

ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЧНОСТИ НЕСУЩИХ КОНСТРУКЦИЙ СООРУЖЕНИЯ ПРОМЫШЛЕННОГО НАЗНАЧЕНИЯ

*В.Г. АТАПИН, доктор техн. наук, профессор
(НГТУ, г. Новосибирск)*

Поступила 6 апреля 2015

Рецензирование 6 мая 2015

Принята к печати 15 мая 2015

Атапин В.Г. – 630073, г. Новосибирск, пр. К. Маркса, 20,
Новосибирский государственный технический университет,
e-mail: teormech@ngs.ru

Цель. Для устройства перекрытий сооружений промышленного назначения широко применяются фермы. Преимущество ферм проявляется при необходимости перекрытия больших пролетов. В связи с этим ставится задача исследовать напряженное и деформированное состояния несущих конструкций конкретного сооружения промышленного назначения (цех для металлообработки, склад) и на этой основе спроектировать рациональную компоновку конструкций. Несущие конструкции представляют собой пространственные фермы. **Методы.** Для расчета напряженного и деформированного состояний применяется метод конечных элементов. **Результаты.** В результате расчетов характерного фрагмента сооружения (угол стыка двух взаимно перпендикулярных участков) получено, что максимальное напряжение в стержне конструкции равно 139,6 МПа, максимальное вертикальное перемещение – 10,51 мм, а масса характерного объема – 51112,72 кг. Для практической реализации рассмотренной конструкции рекомендовано использовать трубы стальные квадратные 70×70×5 (мм) ГОСТ 8639–82, трубы стальные прямоугольные 150×100×8 (мм), 100×70×5 (мм) ГОСТ 8645–82, трубы стальные электросварные прямошовные 273×9 (мм), 219×8 (мм) ГОСТ 10704–91. **Обсуждение.** Разработанная математическая модель несущих конструкций сооружения адекватно отражает их напряженно-деформированное состояние. Так, рабочие напряжения, равные 139,6 МПа, меньше допускаемых напряжений 142,4 МПа и, следовательно, прочность конструкции обеспечена. Максимальное вертикальное перемещение в конструкции равно 10,51 мм, что меньше предельного вертикального прогиба 64 мм, определенного нормами проектирования. Следовательно, необходимая жесткость конструкции обеспечена. Расчеты стержней, испытывающих сжатие на устойчивость, показали, что условие устойчивости выполняется для всех стержней. В частности, для наиболее нагруженного элемента – колонна диаметром 219 мм, толщиной стенки 8 мм, длиной 1900 мм, рабочие напряжения 40,9 МПа меньше допускаемых напряжений на устойчивость 205,2 МПа. Разработанная конструкция удовлетворяет условиям прочностной надежности (условиям прочности, жесткости и устойчивости). По результатам расчетов характерного фрагмента сооружения разработан эскизный проект с необходимой конструкторской документацией (в статье не рассматривается).

Ключевые слова: проектирование, ферма, напряженное состояние, деформированное состояние, метод конечных элементов.

DOI: 10.17212/1994-6309-2015-2-32-38

Введение

В зависимости от конструктивных решений сооружений промышленного назначения целесообразно при их проектировании выделять систему элементов, которая в основном воспринимает действующую нагрузку. Для устрой-

ства перекрытий таких объектов широкое распространение получили, в частности, фермы. Преимущество ферм проявляется при необходимости перекрытия больших пролетов [1, 2]. В последнее время при возведении промышленных зданий стали использоваться конструкции из гнутых профилей, изготовленных холодной

прокаткой из рулонной оцинкованной стали толщиной до 3 мм [3, 4]. Однако применение этих конструкций сдерживается, в частности, из-за недостаточной экспериментально-теоретической базы данных о работе новых конструкций из гнутых профилей при статических и динамических нагрузках.

В настоящей работе рассматривается расчет силовых несущих конструкций сооружения промышленного назначения (цех для металлообработки, склад, крытая стоянка для автомобилей и т. п.). Вследствие больших габаритов и пролетов сооружения решение поставленной задачи возможно с применением ферменных конструкций [5–7].

1. Постановка задачи

Сооружение промышленного назначения предназначено для эксплуатации в климатических условиях Западной Сибири. В связи с этим при расчете несущих конструкций учитывается снеговая и ветровая нагрузка, а также собственный вес конструкций. Расчет напряженного и деформированного состояния несущих конструкций проводится методом конечных элементов [8–10] в среде программного комплекса APM WinMachine (версия 7.0, лицензия № 18201 от 16.01.2001 г.).

В соответствии с компоновочной схемой сооружения (рис. 1) принимаем к расчету следующие исходные данные:

- 1) длина (два участка, расположенных под прямым углом друг к другу) – 76,2 и 87,7 м;
- 2) ширина (по участкам) – 26,4 и 25 м;
- 3) рабочая высота – 2,6 м;
- 4) расстояние между опорами по ширине – 16 м;
- 5) расстояние между опорами по длине за исключением углового участка – 7 м;
- 6) в месте стыка двух взаимно перпендикулярных участков (угол) расстояние между опорами назначается в соответствии с компоновочной схемой фундамента сооружения.

По условиям эксплуатации дополнительно принимаем следующие данные для расчетов:

- 1) конструкция предназначена для эксплуатации в условиях Западной Сибири;
- 2) принимаем снеговой район – IV; нормативное значение веса снежного покрова для

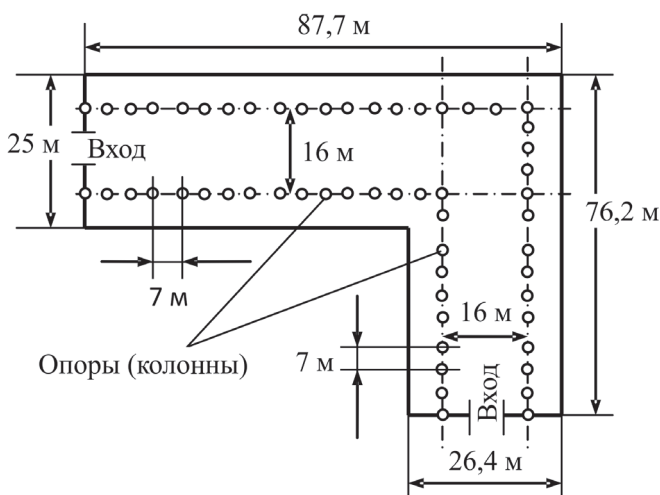


Рис. 1. Фундамент и схема расположения участков и опор

IV снегового района составляет 2,4 кПа [12, табл. 4, 13];

3) принимаем ветровой район – III; нормативное значение ветрового давления для III ветрового района составляет 0,38 кПа ([12, табл. 5, 13];

4) давление настила крыши составляет 0,488 кПа.

Таким образом, при исследовании напряженного и деформированного состояния несущих элементов сооружения расчетная суммарная нагрузка (давление) составляет:

$$q = 2,4 + 0,38 + 0,488 = 3,268 \text{ кПа.}$$

При рассмотрении компоновки несущих конструкций принимаем, что основным элементом является стержневая система, состоящая из жестко соединенных между собой стержней (рис. 2). В связи с этим для моделирования применяется стержневой пространственный конечный элемент с шестью степенями свободы. Узлы

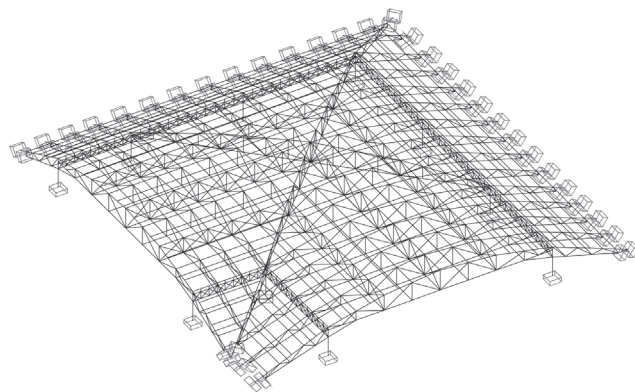


Рис. 2. Фрагмент соединения двух взаимно перпендикулярных участков (угол)

конечно-элементной сетки располагаются в местах естественного пересечения стержней. Расчетные условия:

- 1) условия опирания конструкции – жесткая заделка (на рис. 2 опоры показаны в форме параллелепипедов);
- 2) внешняя равномерно распределенная нагрузка интенсивностью 3,268 кПа, учитывающая нормативные значения веса снегового покрова и ветрового давления, а также расчетное давление настила крыши (рис. 3);

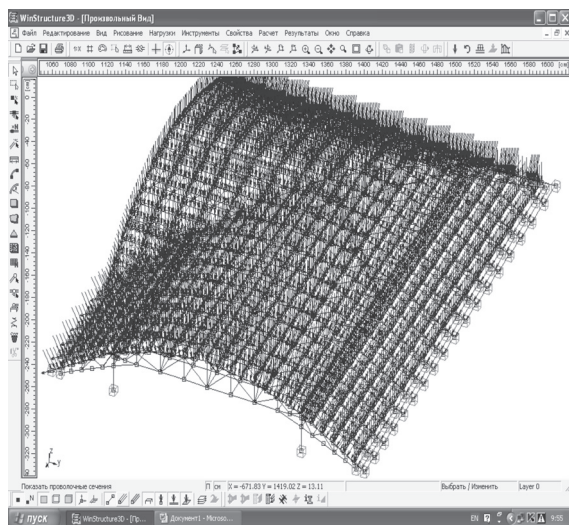


Рис. 3. Внешняя нагрузка

- 3) размеры поперечного сечения элементов конструкции принимаются по результатам расчетов согласно следующим стандартам:

- ГОСТ 8639–82. Трубы стальные квадратные;
- ГОСТ 8645–82. Трубы стальные прямоугольные;
- ГОСТ 10704–91. Трубы стальные электросварные прямошовные (трубы диаметром от 10 до 530 мм);
- 4) материал элементов конструкции – сталь с механическими свойствами основного металла не ниже, чем для стали Ст3 (ГОСТ 380–94).

2. Результаты расчетов и обсуждение

2.1. Оценка точности конечно-элементной сетки

Необходимая точность расчетов по методу конечных элементов достигается, как известно [8, 9], путем разбиения исходного стержня на

конечные элементы, т. е. за счет сгущения расчетной сетки. Исходные данные для расчетной схемы стержня (рис. 4):

- 1) длина наибольшего пролета (длина стержня) – 2 м;
- 2) равномерно распределенная нагрузка – 2,0 кН/м;
- 3) поперечное сечение стержня – размеры $70 \times 70 \times 5$ (мм), труба стальная квадратная ГОСТ 8639–82;

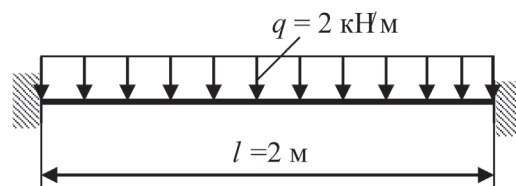


Рис. 4. Расчетная схема стержня

Результаты расчета приведены в таблице. Они показывают, что практически необходимая точность расчета обеспечивается уже при одном конечном элементе. Следовательно, при расчете несущих конструкций нет необходимости разбивать отдельные стержневые элементы, из которых составлена конструкция на два и более конечных элемента. Достаточно иметь естественную разбивку по местам пересечений отдельных стержней.

Результаты расчета

Число конечных элементов	1	2	4
Напряжения, МПа	24,724	25,998	25,999
Перемещения, мм	0,443	0,462	0,462

2.2. Основные результаты расчетов

Общее количество конечных стержневых элементов – 4037. На рис. 5 показано деформированное состояние выделенного углового фрагмента. Основные результаты расчета характерного фрагмента (угол стыка двух взаимно перпендикулярных участков) сводятся к следующему.

1. Максимальное напряжение – $\sigma_{\max} = 139,6$ МПа.
2. Максимальное вертикальное перемещение – $\delta_{\max} = 10,51$ мм.
3. Общая масса конструкции (характерного объема) – 5112,72 кг.

Расчет на прочность. Условие прочности имеет вид [11]

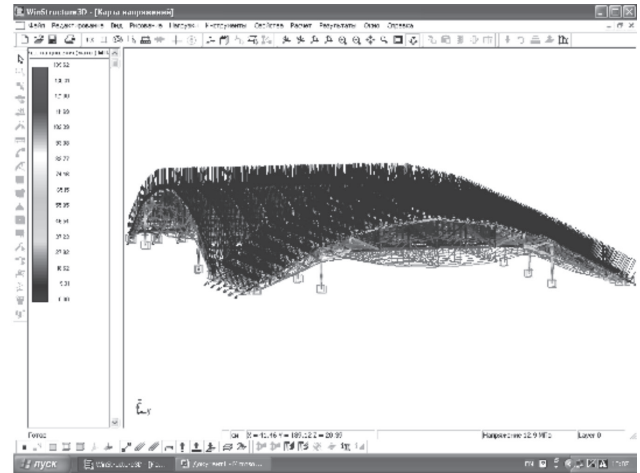
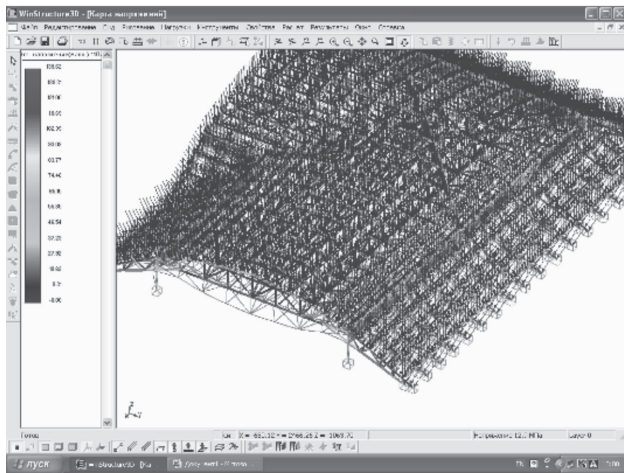


Рис. 5. Деформированное состояние

$$\sigma_{\max} \leq [\sigma],$$

где $[\sigma]$ – допускаемое напряжение, вычисляемое по формуле [12]

$$[\sigma] = \frac{\sigma_T \gamma_c}{\gamma_n \gamma_m}.$$

При использовании в качестве материала элементов конструкции стали Ст3 имеем предел текучести $\sigma_T = 216$ МПа (ГОСТ 380–94). Коэффициент надежности по материалу $\gamma_m = 1,05$ [12, табл. 2]. Коэффициент условий работы сжатых элементов пространственной решетки $\gamma_c = 0,9$ [12, табл. 6]. Коэффициент надежности $\gamma_n = 1,3$ [12, раздел 4]. Тогда допускаемое напряжение

$$[\sigma] = \frac{216 \cdot 0,9}{1,3 \cdot 1,050} = 142,4 \text{ МПа}.$$

Рабочие напряжения $\sigma_{\max} = 139,6 \text{ МПа} < [\sigma] = 142,4 \text{ МПа}$ и, следовательно, прочность конструкции обеспечена.

Расчет на жесткость. Согласно нормам [12] вертикальные предельные прогибы для покрытий и перекрытий, открытых для обзора при пролете $l = 24$ (12) м, вычисляются по формуле $l/250$. В нашем случае при пролете 16 м между колоннами предельный вертикальный прогиб составляет:

$$\delta_{\text{пред}} = 16 / 250 = 0,064 \text{ м} = 64 \text{ мм}.$$

Максимальное вертикальное перемещение в конструкции $\delta_{\max} = 10,51 \text{ мм}$ меньше предельного вертикального прогиба $\delta_{\text{пред}} = 64 \text{ мм}$, следовательно, необходимая жесткость конструкции также обеспечена.

Расчет на устойчивость. Расчет на устойчивость элементов, подверженных сжатию центрально приложенной силой N , выполняется по формуле [12]

$$\frac{N}{\varphi A} \leq R_y \gamma_c = 216 \cdot 0,95 = 205,2 \text{ МПа},$$

где $R_y = \sigma_T = 216$ МПа (сталь Ст3); коэффициент условий работы сжатых элементов конструкции $\gamma_c = 0,95$ ([12, табл. 6]). Значения φ принимаются в зависимости от гибкости λ элемента согласно [12, табл. 72].

Так, для колонны диаметром $D = 219$ мм, толщиной стенки 8 мм и длиной $l = 1900$ мм с наибольшим усилием сжатия $N = 210,4 \text{ кН}$ (рис. 6), которая имеет площадь поперечного сечения $A = 53 \text{ см}^2$, осевой момент инерции $I = 2956 \text{ см}^4$, коэффициент приведения длины μ [12, табл. 71, а], гибкость

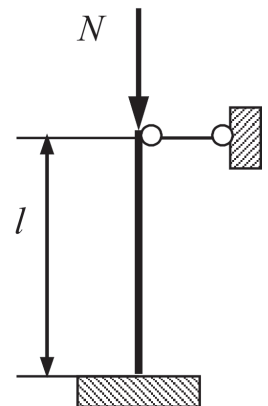


Рис. 6. Расчетная схема колонны

$$\lambda = \frac{\mu l}{\sqrt{I/A}} = \frac{0,7 \cdot 190}{\sqrt{2956/53}} = 17,8.$$

По табл. 72 [9] для $\lambda = 17,8$ и $\sigma_T = 216$ МПа имеем $\varphi = 0,97$. Тогда напряжение при сжатии колонны

$$\sigma = \frac{210,4 \cdot 10^{-3}}{0,97 \cdot 53 \cdot 10^{-4}} = 40,9 \text{ МПа} < 205,2 \text{ МПа},$$

т. е. условие устойчивости элемента выполняется. Проверка на устойчивость других элементов показала, что условие устойчивости везде выполняется.

Выводы

Расчеты на прочностную надежность несущих конструкций сооружения показали, что они удовлетворяют условиям прочности, жесткости и устойчивости. Для практической реализации предложено использовать трубы стальные квадратные $70 \times 70 \times 5$ (мм) [14], трубы стальные прямоугольные $150 \times 100 \times 8$ (мм), $100 \times 70 \times 5$ (мм) [15], для вертикальных стоек трубы стальные электросварные прямошовные 273×9 (мм), 219×8 (мм) [16]. По результатам расчетов характерного фрагмента сооружения разработан эскизный проект с необходимой конструкторской документацией (здесь не рассматривается).

Список литературы

1. Спицына Д.Н. Строительная механика стержневых машиностроительных конструкций / под ред. С.Д. Пономарева. – М.: Высшая школа, 1977. – 248 с.
2. Строительная механика. Стержневые системы / А.Ф. Смирнов, А.В. Александров, Б.Я. Лашеников, Н.Н. Шапошников; под ред. А.Ф. Смирнова. – М.: Стройиздат, 1981. – 512 с.
3. Айрумян Э.Л., Беляев В.Ф. Эффективные холодногнутые профили из оцинкованной стали – в массовое строительство // Монтажные и специальные работы в строительстве. – 2005. – № 11. – С. 10–17.
4. Атапин В.Г., Скиба В.Ю. Численное моделирование бескаркасных арочных покрытий // Обработка металлов (технология, оборудование, инструменты). – 2012. – № 4 (57). – С. 23–27.
5. Кузин Н.Я. Проектирование и расчет стальных ферм покрытий промышленных зданий: учебное пособие. – М.: АСВ, 1998. – 184 с.
6. Металлические конструкции: в 3 т.: т. 1: Элементы стальных конструкций: учебное пособие для строительных вузов / В.В. Горев, Б.Ю. Уваров, В.В. Филиппов, Г.И. Белый, Л.В. Енджиевский, И.И. Крылов, Я.И. Ольков, В.Ф. Сабуров; под ред. В.В. Горева. – Изд. 3-е, стер. – М.: Высшая школа, 2004. – 551 с. – ISBN 5-06-003695-2 (т. 1).
7. Металлические конструкции: в 3 т.: т. 2: Конструкции зданий: учебное пособие для строительных вузов / В.В. Горев, Б.Ю. Уваров, В.В. Филиппов, Г.И. Белый, В.Н. Валь, Л.В. Енджиевский, И.И. Крылов, Я.И. Ольков, В.Ф. Сабуров; под ред. В.В. Горева. – Изд. 2-е, испр. – М.: Высшая школа, 2002. – 528 с. – ISBN 5-06-003696-0 (vol. 2)
8. Расчеты машиностроительных конструкций методом конечных элементов: справочник / под общ. ред. В.И. Мяченкова. – М.: Машиностроение, 1989. – 520 с. – ISBN 5-217-00401-0.
9. Метод конечных элементов / П.М. Варвак, И.М. Бузун, А.С. Городецкий, В.Г. Пискунов, Ю.Н. Толокнов; под ред. П.М. Варвака. – Киев: Вища школа, 1981. – 176 с.
10. Gallagher R.H. Finite element analysis: fundamentals. – New Jersey, Englewood Cliffs: Prentice-Hall, 1974. – 420 p.
11. Атапин В.Г., Пель А.Н., Темников А.И. Сопротивление материалов. Базовый курс. Дополнительные главы: учебник. – Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2011. – 508 с. – (Серия «Учебники НГТУ»). – ISBN 978-5-7782-1750-8.
12. СНиП II–23–81. Стальные конструкции. – Актуализированная редакция. – М.: ЦПП, 2011. – 173 с.
13. СНиП 2.01.07–85. Нагрузки и воздействия. – Актуализированная редакция. – М.: ЦПП, 2011. – 85 с.
14. ГОСТ 8639–82. Трубы стальные квадратные. Сортамент. – Взамен ГОСТ 8639–68; введен 01.01.1983. – Переиздание с изменениями № 1, 2, 3, утвержденными в июне 1987 г., ноябре 1989 г., сентябре 1992 г. (ИУС 10-87, 2-90, 12-92). – М.: Стандартинформ, 2006. – 6 с.
15. ГОСТ 8645–68. Трубы стальные прямоугольные. Сортамент. – Введен 01.01.1969; взамен ГОСТ 8645–57. – Переиздание с изменениями 1–4. – М.: Издательство стандартов, [2010]. – 10 с. – Изменение № 4 введено 01.06.2010.
16. ГОСТ 10704–91. Трубы стальные электросварные прямошовные. – Взамен ГОСТ 10704–76; введен 01.01.1993. – Переиздание. – М.: Издательство стандартов, 1996. – 7 с.

OBRABOTKA METALLOV

(METAL WORKING AND MATERIAL SCIENCE)

N 2(67), April – June 2015, Pages 32–38

Investigation of the strength of carrier constructions of industrial building

Atapin V.G., D.Sc. (Engineering), Professor, e-mail: teormech@ngs.ru

Novosibirsk State Technical University, 20 Prospect K. Marksa, Novosibirsk, 630073, Russian Federation

Abstract

Purpose: Frameworks are widely used for the roof of industrial buildings. The advantage of frameworks appears when it is needed to cover long spans. In this context, the following problem is formulated: investigation of the concrete industrial buildings carrier constructions' (shop for metalworking, warehouse) state of stress and state of strain and design of the rational constructions. Carrier constructions correspond to the spatial frameworks. **Methods:** The finite elements method is used for the calculation of the state of stress and state of strain. **Results:** The calculation of the characteristic fragment of the building (the angle of intersection of two mutually perpendicular sections) found that the maximum stress in the rod is 139.6 MPa, the maximum vertical displacement is 10.51 mm, and weight is 51112.72 kg. For practical realization of the considered structures is recommended to use the steel square pipe 70×70×5 (mm) GOST 8639-82, rectangular steel pipes 150×100×8 (mm), 100×70×5 (mm) GOST 8645-82, welded steel pipes 273×9 (mm), 219×8 (mm) GOST 10704-91. **Discussion:** The numerical model of carrier constructions of building adequately reflects their stress-strain state. Thus, final stresses are equal to 139.6 MPa that is less than working stress (142.4 MPa) and, consequently, the structural strength is ensured. The maximum vertical displacement is 10.51 mm that is less than the maximum permissible vertical bend (64 mm), specified by design standards, therefore, rigidity is ensured. Stability calculations of rods under compression showed that the condition of stability is performed for all rods. In particular, for the most loaded element (a column with 219 mm in diameter of, wall thickness of 8 mm, 1900 mm in length) real pressure of 40.9 MPa is less than the rigidity working stress of 205.2 MPa. Thus, the developed design satisfies the strength reliability conditions (norms of strength, stiffness and stability).

Keywords:

design, framework, state of stress, state of strain, finite elements method

DOI: 10.17212/1994-6309-2015-2-32-38

References

1. Spitsyna D.N. *Stroitel'naya mekhanika sterzhnevyykh mashinostroitel'nykh konstruksii* [Structural mechanics core engineering designs]. Moscow, Vysshaya shkola Publ., 1977. 248 p.
2. Smirnov A.F., Aleksandrov A.V., Lashchenikov B.Ya., Shaposhnikov N.N. *Stroitel'naya mekhanika. Sterzhnevyye sistemy* [Building mechanics. Bar Systems]. Moscow, Stroiizdat Publ., 1981. 512 p.
3. Airumyan E.L., Belyaev V.F. Effektivnye kholodnognutye profili iz otsinkovannoi stali – v massovoe stroitel'stvo [Effective coldly bent structures from galvanized steel – in mass construction]. *Montazhnye i spetsial'nye raboty v stroitel'stve – Erecting and special works in construction*, 2005, no. 11, pp. 10–17.
4. Atapin V.G., Skeebe V.Yu. Chislennoe modelirovanie beskarkasnykh arochnykh pokrytii [Numerical simulation of frameless arched covers]. *Obrabotka metallov (tekhnologiya, oborudovanie, instrumenty) – Metal Working and Material Science*, 2012, no. 4 (57), pp. 23–27.
5. Kuzin N.Ya. *Proektirovanie i raschet stal'nykh ferm pokrytii promyshlennykh zdaniy* [Design and calculation of steel roof trusses industrial buildings]. Moscow, ASV Publ., 1998. 184 p.
6. Gorev V.V., Uvarov B.Yu., Filippov V.V., Belyi G.I., Endzhievskii L.V., Krylov I.I., Ol'kov Ya.I., Saburov V.F. *Metallicheskie konstruksii*. V 3 t. T. 1: *Elementy stal'nykh konstruksii* [Metal structures. In 3 vol. Vol. 1: Elements of steel structures]. Moscow, Vysshaya shkola Publ., 2004. 551 p. ISBN 5-06-003695-2 (vol. 1)
7. Gorev V.V., Uvarov B.Yu., Filippov V.V., Belyi G.I., Val' V.N., Endzhievskii L.V., Krylov I.I., Ol'kov Ya.I., Saburov V.F. *Metallicheskie konstruksii*. V 3 t. T. 2. *Konstruksii zdaniy* [Metal structures. In 3 vol. Vol. 2: Construction of Buildings]. Moscow, Vysshaya shkola Publ., 2002. 528 p. ISBN 5-06-003696-0 (vol. 2)

8. Myachenkov V.I., ed. *Raschety mashinostroitel'nykh konstruksii metodom konechnykh elementov. Spravochnik* [Calculations of machine-building structures by the method of finite elements. Reference]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1989. 520 p. ISBN 5-217-00401-0
9. Varvak P.M., Buzun I.M., Gorodetskii A.S., Piskunov V.G., Toloknov Yu.N. *Metod konechnykh elementov* [The finite element method]. Kiev, Vyshha shkola Publ., 1981. 176 p.
10. Gallagher R.H. *Finite element analysis: fundamentals*. New Jersey, Englewood Cliffs, Prentice-Hall, 1975. 416 p.
11. Atapin V.G., Pel' A.N., Temnikov A.I. *Soprotivlenie materialov. Bazovyi kurs. Dopolnitel'nye glavy* [Strength of materials. Basic course. Additional chapters]. Novosibirsk, NSTU Publ., 2011. 508 p. ISBN 978-5-7782-1750-8
12. *SNiP II-23-81. Stal'nye konstruksii* [Building regulations II-23-81. Steel structures]. Moscow, TsPP Publ., 2011. 173 p.
13. *SNiP 2.01.07-85. Nagruzki i vozdeistviya* [Building regulations 2.01.07-85. Loads and impacts]. Moscow, TsPP Publ., 2011. 85 p.
14. *GOST 8639-82. Truby stal'nye kvadratnye. Sortament* [State Standard 8639-82. Square steel tubes. Range]. Moscow, Standartinform Publ., 1997. 6 p.
15. *GOST 8645-68. Truby stal'nye pryamougol'nye. Sortament* [State Standard 8645-68. Rectangular steel tubes. Range]. Moscow, Standartinform Publ., 2010. 10 p.
16. *GOST 10704-91. Truby stal'nye elektrosvarnye pryamoshovnye* [State Standard 10704-91. Electrically welded steel line-weld tubes. Range]. Moscow, Standartinform Publ., 1997. 15 p.

Received 6 April 2015

Revised 6 May 2015

Accepted 15 May 2015