



**Кузнецов
Иван
Леонидович**

доктор технических наук, профессор, Институт строительства, кафедра металлических конструкций и испытания сооружений, Казанский государственный архитектурно-строительный университет (КазГАСУ), Казань, Российская Федерация

e-mail: kuz377@mail.ru



**Гайнетдинов
Ришат
Габдулхаевич**

ассистент, Институт строительства, кафедра металлических конструкций и испытания сооружений, Казанский государственный архитектурно-строительный университет (КазГАСУ), Казань, Российская Федерация

e-mail: rishat.gainetdinov@bk.ru



**Хайруллин
Ленар
Равилевич**

кандидат технических наук, доцент, Институт строительства, кафедра механики, Казанский государственный архитектурно-строительный университет (КазГАСУ), Казань, Российская Федерация

e-mail: lenarhay@mail.ru

Полигональная арка из двух типов унифицированных элементов

Представлено арочное здание, где несущие конструкции выполняются из двух типов унифицированных элементов. Эти унифицированные элементы изготавливаются из прокатного стального двутавра и спаренных холодногнутых швеллеров, соединенных между собой на болтах без использования фланцев. При таком решении несущая способность унифицированных элементов и их болтового узлового соединения равны. Изготавливаемые арки из унифицированных элементов за счет предложенного узлового соединения элементов могут быть выполнены различного пролета и очертания, при этом для обеспечения несущей способности возможно изменение шага их установки.

Ключевые слова: полигональная арка, унифицированный элемент, болтовое узловое соединение без фасонки, стальной двутавр, холодногнутый швеллер, арочное здание.

KUZNETSOV I. L., GAINETDINOV R. G., KHAYRULLIN L. R.
POLYGONAL ARCH OF TWO TYPES OF UNIFIED ELEMENTS

An arched building is proposed, where their supporting structures are made of two types of unified elements. These unified elements are made of rolled steel I-beam and paired cold-bent channels, bolted together without the use of flanges. With this solution, the bearing capacity of the unified elements and their bolted nodal connection are equal. We make arches from unified elements that can be made of different spans and shapes, while to ensure the load-bearing capacity, it is possible to change the step of their installation.

Keywords: polygonal arch, unified element, bolted node connection without shapes, steel I-beam, cold-bent channel, arched building.

Введение

В практике строительства при проектировании и возведении арочных зданий широко используются арки из унифицированных элементов. Данные арки применяются при возведении зданий большого пролета более 18 м [1, 6–8]. Однако в последнее время наибольшее применение находят полигональные арки при возведении зданий небольшого пролета 12–18 м [4, 9, 10]. Унифицированный элемент состоит из стальных труб, двутавров или других профилей, а их соединение выполняется при помощи фланцев на болтах (Иллюстрация 1).

Наиболее распространенными фланцами являются плиточные, изготавливаемые из листовой стали с отверстиями для крепления болтов и приварки по их концам (Иллюстрация 1, а). Существенным недостатком данных фланцев является повышенный расход стали и возможность соединять унифицированные элементы только под одним углом.

Предложены другие типы соединений унифицированных элементов из фланца, позволяющие обеспечить соединение под разными углами от 0 до α [11–14]. В работе [11] пока-

зан унифицированный элемент, включающий стержень, по концам которого приварены фланцы (Иллюстрация 1, б). Первый фланец унифицированного элемента выполнен из отрезка цилиндрической трубы, а отверстия под болты расположены с равным шагом по ее окружности. Второй фланец унифицированного элемента выполнен из отрезка поверхности трубы с совпадающими отверстиями первого фланца. Предложенное узловое соединение дает возможность возводить арки любой конфигурации и пролета, но при этом требуется большой диаметр перфорации фланца для установки болтов.

В работах [12, 13] предлагается подобный унифицированный элемент с одинаковыми фланцами по концам (Иллюстрация 1, в). Согнутые фланцы охватывают цилиндрическую узловую вставку с жестко закрепленными на концах кольцами, внутренние кромки которых имеют зубчатый профиль и введены в контакт с аналогичным профилем боковой поверхности фланцев. Крепление производится болтами, установленными в соосные отверстия во фланцах и в узловой вставке. Узловое соединение обеспечивает более высокую

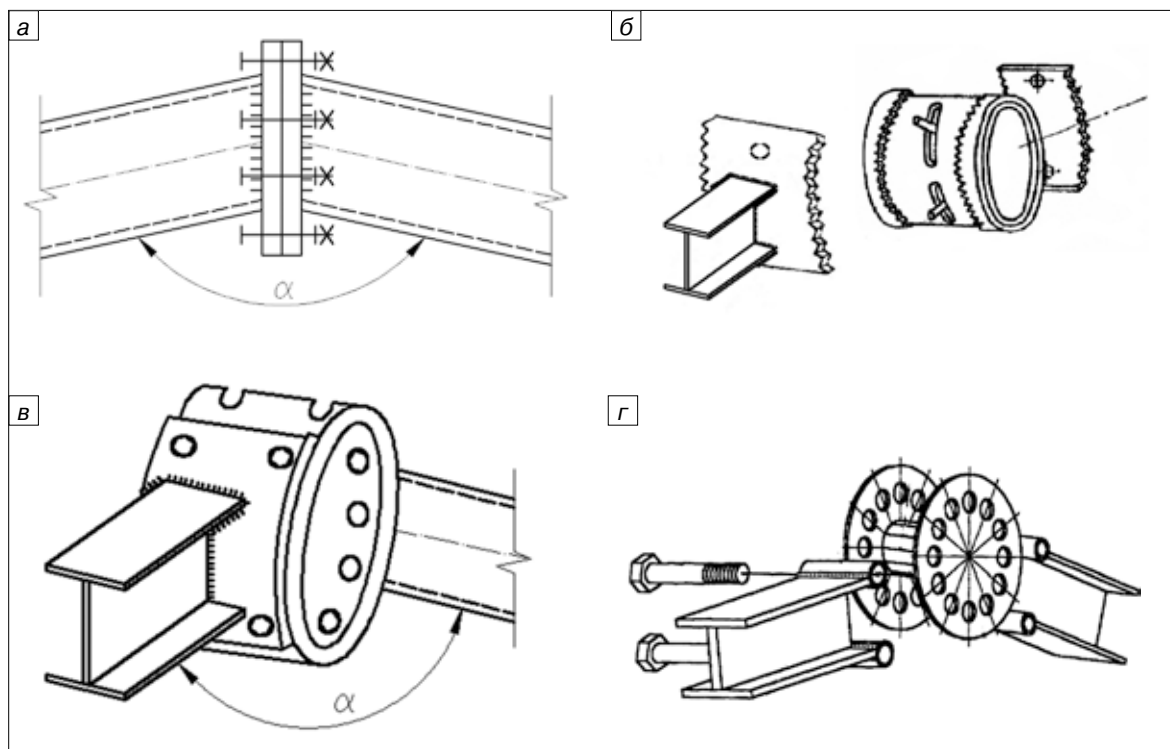


Иллюстрация 1. Узловые соединения однотипных элементов из двутавров в полигональной арке: а — болтовое узловое соединение с плиточным фланцем; б — болтовое узловое соединение на цилиндрических фланцах; в — узловое соединение фланцев с узловой вставкой; г — болтовое узловое соединение с цилиндрической вставкой. Авторы: И. Л. Кузнецов, Р. Г. Гайнетдинов, Л. Р. Хайруллин. 2021 г.

прочность и надежность при действии значительных изгибающих моментов, но при этом требует большой точности изготовления и монтажа.

В работе [14] предлагается узловое соединение унифицированных элементов, включающее концы однотипных элементов арки (Иллюстрация 1, г). К торцам элементов арки на сварке прикреплены крепежные детали, выполненные в виде двух отрезков круглых труб. Элементы арки объединены посредством цилиндрической узловой вставки, к торцам которой жестко установлены боковые накладки с отверстиями, равномерно размещенными по длине окружности. Однотипные элементы арки соединены между собой посредством боковых накладок цилиндрической вставки стяжными болтами, пропущенными через соосные отверстия в накладках и в отверстиях крепежных элементов. Изготовление деталей узлового соединения не требует использования сложных фрезерных работ, при этом из-за отсутствия вогнутых контактных поверхностей повышается точность сборки, но увеличивается расход стали и трудоемкость сборки.

В работах [1–3, 5] рассмотрены вопросы проектирования полигональных арок из унифицированных элементов с фланцами, а именно поиск оптимального очертания. При этом унифицированные элементы выполняют из стальных полосовых отходов, сваренных в квадратную трубу.

Цель статьи заключается в демонстрации разработки полигональной арки из унифицированных элементов без фланцев, обеспечивающих узловое болтовое соединение предлагаемых элементов под любым углом от 0 до α . При этом несущая способность предлагаемого болтового соединения должна быть не меньше несущей способности унифицированных элементов.

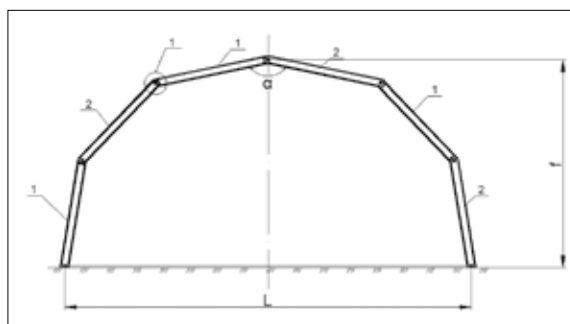


Иллюстрация 2. Полигональная арка из набора двух унифицированных элементов: 1 — первый тип унифицированного элемента; 2 — второй тип унифицированного элемента. Авторы: И. Л. Кузнецов, Р. Г. Гайнетдинов, Л. Р. Хайруллин. 2021 г.

Болтовое узловое соединение двух унифицированных элементов

В статье предлагается новое решение [3], когда арки собираются из двух унифицированных элементов, соединенных между собой на болтах без фланцев, при этом их соединение может выполняться под произвольным углом α (Иллюстрация 2).

Первый тип унифицированного (Иллюстрация 3) элемента выполнен в виде двутаврового сечения, на концах которого сделана подрезка полков, а выступающий конец стенки реализован по дуге полуокружности, на котором имеется отверстие под центральный болт, а вокруг него по окружности выполнены отверстия под крепежные болты. Вторым тип унифицированного элемента (Иллюстрация 3) из парных швеллеров, составленных параллельно друг к другу на расстоянии, равном толщине стенки двутавра первого унифицированного элемента.

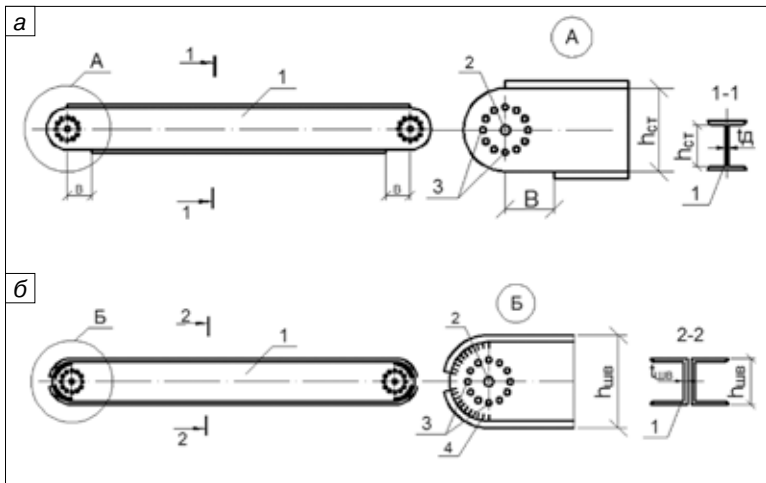


Иллюстрация 3. Унифицированные элементы: а — первый тип унифицированного элемента из стального прокатного двутавра; б — второй тип унифицированного элемента из стальных холодногнутого швеллера; 1 — стальной стержень из прокатного двутавра и холодногнутого швеллера; 2 — отверстие под центральный болт; 3 — отверстия под крепежные болты; 4 — сварка отогнутых полок швеллера с их стенкой. Авторы: И. Л. Кузнецов, Р. Г. Гайнетдинов, Л. Р. Хайруллин. 2021 г.

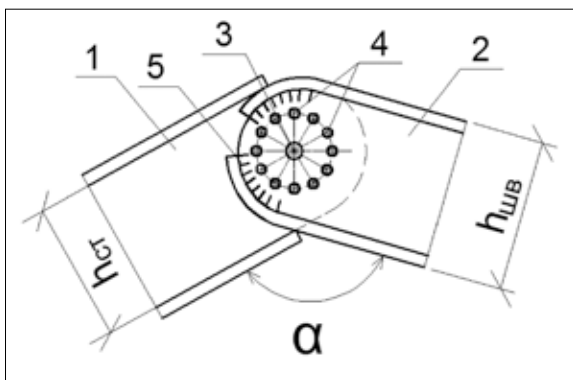


Иллюстрация 4. Узел соединения двух унифицированных элементов под углом от 0 до α : 1 — стальной стержень из прокатного двутавра; 2 — стальной стержень из двух швеллеров; 3 — отверстие под центральный болт; 4 — отверстия под крепежные болты; 5 — сварка отогнутых полок швеллера с его стенкой. Авторы: И. Л. Кузнецов, Р. Г. Гайнетдинов, Л. Р. Хайруллин. 2021 г.

По концам швеллеров выполнена подрезка полок, их отгиб и приварка к стенкам швеллеров. При этом стенка швеллеров выполнена по подобию стенки двутавра первого унифицированного элемента.

Соединение двух типов унифицированных элементов выполняют в следующей последовательности. Вначале эти элементы соединяются центральными болтами, устанавливаемыми в отверстие 2, а после обеспечения требуемого угла соединения унифицированных элементов вокруг устанавливаются крепежные болты 4.

При этом нижняя стенка двутавров на конце в месте выполнения полукруглости на стенке отрезается на величину:

$$B = \frac{h_d \cdot \sin(180 - \alpha)}{2}, \quad (1)$$

где h_d — высота двутавра; α — угол наклона элементов.

Ширина стенки швеллеров:

$$t_{шв} > \frac{t_d}{2}, \quad (2)$$

где $t_{шв}$ — ширина стенки швеллера; t_d — ширина стенки двутавра.

Полки швеллеров в месте образования полукруглости отогнуты и приварены 5 к полукруглости (Иллюстрация 4).

Полигональная арка позволяет исключить в узле соединения элементов один центральный болт и один набор крепежных элементов, а также узловую фасонку.

При этом количество крепежных болтов и их радиус установки вокруг центрального болта определяются расчетом узла по несущей способности, которая равна несущей способности унифицированных элементов.

Численное исследование болтового узлового соединения двух унифицированных элементов

Рассмотрим двухшарнирную полигональную арку (Иллюстрация 2) пролетом $L = 11,58$ м с очертанием по дуге полукруглости со стрелой подъема $f = 5,79$ м. Расчетная длина унифицированных элементов $\Delta l = 3$ м. Указанная арка рассчитана по СП 20.13330.2016. Снеговая нагрузка принимается для IV района интенсивностью $q = 280$ кг/м², ветровая нагрузка $w = 30$ кг/м², при этом нагрузка от собственного веса равна 30 кг/м². Расчет арки выполняется по программе «ЛИРА-САПР», при шаге арок $B = 5$ м, при этом расчетный изгибающий момент равен $M = 4815$ кг·м, а нормальная сила $N = 6013$ кг. На данные усилия подобраны сечения унифицированных элементов из стали класса С285. Сечение первого унифицированного элемента принято из прокатного двутавра по ТУ14-2-205-76 размерами $300 \times 85 \times 4,8$, а второго элемента из парных холодногнутого швеллера по ГОСТ 27772-80 размерами $280 \times 60 \times 3,9$ мм. Площадь сечения двух швеллеров $A = 2 \cdot 14,9 = 29,8$ см², момент сопротивления $W = 2 \cdot 104,9 = 209,8$ см³. Для болтового узлового соединения унифицированных элементов приняты болты класса прочности 8,8 диаметром 20 мм, которые установлены по окружности вокруг центрального болта диаметром 30 мм с радиусом 100 мм.

Несущая способность на смятие одного болта диаметром 20 мм равна:

$$N_{bp} = R_{bp} \cdot d_b \cdot \sum t \cdot \gamma_b \cdot \gamma_c = 5150 \cdot 20 \cdot 0,39 \cdot 1 \cdot 1 = 4017 \text{ кг.}$$

Несущая способность на смятие центрального болта диаметром 30 мм равна:

$$N_{bp} = R_{bp} \cdot d_b \cdot \sum t \cdot \gamma_b \cdot \gamma_c = 5150 \cdot 30 \cdot 0,39 \cdot 1 \cdot 1 = 6026 \text{ кг.}$$

Изгибающий момент, воспринимаемый всеми крепежными болтами, равен:

$$M = N_{bp} \cdot R \cdot n = 4017 \cdot 0,10 \cdot 12 = 4821 \text{ кг} \cdot \text{м.}$$

Для дополнительной проверки несущей способности и оценки реального поведения предлагаемого болтового узлового соединения унифицированных элементов полигональной арки создана модель узла (Иллюстрация 5)

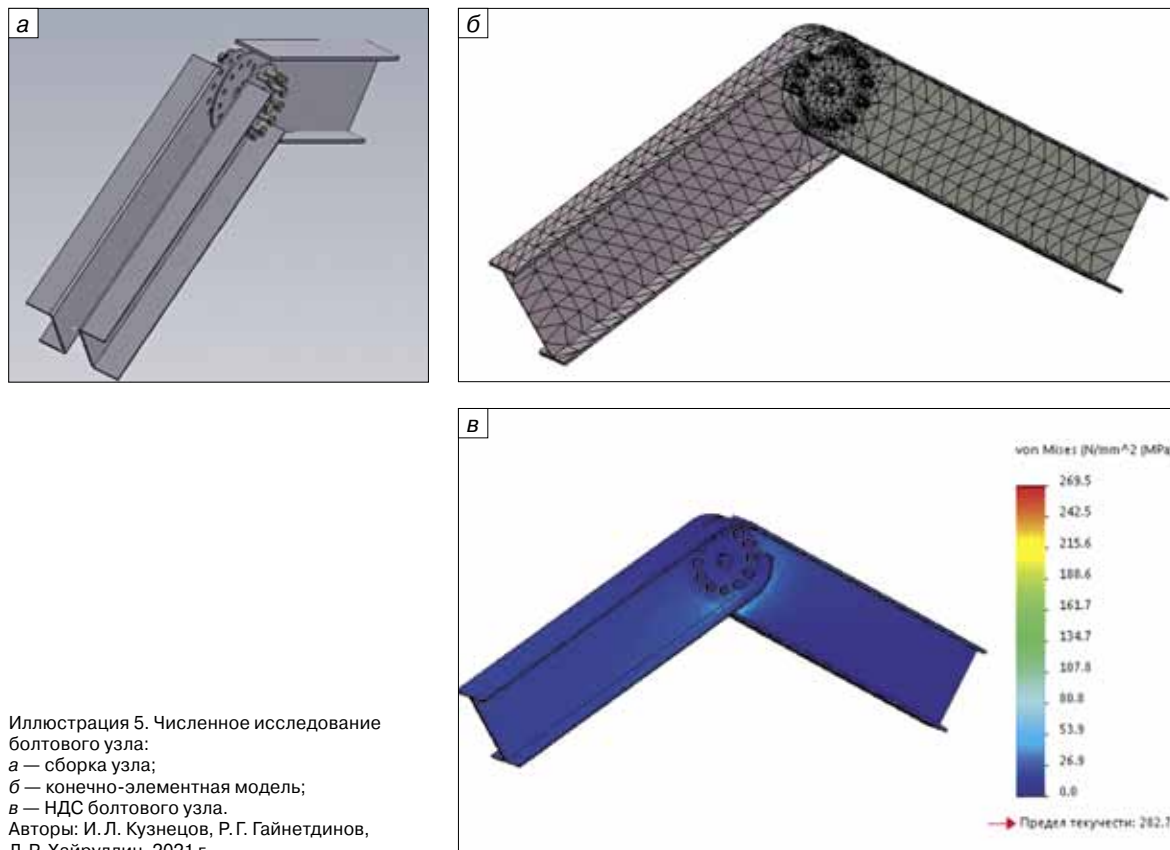


Иллюстрация 5. Численное исследование болтового узла:
 а — сборка узла;
 б — конечно-элементная модель;
 в — НДС болтового узла.
 Авторы: И. Л. Кузнецов, Р. Г. Гайнетдинов, Л. Р. Хайруллин. 2021 г.

в программном комплексе Solidworks, при этом сечения элементов и болты приняты те же, которые ранее были подобраны в арке. Моделирование производилось путем создания отдельных моделей деталей и их дальнейшей сборки в единый узел. Определение напряженно-деформированного состояния болтового узла выполнено в модуле Solidworks Simulation с учетом физической и геометрической нелинейности, на усилия, которые получены при статическом расчете в ПК «ЛИРА-САПР». Сетка конечного элемента создана на основе кривизны узла.

Предлагаемый узел соединения рассматривается как двухшарнирная арка пролетом $L = 5,5$ м и стрелой подъема $f = 1,19$ м. При этом на данную арку, а именно на узел, прикладывается сжимающая нагрузка (распор), создающий изгибающий момент $M = 4815$ кг · м в центре узла, как в рассмотренной арке пролетом $L = 11,59$ м. Проведенные численные исследования показали, что напряжения в узле при данном изгибающем моменте не превышают расчетного усилия (Иллюстрация 5).

Заключение

Предложенная полигональная арка из двух типов стальных унифицированных элементов, соединенных болтами друг с другом без фасонки под разным углом, позволяет обеспечить ее несущую способность, что показано расчетом и численным исследованием. При этом данное конструктивное решение позволяет возводить арки разного пролета и очертания, а несущая способность обеспечивается изменением шага арок.

Список использованной литературы

- 1 Кузнецов И. Л. Расчет и конструирование легких арок: учеб. пособие. — Казань: КГАСУ. — 144 с.
- 2 Кузнецов И. Л., Пеньковцев С. А. Использование стальных выштампованных полосовых отходов

для изготовления облегченных конструкций. Серия — строительные материалы и конструкции, здания и сооружения. — М.: ЦНИКЭПстрой, 1985. — С. 20–23.

- 3 Кузнецов И. Л. Разработка арочных конструкций из унифицированных элементов // Изв. вузов. Строительство и архитектура. — 1990. — № 3. — С. 124–127.
- 4 Кутухтин Е. Г., Гольденгерш Л. Ф. Перспективы развития легких металлических конструкций комплектной поставки // Промышленное строительство. — 1987. — № 1. — С. 4–8.
- 5 Пеньковцев С. А. Несущие металлические конструкции облегченных зданий из унифицированных элементов: автореф. дис. ... канд. техн. наук. — Воронеж, 1990. — 23 с.
- 6 Чекулаева М. В. Конструкции покрытия теннисного корта с применением стальных профилированных арочных элементов (Великобритания) // Строительство и архитектура. Строительные конструкции и материалы. — 1989. — № 3. — С. 9–12.
- 7 Ягофаров Х. Треугольные стальные арки для складов руды // Промышленное строительство. — 1967. — № 1. — С. 25–27.
- 8 Saitoh M. Recent Developments of Hybrid Tension Structures // Proceeding of the IASS Symposium. — 1991. — № 2. — P. 177–186.
- 9 Thomas H. et al. Optimum least-cost design of a truss root system // Computers and structures. — 1977. — № 1. — P. 13–22.
- 10 Pat. 2005/066426 World Intellectual Property Organization, IPC E 04 B 1/32. Three-hinged demountable arched structure / Matusiak Wieslaw. — Pres. 09.01.2004; publ. 21.07.2005.
- 11 А. с. 608895 СССР, МКИ E 04 B 1/32. Элемент арки / И. Л. Кузнецов. — Заявл. 14.02.77; опубл. 28.02.78; бюл. № 20.

- 12 А. с. 746058 СССР, МКИ Е 04 В 1/58. Узловое соединение однотипных элементов арки / И. Л. Кузнецов. — Заявл. 13.03.81; опубл. 30.07.82; бюл. № 25.
- 13 А. с. 676702 СССР, МКИ Е 04 В 1/58. Узловое соединение элементов арки / И. Л. Кузнецов. — Заявл. 24.03.78; опубл. 30.07.79; бюл. № 28.
- 14 Пат. 2273702 Российская Федерация, МПК Е 04 В 1/58. Узловое соединение элементов арки / И. Л. Кузнецов, Р. М. Яруллин. — Заявл. 28.10.2004; опубл. 10.04.2006; бюл. № 10.
- 15 Кузнецов И. Л., Гайнетдинов Р. Г., Судариков В. А. Полигональная арка. Патент на изобретение №2750773 от 02.07.2021.

References

- 1 Kuznecov I. L. Raschet i konstruirovaniye legkih arok: ucheb. posobie. — Kazan': KGASU. — 144 s.
- 2 Kuznecov I. L., Pen'kovcev S. A. Ispol'zovanie stal'nyh vyshampovannykh polosovykh othodov dlya izgotovleniya oblegchennykh konstrukcij. Seriya — stroitel'nye materialy i konstrukcii, zdaniya i sooruzheniya. — М.: СНИИПСтрой, 1985. — С. 20–23.
- 3 Kuznecov I. L. Razrabotka arochnykh konstrukcij iz unificirovannykh elementov // Izv. vuzov. Stroitel'stvo i arhitektura. — 1990. — № 3. — С. 124–127.
- 4 Kutuhtin E. G., Gol'dengersh L. F. Perspektivy razvitiya legkih metallicheskih konstrukcij kompleksnoj postavki // Promyshlennoe stroitel'stvo. — 1987. — № 1. — С. 4–8.
- 5 Pen'kovcev S. A. Nesushchie metallicheskie konstrukcii oblegchennykh zdaniy iz unificirovannykh elementov: avtoref. dis. ... kand. tekhn. nauk. — Voronezh, 1990. — 23 s.
- 6 Chekulaeva M. V. Konstrukcii pokrytiya tennisnogo korta s primeneniem stal'nykh profilirovannykh arochnykh elementov (Velikobritaniya) // Stroitel'stvo i arhitektura. Stroitel'nye konstrukcii i materialy. — 1989. — № 3. — С. 9–12.
- 7 Yagofarov H. Treugol'nye stal'nye arki dlya skladov rudy // Promyshlennoe stroitel'stvo. — 1967. — № 1. — С. 25–27.
- 8 Saitoh M. Recent Developments of Hybrid Tension Structures // Proceeding of the IASS Symposium. — 1991. — № 2. — P. 177–186.
- 9 Thomas H. et al. Optimum least-coast design of a truss root system // Computers and structures. — 1977. — № 1. — R. 13–22.
- 10 Pat. 2005/066426 World Intellectual Property Organization, IPC E 04 V 1/32. Three-hinged demountable arched structure / Matusiak Wieslaw. — Pres. 09.01.2004; publ. 21.07.2005.
- 11 А. с. 608895 СССР, МКИ Е 04 В 1/32. Element arki / I. L. Kuznecov. — Заявл. 14.02.77; опубл. 28.02.78; бюл. № 20.
- 12 А. с. 746058 СССР, МКИ Е 04 В 1/58. Узловое соединение однотипных элементов арки / И. Л. Кузнецов. — Заявл. 13.03.81; опубл. 30.07.82; бюл. № 25.
- 13 А. с. 676702 СССР, МКИ Е 04 В 1/58. Узловое соединение элементов арки / И. Л. Кузнецов. — Заявл. 24.03.78; опубл. 30.07.79; бюл. № 28.
- 14 Пат. 2273702 Российская Федерация, МПК Е 04 В 1/58. Узловое соединение элементов арки / И. Л. Кузнецов, Р. М. Яруллин. — Заявл. 28.10.2004; опубл. 10.04.2006; бюл. № 10.
- 15 Kuznecov I. L., Gajnetdinov R. G., Sudarikov V. A. Poligonal'naya arka. Patent na izobretenie №2750773 ot 02.07.2021.

Статья поступила в редакцию 24 мая 2021 г.
Опубликована в сентябре 2021 г.

Ivan Kuznetsov

Doctor of Technical Sciences, Professor, Institute of construction, Kazan State University of Architecture and Engineering (KSUAE), Kazan, Russian Federation
e-mail: kuz377@mail.ru
ORCID ID: 0000-001-6838-0319

Rishat Gainetdinov

Assistant, Institute of construction, Kazan State University of Architecture and Engineering (KSUAE), Kazan, Russian Federation
e-mail: rishat.gajnetdinov@bk.ru
ORCID ID: 0000-001-6838-0319

Lenar Khairullin

Candidate of Technical Sciences, associate professor, Institute of construction, Kazan State University of Architecture and Engineering (KSUAE), Kazan, Russian Federation
e-mail: lenarhay@mail.ru
ORCID ID: 0000-0002-2870-4195

24 августа 2021 года на 71 году жизни выдающийся ученый в области строительных наук, доктор технических наук, профессор Кузнецов Иван Леонидович скоропостижно скончался.

Иван Леонидович прошел большой жизненный путь и проявил себя как блестящий ученый, талантливый педагог, который оставил яркий след и в практическом строительстве и в науке. Его научные работы, а их более 600, в том числе более 220 изобретений, защищенных авторскими свидетельствами и патентами РФ внесли неоспоримый вклад в научно-технический прогресс в области строительства.

Иван Леонидович был для всех нас хорошим другом, коллегой, наставником, у которого всегда было чему поучиться, прежде всего его организованности, исполнительности и высокой требовательности к себе и другим.

Его уход большая потеря как для всего коллектива кафедры МКИИС КазГАСУ, так и для каждого, кто знал Ивана Леонидовича лично.

Коллектив кафедры МКИИС КазГАСУ выражает соболезнования родным и близким в связи с утратой выдающегося ученого, наставника и друга.

Благодарная память о нем всегда будет с нами.