



ISSN 1814-5566 print

ISSN 1993-3517 online

МЕТАЛЕВІ КОНСТРУКЦІЇ
МЕТАЛЛИЧЕСКИЕ КОНСТРУКЦИИ
METAL CONSTRUCTIONS

2016, ТОМ 22, НОМЕР 3, 125–137

УДК 624.046.4:624.078

(16)-0348-1

УРАХУВАННЯ КОНСТРУКТИВНИХ ОСОБЛИВОСТЕЙ ВУЗЛІВ З'ЄДНАННЯ У РОЗРАХУНКАХ СТІЙКОСТІ ЦЕНТРАЛЬНО СТИСНУТИХ СТЕРЖНІВ СТРУКТУРНИХ ПОКРИТТІВ

Є. В. Горохов¹, О. В. Мущанов²

*Донбаська національна академія будівництва і архітектури,
2, вул. Державіна, м. Макіївка, 86123.*

E-mail: ¹ mailbox@donnasa.ru, ² mushhanov93@gmail.com

Отримана 31 травня 2016; прийнята 23 вересня 2016.

Анотація. У статті представлені результати дослідження впливу конструктивних рішень вузлових з'єднань структурних конструкцій на величину критичної сили і форми втрати стійкості центрально стиснутим елементом покриття. Дослідження виконані статичним методом для елемента великої гнучкості ($\lambda = 224$) при втраті стійкості в пружній стадії роботи матеріалу в скінченно-елементній постановці із заданням початкової недосконалості у формі напівхвилі синусоїди, що характерна для класичного розв'язку задачі Ейлера. Висновки про вплив фактичних конструктивних рішень вузлових з'єднань на величину критичної сили і форми втрати стійкості зроблені на основі порівняльного аналізу результатів розрахунку ідеалізованої стержневої моделі і скінченно-елементної моделі трубчастого стержня з вузловими рішеннями, характерними для системи МАрхІ.

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

УЧЕТ КОНСТРУКТИВНЫХ ОСОБЕННОСТЕЙ УЗЛОВЫХ СОЕДИНЕНИЙ В РАСЧЕТАХ УСТОЙЧИВОСТИ ЦЕНТРАЛЬНО СЖАТЫХ СТЕРЖНЕЙ СТРУКТУРНЫХ ПОКРЫТИЙ

Е. В. Горохов¹, А. В. Мущанов²

*Донбасская национальная академия строительства и архитектуры,
2, ул. Державина, г. Макеевка, 86123.*

E-mail: ¹ mailbox@donnasa.ru, ² mushhanov93@gmail.com

Получена 31 мая 2016; принята 23 сентября 2016.

Аннотация. В статье представлены результаты исследования влияния конструктивных решений узловых соединений структурных конструкций на величину критической силы и формы потери устойчивости центрально сжатым элементом покрытия. Исследования выполнены статическим методом для элемента большой гибкости ($\lambda = 224$) при потере устойчивости в упругой стадии работы материала в конечно-элементной постановке с заданием начального несовершенства в форме полуволны синусоиды, что характерно для классического решения задачи Эйлера. Выводы о влиянии фактических конструктивных решений узловых соединений на величину критической силы и формы потери устойчивости сделаны на основе сопоставительного анализа результатов расчета идеализированной стержневой модели и конечно-элементной модели трубчатого стержня с узловыми решениями, характерными для системы МАрхИ.

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

ACCOUNTING OF CONSTRUCTIVE FEATURES NODES COMPOUND BASED STABLE CENTRAL COMPRESSED RODS STRUCTURAL COVERAGE

Yevgen Gorokhov¹, Alexander Mushchanov²

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

E-mail: ¹ mailbox@donnasa.ru, ² mushhanov93@gmail.com

Received 31 May 2016; accepted 23 September 2016.

Abstract. In the article the results of research of influence of constructive decisions of nodal connections of structural designs on the critical forces and form of buckling failure by center-compression element of covering have been given. Researches have been carried out by the static method for the item great flexibility ($\lambda = 224$) for the loss of stability in the elastic stage of the work materials in the finite element formulation with the task of initial imperfections in the form of half-wave sine wave, which is characteristic of the classical solution of the Euler problem. Conclusions on the impact of the actual design solutions of nodal connections on the critical forces and buckling shapes have been made on the basis of comparative analysis of the calculation results idealized core model and finite element model of the tubular rod with the nodal solutions specific to MArchI system.

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

Анализ состояния вопроса

Для формулировки цели исследования, представленного в данной работе, отметим несколько общеизвестных, устоявшихся положений теории устойчивости:

- переход сооружения из устойчивого состояния в неустойчивое часто называют *потерей устойчивости*, границу этого перехода – *критическим состоянием сооружения*, а соответствующие этому явлению нагрузки – *критическими нагрузками*;
- различают два вида потери устойчивости: *потеря устойчивости положения* и *потеря устойчивости первоначальной формы равновесия* (последнее характерно для рассматриваемого нами случая);
- различают *потерю устойчивости I^о рода* (продольный изгиб прямолинейного стержня, сжатого осевой силой, когда потеря устойчивости сопровождается возникновением нового вида деформации изгиба вместо сжатия, имевшего место при $P \leq P_{кр}$) и *II^о рода* (потеря устойчивости внецентренно сжатых стержней, стержней подверженных действию продольных и поперечных нагрузок, когда вид деформации не меняется, но деформации стержня при $P \approx P_{кр}$ начинают

быстро возрастать даже без увеличения нагрузки);

- основными методами исследования устойчивости являются статический, динамический и энергетический методы.

Статический метод, являясь основным при решении ряда задач (в том числе и задачи Эйлера), позволяет при задании возможного вида деформированной оси элемента из характеристических уравнений деформирования определить те значения $P_{кр}$ внешних сил, при которых возможна новая форма равновесия.

При этом существенными факторами, влияющими на точность решения (величину расчетной критической силы), являются *отличие фактических закреплений стержня от идеализированных* и *предполагаемая форма потери устойчивости*.

Наиболее просто и корректно преодолеть указанные трудности возможно на основе применения конечно-элементного моделирования, поскольку именно такой подход позволяет реализовать наиболее последовательный учет фактических опорных закреплений, обусловленных применяемыми конструктивными реализациями узловых соединений элементов структурных конструкций, а также, генерируя

соответствующую сетку узлов расчетной схемы, описать наиболее точным образом начальное несовершенство, характерное для последующего деформирования стержня в процессе потери устойчивости. Справедливость подобного подхода подтверждается рядом проведенных ранее исследований, в том числе, для стержневых элементов комбинированных конструкций [16, 17].

В связи с этим основной целью исследований, представленных в данной статье, является *уточнение величины критической силы и форм потери устойчивости центрально сжатых стержней структурного покрытия на основе учета конструктивных решений узловых соединений и фактических сечений элементов.*

Основная часть

Создание расчетной схемы идеализированного стержня для исследования устойчивости средствами МКЭ

При решении поставленной задачи использовался вычислительный комплекс «SCAD», ориентированный на прочностный анализ конструкций методом конечных элементов.

Несмотря на описанный выше накопленный опыт применения конечно-элементного анализа в задачах анализа устойчивости элементов строительных конструкций, при его реализации для конкретной расчетной схемы существуют свои определенные трудности, а именно:

- корректное использование расчета с учетом геометрической нелинейности при решении задачи;
- корректный подбор расчетной сетки;
- корректное использование принципов статического метода решения задачи при использовании численного метода расчета.

Дальнейшее решение задачи основано на сопоставительном анализе результатов расчета методом конечных элементов величины нагрузки, соответствующем началу потери устойчивости идеализированного стержня (расчетная схема по варианту 1) с аналогичным показателем конечно-элементной модели стержня, моделирующей как его сечение, так и особенности узловых соединений (расчетная схема по варианту 2).

Для корректного моделирования идеализированного стержня и решения поставленной задачи использовались следующие данные:

- длина стержня – 3 600 мм, тип жесткости – труба $\varnothing 48 \times 3$;
- принята расчетная сетка в 3-х вариантах: 11, 21 и 40 узлов (рис. 1);
- всем стержням предана форма начального несовершенства (отклонение $\frac{1}{700}$ от собственной оси);
- условия закрепления следующие: в верхнем узле (№ 2) – допускаются вертикальные перемещения, однако запрещается угол поворота относительно вертикальной оси Z ; в нижнем узле (№ 1) – запрещены вертикальные перемещения и угол поворота относительно Z ; на концах верхнего и нижнего элемента стержней установлен шарнир (U_x, U_y);
- назначен тип конечного элемента № 310 – универсальный стержень (с учетом геометрической нелинейности);
- на стержень приложена вертикальная узловая нагрузка $N_{кр} = 25$ кН; для возможности использования нелинейного расчета использовалось пошаговое приложение нагрузки (10 шагов – 2,5 кН).

Для корректного отображения стержня с особенностями сечения и узловых соединений использовались следующие данные:

- длина стержня – 3 600 (из них: 3 496 мм – фактическая длина стержня, 20 мм – высота заглушки; 84 мм – высота коннектора [стержня]);
- принята расчетная сетка 200×20 (рис. 2);
- стержню придана форма начального несовершенства (отклонение $(\frac{1}{700})L$, где L – геометрическая длина стержня);
- смоделирован фактический узел сопряжения (стержень → заглушка → болт → коннектор [стержень]);
- условия закрепления следующие: верхний узел (№ 2) – шарнирно-подвижная опора; нижний узел (№ 1) – шарнирно-неподвижная опора;
- назначены следующие типы конечных элементов:
 - для стержня: тип элемента № 344 – 4-х угольный КЭ оболочки (с учетом геометрической нелинейности);

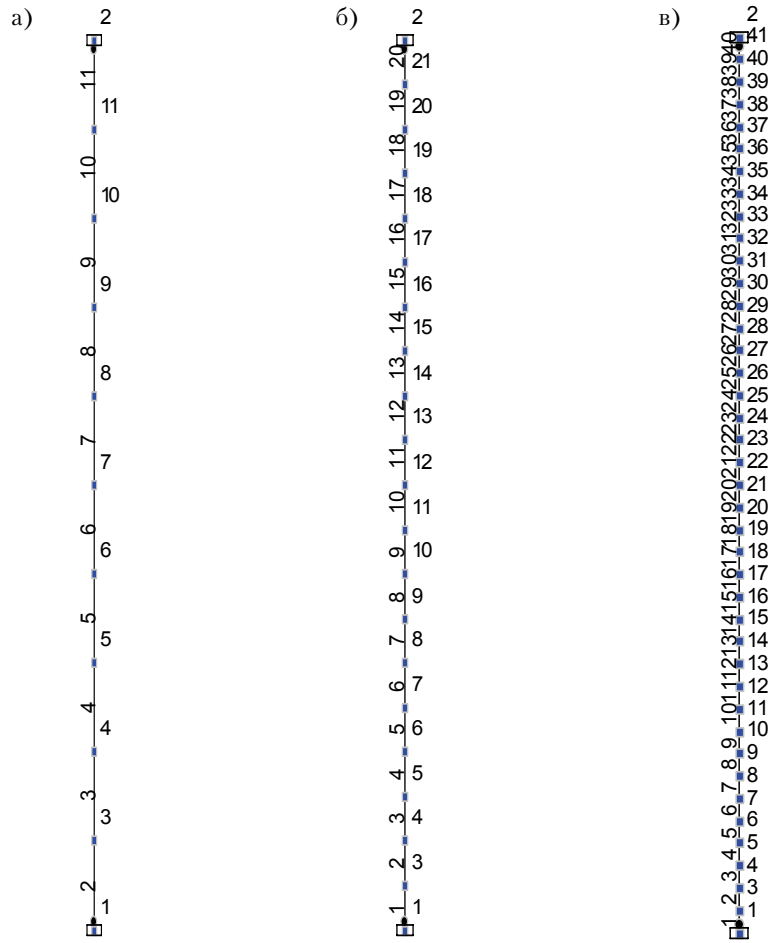


Рисунок 1. Расчетные сетки стержней по варианту 1: а) с разбиением на 10 элементов; б) с разбиением на 20 элементов; в) с разбиением на 40 элементов.

- для заглушки: тип элемента № 305 – пространственный стержень (с учетом геометрической нелинейности);
- для заглушки: тип элемента № 305 – пространственный стержень (с учетом геометрической нелинейности);
- для болта: тип элемента № 305 – пространственный стержень (с учетом геометрической нелинейности);
- для коннектора (стержня): тип элемента № 305 – пространственный стержень (с учетом геометрической нелинейности);
- на стержень приложена вертикальная узловая нагрузка $N_{кр} = 25$ кН; для возможности использования нелинейного расчета использовалось пошаговое приложение нагрузки (10 шагов – 2,5 кН).

На рис. 2 в укрупненном виде показан фрагмент расчетной модели стержня с фактическим сечением и особенностями решений узловых соединений, присущими системе МАрХИ.

Результаты расчета идеализированной расчетной схемы стержня по вариантам 1 и 2 приведены на рис. 3–6.

Для анализируемого стержня величина критической силы по Эйлеру составит:

$$N_{кр} = \frac{\pi^2 EI}{\mu l^2} = \frac{3,14 \cdot 2,6 \cdot 10^5 \text{ Па} \cdot 10,98 \text{ см}^4}{1 \cdot 3,6} = 17,3 \text{ кН}.$$

Анализ форм деформирования стержня на различных этапах загрузки (рис. 3–6) показывает, что именно для сетки с максимальным количеством узлов (рис. 5–6) после 7-го нагружения (17,5 кН), в узле № 20 стержень на-

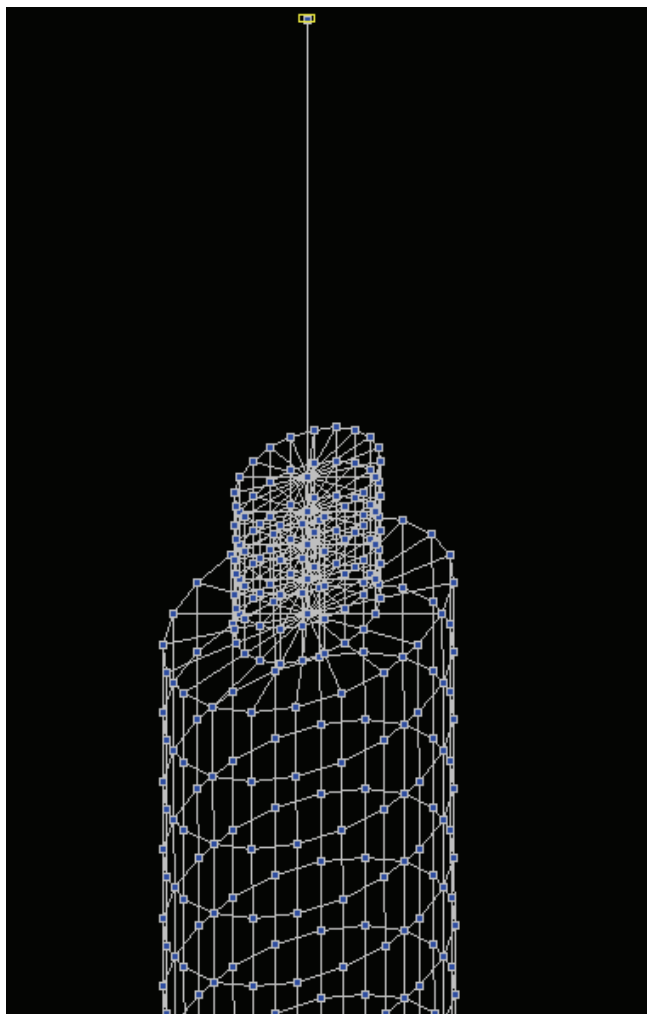


Рисунок 2. Расчетная схема стержня по варианту 2.

чинает менять равновесную форму положения (меняется знак перемещений), что свидетельствует о потере устойчивости.

Аналогичные расчеты, выполненные для расчетной схемы стержня по варианту 2 (рис. 2) приведены в таблице и на рис. 7 и 8 (сравнение осуществлялось на основе сопоставления данных горизонтальных перемещений узловых точек КЭ схем, представленных на рис. 1 и 2 с совпадающими узловыми координатами). По результатам сравнения можно отметить следующее:

- а) как и при расчете идеализированной схемы стержня, устойчивость начинает теряться на 7-ом шаге приложения нагрузки (17,5 кН);
- б) максимальные перемещения вдоль оси x зафиксированы в узле № 2076;

в) следует отметить более реалистичную картину процесса потери устойчивости в сравнении с идеализированной схемой стержня.

Как было уже выше сказано, максимальные горизонтальные перемещения зафиксированы в узле № 2076. На рис. 8 приведены перемещения узла в горизонтальном направлении в зависимости от величины нагрузки.

Общие выводы

Анализируя результаты, представленные на рис. 3–8 и в таблице можно сделать следующие основные выводы:

1. Уточненная величина критической силы составила: $N_{кр} = 17,5$ кН. Различие между

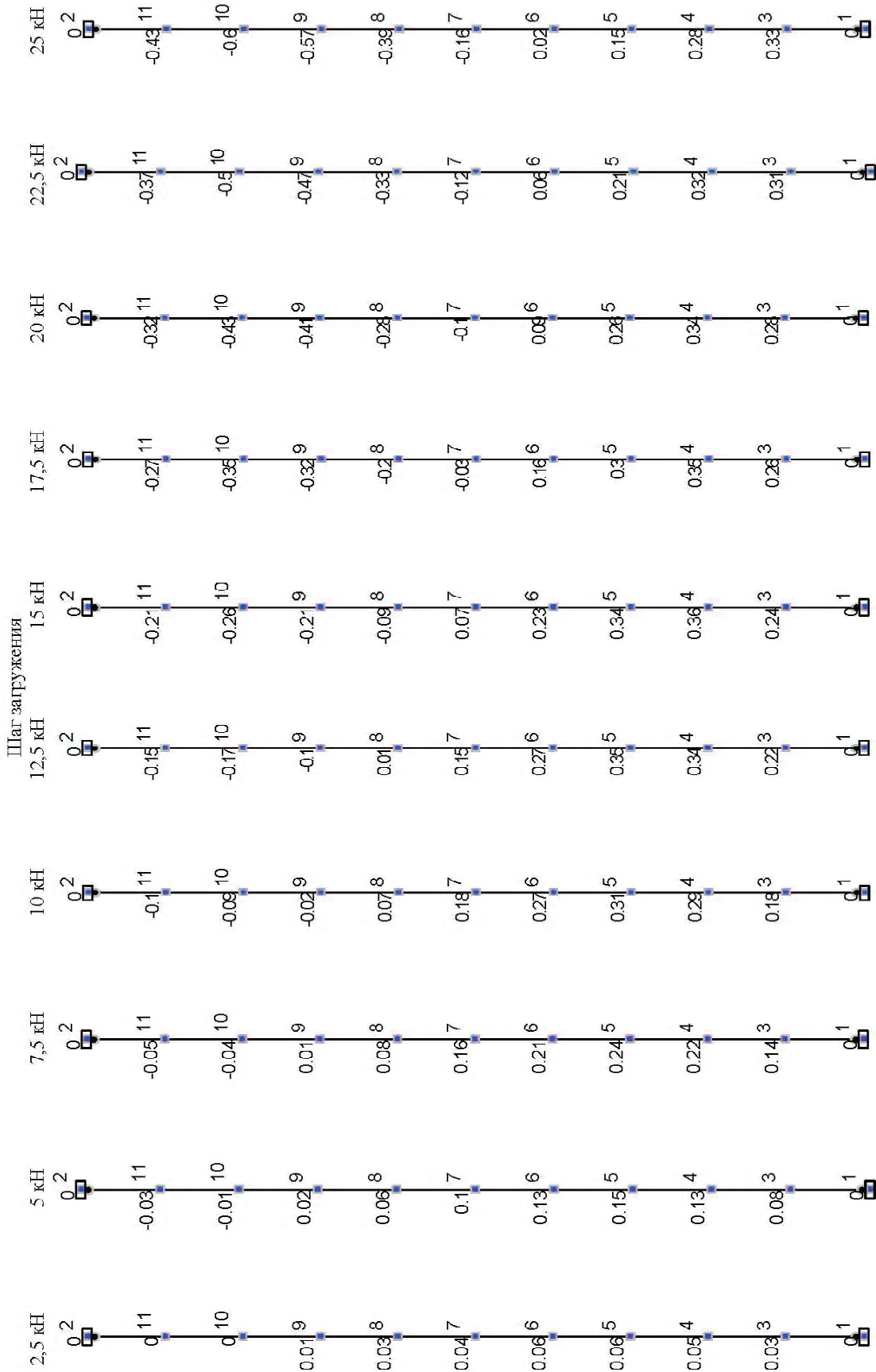


Рисунок 3. Численные значения перемещений в узлах вдоль оси X, мм (для сетки из 11 узлов).

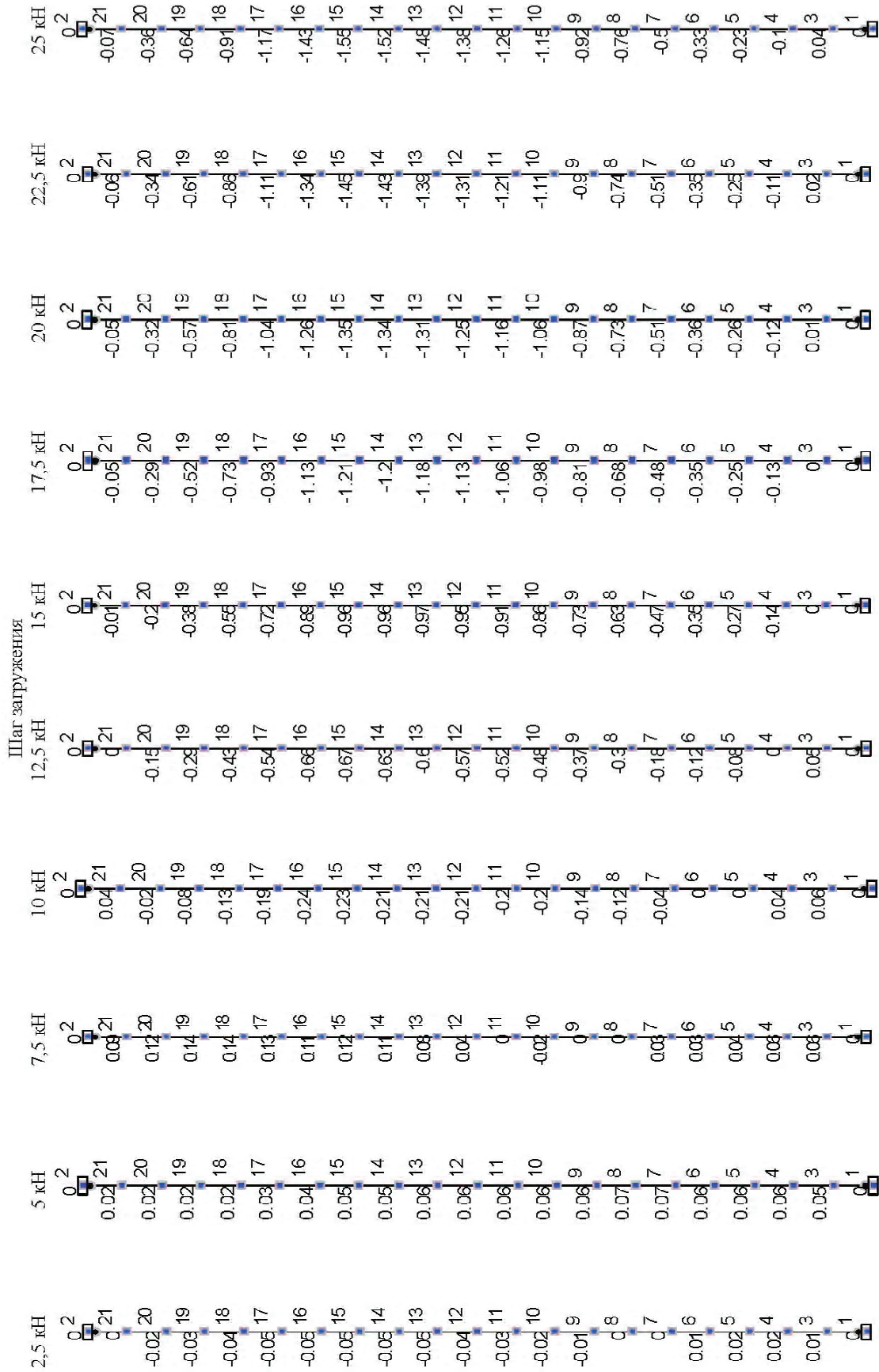


Рисунок 4. Численные значения перемещений в узлах вдоль оси X, мм (для сетки из 21 узла).

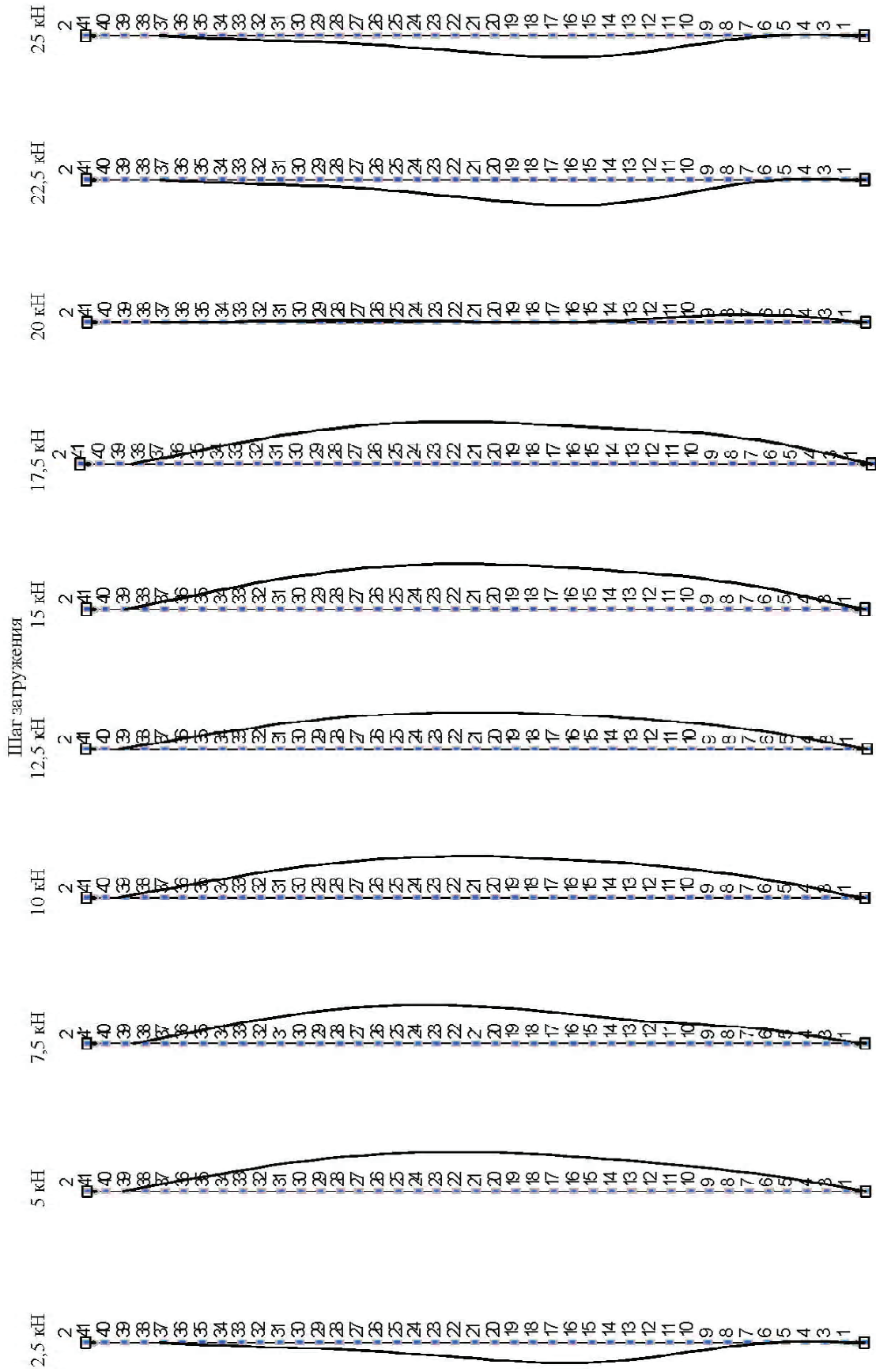


Рисунок 5. Отображение исходной и деформированной схемы стержня (для сетки из 41 узла).

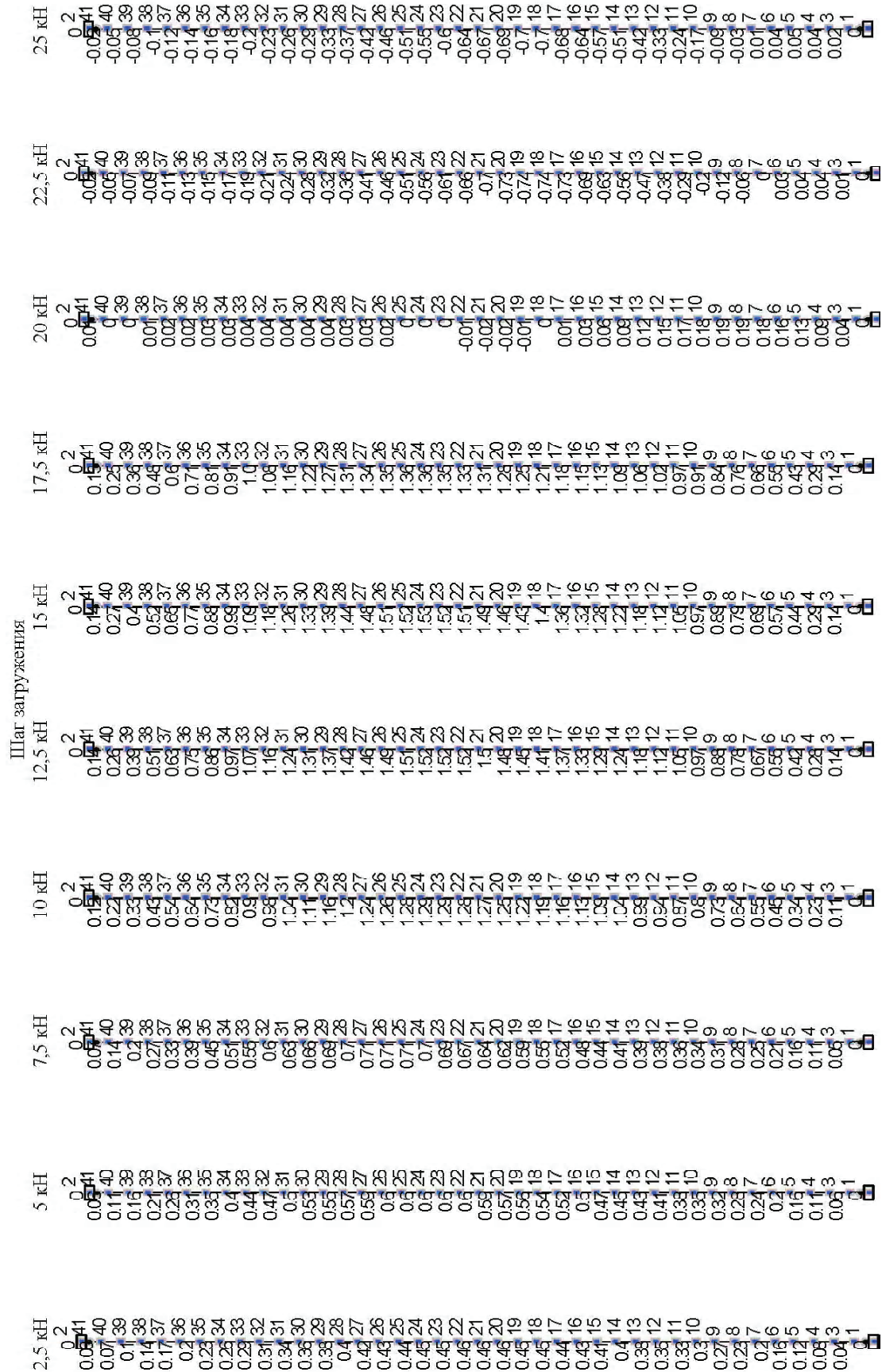


Рисунок 6. Численные значения перемещений в узлах вдоль оси X, мм (для сетки из 41 узла).

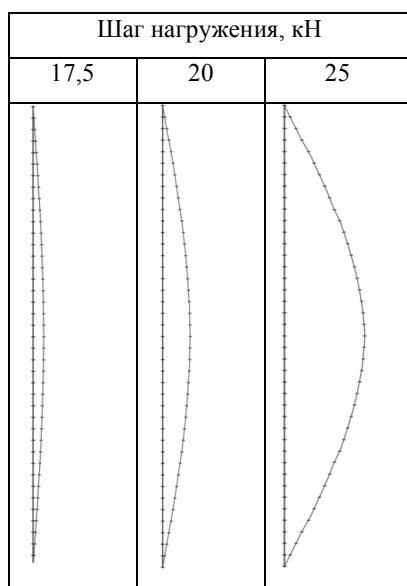


Рисунок 7. Отображение исходной и деформированной расчетной схемы стержня по варианту 2 (см. рис. 2).

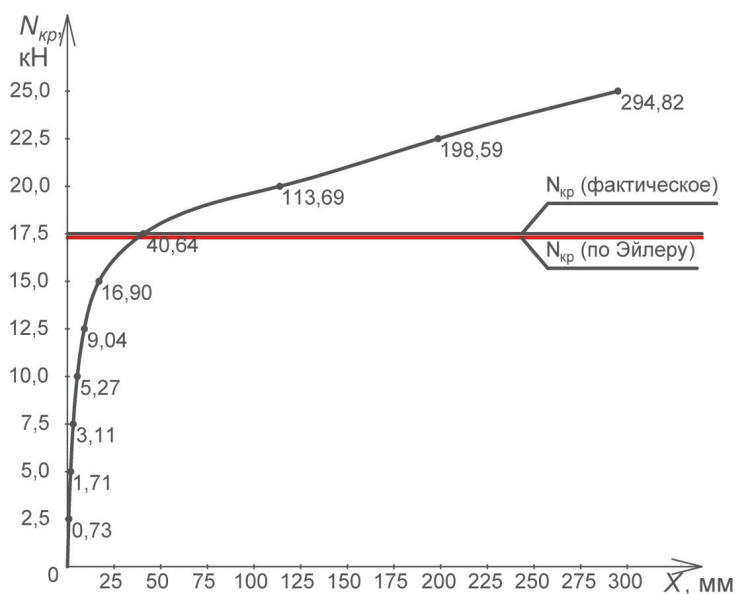


Рисунок 8. Зависимость «нагрузка – перемещение» для центрального узла стержня.

критической силой, найденной по Эйлеру ($N_{кр} = 17,3$ кН) и уточненной величиной критической силы составила 1,2 %, что объясняется высокой гибкостью исследуемого стержня ($\lambda = 224$).

- Представленные на рис. 3–8 результаты свидетельствуют о том, что тщательное КЭ моделирование сечений и конструктивных осо-

бенностей узловых соединительных элементов структурного покрытия позволяет получить более качественную картину процесса потери устойчивости.

- Принятый статический метод исследования процесса устойчивости в сочетании с КЭ анализом подтвердил свою значимость для решения указанных задач.

Литература

- Информация о системе Мархи [Электронный ресурс] // ООО «Монтаж ПК» / ООО «Монтаж ПК». – Режим доступа : http://www.monpk.ru/system_marhi.html.
- Система МАРХИ [Электронный ресурс] // Виктория Научно-проектный центр. – Режим доступа : <http://www.sistems-marhi.ru/marhi/.html>.
- Мушчанов, А. В. Учет особенностей конструктивных решений системы МАРХИ при разработке индивидуального проекта большепролетного структурного покрытия [Текст] / А. В. Мушчанов, И. В. Роменский // Научно-техническое творчество молодежи – путь к обществу, основанному на знаниях : сборник докладов Пятой Международной научно-практической конференции (Москва, 26–28 июня 2013 г.) / М-во образования и науки Росс. Федерации, ФГБОУ ВПО «Моск. гос. строит. ун-т». – Москва : МГСУ, 2013. – С. 111–115.

References

- Information of the Marchi system. Mode of access: http://www.monpk.ru/system_marhi.html. (in Russian)
- System of MARCHI. Mode of access: <http://www.sistems-marhi.ru/marhi/>. (in Russian)
- Mushchanov, A. V.; Romenskiy, I. V. Considerations of design solutions of MARCHI system for development of individual project with span structural coating. In: *Scientific and Technical Creativity of Youth – the path to a society based on knowledge: the collection of reports of the Fifth International Scientific and Practical Conference (Moscow, 26–28 June 2013)*. Moscow: MGSU, 2013, pp. 111–115. (in Russian)
- Gorokhov, Ye. V.; Mushchanov, V. F.; Nazim, Ya. V.; Romenskiy, I. V. Analysis and design of space metal structures. Makeevka: DonNACEA, 2012. 561 p. (in Russian)

4. Расчет и проектирование пространственных металлических конструкций [Текст] / Е. В. Горохов, В. Ф. Муцанов, Я. В. Назим, И. В. Роменский. – Макеевка : ДонНАСА, 2012. – 561 с.
5. 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.
6. Избранные методы строительной механики в расчетах пространственных конструкций [Текст] / Под общей ред. В. Ф. Муцанова. – Макеевка : ДонНАСА, 2006. – 292 с.
7. 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.
8. Jianguo, Caia. Development and analysis of a long-span retractable roof structure [Текст] / Caia Jianguo, Fenga Jian, Jiang Chao // *Journal of Constructional Steel Research*. 2014. Volume 92, January. P. 175–182.
9. Что такое ПСПК? [Электронный ресурс] / ООО «ВиСта» // Виста. Производство перекрестно-стержневых пространственных конструкций. – Режим доступа : <http://vista-marhi.ru/o-sisteme-MARHI/chto-takoe-PSPK/>.
10. 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. СНиП 53-100-2010. Стальные конструкции. Нормы проектирования [Текст]. – Москва : Строительство, 2010. – 205 с.
12. Eurocode 3: Design of steel structures – Part 1–1: General rules and rules for buildings [Текст] : EN 1993-1-1:2005. – Supersedes ENV 1993-1-1:1992. – Brussels : CEN, 2005. – 91 p.
13. Перельмутер, А. В. Устойчивость равновесия конструкций и родственные проблемы [Текст]. Т. 1: Общие теоремы. Устойчивость отдельных элементов механических систем / А. В. Перельмутер, В. И. Сливкер. – М. : СКАД СОФТ, 2010. – 681 с.
14. Металлические конструкции [Текст]. Расчет элементов и соединений с использованием программного комплекса SCAD Office : Учебное пособие / А. А. Семенов, А. И. Габитов, И. А. Поряев [и др.]. – М. : СКАД СОФТ, АСВ, 2012. – 328 с.
15. Муцанов, В. Ф. Строительная механика [Текст] : Конспект лекций. Часть 3 / В. Ф. Муцанов, Н. Р. Жук. – Макеевка : ДонНАСА, 2010. – 69 с.
16. Mushchanov, Volodymyr. Refined Design Models for Investigating the Stability of the Support Contour Membrane Roof on the Square and Elliptical Plans [Текст] / Volodymyr Mushchanov, Margarita Kashchenko, Arusyak Vardanyan // *Металлические конструкции*. 2014. Т. 20, № 4. С. 209–220.
5. Perelmuter, 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)
6. Mushchanov, V. F. (Ed.) Select methods of structural mechanics in analysis of space structures. Makeevka: DonNACEA, 2006. 292 p. (in Russian)
7. 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.
8. Jianguo, Caia; Jian, Fenga; Chao, Jiang. Development and analysis of a long-span retractable roof structure. In: *Journal of Constructional Steel Research*, 2014, Volume 92, January, pp. 175–182.
9. LLC «Vista». What are the grid structures. Accessed at: <http://vista-marhi.ru/o-sisteme-MARHI/chto-takoe-PSPK/>. (in Russian)
10. DBN V.2.6-198:2014. Steel structures. Design code. Kyiv: Ministry of Regional Development of Ukraine, 2014. 199 p. (in Ukrainian)
11. SNiP 53-100-2010. Steel structures. Design code. Moscow: Construction, 2010. 205 p. (in Russian)
12. Eurocode 3: Design of steel structures – Part 1–1: General rules and rules for buildings. EN 1993-1-1:2005. Brussels: CEN, 2005. 91 p.
13. Perelmuter, A. V.; Slivker, V. I. Balance stability of constructions and related problem. The first part: general theorem. Durability of individual elements of mechanical system. Moscow: SKAD SOFT, 2010. 681 p. (in Russian)
14. Semenov, A. A.; Gabitov, A. I.; Poryvaev, I. A.; Safullin, M. N.; Yurchenko, V. V. Metal Construction. Analysis of elements and connections based on software complex SCAD Office. Textbook. Moscow: SKAD SOFT, ASV, 2012. 328 p. (in Russian)
15. Mushchanov, V. F., Zhuk, N. R. Structural Mechanics: Lecture notes. Part 3. Makeevka: DonNACEA, 2010. 69 p. (in Russian)
16. Mushchanov, Volodymyr; Kashchenko, Margarita; Vardanyan, Arusyak. Refined Design Models for Investigating the Stability of the Support Contour Membrane Roof on the Square and Elliptical Plans. In: *Metal Constructions*, 2014, Volume 20, Number 4, pp. 209–220.
17. Mushchanov, Volodymyr; Gorokhov, Yevgen; Vardanyan, Arusyak; Kashchenko, Margarita; Nemova, Darya. Particular features of calculation and design of long-span membrane roofs. In: *SPbUCEMF 2015. Urban Civil Engineering and Municipal Facilities (18–20 March 2015, Saint-Petersburg, Russia)*. *Procedia Engineering*, 2015, Volume 117, pp. 1001–1012.

17. Particular futures of calculation and design of long-span membrane roofs [Текст] / Volodymyr Mushchanov, Yevgen Gorokhov, Arusyak Vardanyan [et al.] // SPbUCEMF 2015. Urban Civil Engineering and Municipal Facilities (18–20 March 2015, Saint-Petersburg, Russia). Procedia Engineering. 2015. Volume 117. P. 1001–1012.

Горохов Євген Васильович – доктор технічних наук, професор, завідувач кафедри металевих конструкцій, ректор Донбаської національної академії 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.

Мущанов Олександр Володимирович – стажист-викладач Донбаської національної академії будівництва і архітектури. Наукові інтереси: розрахунок і проектування просторових металевих конструкцій.

Горохов Евгений Васильевич – доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой металлических конструкций, ректор Донбасской национальной академии строительства и архитектуры. Президент Украинской ассоциации по металлическим конструкциям, 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.

Мущанов Александр Владимирович – стажер-преподаватель Донбасской национальной академии строительства и архитектуры. Научные интересы: расчет и проектирование пространственных металлических конструкций.

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.