmail.com, ⁴ a.n.volchikov@donnasa.ru

Отримана 29 квітня 2020; прийнята 22 травня 2020.

Анотація. У роботі представлені результати експериментальних досліджень втрати стійкості центрально-стиснутих стержнів чарунки структурного покриття. Матеріал стержнів – Ст2, гнучкість $\lambda = 120$. Передумовами для дослідження послужило кінцево-елементне моделювання як одиночного стержня з фактичними умовами закріплення [10], так і стержнів в складі чарунки структурного покриття в масштабі 1:1. Рівень розрахункового навантаження на експериментальну і на чисельну модель склав 30,525 т. Проведений аналіз чисельних досліджень вказав на втрату стійкості стержнів в пружній стадії. Експериментальні дослідження підтвердили втрату стійкості в пружній стадії, однак показали розвиток локальних пластичних деформацій в найбільш напруженому перерізі стержня. На підставі зафіксованих результатів експериментального та чисельного досліджень пропонується ввести значення коригувального коефіцієнта k_e по відношенню до результатів, одержуваних з використанням регресійної залежності, наведеної в роботі [10].

Ключові слова: центрально-стиснуті стержні, втрата стійкості, експериментальні дослідження, ЛІРА-САПР, моделювання, напружено-деформований стан.

EXPERIMENTAL STUDY OF THE INFLUENCE OF NODE JOINTS OF STRUCTURAL STRUCTURES ON THE STABILITY OF CENTRAL COMPRESSED RODS

Evgeniy Gorokhov¹, Volodymyr Vasylev², Alexander Mushchanov³, Alexander Volchikov⁴

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

E-mail: ¹mailbox@donnasa.ru, ²wn1951@mail.ru, ³mushchanov93@gmail.com, ⁴a.n.volchikov@donnasa.ru

Received 29 April 2020; accepted 22 May 2020.

Abstract. The paper presents the results of experimental studies of the loss of stability of centrally compressed rods of the structural coating cell. Rod material – St2, flexibility $\lambda = 120$. The prerequisites for the study were finite element modeling of both a single rod with actual fixing conditions [10], and rods as part of a structural coating cell on a 1:1 scale. The level of the calculated load on the experimental and on the numerical model was 30,525 tons. The analysis of numerical studies indicated the loss of stability of the rods in the elastic stage. Experimental studies have confirmed the loss of stability in the elastic stage, but have shown the development of local plastic deformations in the most stressed section of the bar. Based on the recorded results of experimental and numerical studies, it is proposed to introduce the value of the correction coefficient k_e in relation to the results obtained using the regression dependence given in [10].

Keywords: centrally compressed rods, buckling, experimental research, LIRA-SAPR, modeling, stress-strain state.

Введение

Учет влияния узловых соединений на устойчивость центрально-сжатых стержней стержневых конструкций нашел отражение в соответствующих разделах нормативных документов. Например, для [1, 2] при определении расчетных длин элементов решетки стропильных ферм с фасонными соединениями применяется коэффициент приведения геометрической длины стержня к расчетной $\mu = 0,8$, учитывающий сокращение геометрической длины стержня за счет размеров фасонки при потере устойчивости в плоскости фермы. Вместе с тем системные экспериментальные исследования влияния конструктивного решения узловых соединений на несущую способность центрально-сжатых стержней структурных конструкций отсутствуют.

Цель исследования

На основании выполненного критического анализа можно сформулировать цель данной работы, которая заключается в экспериментальной проверке и подтверждении результатов численных исследований и теоретического анализа, представленных в ранних работах авторов [6–12].

Задачи исследования

Полный план проводимого экспериментального исследования включает в себя решение следующих задач, подразумевающих испытания:

- 1) одиночного стержня с конструктивной схемой, соответствующей идеализированной расчетной схеме центрально-сжатого стержня, потеря устойчивости которого происходит в пределах упругой стадии работы материала;

- 2) одиночного стержня с конструктивной схемой, соответствующей идеализированной расчетной схеме центрально-сжатого стержня, потеря устойчивости которого происходит в пределах упруго-пластической стадии работы материала;
- 3) ячейки структурного покрытия с узловыми соединениями в виде типовых шаровых коннекторов, объединяющих стержни большой гибкости, теряющих устойчивость при упругой работе материала;
- 4) ячейки структурного покрытия с узловыми соединениями в виде типовых шаровых коннекторов, объединяющих стержни большой гибкости, теряющих устойчивость при упругой работе материала.

Примечание: результаты исследований, представленных в данной статье, ограничены данными по 3-й задаче исследования.

Основная часть

Схема испытательной установки

В качестве подхода к исследованию проблемы устойчивости центрально-сжатых элементов конструкции в части верификации, рассматриваемых в численных исследованиях расчетных схем, принято использовать физическое моделирование. Исследуемая физическая модель создается с соблюдением принципов геометрического и физического подобия и имеет ту же качественную природу, что и моделируемый объект.

В связи с наличием регламентирующего сортамента, как стержней, так и узловых вставок-коннекторов, масштабы-индикаторы (*EI, EF, геом. размеры*) планируется принимать в масштабе 1:1.

В основу физической модели положен фрагмент структурной плиты (ячейка структурного покрытия). Благодаря объединению нескольких стержней в узловой вставке-коннекторе в модели максимально полно отражается действительная работа всех элементов покрытия, и в особенности полно моделируется податливость узловых соединений, что в конечном итоге позволит уточнить значения несущей способности центрально-сжатых элементов структурной конструкции из условия устойчивости с учётом влияния конструктивных особенностей узловых соединений.

Для анализа физической модели и подбора необходимой аппаратуры на основе данных предварительных конечно-элементных расчетов проведем подбор измерительного оборудования и нагрузочных устройств. Данные КЭ-анализа модели позволяют оценить ожидаемый уровень деформаций и напряжений конструкции, что в свою очередь послужит основой для целенаправленного назначения регистрирующих приборов и оборудования, выбор которых должен гарантировать проведение измерений с требуемой точностью.

Нагружение конструкции наиболее логично осуществлять с использованием гидравлических домкратов в силу следующих причин:

- обеспечения «следящего» характера действующей нагрузки;
- возможности плавного увеличения нагрузки при обеспечении фиксации на необходимых шагах загрузки (пошаговое приложение нагрузки);
- возможности резкого сброса нагрузки в случае необходимости.

В качестве основного измерительного оборудования планируется применение:

- для измерения относительных деформаций – первичных преобразователей в виде тензорезисторов на бумажной основе с базой $l = 20$ мм и номинальным сопротивлением $R = 200$ Ом (рис. 1а);
- для измерения линейных перемещений – индикаторов часового типа ИЧ-10 с ценой деления 0,01 мм (рис. 1б);
- для регистрации изменения омического сопротивления первичных преобразователей – ОВЕН МВ110-224. 1ТД (рис. 1в);
- для опроса, визуализации и архивирования параметров по полученным данным – SoftLogic – система MasterSCADA 3.xDemo.

Обоснование точности используемого к применению оборудования приведено в таблице 1.

Для лабораторных испытаний в качестве экспериментальных исследований принята следующая испытательная установка, моделирующая ячейку структурного покрытия, сжатые раскосы которой должны потерять устойчивость в упругой стадии работы материала, исходя из классических решений задачи устойчивости центрально-сжатых стержней ($\lambda_{\text{раскос}} = 120$) (рис. 2, 3а,б).

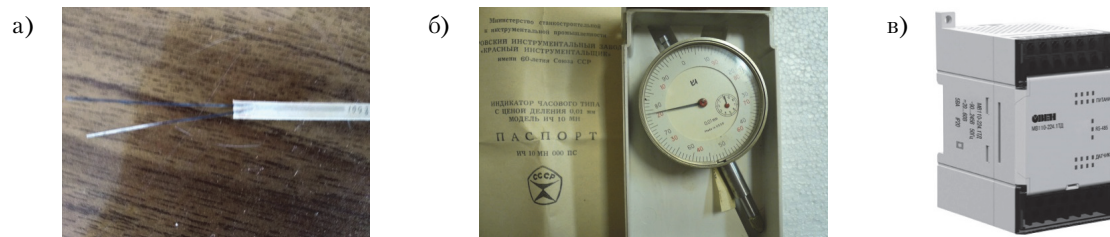


Рисунок 1. Общий вид измерительного оборудования: а) проволочный петлевой тензорезистор; б) индикатор часового типа ИЧ-10; в) прибор для регистрации данных первичных преобразователей ОВЕН МВ110-224. 1ТД.

Таблица 1. Обоснование возможности применения измерительного оборудования

№ п/п	Фиксируемый показатель	Тип используемого оборудования	Пределы изменения фиксируемой величины	Цена деления прибора	Погрешность измерения
1	Нагрузка	Гидродомкрат ДГ-100	От 0 до 100 т	—	—
2	Относительная деформация	Тензорезистор КФ5П1-20-200-А-12-С1	200 Ом	—	± 1 Ом
3	Перемещение	Индикатор часового типа ИЧ-10	10 мм	0,01 мм	От 15 до 20 мкм
4	Изменение омического сопротивления	Модуль ввода сигналов тензодатчиков ОВЕН МВ110-224.4. 1ТД	—	—	$\pm 0,05$ %



Рисунок 2. Схема испытываемой модели (вид модели по диагонали).

В таблице 2 и 3 представлены сечения элементов испытываемой модели, соответствующей маркировки, указанные на рисунке 3 а,б.

Таблица 2. Ведомость элементов

Марка	Сечение				Количество	Сталь
	Эскиз	Поз.	Состав	Длина		
БК1	●	1	Ø120	—	1	Ст40
БК2	●	2	Ø120	—	1	Ст40
БК3	●	3	Ø120	—	1	Ст40
БК4	●	4	Ø120	—	1	Ст40
БК5	●	5	Ø120	—	1	Ст40
Р	○	6	Ø48×3	1 700	4	Ст2
П	○	7	Ø48×3	1 546	4	Ст2
3	○	8	Ø48×22	20	16	Ст20

Таблица 3. Ведомость метизов

Наименование	ГОСТ, ТУ	Кол-во, шт.	Сталь
Шпилька М22×75	ГОСТ 22042-76	17	Ст20

Для исследования процесса потери устойчивости раскосов на основании предварительных расчетов, результаты которых изображены на рисунках 7–12, выявлены места расстановки тензорезисторов и индикаторов часового типа. Так, на один раскос (Р) на расстоянии 773 мм от края стержня устанавливаются 4 тензорезистора и 2 – в приопорной зоне стержня, направление которых определено начальным отклонением от оси элемента. Такое количество датчиков

в его сечении обусловлено необходимостью поиска изгибающих моментов в обеих плоскостях. Также, в центре элемента необходима установка двух индикаторов часового типа для поиска максимальных перемещений, что обусловлено результатами расчета.

Перед началом проведения экспериментальных исследований на экспериментальной базе ГОУ ВПО «ДонНАСА» было проведено тарирование тензорезисторов. Для тарировки была использована консольная балка переменного сечения равного сопротивления изгибу (рис. 4, 5). В местах изменения сечения были установлены четыре активных тензорезистора, расположенные вдоль напряженных волокон. На пластине выше были установлены четыре компенсационных тензорезистора (равно количеству активных). Результаты тарирования тензорезисторов представлены в таблице 4.

Проведенные испытания позволили установить цену деления модуля ввода сигналов датчиков ОВЕН в напряжениях: 1мВ – 147,78 МПа или 0,01мВ – 1,47 МПа.

Методика проведения эксперимента

Расчетная схема экспериментальной модели выполнена в программном комплексе семейства «ЛИРА-САПР 2019 R1» и имеет следующие характеристики:

- количество узлов расчетной схемы – 39 642;
- количество элементов расчетной схемы – 24 440, в составе которых:
 - для моделирования стержней, заглушек и болтов – 19 840 объёмных элементов;

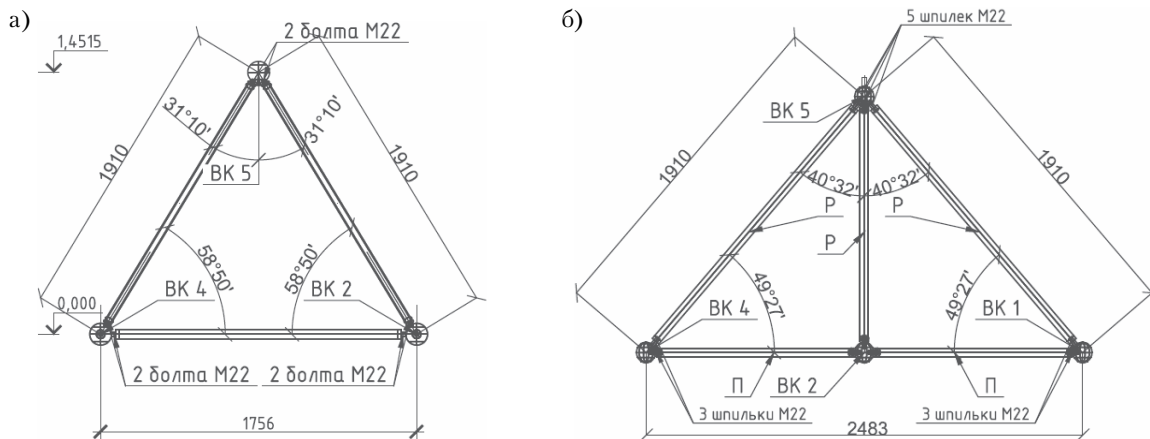


Рисунок 3. Схема испытываемой модели: а) вид сбоку; б) вид по диагонали.



Рисунок 4. Установка для тарировки тензорезисторов.



Рисунок 5. Расположение активных и компенсационных тензорезисторов.

- для моделирования коннекторов – 4 600 3 и 4 узловых пластин;
- в узлах коннектора заданы граничные условия (запрет линейных перемещений относительно оси y и x);
- расчетная критическая нагрузка, приложенная в верхний коннектор, равняется 30 000 кг;
- количество неизвестных в расчетной схеме составляет 127 302.

На основании предварительных результатов расчета уровень расчетной нагрузки на испытываемую модель составил 30 000 кг.

Нагрузка на экспериментальную модель прикладывалась при помощи 100-тонного гидродомкрата ДГ-100 в верхний узел. Шаг приложения нагрузки составил 555 кг (55 ступеней нагружения соответственно). Длительность выдержки каждой ступени составляет 20...45 секунд (для восприятия и распределения нагрузки в конструкции).

Такое решение обосновано тем, что скорость опроса всех активных тензорезисторов, подключенных к тензостанции ОВЕН, равна 7 опросам в секунду, что позволит максимально четко усреднить все полученные данные и выявить момент распределения и стабилизации в конструкции.

Фиксация показаний тензорезисторов записывалась с помощью программы MasterSCADA и фиксировалась в виде текстового файла. Показания индикаторов часового типа записывались вручную и фиксировались на видеокамеры, предварительно синхронизировав время записи.

Таблица 4. Результаты тарирования тензорезисторов

№ п/п	Время	Номер активного тензорезистора				Нагрузка (кг)
		T1	T2	T3	T4	
1	13.02.2020 16:20:35	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
2	13.02.2020 16:20:50	-0,35	0,34	-0,34	-0,34	10,00
3	13.02.2020 16:21:20	-0,69	0,68	-0,68	-0,68	20,00
4	13.02.2020 16:21:40	-1,04	1,03	-1,02	-1,02	30,00
5	13.02.2020 16:22:00	-1,39	1,36	-1,37	-1,36	40,00
6	13.02.2020 16:22:24	-1,04	1,04	-1,02	-1,01	30,00
7	13.02.2020 16:22:39	-0,70	0,68	-0,67	-0,68	20,00
8	13.02.2020 16:23:16	-0,35	0,34	-0,34	-0,34	10,00
9	13.02.2020 16:23:43	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00

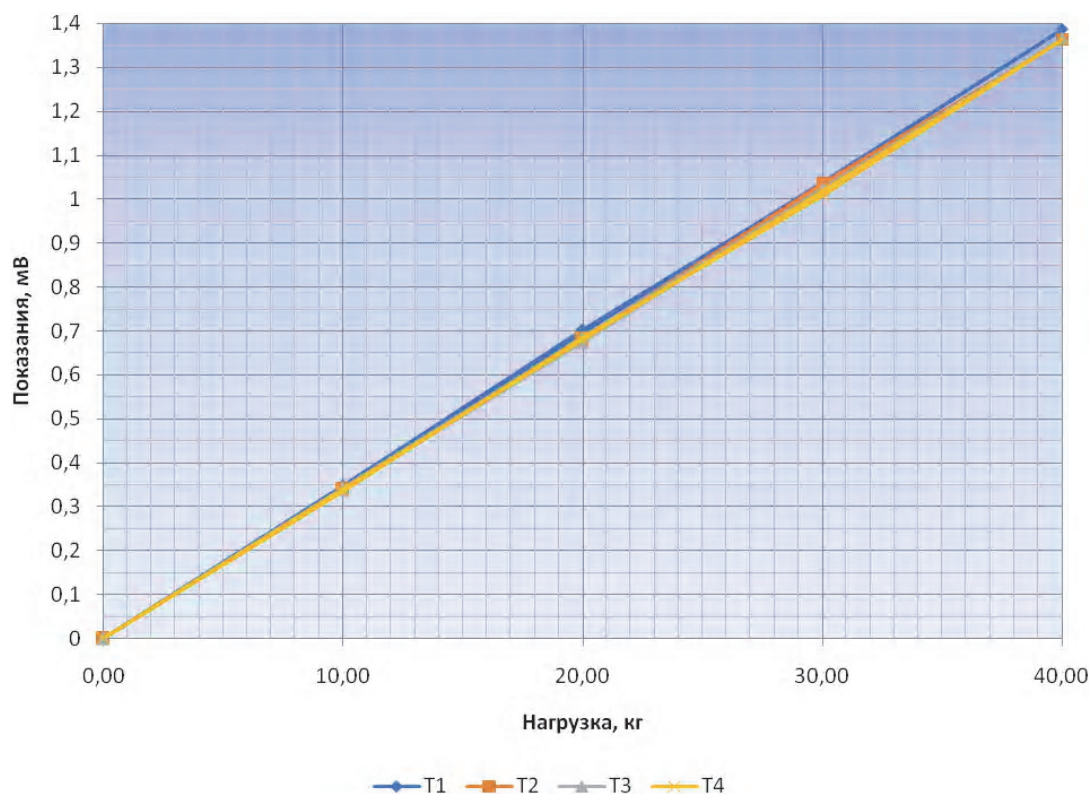


Рисунок 6. Зависимость «Нагрузка–Показания».

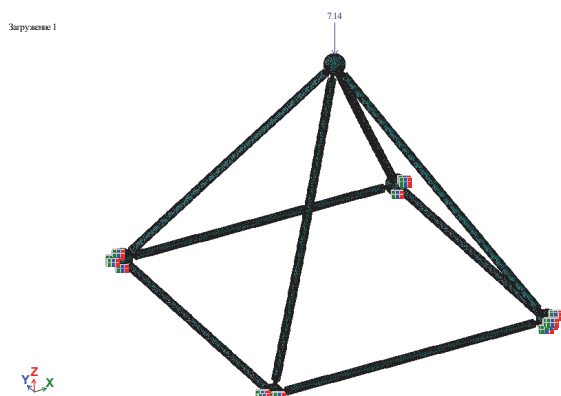


Рисунок 7. Расчетная схема ячейки структурной конструкции.

Результаты испытаний

Все экспериментальные исследования проводились в лабораторном корпусе № 2 кафедры «Металлические конструкции и сооружения» ГОУ ВПО «ДонНАСА» в апреле 2020 г. при температуре внутреннего воздуха $t = +12 \pm 3^\circ\text{C}$.

Стержни рассматриваемой модели были доведены до потери устойчивости, по результатам

каждого эксперимента был сформирован массив данных по каждому датчику, и далее проведена процедура процесса обработки результатов, принципиально заключающаяся в следующем:

- 1) данные с датчиков были синхронизированы со временем видеозаписи, и определено с точностью до 1 секунды время потери устойчивости;
- 2) по результатам испытания для каждой группы датчиков были построены графики изменения напряжений по времени наблюдения и определены средние значения напряжений в момент потери устойчивости;
- 3) сравнение экспериментальных и численных значений максимальных напряжений в момент потери устойчивости, а также приращений критического давления.

Определение момента потери устойчивости стержня определяется с учётом показаний приборов до появления существенных скачков перемещений (напряжений).

Определив точное время потери устойчивости и убедившись в наличии скачка напряжений в указанный промежуток времени, согласно электронным таблицам обработки эксперимента

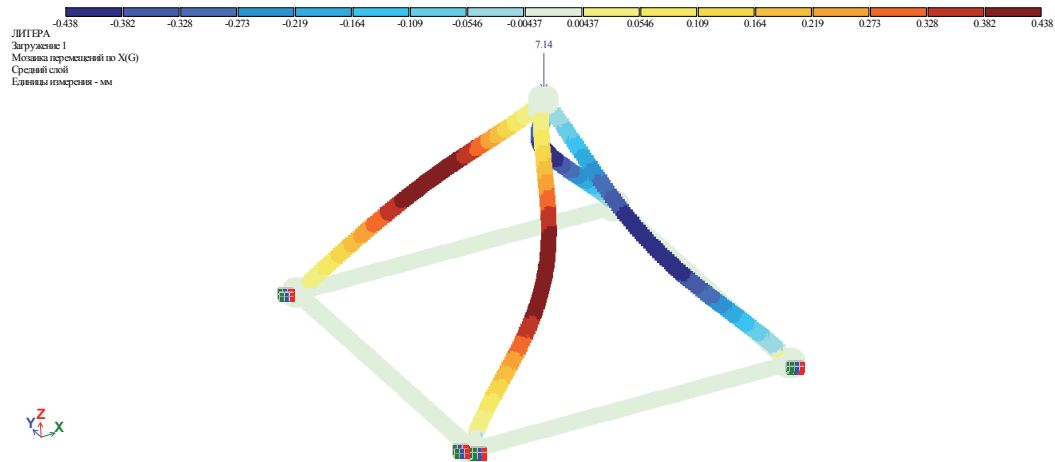


Рисунок 8. Перемещения по X.

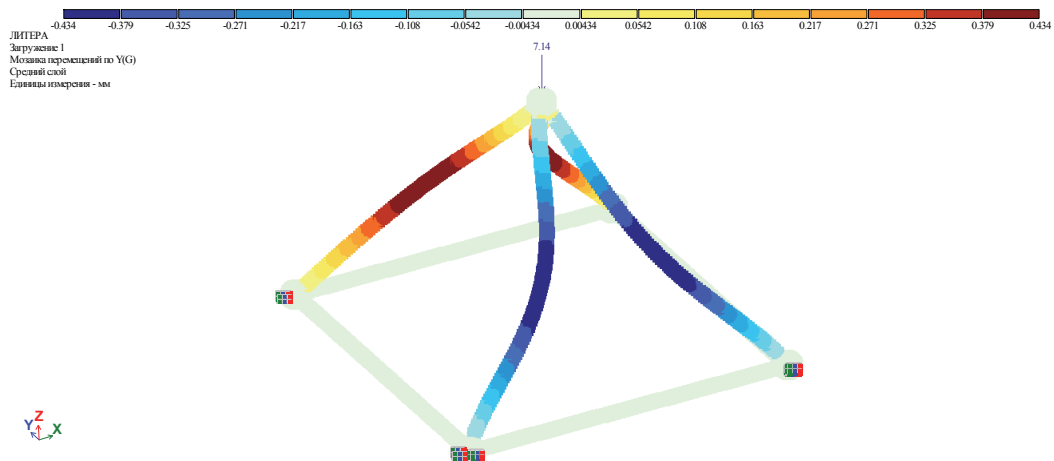


Рисунок 9. Перемещения по Y.

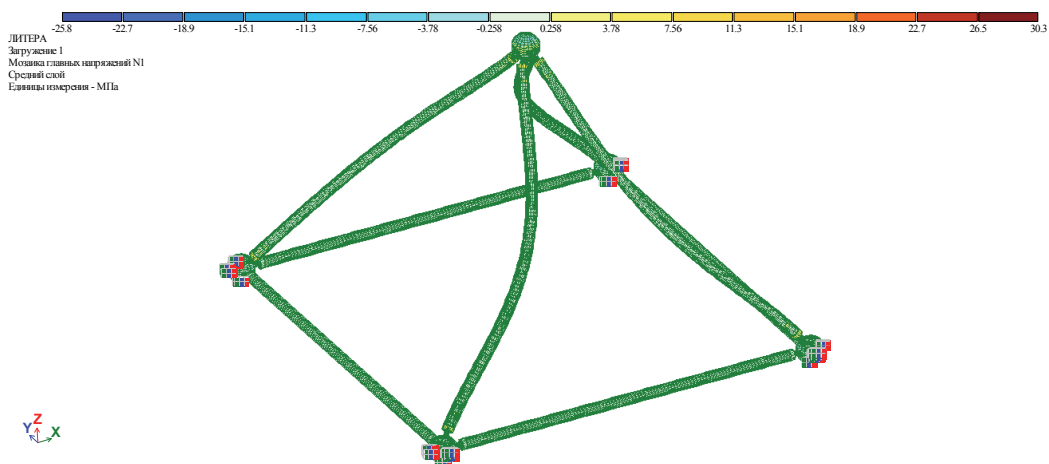


Рисунок 10. Главные напряжения N1.

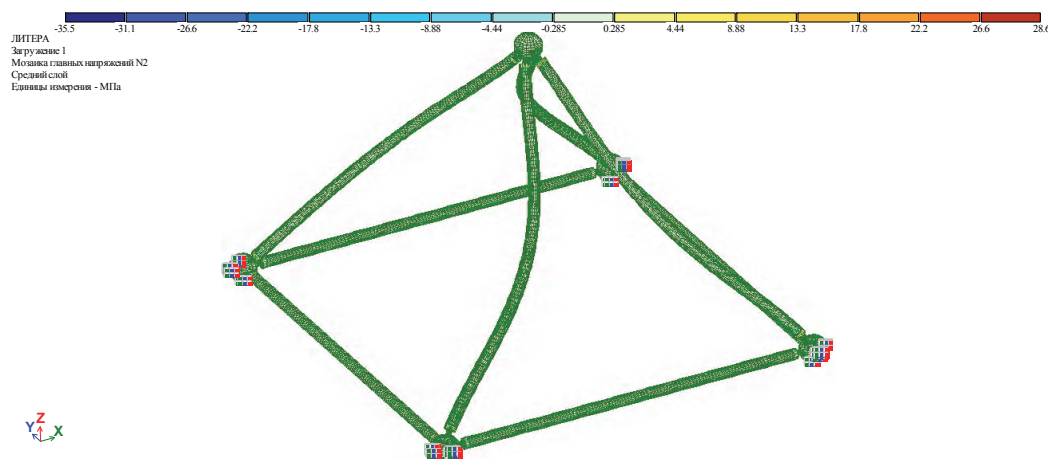


Рисунок 11. Главные напряжения N2.

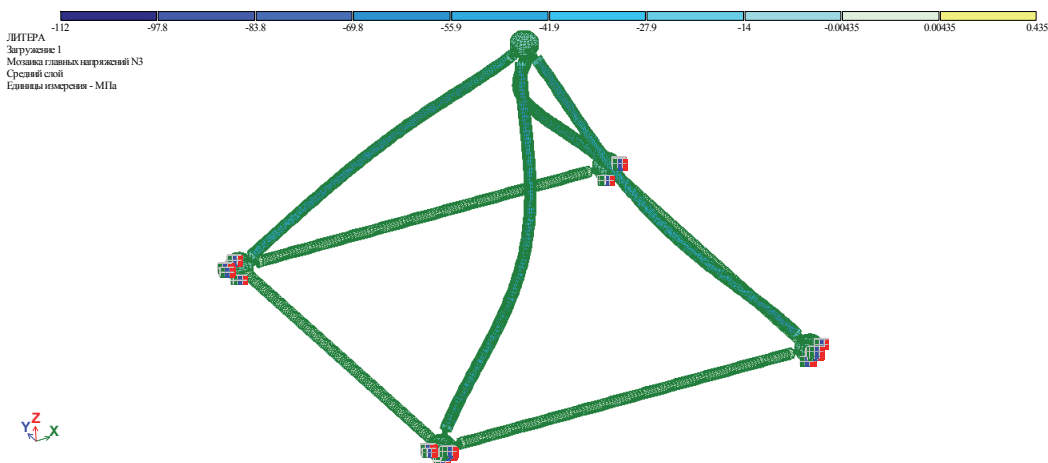


Рисунок 12. Главные напряжения N3.

определяется величина основных параметров напряжённого состояния в ближайший зафиксированный момент, предшествующий потери устойчивости. В связи с этим на рисунках 13–16 приводятся графики возрастания напряжений до момента потери устойчивости по времени.

Ниже рассмотрены результаты испытания и обработка результатов эксперимента модели.

Анализ результатов измерений:

- начало развития локальных пластических деформаций в сечении происходит при уровне напряжений $\sigma_x = 220$ МПа.
- экспериментально зафиксированный уровень приведенных напряжений, при которых

происходит потеря устойчивости, составляет $\sigma_{пр.экр} = 193,5$ МПа, что свидетельствует об общей потере устойчивости для стержня с теоретическим значением гибкости $\lambda = 120$ в упругой стадии работы материала.

- начало процесса потери устойчивости стержня произошло при относительном выгибе стержня $f/l = 1/479$, что значительно превышает традиционно закладываемое значение $f/l = 1/700$;
- несмотря на зафиксированную разницу результатов численного и экспериментального исследований, сравнение величин $\sigma_{кр.теор.}$, $\sigma_{кр.эсп.}$, $\sigma_{кр.числ.}$ позволяет сделать однозначный вывод о значительном влиянии конструктивного решения узловых соединений

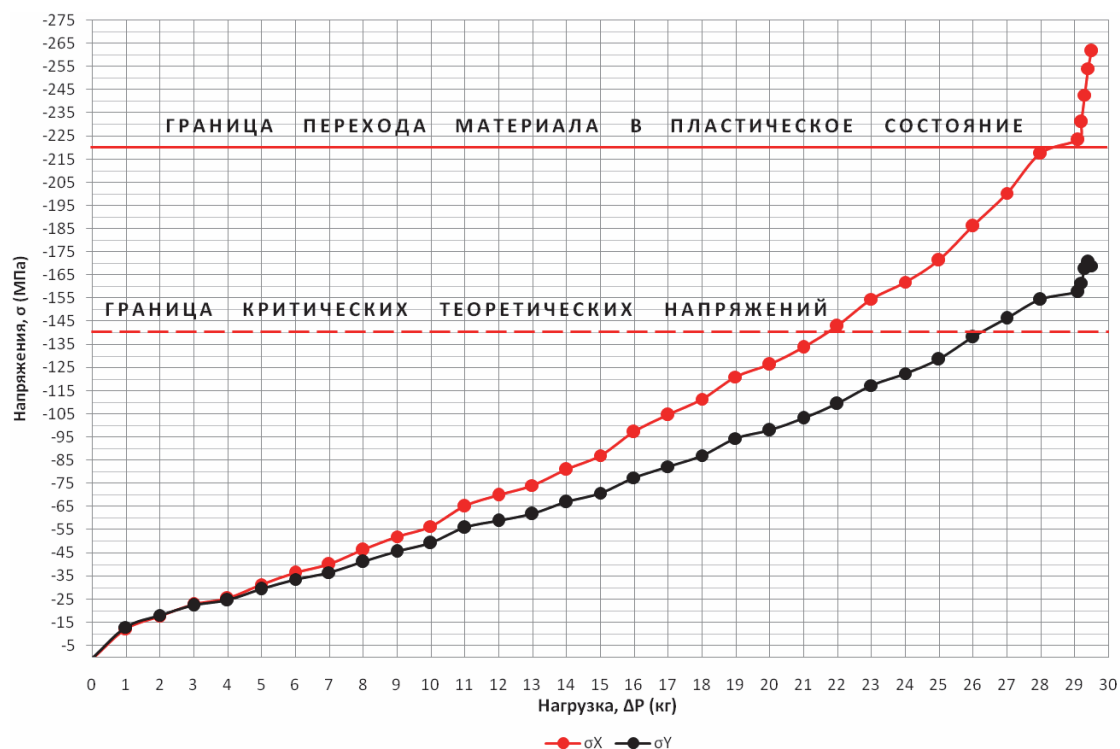


Рисунок 13. Изменение напряжений в зависимости от приращения нагрузки в центральном сечении (экспериментальные исследования) ($\sigma_x - \Delta P$, $\sigma_y - \Delta P$).

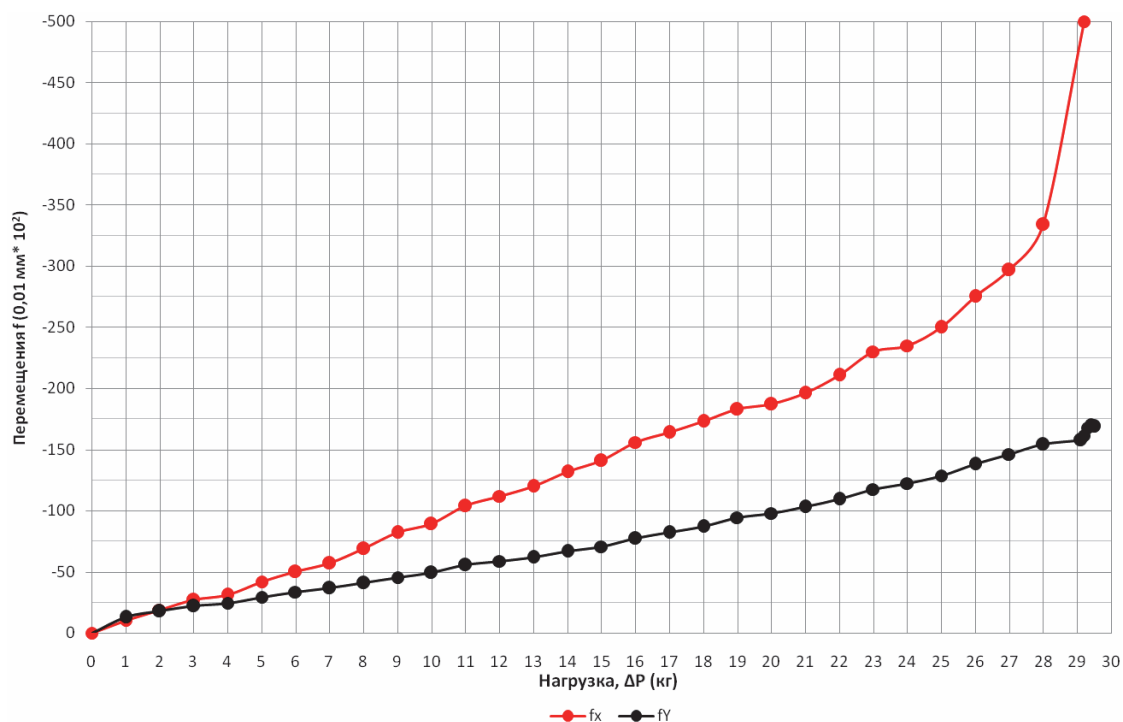


Рисунок 14. Изменение перемещений в зависимости от приращения нагрузки в центральном сечении (экспериментальные исследования) ($f_{\max} - \Delta P$).

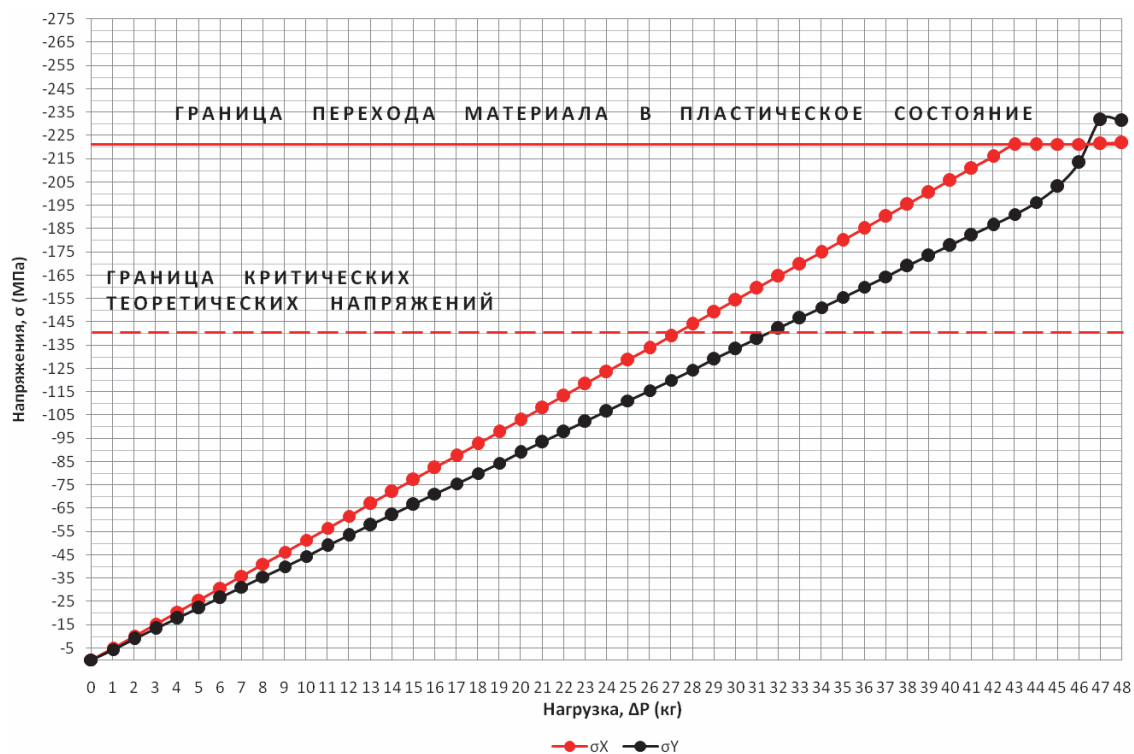


Рисунок 15. Изменения напряжений в зависимости от приращения нагрузки в центральном сечении (численные исследования) ($\sigma_x - \Delta P$, $\sigma_y - \Delta P$).

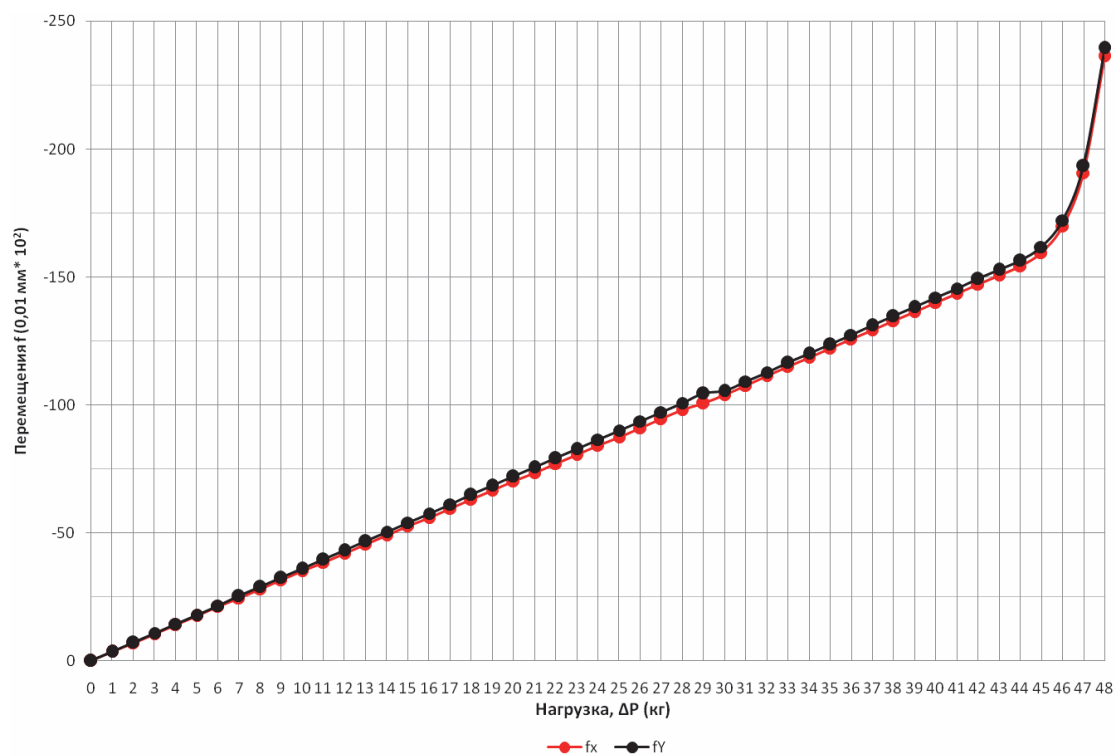


Рисунок 16. Изменения перемещений в зависимости от приращения нагрузки в центральном сечении (численные исследования) ($f_{\max} - \Delta P$).



Рисунок 17. Вид элемента, потерявшего устойчивость.

структурных конструкций (в данном случае – шаровых вставок-коннекторов) за счет сокращения расчетной длины стержня на повышение его несущей способности из условия устойчивости.

Основные выводы

1. По данным проведенного экспериментального исследования установлено увеличение несущей способности центрально-сжатого стержня с теоретическим значением $\lambda = 120$ до 37 % (по данным численного исследования – до 50 %) по сравнению с теоретическим значением $\sigma_{кр.теор.}$ (что объясняется принятой упрощенной диаграммой деформирования стали принятой в соответствии с возможностями ПК ЛИРА-САПР).
2. В связи с зафиксированными отличиями результатов экспериментального и численного исследований предлагается ввести значение корректирующего коэффициента k_e по отношению к результатам, получаемым с использованием регрессионной зависимости, приведенной в работе [10], значения которого должны быть уточнены после проведения экспериментальных исследований стержней в диапазоне гибкостей $\lambda = 80...120$.

Литература

1. ДБН В.2.6-198:2014. Стальные конструкции. Нормы проектирования [Текст]. – Взамен ДБН В.2.6-163:2010 в части раздела 1 и ДСТУ Б В.2.6-194:2013; введ.2015-01-01. – К.: Минрегион Украины, 2014. – 206 с.
2. СП 294.1325800.2017. Конструкции стальные. Правила проектирования [Текст]. – Введ. впервые; введ. 2017-05-31. – М.: Минстрой России, 2017. – 167 с.
3. Рекомендации по проектированию структурных конструкций [Текст] / ЦНИИСК им. Кучеренко. – М.: Стройиздат, 1984. – 297 с.
4. Трущев, А. Г. Пространственные металлические конструкции [Текст]: учебное пособие / А. Г. Трущев. – М.: Стройиздат, 1983. – 216 с.
5. Хисамов, Р. И. Расчет и конструирование структурных покрытий [Текст] / Р. И. Хисамов. – Киев: Будивельник, 1981. – 48 с.

References

1. DBN V.2.6-198:2014. Steel structures. Design Standards [Text]. Kyiv: Ministry of Regional Development of Ukraine, 2014. – 198 p. (in Russian)
2. SP 294.1325800.2017. Steel structures. Design rules [Text]. M.: Ministry of Construction of Russia, 2017. 167 p. (in Russian)
3. V. A. Kucherenko CSRIBS Structural Design Guidelines [Text]. M.: Stroiizdat, 1984. 297 p. (in Russian)
4. Trushchev, A. G. Spatial metal structures: schoolbook [Text]. M.: Stroiizdat, 1983. 216 p. (in Russian)
5. Khisamov, R. I. Calculation and design of structural coatings [Text]. Kyiv: Budivelnik, 1981. 48 p. (in Russian)
6. Romensky, I. V.; Zagoruyko, T. I.; Mushchanov, A. V. The main approaches to the assignment of spatial and stiffness characteristics of the coating of the

6. Роменский, И. В. Основные подходы к назначению пространственных и жесткостных характеристик покрытия системы МАРХИ при регулировании параметров его напряженно-деформированного состояния [Текст] / И. В. Роменский, Т. И. Загоруйко, А. В. Мушанов. // Металлические конструкции. 2015. Том 21, № 1. С. 5–14.
7. Мушанов, В. Ф. Рациональные геометрические и жесткостные параметры большепролетного структурного покрытия [Текст] / В. Ф. Мушанов, И. В. Роменский, А. В. Мушанов. // СУЗИС. 2016, № 2(41). С. 18–29.
8. Горохов, Е. В. Учёт конструктивных особенностей узловых соединений в расчетах устойчивости центрально сжатых стержней структурных покрытий [Текст] / Е. В. Горохов, А. В. Мушанов // Металлические конструкции. 2016. Том 22, № 3. С. 125–137.
9. Горохов, Е. В. Анализ влияния конструктивных особенностей узловых соединений на несущую способность центрально сжатых стержней структурных покрытий [Электронный ресурс] / Е. В. Горохов, А. В. Мушанов // Металлические конструкции, 2017. Том 23, № 3. С. 139–151. – Режим доступа : http://donnasa.ru/publish_house/journals/mk/2017-3/04_gorokhov_mushchanov.pdf.
10. Горохов, Е. В. Оценка устойчивости центрально-сжатых стержней структурных покрытий с учётом конструктивных особенностей узловых соединений и нелинейной работы материала [Электронный ресурс] / Е. В. Горохов, А. В. Танасогло, А. В. Мушанов // Металлические конструкции. 2018. Том 24, № 3. С. 105–121. – Режим доступа : http://donnasa.org/publish_house/journals/mk/2018-3/02_gorokhov_tanasoglo_mushanov.pdf.
11. Мушанов, В. Ф. Оптимальное проектирование структурных покрытий на нетиповых планах [Электронный ресурс] / В. Ф. Мушанов, А. Н. Оржеховский, А. В. Мушанов // Наукоемкие технологии и инновации : эл. сб. докладов Междунар. науч.-практ. конф. в 2 ч. ; ч. 2. (29 апреля 2019 г., Белгород). – 114 с. – С. 75–79. – Режим доступа : <https://conf.bstu.ru/shared/attachments/200934>.
12. Мушанов, А. В. Оптимальные конструктивные решения структурных покрытий на прямоугольных нетиповых планах [Электронный ресурс] / А. В. Мушанов // Металлические конструкции. 2020. Том 26, № 1. С. 37–48. – Режим доступа : http://donnasa.ru/publish_house/journals/mk/2020-1/04_mushchanov.pdf.
13. Каримбаев, К. Д. О критериях потери устойчивости сжатых стержней за пределами упругости при жестком нагружении [Текст] / К. Д. Каримбаев, Д. С. Пальчиков // Вестник УГАТУ. 2015. Т. 19, № 3(69). С. 126–131.
14. Buijsen, Michel. Dynamic Space Frame Structures [Электронный ресурс] / Michel Buijsen. – 2011. – 96 p. – Режим доступа : <http://homepage.tu-delft.nl/>
- MARKHI system when adjusting the parameters of its stress-strain state [Text]. In: *Metal constructions*. 2015. Vol 21, № 1. P. 5–14. (in Russian)
7. Mushchanov, V. F.; Romensky, I. V.; Mushchanov, A. V. Rational geometric and stiffness parameters of a long-span structural coating [Text]. In: *CUBS*. 2016, №2 (41). P.18–29. (in Russian)
8. Gorokhov, Ye. V.; Mushchanov, A. V. Consideration of design features of nodal joints in stability calculations of centrally compressed structural coating rods [Text]. In: *Metal constructions*. 2016. Vol. 24, № 3. P. 125–137. (in Russian)
9. Gorokhov, Ye. V.; Mushchanov, A. V. Analysis of the influence of structural features of nodal joints on the bearing capacity of centrally compressed structural coating rods [Electronic resource]. In: *Metal constructions*. 2017. Vol. 23, № 3. P. 139–151. Access mode : http://donnasa.org/publish_house/journals/mk/2017-3/04_gorokhov_mushchanov.pdf. (in Russian)
10. Gorokhov, Ye. V.; Tanasoglo, A. V.; Mushchanov, A. V. Stability assessment of centrally compressed structural coating rods taking into account design features of nodal joints and non-linear material operation [Electronic resource]. In: *Metal constructions*. 2018, Vol. 24, № 3, P. 105–121. Access mode : http://donnasa.org/publish_house/journals/mk/2018-3/02_gorokhov_tanasoglo_mushanov.pdf. (in Russian)
11. Mushchanov, V. F.; Orzhekhovskiy, A. N.; Mushchanov, A. V. Optimal design of structural coatings on non-standard layouts [Electronic resource]. In: High technology and innovation: electronic proceedings of the international scientific and technical conference in 2 parts; part 2, 114 p. P. 75–79. Access mode: [https://conf.bstu.ru>shared/attachments/200934](https://conf.bstu.ru/shared/attachments/200934). (in Russian)
12. Mushchanov, A. V. Optimal design solutions for structural coatings on rectangular non-standard layouts [Electronic resource]. In: *Metal constructions*. 2020. Vol. 26, № 1. P. 37–48. Access mode : http://donnasa.ru/publish_house/journals/mk/2020-1/04_mushchanov.pdf. (in Russian)
13. Karimbayev, K. D.; Palchikov, D. S. Criteria for the loss of stability of compressed rods outside the elastic limit under rigid loading [Text]. In: *Proceedings of the USATU*. 2015. Vol. 19, № 3(69). P. 126–131. (in Russian)
14. Buijsen, Michel. Dynamic Space Frame Structures [Electronic resource]. 2011. 96 p. Access mode : http://homepage.tudelft.nl/x4x4j/sadbtreports/1011nj/Dynamic_Space_Frame_Structures_Michel_Buijsen.pdf. (in English)
15. Rosen, A.; Sabag, M.; Givoli, M. A general nonlinear structural model of a multirod (multibeam) system – I. Theoretical derivations [Text]. In: *Computers & Structures*. 1996. Volume 61, Issue 4. P. 617–632. (in English)
16. Antoniou, N.; Nikolaidis, Th. N.; Baniotopoulou, C. C. Designing long-span steel girders by applying displacement control concepts [Text]. In:

- x4x4j/sadbbtreports/1011nj/Dynamic_Space_Frame_Structures_Michel_Bujisen.pdf.
15. 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.
 16. Antoniou, N. Designing long-span steel girders by applying displacement control concepts [Текст] / N. Antoniou, Th. N. Nikolaidis, C. C. Baniotopoulos // Engineering Structures. 2014. Volume 59. P. 21–27.
 17. Edwin, Gaylord. Structural engineering [Текст] / Gaylord Edwin, Gaylord Charles, Stallmeyer James. New York : The McGraw Hill Companies, 1997. – 1024 p.
 18. Chilton, John. Space Grid Structures [Текст] / John Chilton. – Great Britain : Architectural Press, 2000. – 180 p.
 - Engineering Structures. 2014. Volume 59. P. 21–27. (in English)
 17. Edwin, Gaylord; Charles, Gaylord; James, Stallmeyer. Structural engineering [Text]. New York : The McGraw Hill Companies, 1997. 1024 p. (in English)
 18. Chilton, John. Space Grid Structures [Text]. Great Britain : Architectural Press, 2000. 180 p. (in English)

Горохов Евгений Васильевич – доктор технических наук, профессор; заведующий кафедрой металлических конструкций и сооружений ГОУ ВПО «Донбасская национальная академия строительства и архитектуры», Иностраный 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.

Васылев Владимир Николаевич – кандидат технических наук, доцент; профессор кафедры металлических конструкций и сооружений, начальник Лаборатории испытаний строительных конструкций и сооружений ГОУ ВПО «Донбасская национальная академия строительства и архитектуры». Научные интересы: экспериментальное теоретическое исследование работы опор линий электропередачи; регулирование и учет внутреннего напряженного состояния горячекатаного проката в строительных конструкциях.

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

Волчков Александр Николаевич – старший преподаватель кафедры автоматизация и электроснабжения в строительстве ГОУ ВПО «Донбасская национальная академия строительства и архитектуры». Научные интересы: использование тензометрии для определения напряженного состояния строительных конструкций.

Горохов Євген Васильович – доктор технічних наук, професор; завідувач кафедри металевих конструкцій і споруд ДООУ ВПО «Донбаська національна академія будівництва і архітектури», Іноземний член Російської Академії архітектурно-будівельних наук, академік Академії Вищої школи і Академії будівництва України. Член Міжнародного комітету з вивчення впливу вітру на будівлі і споруди. Наукові інтереси: експлуатаційна надійність будівельних металевих конструкцій, кліматичні навантаження на будівельні конструкції.

Василев Володимир Миколайович – кандидат технічних наук, професор кафедри металевих конструкцій та споруд, начальник Лабораторії випробувань будівельних конструкцій і споруд ДООУ ВПО «Донбаська національна академія будівництва і архітектури». Наукові інтереси: експериментальнотеоретичне дослідження роботи опор ліній електропередавання; регулювання і врахування внутрішнього напруженого стану горячекатаного прокату в будівельних конструкціях.

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

Волчков Олександр Миколайович – старший викладач кафедри автоматизація та електропостачання в будівництві ДОНУ ВПО «Донбаська національна академія будівництва і архітектури». Наукові інтереси: використання тензометрії для визначення напруженого стану будівельних конструкцій.

Gorokhov Evgeniy – D. Sc. (Eng), Professor; Head of the Metal Structures Department, Rector of the Donbas National Academy of Civil Engineering and Architecture, Foreign member of the Russian Academy of Architectural and Civil Engineering, Academician of the Academy of Higher Education and the Academy of Civil Engineering of Ukraine. Member of the International Committee for the Study of Wind Effects on Buildings and Structures. Scientific interests: operational reliability of building metal structures, climatic loads on building structures.

Vasylev Volodymyr – Ph. D. (Eng.), Associate Professor; Metal Structures and Constructions Department, Head of the Laboratory of Testing Building Structures and Buildings, Donbas National Academy of Civil Engineering and Architecture. Scientific interests: experimental and theoretical investigation of power transmission tower operation, control and record of the inner stressed state of the hot rolled metal in building structures.

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

Volchikov Alexander – Senior lecturer, Automatics and Electrotechnics Department, Donbas National Academy of Civil Engineering and Architecture. Scientific interests: the use of strain gauges to determine the stress state of building structures.