



ISSN 1993-3517 online

**МЕТАЛЛИЧЕСКИЕ КОНСТРУКЦИИ
МЕТАЛЕВІ КОНСТРУКЦІЇ
METAL CONSTRUCTIONS**

2017, ТОМ 23, НОМЕР 4, 153–161
УДК 624.042.2

(17)-0367-1

НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРУЕМОЕ СОСТОЯНИЕ СТРУКТУРНОЙ КОНСТРУКЦИИ С УЧЕТОМ ЗАКРЕПЛЕНИЯ ЭЛЕМЕНТОВ

В. Н. Васильев, А. Н. Миронов, А. В. Безушко

*ГОУ ВПО «Донбасская национальная академия строительства и архитектуры»,
2, ул. Державина, г. Макеевка, ДНР, 86123.
E-mail: wn1951@mail.ru*

Получена 20 октября 2017; принята 24 ноября 2017.

Анотация. В статье представлены результаты расчета узлового соединения пространственного блока структурного покрытия промышленного здания. Описана подробная методика выполнения расчета узлового соединения в пространственной постановке с применением программного комплекса «Lira». Приведены этапы проверки адекватности расчетной схемы реальной конструктивной форме узла. На основании результатов проведенных расчетов сделаны выводы и определены цели и задачи экспериментального исследования узлового соединения структурного покрытия. Адекватность (математика) – соответствие, совпадение каких-либо параметров, удовлетворительное для определенных целей.

Ключевые слова: структурное покрытие, узловое соединение, фасонка, напряженно-деформируемое состояние.

НАПРУЖЕНО-ДЕФОРМОВАНИЙ СТАН СТРУКТУРНОЇ КОНСТРУКЦІЇ З УРАХУВАННЯМ ЗАКРІПЛЕННЯ ЕЛЕМЕНТІВ

В. М. Василев, А. М. Миронов, А. В. Безушко

*ДОНУ ВПО «Донбаська національна академія будівництва і архітектури»,
2, вул. Державіна, м. Макіївка, ДНР, 86123.
E-mail: wn1951@mail.ru*

Отримана 20 жовтня 2017; прийнята 24 листопада 2017.

Анотація. У статті представлені результати розрахунку вузлового з'єднання просторового блока структурного покриття промислового будинку. Описана докладна методика виконання розрахунку вузлового з'єднання в просторовій постановці з застосуванням програмного комплексу «Lira». Наведені етапи перевірки адекватності розрахункової схеми реальній конструктивній формі вузла. На основі результатів проведених розрахунків зроблено висновки та визначено цілі та завдання експериментального дослідження вузлового з'єднання структурного покриття. Адекватність (математика) – відповідність, збіг будь-яких параметрів, задовільний для певних цілей.

Ключові слова: структурне покриття, вузлове з'єднання, фасонки, напружено-деформований стан.

STRESS-STRAIN STATE OF A STRUCTURAL CONSTRUCTION WITH ALLOWANCE FOR FASTENING ELEMENTS

Volodymyr Vasylev, Andrei Mironov, Anna Bezushko

Donbas National Academy of Civil Engineering and Architecture,

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

E-mail: vn1951@mail.ru

Received 20 October 2017; accepted 24 November 2017.

Abstract. The article presents the results of the calculation of the nodal connection of the spatial block of the structural covering of an industrial building. A detailed technique for performing the calculation of a junction connection in a spatial setting using the Lira software is described. The stages of checking the adequacy of the design scheme for the real constructive form of the node are given. Based on the results of the calculations, conclusions were drawn and the goals and objectives of the experimental study of the nodal connection of the structural coating were determined. Adequacy (mathematics) is the correspondence, the coincidence of any parameters, satisfactory from the point of view of certain goals.

Keywords: structural coating, nodal connection, shape, stress-deformable state.

Введение

Структурные конструкции, благодаря своим особенностям, соответствуют требованиям архитектурной выразительности и высокой степени заводской готовности. Их применяют для более эффективного промышленного производства строительных конструкций, что позволяет снизить затраты благодаря специализации производства и рациональности конструктивных решений.

Структурные конструкции позволяют практически неограниченное разнообразие конструктивных форм и решений.

Широкое применение структурных конструкций для покрытий промышленных зданий в настоящее время сдерживается сложностью конструктивных решений узловых соединений, т. е. необходим простой и технологичный узел, изготавливаемый в пределах традиционной технологии завода металлоконструкций.

Основная часть

Предпосылки к выполнению поставленной задачи

Ранее было представлено обоснование необходимости совершенствования узловых соединений пространственно-стержневых конструкций для покрытий промышленных зданий, разделения элементов структуры на пояса и прогоны;

обеспечения неразрезности поясов и прогонов и шарнирного сопряжения раскосов в узлах [1, 2, 3, 4].

Далее был выполнен ряд расчетов пространственных блоков структурных плит с подвесным крановым оборудованием, варьированием геометрическими параметрами ячейки и блока структуры, установкой дополнительных промежуточных опор. Что позволило сделать следующие выводы:

- ячейки правильной формы, размерами $2,0 \times 2,0$, $2,2 \times 2,2$ м, использовать рациональнее благодаря тому, что элементы будут одинаково работать в обоих направлениях;
- ортогональная система является наиболее рациональной с элементами решетки равной длины;
- увеличение высоты ячейки от $1,4 \times 2,0$ м приводит к уменьшению усилий на 28–35 %;
- введение в схему дополнительных промежуточных опор позволяет уменьшить усилия в раскосах на 55–70 % для прямоугольных в плане покрытий, однако не несет существенных изменений для квадратных.

Кроме того, эти расчеты позволили выбрать рациональный блок покрытия и усилия в элементах узлового соединения, которые будут использованы для расчета этого соединения в пространственной постановке.

Создание расчетной модели узлового соединения

На рисунке 1 представлено разработанное авторами болтовое узловое соединение структурной конструкции покрытия. Неразрезной прогон 1 направлен вдоль цеха и воспринимает нагрузку от конструкций скатной крыши. Пояс 2 направлен вдоль ската крыши. Сопряжение прогона 1 и пояса 2 – этажное. Прогон 1 соединяется с поясом 2 через фасонки 5 с помощью монтажных болтов. Гнутые фасонки 4 раскосов 3 соединяются в узлах с поясом 2 с помощью одного монтажного болта 6. Узловые фасонки 4 к раскосам 3 и фасонки 5 к поясу 2 крепятся с помощью заводской сварки.

Расчетная модель узла создана в программном комплексе Лира, в котором реализован метод конечных элементов. Листовые фасонки и стержни из квадратных труб разбиты на два типа конечных элементов № 34 (универсальный пространственный шестиузловой изопараметрический КЭ) и № 36 (универсальный пространственный

ный восьмиузловой изопараметрический КЭ). Физические характеристики конечных элементов расчетной модели представлены в табл.

Пояс, прогон и гнутые фасонки пояса распилены по всем направлениям, представляя собой отдельные элементы. Фасонки прогона привариваются к поясу, поэтому в этом месте между ними подразумевается монолитная связь. В элементах, соединяемых между собой болтами, по контурам отверстий болтов были объединены перемещения по трем взаимно перпендикулярным направлениям.

Проверка адекватности расчетной схемы

Для проверки схемы прикладывалась пробная нагрузка в 100 кН к поясу и прогону поочередно в виде сосредоточенной узловой нагрузки. Анализируются деформируемая схема и порядок величин перемещений в соответствующих направлениях (до 0,15 мм), результаты показаны на рисунках 2, 3.

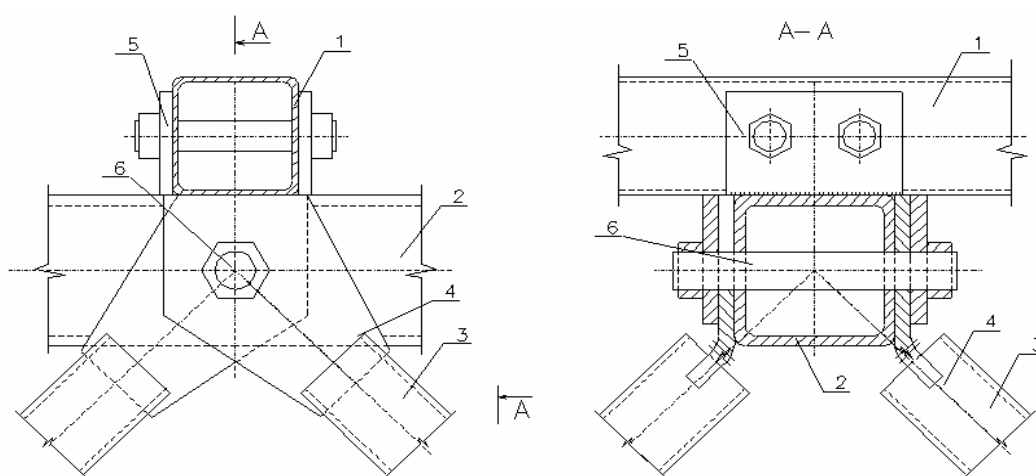


Рисунок 1. Схема узлового соединения: 1 – неразрезной прогон; 2 – пояс; 3 – раскосы; 4 – гнутые фасонки пояса; 5 – фасонки прогона; 6 – горизонтальный болт, соединяющий гнутые фасонки с поясом.

Таблица. Физические характеристики конечных элементов расчетной схемы

Название характеристики	Размерность	Величина
Модуль упругости E	кН/см ²	20 400
Коэффициент Пуассона	–	0,3
Толщина	см	0,4...0,8
Объемный вес	кг/м ³	7 850
Расчетное сопротивление R_y	МПа	245

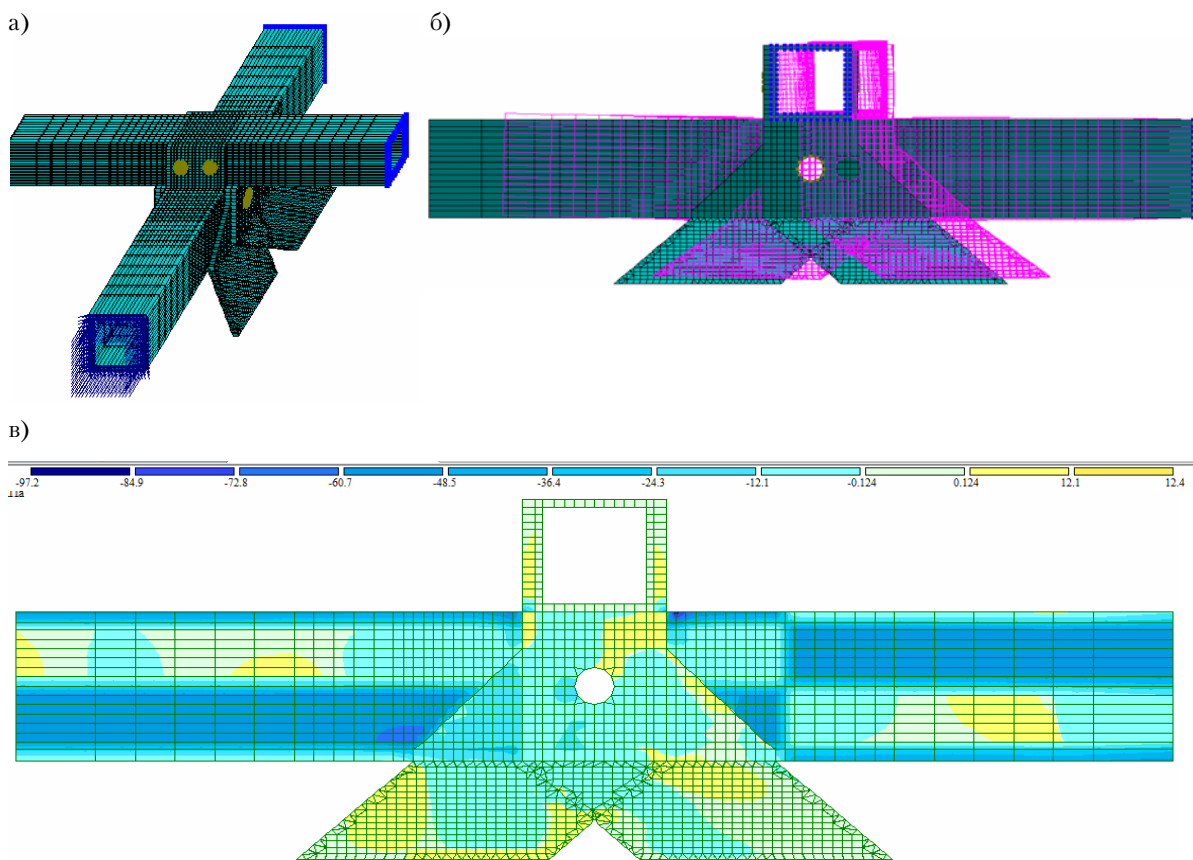


Рисунок 2. Приложение пробной нагрузки к поясу: а) схема загрузки; б) деформируемая схема; в) схема распределения изополей напряжений по оси действия нагрузки.

При приложении вертикальной сосредоточенной симметричной узловой нагрузки к прогону деформации также были логичными.

При этом же нагружении проверялась симметричность усилий в элементах. Т. к. в исходной схеме симметрии не было, временно пошагово убирались элементы и связи с целью определения причины этого. На примере прогона: симметрия усилий наблюдалась только когда из схемы было исключено все, включая группу объединенных перемещений.

Приложение нагрузки к расчетной модели и определение результатов расчета

Теоретическое исследование проводилось на статическое нагружение. Нагрузки прикладывались в виде распределенного по площади единичного давления к узлам элементов в местной системе координат по направлениям, соответ-

ствующим направлениям действия усилий. К гнутым фасонкам пояса усилия, действующие в раскосах, передавались по линии сварного шва, разложенные с учетом угла наклона на две составляющие по горизонтальной и вертикальной оси. Также учитывалась знакопеременность усилий в раскосах, были просчитаны несколько вариантов схем, так как результаты для всех схем были аналогичны, рассмотрим на примере одного нагружения.

По результатам расчета на рисунке 4 представлена деформируемая схема узла.

Были определены эквивалентные напряжения по 4-й теории прочности с целью выявления наиболее опасных зон соединения. На рисунке 5 представлена гнутая фасонка (№ 1 и 2). Наибольшие напряжения наблюдаются в зоне отверстия и в зоне изгиба фасонки. Аналогично и с другой стороны.

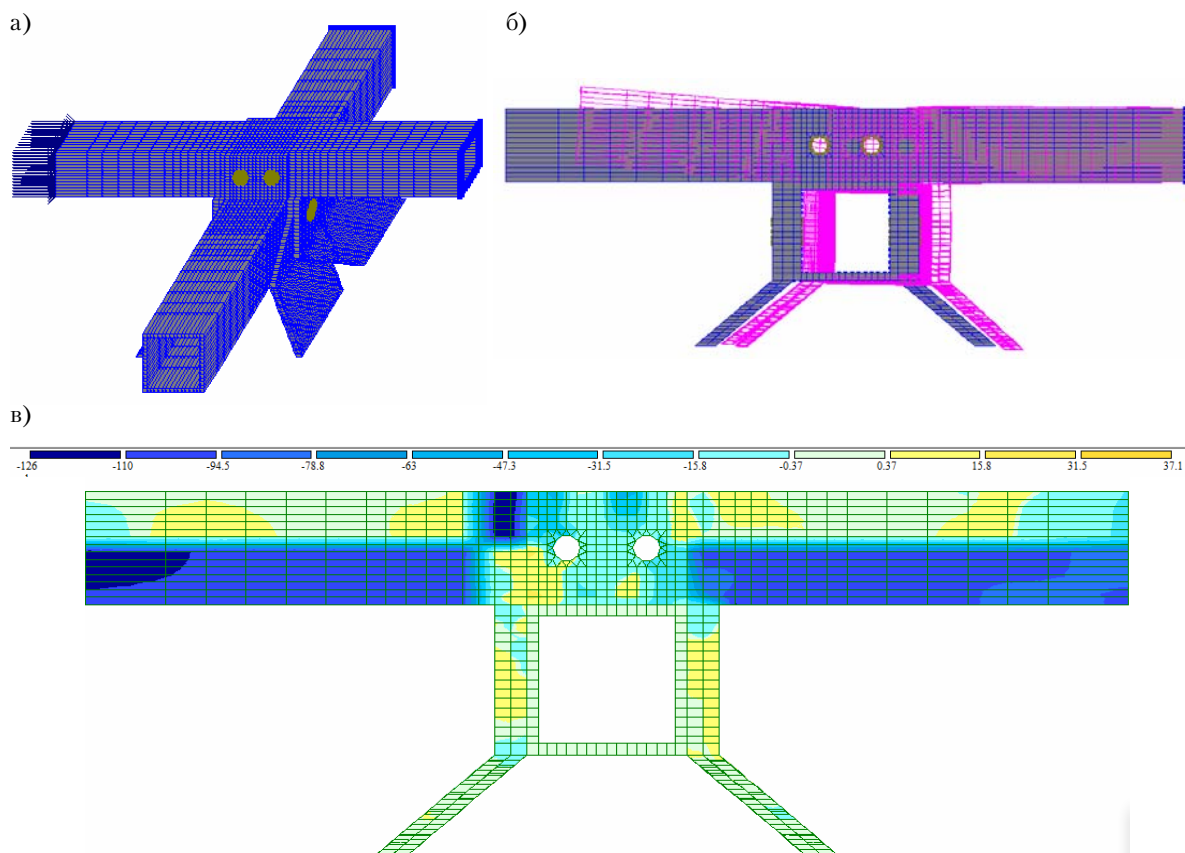


Рисунок 3. Приложение пробной нагрузки к прогону: а) схема загрузки; б) деформируемая схема; в) схема распределения изополей напряжений по оси действия нагрузки.

В поясе также наибольшие напряжения возникают в зоне отверстия, вблизи места приложения нагрузки. В фасонке прогона наиболее опасными стали зоны отверстий и зона сварного шва (связывающего фасонку и пояс). В самом прогоне – места сопряжения с поясом и фасонками пояса (рис. 6).

Далее будет продолжаться работа в направлении уточнения расчетной схемы, формы фасонки, будут рассмотрены варианты с различной сеткой КЭ, чтобы прийти к наиболее оптимальной, и расчеты с учетом физической нелинейности.

Выводы

На основании выполненной работы следует сделать следующие выводы:

1. По результатам расчета были определены зоны с большими и малыми концентрациями напряжений. Наибольшие напряжения в узлом соединении наблюдаются в зонах от-

верстий, зонах изгиба фасонки и в зонах сварных швов.

2. Необходимо уточнение оптимальной формы гнутых фасонки, что существенно влияет на напряженно-деформируемое состояние. Например, если отсечь зоны с малыми величинами напряжений и конструктивно исключить концентраторы напряжений, можно получить фасонки с более рациональным распределением напряжений по ее площади. Можно предположить, что оптимальное очертание граней фасонки должно повторять линии касательных напряжений, возникающих в них. Однако при этом необходимо учитывать конструктивные особенности узлового элемента.
3. Результаты расчета необходимо сравнить с данными, полученными экспериментальным путем.
4. Задачи планируемого экспериментального исследования:

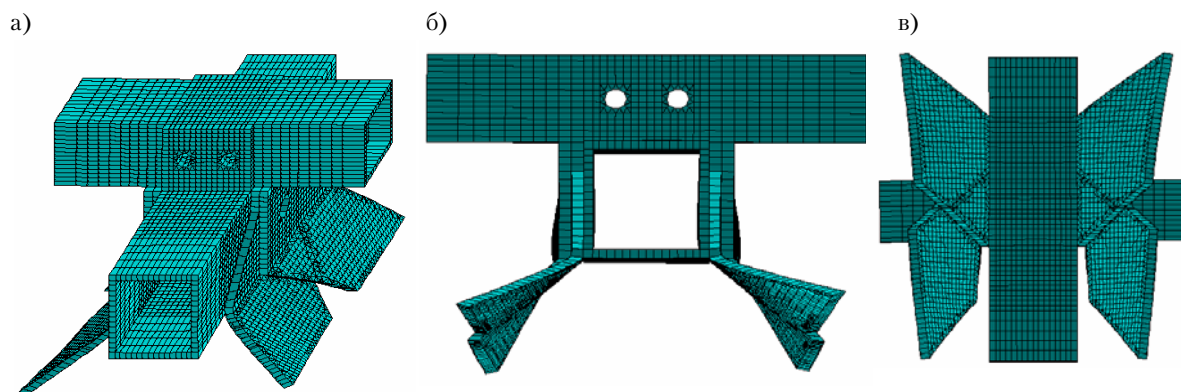


Рисунок 4. Деформируемая схема: а) общий вид; б) вид сбоку; в) вид снизу.

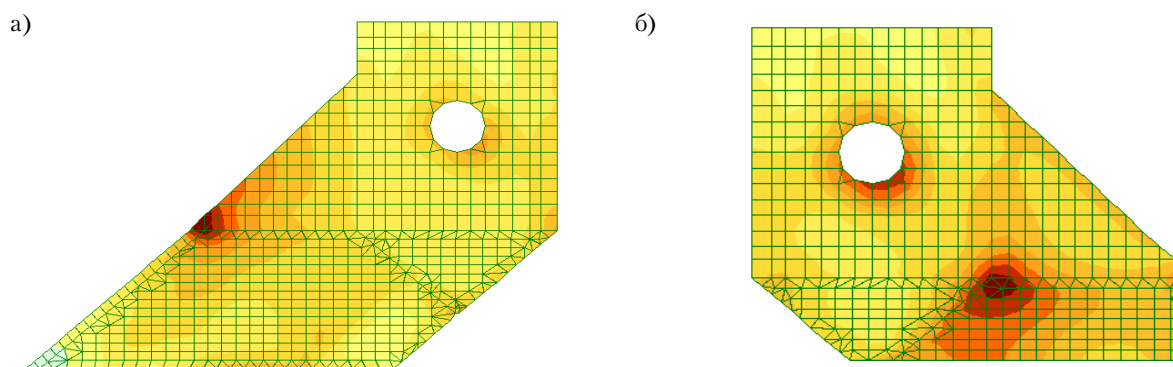


Рисунок 5. Изополя напряжений в гнутых фасонках пояса: а) гнутая фасонка 1; б) гнутая фасонка 2.

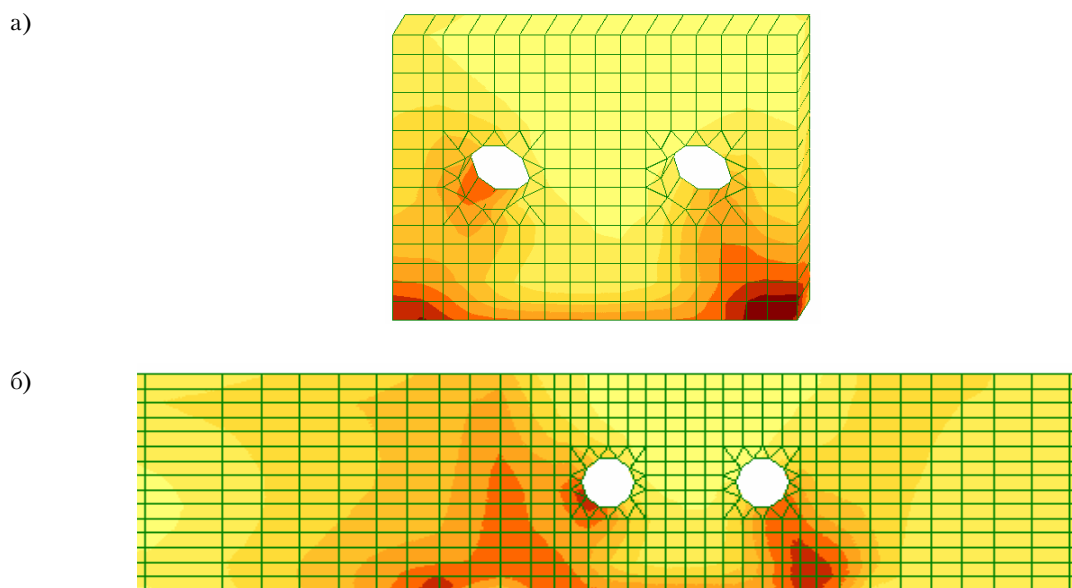


Рисунок 6. Изополя напряжений в: а) фасонке прогона; б) прогоне. Вид сбоку.

- изготовление экспериментальной модели на основе теорий размерностей и подобия;
- создание напряженно-деформируемого состояния, приближенного к действительной работе элементов;

- выявление рациональной формы фасонки;
- определение рационального соотношения толщин фасонки и стержневых элементов;
- определение допусков на проектное положение опорного узла.

Литература

1. Статические испытания узлов соединения структурного покрытия «ИНЕКО» [Текст] / В. Н. Васылев, В. Ф. Мушчанов, А. М. Алехин [и др.] // Металлические конструкции. 2016. Т. 22, № 3. С. 157–170.
2. Васылев, В. Н. Конструктивные решения узлов сопряжения структурных покрытий для промышленных зданий [Текст] / В. Н. Васылев, А. В. Безушко // Металлические конструкции. 2016. Т. 22, № 4. С. 193–205.
3. Безушко, А. В. Выбор рациональных конструктивных форм структурных покрытий промышленных зданий [Текст] / А. В. Безушко // Строительство – формирование среды жизнедеятельности: сборник трудов XX Международной межвузовской научно-практической конференции студентов, магистрантов, аспирантов и молодых учёных / ФГБОУ ВО «Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет». – М.: Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет, 2017. – С. 240–242.
4. Безушко, А. В. Совершенствование конструктивной формы структурных покрытий промышленных зданий [Текст] / В. Н. Васылев, А. В. Безушко // 7-я Международная научно-практическая конференция молодых учёных и студентов «Опыт прошлого – взгляд в будущее»: материалы конференции / М-во образования и науки Российской Федерации, Федеральное гос. бюджетное образовательное учреждение высш. проф. образования «Тульский Гос. ун-т» [и др.]. – Тула: ТулГУ, 2017. – С. 182–184.
5. Царитова, Н. Г. Автоматизированное проектирование стержневых систем регулярной структуры с шарнирными узлами [Текст]: дис. ... канд. техн. наук: 05.23.01 / Царитова Надежда Геннадиевна. – Ростов н/Д, 2015. – 161 с.
6. Aguirre, A. Carlos. Structural properties of connections for rack structures [Текст] / Carlos Aguirre A. // Connections in Steel Structures V. Behaviour, Strength and Design: Proceedings of the Fifth International Workshop. June 3–4, 2004 / Edited by F. S. K. Billiard, A. M. Gresnigt, G. J. van der Vegte. – Delft: Delft University of Technology, 2005. – P. 233–242.
7. Makowski, Z. S. Development of jointing systems for modular prefabricated steel space structures [Текст] / Z. S. Makowski // Lightweight Structures

References

1. Vasylev, Volodymyr; Mushchanov, Volodymyr; Alyokhin, Andrey; Mironov, Andrey; Bezushko, Anna. Static testing of the node connection of space structural «INEKO». In: *Metal Constructions*, 2016, Vol. 22, No. 3, pp. 157–170. (in Russian)
2. Vasylev, Volodymyr; Bezushko, Anna. Constructive solutions of the joint connection of space structural for industrial buildings. In: *Metal Constructions*, 2016, Vol. 22, No. 4, pp. 193–205. (in Russian)
3. Bezushko, A. V. The choice of rational constructional forms of structural coverings of industrial buildings. In: *National Research University Moscow State University of Civil Engineering. Building – formation of life-cycle environment: work collection of the XX International interacademy scientific practical conference of students, masters, and young scientists*. Moscow: National Research University Moscow State University of Civil Engineering, 2017, pp. 240–242. (in Russian)
4. Bezushko, A. V., Vasylev, V. N. The development of a construction form of structural coverings of industrial buildings. In: *The 7th International scientific-practical conference of young scientist and students «Past experience – a look into the future»: conference materials*. Tula: TulSU, 2017, pp. 182–184. (in Russian)
5. Tsaritova, N. G. The automated design of rod systems of regular structure with hinged knots: the thesis submitted for the Scientific Degree on competition of Candidate of Engineering: 05.23.01. Rostov-on-Don, 2015. 161 p. (in Russian)
6. Aguirre, A. Carlos. Structural properties of connections for rack structures. In: *Connections in Steel Structures V. Behavior, Strength and Design: Proceedings of the Fifth International Workshop. June 3–4, 2004 / Edited by F. S. K. Billiard, A. M. Gresnigt, G. J. van der Vegte*. Delft: Delft University of Technology, 2005, pp. 233–242.
7. Makowski, Z. S. Development of jointing systems for modular prefabricated steel space structures. In: *Lightweight Structures in Civil Engineering: Proceedings of the international symposium. Warsaw, Poland, 24–28 June, 2002 / Ed. J. B. Obrebski*. Warsaw: Wydawnictwo Naukowe, 2002, pp. 17–41.
8. Shalobyta, N. N.; Shalobyta, T. P. The intense deformed state and calculation procedure on durability of knot of connection of rod elements of metal structural designs like «BrGTU». In: *Budownictwo o zoptymalizowanym potencjale energetycznym / Praca*

- in Civil Engineering: Proceedings of the international symposium. Warsaw, Poland, 24–28 June, 2002 / Ed. J. B. Obrebski. – Warsaw : Wydawnictwo Naukowe, 2002. – P. 17–41.
8. Шалобыта, Н. Н. Напряженно-деформированное состояние и методика расчета на прочность узла соединения стержневых элементов металлических стержневых элементов металлических структурных конструкций типа «БрГТУ» [Текст] / Н. Н. Шалобыта, Т. П. Шпლობыта // Budownictwo o zoptymalizowanym potencjale energetycznym / Praca zbiorowa pod redakcją Tadeusza Bobki, Jarosława Rajczyka. – Częstochowa : Wydawnictwo Politechniki Częstochowskiej, 2010. – С. 279–289.
 9. Chilton, J. Space Grid Structures [Текст] / J. Chilton. – Oxford : Architectural Press, 2000. – 191 p. – ISBN 0-7506-3275-5.
 10. Рекомендации по проектированию структурных конструкций [Текст] / ЦНИИСК им. Кучеренко Госстроя СССР. – Москва : Стройиздат, 1984. – 303 с.
 11. Анализ существующих узлов сопряжения пространственных конструкций и разработка сборно-разборного узлового элемента [Текст] / И. С. Инжутов, П. А. Дмитриев, С. В. Деордиев, В. В. Захарюта // Вестник МГСУ. 2013. № 3. С. 61–71.
 12. Окаб, А. К. Анализ соединений для модульных сборно-разборных пространственных конструкций [Электронный ресурс] / А. К. Окаб // Нефтегазовое дело : Электронный научный журнал. 2015. № 2. С. 206–216. Режим доступа : http://ogbus.ru/issues/2_2015/ogbus_2_2015_p206-216_OkabAK_ru.pdf.
 13. Optimizing structural roof form for lifecycle energy efficiency [Текст] / N. Hubermana, D. Pearlmuttera, E. Galb, I. A. Meira // Energy and Buildings. 2015. Volume 104. P. 336–349
 14. Caia, Jianguo. Development and analysis of a long span retractable roof structure [Текст] / Jianguo Caia, Jian Fenga, Chao Jiang // Journal of Constructional Steel Research. 2014. Volume 92. P. 175–182.
 15. Schumacher, M. Move – Architecture in Motion [Текст] / M. Schumacher, O. Schaeffer, M. M. Vogt. – Basel : Birkhauser Verlag AG, 2010. – 248 p. – ISBN 3764399864.
 16. Москалев, М. Б. Совершенствование плитно-структурных металлодеревянных конструкций [Текст] : автореф. дис. ... канд. техн. наук : 05.23.01 / Москалев Михаил Борисович. – Санкт-Петербург, 2011. – 18 с.
 17. zbiorowa pod redakcją Tadeusza Bobki, Jarosława Rajczyka. Częstochowa: Wydawnictwo Politechniki Częstochowskiej, 2010, pp. 279–289. (in Russian)
 9. Chilton, J. Space Grid Structures. Oxford: Architectural Press, 2000. 191 p. ISBN 0-7506-3275-5.
 10. V. A. Kuchenko Order of Labour Chief Research and Development Establishment of Civil Structure. Recommendations according to design engineering of structural constructions. Moscow: Stroiizdat, 1984. 303 p. (in Russian)
 11. Inzhutov, Ivan Semenovich; Dmitriev, Petr Andreevich; Deordiev, Sergey Vladimirovich; Zakharyuta, Vasilii Viktorovich. Analysis of available space structure joints and design of demountable modular joints. In: *Proceedings of Moscow State University of Civil Engineering*, 2013, No. 3, pp. 61–71. (in Russian)
 12. Okab, A. K. Analysis of nodes in demountable modular space structures. In: *Oil and Gas Business*, 2015, No. 2, pp. 206–216. Mode of access: http://ogbus.ru/issues/2_2015/ogbus_2_2015_p206-216_OkabAK_ru.pdf. (in Russian)
 13. Hubermana, N.; Pearlmuttera, D.; Galb, E.; Meira, I. A. Optimizing structural roof form for lifecycle energy efficiency. In: *Energy and Buildings*, 2015, Volume 104, pp. 336–349.
 14. Caia, Jianguo; Fenga, Jian; Jiang, Chao. Development and analysis of a long span retractable roof structure. In: *Journal of Constructional Steel Research*, 2014, Volume 92, pp. 175–182.
 15. Schumacher, M.; Schaeffer, O.; Vogt, M. M. Move – Architecture in Motion. Basel: Birkhauser Verlag AG, 2010. 248 p. ISBN 3764399864.
 16. Moskalev, M. B. The development of plate-structural metal-and-wood constructions: Author's abstract the thesis submitted for the Scientific Degree on competition of Candidate of Engineering: 05.23.01. St. Petersburg, 2011. 18 p. (in Russian)

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: экспериментально-теоретическое исследование работы опор линий электропередачи; регулирование и учет внутренне-го напряженного состояния горячекатаного проката в строительных конструкциях.

Мионов Андрей Николаевич – кандидат технических наук; доцент кафедры металлических конструкций и сооружений ГОУ ВПО «Донбасская национальная академия строительства и архитектуры». Научные интересы: усталостная прочность металлических конструкций, концентрация напряжений в узлах ферм с применением широкополочных двутавров и гнutosварных замкнутых профилей, напряженно-деформированное состояние сталежелезобетонных конструкций в том числе трубобетонных конструкций.

Безушко Анна Владимировна – аспирант кафедры металлических конструкций и сооружений ГОУ ВПО «Донбасская национальная академия строительства и архитектуры». Научные интересы: расчет и проектирование пространственных металлических конструкций.

Василев Володимир Миколайович – кандидат технических наук, профессор кафедры металлических конструкций та споруд, начальник Лабораторії випробувань будівельних конструкцій і споруд ДООУ ВПО «Донбаська національна академія будівництва і архітектури». Наукові інтереси: експериментально-теоретичне дослідження роботи опор ліній електропередавання; регулювання і врахування внутрішнього напруженого стану гарячекатаного прокату в будівельних конструкціях.

Мионов Андрій Миколайович – кандидат технических наук; доцент кафедры металлических конструкций та споруд ДООУ ВПО «Донбаська національна академія будівництва і архітектури». Наукові інтереси: втомлена міцність металевих конструкцій, концентрація напружень в вузлах ферм із застосуванням широкополочкових двотаврів та гнutos-зварних замкнених профілів, напружено-деформований стан сталезалізобетонних конструкцій, у тому числі трубобетонних конструкцій.

Безушко Анна Володимирівна – аспірант кафедри металевих конструкцій та споруд ДООУ ВПО «Донбаська національна академія будівництва і архітектури». Наукові інтереси: розрахунок і проектування просторових металевих конструкцій.

Vasylev Volodymyr – Ph.D. (Engineering), 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.

Mironov Andrei – Ph.D. (Engineering), Associate Professor; Metal Structures and Constructions Department, Donbas National Academy of Civil Engineering and Architecture. Scientific interests: fatigue strength of metal structures, concentration of stresses in the nodes of trusses with the use of wide-frangles I-beams and roll-welded closed profiles, stress-strain state of composite structures including pipe-concrete structures.

Bezushko Anna – Post-graduate student, Metal Structures and Constructions Department, Donbas National Academy of Civil Engineering and Architecture. Scientific interests: analysis and design of spatial metal structures.