

УДК 692.484

DOI 10.25628/UNIIP.2019.41.2.016

САЛАХУТДИНОВ М. А.
КУЗНЕЦОВ И. Л.
ФАХРУТДИНОВ А. Э.

ORCID: 0000-0002-9452-0271
ORCID: 0000-0001-6838-0319
ORCID: 0000-0003-2379-9428



**Салахутдинов
Марат
Айдарович**

кандидат технических наук,
доцент, ФГБОУ ВО
«Казанский государствен-
ный архитектурно-строи-
тельный университет»

e-mail:
lider-kazann@yandex.ru



**Кузнецов
Иван
Леонидович**

доктор технических наук,
профессор, ФГБОУ ВО
«Казанский государствен-
ный архитектурно-строи-
тельный университет»

e-mail: kuz377@mail.ru



**Фахрутдинов
Адель
Эдуардович**

кандидат технических наук,
заместитель генерального
директора по строитель-
ству АО «ОЭЗ «Иннополис»,
г. Иннополис

e-mail:
fakhrutdinoff@yandex.ru

Решетчатая конструкция

Использование уголковых профилей в качестве элементов решетки в решетчатых конструкциях приводит к увеличению расхода стали при их креплении болтами. Предлагается сплющивание полка уголка в месте его крепления к поясам и разрез обушка для симметричного крепления к стенкам поясов. Для обеспечения симметричности и равноустойчивости предлагается оптимальный угол раскрытия полков уголков. На примере решетчатой конструкции показано достижение экономии по расходу стали.

Ключевые слова: решетчатая конструкция, уголковый профиль, угол раскрытия полков, равноустойчивость, сплющивание полков.

SALAKHUTDINOV M. A., KUZNETSOV I. L., FAKHRUTDINOV A. E.
LATTICE STRUCTURE

The use of angular profiles as lattice elements in lattice structures results in an increase in the consumption of steel when they are fastened with bolts. The flattening of the angle's flanges in the place of its attachment to the chords and the cut of the heel for symmetrical fastening to the web of the chords are proposed. To ensure symmetry and bistable, an optimum angle between legs of angle section is proposed. On the example of the lattice construction, it is shown that the economy of steel consumption is achieved.

Keywords: lattice structure, angle section, angle between legs of angle section, bistable, flattening.

В строительстве широко распространены решетчатые конструкции [2, 6, 10, 16, 21, 22]. Их конструктивные решения могут быть весьма разнообразны [1, 12–14, 17, 20], включая рамные, в которых сплошное сечение расщепляется в решетчатое [4, 7]. Решетчатые конструкции применяются как при новом строительстве [19, 23], так и при ремонте и реконструкции существующих зданий и сооружений [18]. Известны решетчатые конструкции, пояса которых выполнены из тавров, а стержни треугольной решетки — из уголков [3, 8, 15]. Крепление стержней решетки к поясам выполняется на сварке или на болтах. Одними из наиболее распространенных являются решетчатые конструкции с креплением одиночных стержней решетки из уголка при помощи болтов. Как показывают расчеты [5, 9, 11], существующие конструкции приводят к увеличению сечений решетки, поскольку они рассчитываются с учетом эксцентриситетов и устойчивости сжатых элементов. Например, в действующих нормах проектирования стальных конструкций сжатые элементы из одиночных уголков, прикрепленные одной полкой, рассчитываются с коэффициентом условий работы $\gamma_c = 0,75$, а растянутые элементы — с учетом коэффициента надежности γ_{cl} и коэффициента условий работы γ_{cl} .

Авторами предлагается конструктивное решение решетчатой конструкции (Иллюстрация 1, а), состоящей из тавровых поясов и стержней решетки из одиночных уголков, прикрепленных болтами. При этом предлагается использовать симметричное расположение стержней уголков. Для этого в узлах крепления уголковых стержней решетки необходимо выполнить сплющивание полка и разрезку обушка, а их крепление к полкам поясов осуществлять парными полками при помощи болтов (Иллюстрация 1, б, в).

Использование таких стержней решетки из одиночных стандартных уголковых профилей, у которых две полки соединяются под углом 90° , приводит к снижению устойчивости и прочности за счет увеличения эксцентриситета. Например, для прокатного равнополочного уголка $90 \times 90 \times 6$ мм соотношение радиусов инерции относительно главных осей составляет $i_{x0}/i_{y0} = 3,7/1,79 = 1,955$, а центр тяжести несплюсненных полков в зоне узла смещен от центра тяжести уголка в $4,5/2,43 = 1,85$ раза. Для обеспечения равноустойчивости предлагается угол раскрытия полков назначать из условия равенства моментов инерции относительно плоскостей x_0-x_0 и y_0-y_0 (Иллюстрация 2). Данный оптимальный угол раскрытия полков уголка рекомендуется назначать по формуле (1):

$$\gamma = 2\arccos \cdot \sqrt{\frac{4a^2 - t^2}{5a - 2t^2}}, \quad (1)$$

где a — размер полки уголка, t — толщина полки уголка.

При изготовлении сжатых уголко-вых элементов решетки из тонкостен-ных гнутых профилей целесообразно соотношение a/t принимать макси-мальным с учетом требований СП 260.1325600.2016.

Для подтверждения предложенной формулы (1) рассмотрим в качестве примера гнутый равнополочный уголок сечением $100 \times 100 \times 7$ мм. Опти-мальный угол γ раскрытия полок по формуле (1) для рассматриваемо-го уголка составляет $53,1^\circ$ (Иллю-страция 2). Геометрические харак-теристики данного уголка вычислены на ПК «SCAD Office» и приведены в Таблице 1.

Приведенные геометрические ха-рактеристики (Таблица 1) показыва-ют, что радиусы инерции рассмотрен-ного уголка под оптимальным углом раскрытия полок равны, тем самым при $I_{x0} = I_{y0}$ обеспечивается равно-устойчивость в обеих плоскостях.

Рассмотрим вопрос эффективно-сти применения сечений из гнутых уголков с полками под оптимальным углом в составе несущих конструк-ций, например, прогонов или ферм. Для этого проведем расчет решетча-той конструкции, схема которой при-ведена на Иллюстрации 3. Конструк-ция нагружена линейной равномерно распределенной погонной нагрузкой 840 кг/м . Верхний пояс и узловая фас-сонка выполняются из тавров, а ре-шетка — из гнутых уголков. Верх-ний пояс и фасонка принимаются из стали С345, а решетка — из стали С245 по ГОСТ 27772. Устойчивость из плоскости верхнего пояса обеспе-чивается непосредственным крепле-нием настила.

На первом этапе расчета при опре-делении усилий по предложенному решению принимаем следующие се-

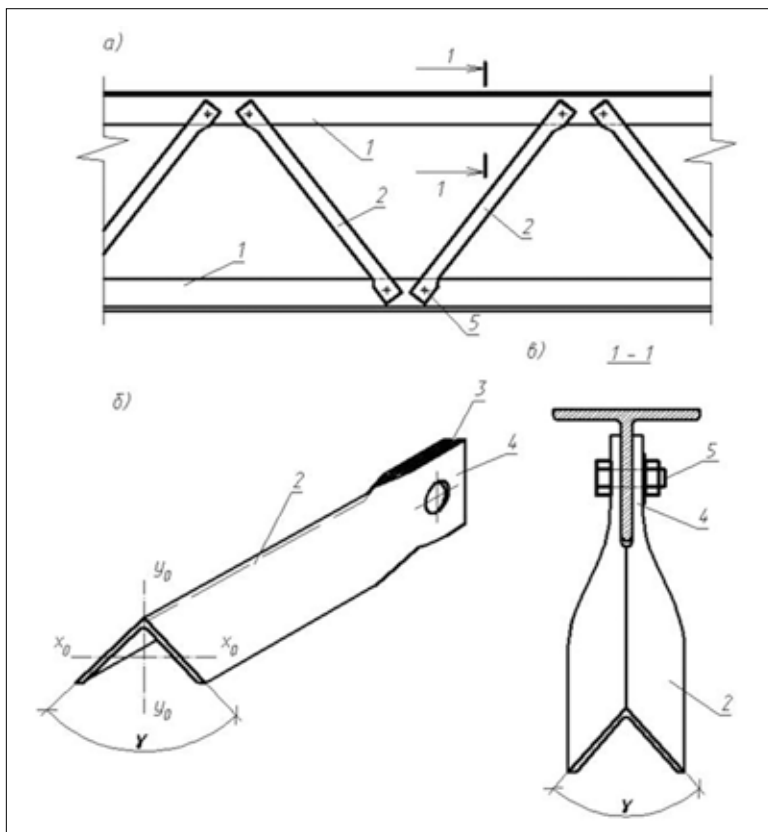


Иллюстрация 1. Ресетчатая конструкция с поясами из тавров и стержнями решетки из одиночных уголков: а — общий вид фрагмента решетчатой конструкции; б) угол-ковый стержень решетки в месте крепления к поясу; в) разрез 1-1; 1 — пояса фермы, 2 — стержни решетки, 3 — прорезь в обухе уголка, 4 — сплюснутые полки уголка, 5 — болт

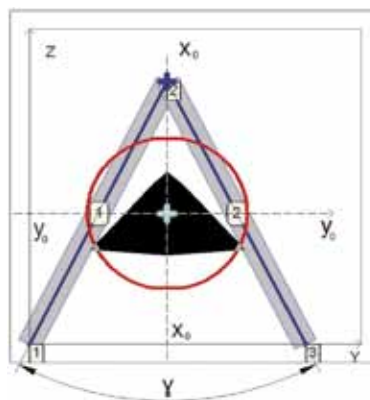


Иллюстрация 2. Поперечное сечение гнутого равнополочного уголка $100 \times 100 \times 7$ мм с оптимальным углом раскрытия полок $\gamma = 53,1^\circ$

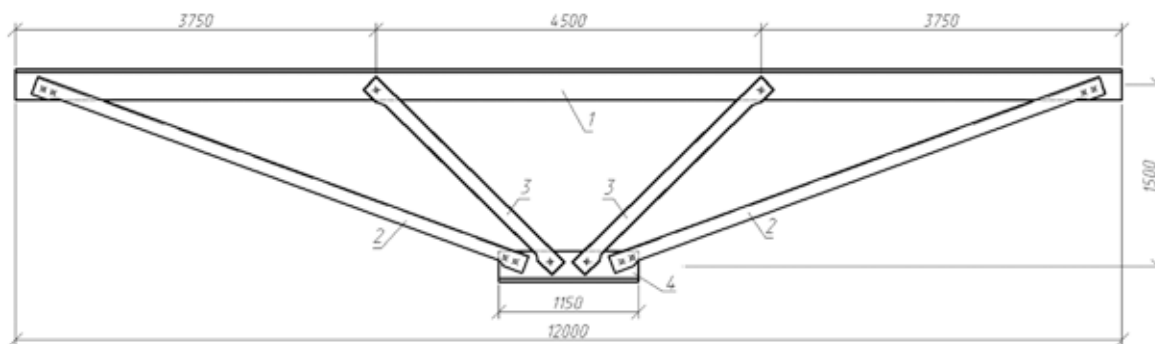


Иллюстрация 3. Предлагаемая решетчатая конструкция: 1 — верхний пояс; 2 — растянутый раскос; 3 — сжатый раскос; 4 — узловая фасонка

Таблица 1. Геометрические характеристики сечения уголка 100×100×7 мм с оптимальным углом раскрытия полок $\gamma = 53,1^\circ$

Геометрические характеристики			
	Параметр	Значение	Ед. изм.
A	Площадь поперечного сечения	13,024	см ²
I _{x0}	Момент инерции относительно центральной оси Y1, параллельной оси Y	75,262	см ⁴
I _{y0}	Момент инерции относительно центральной оси Z1, параллельной оси Z	75,48	см ⁴
I _t	Момент инерции при свободном кручении	2,127	см ⁴
i _y	Радиус инерции относительно оси Y1	2,404	см
i _z	Радиус инерции относительно оси Z1	2,407	см
W _u	Момент сопротивления относительно оси U	16,882	см ³
W _v	Момент сопротивления относительно оси V	17,433	см ³
a _u	Ядровое расстояние вдоль положительного направления оси Y (U)	1,339	см
a _v	Ядровое расстояние вдоль отрицательного направления оси Z (V)	1,296	см
y _m	Координата центра масс по оси Y	4,158	см
z _m	Координата центра масс по оси Z	4,161	см
Z _b	Координата центра изгиба по оси Z	8,322	см
I _p	Полярный момент инерции	150,742	см ⁴
i _p	Полярный радиус инерции	3,402	см
W _p	Полярный момент сопротивления	25,115	см ³

Таблица 2. Параметры рассматриваемой решетчатой конструкции с решеткой из уголков с оптимальным раскрытием полок

№ п/п	Наименование стержня	Усилие в элементе		Масса, кг
		М, кН·см	N, кН	
1	Верхний пояс, тавр 20 БТ1 (l = 12 м)	1009,16	–146,73	283,2
2	Узловая фасонка, тавр 20 БТ1 (l = 1,15 м)	—	—	27,14
3	Растянутый раскос, одиночный уголок 90×6 мм (l = 4,32 м)	—	151,27	71,97
4	Сжатый раскос, одиночный уголок 90×6 мм (l = 2,18 м)	—	–66,13	36,32
	ИТОГО			418,63

Таблица 3. Параметры рассматриваемой решетчатой конструкции с решеткой из типовых уголков

№ п/п	Наименование стержня	Усилие в элементе		Масса, кг
		М, кН·см	N, кН	
1	Верхний пояс, тавр 20 БТ1 (l = 12 м)	1009,16	–146,73	283,2
2	Узловая фасонка, тавр 20 БТ1 (l = 1.15 м)	—	—	27,14
3	Растянутый раскос, спаренный уголок 75×6 мм (l = 4,32 м)	226,91	151,27	100,22
4	Сжатый раскос, спаренный уголок 63×6 мм (l = 2,18 м)	116,39	–66,13	49,88
5	Соединительные элементы («сухари»)	—	—	1,56
	ИТОГО			462

чения элементов: верхний пояс и узловая фасонка — из тавров 20БТ1 по ТУ 14-2-24-72, стержни решетки — из уголка равнополочного 90×90×6 мм по ГОСТ 8509, при этом угол γ раскрытия полок принимаем равным 51° . Расчет крепления уголков при помощи болтов выполнен по их несущей способности. При расчете данное крепление уголков выполнено болтами М20 класса прочности 5.6. Расход стали на рассматриваемую конструкцию приведен в Таблице 2.

В предложенном решении центр тяжести уголка расположен на расстоянии 4,16 см от обушка. После сплющивания полок размещение отверстия для болта выполняется по центру, т. е. без эксцентриситета.

Для сравнения рассмотрим классическую решетчатую конструкцию, в которой верхний пояс и узловая фасон-

ка также выполнены из тавров, а раскосы — из парных стандартных уголков сечением 75×6 и 63×6 мм. Масса этой фермы с учетом соединительных элементов, расположенных между уголками по их длине, будет равна 462 кг, что на 10% больше предложенного авторами конструктивного решения.

Расчет классической решетчатой конструкции с применением стандартных уголков с углом раскрытия полок 90° проводился с учетом возникающего эксцентриситета и фактического значения момента инерции. Расход стали на рассматриваемую конструкцию приведен в Таблице 3.

Таким образом, проведенные исследования подтверждают эффективность применения гнутых уголков со сплюсненными под оптимальным углом полками в решетчатых конструкциях.

Заключение

- 1 Показано, что в стандартных уголках с углом раскрытия полок 900 момент инерции в плоскости и из плоскости уголка отличается более чем в 1,9 раза.
- 2 Получена формула для определения угла раскрытия полок уголка до оптимальной величины, когда радиусы инерции относительно плоскости X–X и плоскости Y–Y равны, где угол наклона полок 53,1°, при этом для изготовления сечений с оптимальным углом раскрытия полок наиболее подходящими являются гнутые уголки.
- 3 Прорезка обуха уголка и сплющивание полок позволяют использовать симметричные сечения для их соединения к поясам, например, из тавров, с помощью болтов.
- 4 Предложенная решетчатая конструкция позволяет уменьшить расход стали до 10%.

Список использованной литературы

- 1 А. с. № 732470 СССР, МПК E04B1/343. Складная металлическая ферма: №2533857/29–33; заявл. 13.10.1977; опубл. 15.05.1980 / Туллер М. Я.; заявитель и патентообладатель Центральный научно-исследовательский и проектный институт строительных металлоконструкций. — 2 с.: ил.
- 2 Алпатов В. Ю. Опыт-экспериментальное проектирование пространственной решетчатой металлической конструкции для покрытия промышленного здания // Градостроительство и архитектура. — Самара: СГТУ, 2017. № 4 (29). — С. 4–8.
- 3 Брудка Я. Легкие стальные конструкции. — М.: Стройиздат, 1974. — 342 с.
- 4 Вахтель Р. Р. К расчету рамы с расщеплением сечения в уровне карнизного узла // Современные проблемы науки и образования. — Пенза: ИД «Академия Естествознания», 2014. № 6. — С. 76.
- 5 Волков В. В. Оптимальное проектирование металлических ферм с поясами из тавров и перекрестной решеткой из одиночных уголков // Изв. высш. учеб. заведений. Строительство и архитектура. — Новосибирск: НГАСУ, 1986. № 11. — С. 13–15.
- 6 Иодчик А. А. Особенности применения ферм из одиночных уголков в практике современного строительства // Дальний Восток: проблемы развития архитектурно-строительного комплекса. — Хабаровск: ТГУ, 2016. № 1. — С. 399–402.
- 7 Исаев А. В. Численные исследования напряженно-деформированного состояния стальной рамы переменного сечения с расщеплением карнизного узла // Изв. КазГАСУ. — Казань: КазГАСУ, 2017. № 4 (42). — С. 159–166.
- 8 Ищенко И. И. Легкие металлические конструкции одноэтажных производственных зданий. — М.: Стройиздат, 1979. — 196 с.
- 9 Кирсанов М. Н. Аналитический расчет решетчатой фермы // Моделирование и механика конструкций. — Пенза: ПГУАС, 2015. № 2 (2). — С. 20–23.
- 10 Марахина О. Ю. Некоторые особенности проектирования стропильных ферм из парных уголков // Вестн. Сибирского гос. автомобильно-дорожного ун-та. — Омск: СибАДИ, 2017. № 3 (55). — С. 138–144.
- 11 Марутян А. С. Оптимизация конструкций с решетками из круглых и овальных труб // Вестн. МГСУ. — М.: НИУ МГСУ, 2016. № 10. — С. 45–57.
- 12 Патент № 2647137 Российская Федерация, МПК E04C 3/09. Ферма: № 2017100620/03; заявл. 10.01.2017; опубл. 14.03.2018 / Кузнецов И. Л., Салахутдинов М. А., Фахрутдинов А. Э.; заявитель и патентообладатель КазГАСУ. — 4 с.: ил.

- 13 Патент № 178154 Российская Федерация, МПК E04B 1/24. Строительный элемент для изготовления решетчатых конструкций: № 2017145208; заявл. 21.12.2017; опубл. 26.03.2018 / Кузнецов И. Л., Салахутдинов М. А.; заявитель и патентообладатель КазГАСУ. — 2 с.: ил.
- 14 Салахутдинов М. А. Стальные фермы с поясами из труб многогранного сечения // Изв. КазГАСУ. — Казань: КазГАСУ, 2016. № 4 (38). — С. 236–242.
- 15 Трофимов В. И. Легкие металлические конструкции зданий и сооружений. — М.: АСВ, 2002. — 576 с.
- 16 Шаратина Е. Д. Работа легких металлических ферм с верхним поясом из z-профиля и решеткой из одиночных уголков // Череповецкие научные чтения-2014: материалы Всерос. науч.-практ. конф. — Череповец: ЧГУ, 2015. — С. 198–199.
- 17 Afshan S., Theofanous M., Wang J. et al. Testing, numerical simulation and design of prestressed high strength steel arched trusses // Engineering Structures / Elsevier, 2019. Vol. 183. — P. 510–522.
- 18 Biegus A., Madry D. Failure hazard and strengthening of roof in steel industrial building after explosion of electric furnace // Engineering Failure Analysis / Elsevier, 2009. Vol. 16 (7). — P. 2427–2432.
- 19 Di Lorenzo G., Babilio E., Formisano A., Landolfo R. Innovative steel 3D trusses for preserving archaeological sites: Design and preliminary results // J. of Constructional Steel Research / Elsevier, 2019. Vol. 154. — P. 250–262.
- 20 Karoki K. E., Shen L., Gong J. Capacity analysis, investigations and retrofitting of a long span steel grid hangar // Engineering Failure Analysis / Elsevier, 2017. Vol. 78. — P. 1–14.
- 21 Liu Y.-F., Liu X.-G., Fan J.-S. et al. Refined safety assessment of steel grid structures with crooked tubular members // Automation in Construction / Elsevier, 2019. Vol. 99. — P. 249–264.
- 22 Van Der Kooi K., Hoult N. A. Assessment of a steel model truss using distributed fibre optic strain sensing // Engineering Structures / Elsevier, 2018. Vol. 171. — P. 557–568.
- 23 Wang X., Feng R.-Q., Yan G.-R. Effect of joint stiffness on the stability of cable-braced grid shells // International Journal of Steel Structures / Springer, 2016. Vol. 16 (4). — P. 1123–1133.

References

- 1 A. s. № 732470 SSSR, MPK E04V1/343. Skladnaya metallicheskaya ferma: №2533857/29–33; yayavl. 13.10.1977; opubl. 15.05.1980 / Tuller M. Ya.; zayavitel' i patentoobladatel' Central'nyj nauchno-issledovatel'skij i proektnyj institut stroitel'nyh metallokonstrukcij. — 2 s.: il.
- 2 Alpatov V. Yu. Opytno-eksperimental'noe proektirovanie prostranstvennoj reshetchatoj metallicheskoj konstrukcii dlya pokrytiya promyshlennogo zdaniya // Gradostroitel'stvo i arhitektura. — Samara: SGTU, 2017. № 4 (29). — S. 4–8.
- 3 Brudka Ya. Legkie stal'nye konstrukcii. — M.: Strojizdat, 1974. — 342 s.
- 4 Vahtel' R. R. K raschetu ramy s rasshchepleniem secheniya v urovne karniznogo uzla // Sovremennye problemy nauki i obrazovaniya. — Penza: ID «Akademiya Estestvoznaniya», 2014. № 6. — S. 76.
- 5 Volkov V. V. Optimal'noe proektirovanie metallicheskih ferm s poyasami iz tavrov i perekrestnoj reshetkoj iz odinochnyh ugolkov // Izv. vyssh. ucheb. zavedenij. Stroitel'stvo i arhitektura. — Novosibirsk: NGASU, 1986. № 11. — S. 13–15.
- 6 Iodchik A. A. Osobennosti primeneniya ferm iz odinochnyh ugolkov v praktike sovremennogo stroitel'stva // Dal'nij

- Vostok: problemy razvitiya arhitekturno-stroitel'nogo kompleksa. — Habarovsk: TGU, 2016. № 1. — S. 399–402.
- 7 Isaev A.V. Chislennye issledovaniya napryazhenno-deformirovannogo sostoyaniya stal'noj ramy peremennogo secheniya s rasshchepleniem karniznogo uzla // Izv. KazGASU. — Kazan': KazGASU, 2017. № 4 (42). — S. 159–166.
 - 8 Ishchenko I.I. Legkie metallicheskie konstrukcii odnoetazhnyh proizvodstvennyh zdaniy. — M.: Strojizdat, 1979. — 196 s.
 - 9 Kirsanov M.N. Analiticheskij raschet reshetchatoj fermy // Modelirovanie i mekhanika konstrukcij. — Penza: PGUAS, 2015. № 2 (2). — S. 20–23.
 - 10 Marahina O.Yu. Nekotorye osobennosti proektirovaniya stropil'nyh ferm iz parnyh ugolkov // Vestn. Sibirskogo gos. avtomobil'no-dorozhnogo un-ta. — Omsk: SibADI, 2017. № 3 (55). — S. 138–144.
 - 11 Marutyan A.S. Optimizaciya konstrukcij s reshetkami iz kruglyh i oval'nyh trub // Vestn. MGSU. — M.: NIU MGSU, 2016. № 10. — S. 45–57.
 - 12 Patent № 2647137 Rossijskaya Federaciya, MPK E04S 3/09. Ferma: № 2017100620/03; zayavl. 10.01.2017; opubl. 14.03.2018 / Kuznecov I.L., Salahutdinov M.A., Fahrutdinov A.E.; zayavitel' i patentoobladatel' KazGASU. — 4 s.: il.
 - 13 Patent № 178154 Rossijskaya Federaciya, MPK E04B 1/24. Stroitel'nyj element dlya izgotovleniya reshetchatyh konstrukcij: № 2017145208; zayavl. 21.12.2017; opubl. 26.03.2018 / Kuznecov I.L., Salahutdinov M.A.; zayavitel' i patentoobladatel' KazGASU. — 2 s.: il.
 - 14 Salahutdinov M.A. Stal'nye fermy s poyasami iz trub mnogogrannnogo secheniya // Izv. KazGASU. — Kazan': KazGASU, 2016. № 4 (38). — S. 236–242.
 - 15 Trofimov V.I. Legkie metallicheskie konstrukcii zdaniy i sooruzhenij. — M.: ASV, 2002. — 576 s.
 - 16 Sharatinova E.D. Rabota legkih metallicheskih ferm s verhnim poyasom iz z-profila i reshetkoj iz odinochnyh ugolkov // Cherepoveckie nauchnye chteniya-2014 : materialy Vseros. nauch.-prakt. konf. — Cherepovec: CHGU, 2015. — S. 198–199.
 - 17 Afshan S., Theofanous M., Wang J. et al. Testing, numerical simulation and design of prestressed high strength steel arched trusses // Engineering Structures / Elsevier, 2019. Vol. 183. — P. 510–522.
 - 18 Biegus A., Madry D. Failure hazard and strengthening of roof in steel industrial building after explosion of electric furnace // Engineering Failure Analysis / Elsevier, 2009. Vol. 16 (7). — P. 2427–2432.
 - 19 Di Lorenzo G., Babilio E., Formisano A., Landolfo R. Innovative steel 3D trusses for preserving archaeological sites: Design and preliminary results // J. of Constructional Steel Research / Elsevier, 2019. Vol. 154. — P. 250–262.
 - 20 Karoki K.E., Shen L., Gong J. Capacity analysis, investigations and retrofitting of a long span steel grid hangar // Engineering Failure Analysis / Elsevier, 2017. Vol. 78. — P. 1–14.
 - 21 Liu Y.-F., Liu X.-G., Fan J.-S. et al. Refined safety assessment of steel grid structures with crooked tubular members // Automation in Construction / Elsevier, 2019. Vol. 99. — P. 249–264.
 - 22 Van Der Kooi K., Hoult N.A. Assessment of a steel model truss using distributed fibre optic strain sensing // Engineering Structures / Elsevier, 2018. Vol. 171. — P. 557–568.
 - 23 Wang X., Feng R.-Q., Yan G.-R. Effect of joint stiffness on the stability of cable-braced grid shells // International Journal of Steel Structures / Springer, 2016. Vol. 16 (4). — P. 1123–1133.

Marat Salakhutdinov

Candidate of Engineering Sciences, Associate Professor, «KAZAN state University of architecture and civil engineering», Russian Federation
e-mail: lider-kazann@yandex.ru

Ivan Kuznetsov

Doctor of Engineering Sciences, Full Professor, «KAZAN state University of architecture and civil engineering», Russian Federation
e-mail: kuz377@mail.ru

Adele Fakhrutdinov

Candidate of Engineering Sciences, Deputy general Director for construction of JSC «SEZ «Innopolis», Russian Federation
e-mail: faxrutdinoff@yandex.ru

Статья поступила в редакцию в марте 2019 г.
Опубликована в июне 2019 г.