

КОНСТРУКЦИЯ С РЕШЕТКОЙ ИЗ U-ОБРАЗНОГО ПРОФИЛЯ

© А. С. Марутян

Филиал СКФУ, Пятигорск, Россия

Приведен сравнительный расчет оптимальных параметров стержневых элементов из V- и U-образных профилей. Оба они оптимизированы по критерию равноустойчивости. Первый получен в результате раскрытия полок равнобокого уголка на угол, меньший прямого, и применен в качестве прототипа для второго. U-образный профиль состоит из двух вертикальных стенок, соединенных круглым полукольцом, и отличается отношением габаритных размеров ширины и высоты 1/1,39 по средней линии его расчетного сечения. Тестирование приближенной методики расчета подтвердило ее необходимую и достаточную корректность, остающуюся в пределах погрешностей конечно-элементного моделирования. Результаты расчета показали, что при одинаковом расходе конструкционного материала U-образный профиль более предпочтителен, поскольку его размеры компактнее, а ресурсы несущей способности больше.

Ключевые слова: решетчатая конструкция, гнутозамкнутый профиль, U-образный профиль, оптимизационный расчет, равноустойчивость.

Введение

Предлагаемое техническое решение предназначено для несущих и связевых решетчатых систем и может быть использовано при изготовлении ферм, прогонов, колонн, арок, рам и других строительных конструкций. Известным техническим решением является

ферма, включающая пояса из гнутых тавров, двойные стенки которых сболчены со стержневыми элементами решетки из одиночных уголков [1]. Каждый из уголков соединен с поясным элементом только одной полкой, что существенно ограничивает его несущую способность (рис. 1).

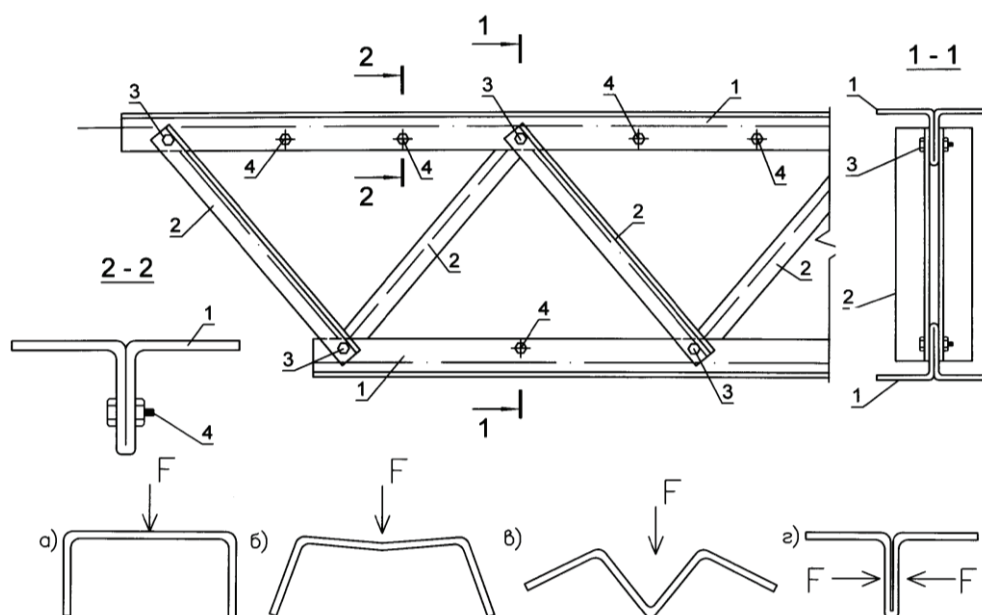


Рис. 1. Схемы фермы с поясами из гнутых тавров с двойными стенками и решеткой из одиночных уголков: 1 – стержни поясов; 2 – стержни решетки; 3 – болтовые соединения стержней поясов и решетки; 4 – болтовые соединения стержней поясов; а, б, в, г – очередность операций по изготовлению поясного стержня

Известно еще одно техническое решение (принятое за аналог) в виде строительного элемента для изготовления решетчатых конструкций, включающего тонкостенный стержень многоугольного замкнутого сечения, ребро которого по всей длине имеет двойную толщину и ряд соосных отверстий под болты. В этом ряду предусмотрены также соединения со стержневыми элементами решетки из одиночных уголков (рис. 2) [2]. Поскольку каждый из уголков решетки соединен с поясным элементом только одной полкой, недостаток аналога совпадает с недостатком приведенной выше фермы.

Наиболее близким техническим решением (прототипом) для предлагаемого является решетчатая конструкция, включающая пояса из замкнутых профилей с листовыми фасонками на всю длину, соединенные стержнями решетки из одиночных уголков, прикрепленных к фасонкам на болтах и отличающихся углом γ раскрытия полок:

$$\gamma = 2 \arccos \sqrt{(4b^2 - t^2) / (5b^2 - 2t^2)}, \quad (1)$$

где b – размер полки уголка, t – толщина полки уголка.

При этом в обушках по концам уголков выполнены прорезы на ширину поясных фасонки, полки уголков в узлах крепления сплюснены до контакта с фасонками, в сплюсненных полках и фасонках имеются соосные отверстия для болтов (рис. 3) [3].

В техническом решении прототипа стержневые элементы решетки оптимизированы по критерию равноустойчивости, что обеспечивает устойчивость, одинаковую в плоскости наибольшей жесткости и в плоскости наименьшей жесткости. При такой оптимизации за счет острого угла раскрытия полок профили стержневых элементов решетки трансформируются из уголкового с ортогональным сопряжением этих полок в V-образные. С переходом от прямого к острому углу конструкционный материал в обеих полках профиля располагается с меньшим удалением от центра

тяжести поперечного сечения, что увеличивает наклеп и концентрацию напряжений, снижает устойчивость стержневого элемента [4-7]. Влияние такого снижения проявляется и в прокатном уголке [8, 9], и в гнутом [10], и в алюминированном [11]. Поэтому определенная проработка профиля с более обтекаемым удалением материала от центра тяжести сечения может повысить его несущую способность.

V-образная компоновка равнополочных уголков в стержневых элементах решеток встречается гораздо реже ортогональной (Г- или L-образной). В частности, она использована в конструкциях покрытия типа «Тагил» с поясами из двутавров (рис. 4) [12-14].

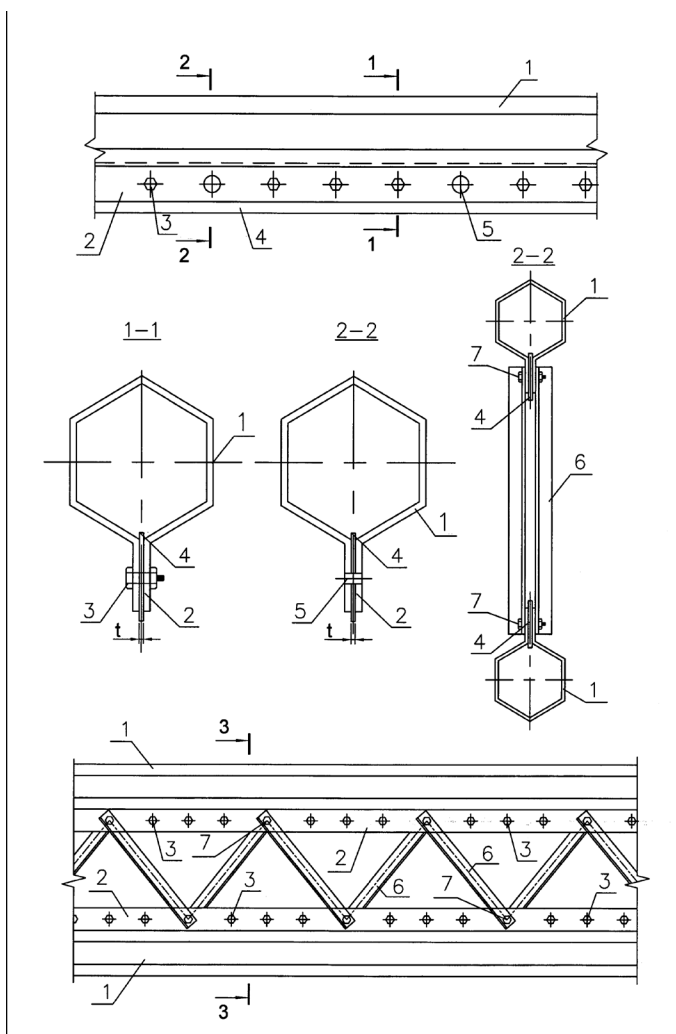


Рис. 2. Схемы строительного элемента для изготовления решетчатых (ферменных) конструкций: 1 – поясной стержень замкнутого сечения; 2 – кромки ребра; 3 – поясной болт; 4 – листовая полоса; 5 – отверстие; 6 – стержень решетки; 7 – болтовое соединение пояса и стержней решетки

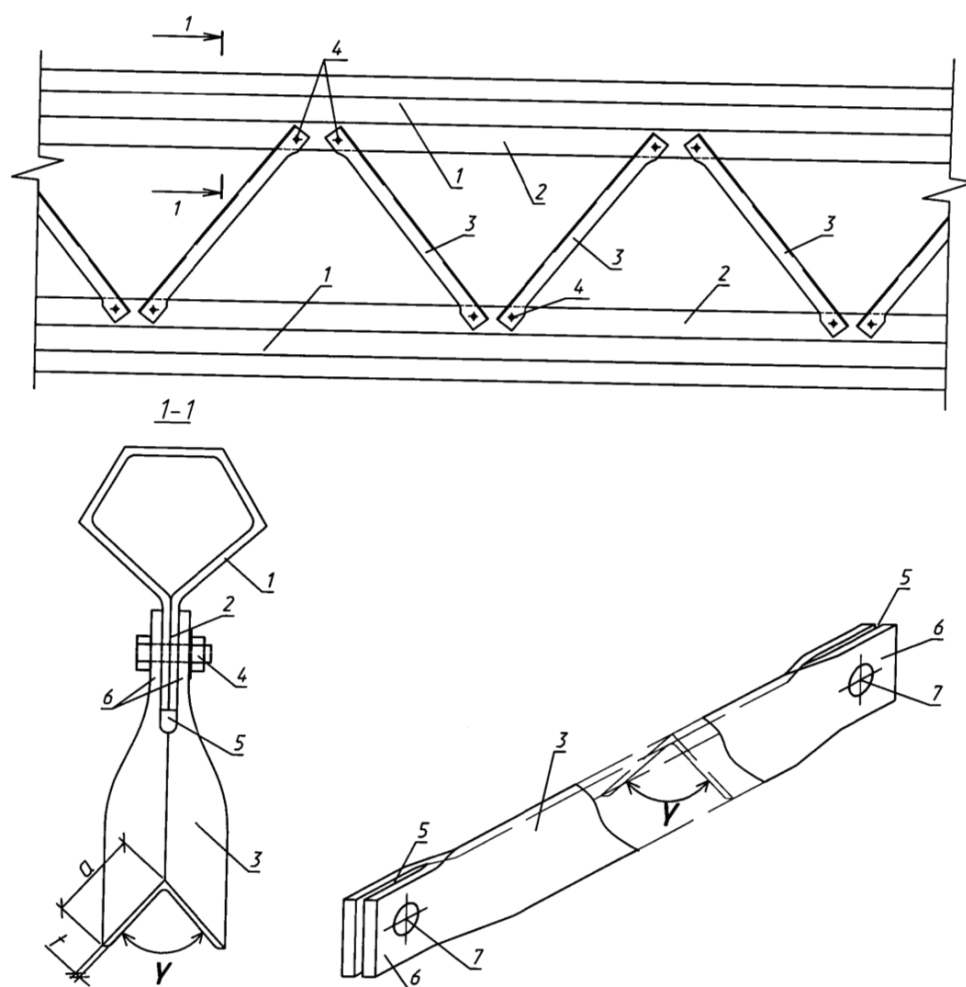


Рис. 3. Схемы решетчатой (ферменной) конструкции: 1 – пояс из замкнутого профиля; 2 – листовая фасонка на всю длину пояса; 3 – стержень решетки из уголка; 4 – болт; 5 – прорезь; 6 – сплюснутые полки стержня решетки; 7 – отверстие

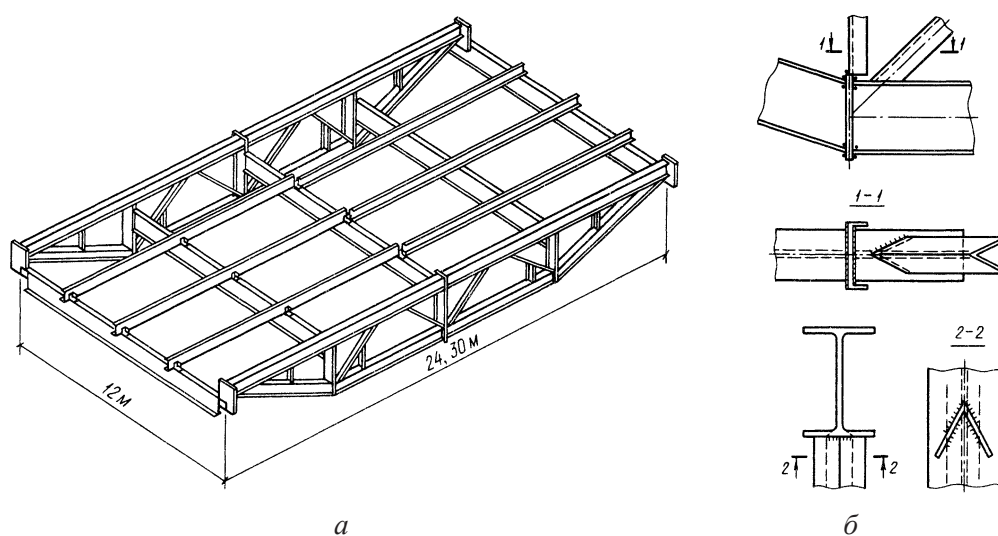


Рис. 4. Аксонометрия ферменных конструкций покрытия типа «Тагил» (а) и схемы их основных узлов (б)

Менее известны модификации, в одной из которых одиночный уголок верхнего пояса снабжен столиками для опирания на них кровельных прогонов (рис. 5) [15], а в другой – уголкового профиль верхнего пояса усилен швеллером, опертый на грани этого профиля и ребро между ними с образованием составного сечения [16].

Техническим результатом предлагаемого решения является повышение устойчивости, сокращение расхода конструкционного материала, уменьшение наклепа и концентрации напряжений, снижение массы (веса) решетчатой конструкции. Он достигается тем, что в конструкции, включающей пояса из гнутозамкнутых профилей, соединенных стержнями решетки, сплюснутые торцы которых снабжены прорезями и соосными отверстиями для болтов, стержневые элементы решетки имеют U-образное сечение с отношением габаритов ширины и высоты $1/1,39$ по средней линии этого же сечения (рис. 6) [17].

В предлагаемой конструкции верхний и нижний пояса выполнены из гнутозамкнутых профилей, имеющих трубчатую (замкнутую) часть одиночной (одинарной) толщины и реберную часть двойной толщины. Реберная часть замыкает листовую развертку (заготовку) в профиль при помощи болтовых, заклепочных, сварных, замковых (фальцевых или зубчатых) и других соединений [18-22]. Для непосредственного примыкания к реберной части гнутозамкнутого профиля верхнего или нижнего пояса с образованием соединительного узла U-образный профиль каждого из стержневых элементов решетки в торцах прорезают и сплющивают. За счет протяженности продольных прорезей и ширины сплюснутых торцов вполне допустима унификация конструктивно-компоновочного оформления узловых соединений на болтах без эксцентриситетов с учетом закрепления одним болтом одного, двух или нескольких стержневых элементов решетки U-образного профиля. Исходя

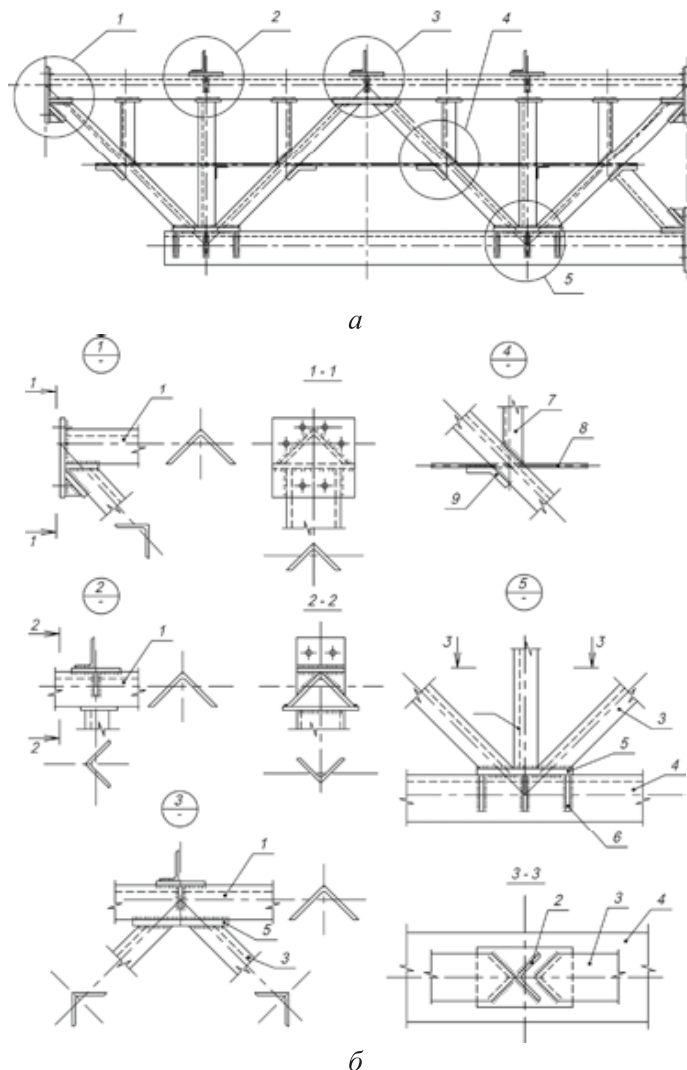


Рис. 5. Схемы полуфермы (отправочной марки) из одиночных уголков (а) и ее основных узлов (б)

из этого, чтобы стержневые элементы решетки в плоскости и из плоскости конструкции имели одну и ту же гибкость, целесообразен такой профиль их поперечного сечения, у которого радиусы инерции по главным центральным осям имеют равные значения. Такому условию вполне отвечает тонкостенное сечение U-образной формы с отношением габаритов ширины и высоты $1/1,39$ по его средней линии, где больший габарит расположен в плоскости конструкции, а меньший – из плоскости.

Таким образом, настоящее исследование преследует две цели. Первая из них представляет собой тестовый (проверочный) расчет незамкнутых профилей по приближенной методике с использованием средних линий поперечных сечений, когда значения статических

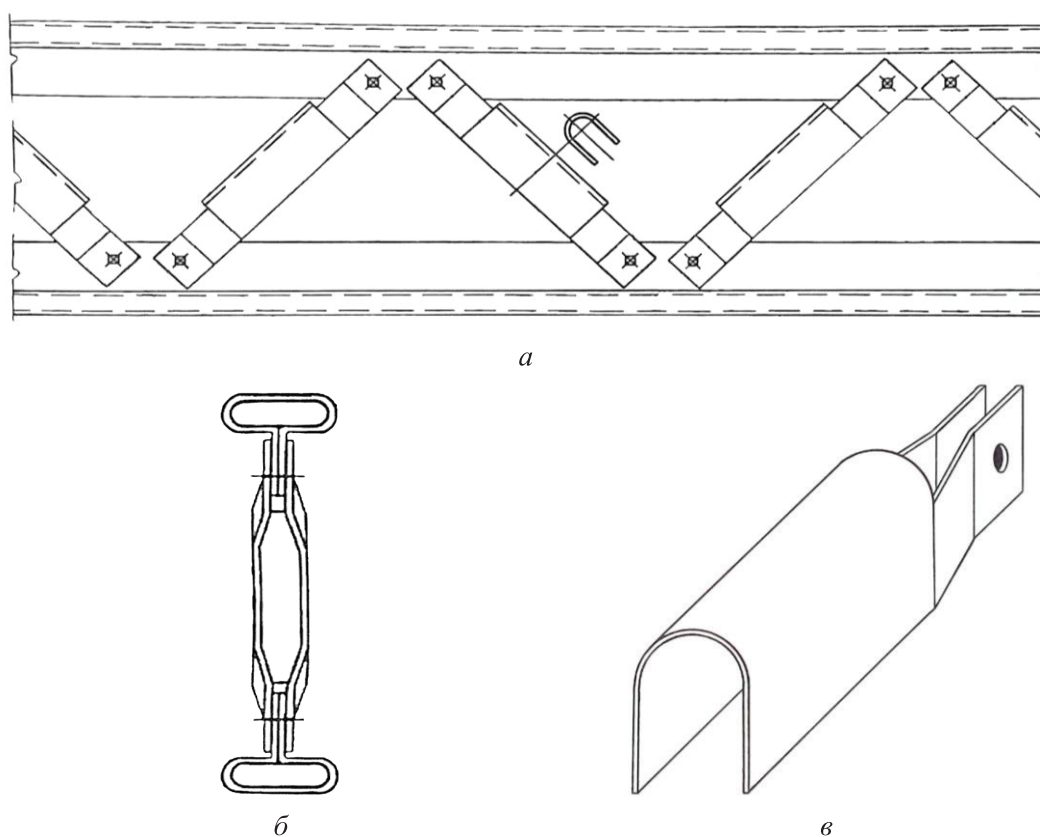


Рис. 6. Схема конструкции с решеткой из U-образного профиля (а), ее разрез (б) и аксонометрия фрагмента стержня решетки (в)

(геометрических) характеристик, полученных с ее применением, можно сравнить с величинами тех же параметров, определенных в результате информационного (компьютерного) моделирования. Вторая цель – показать, что по своим статическим (геометрическим) и технико-экономическим характеристикам U-образные профили в решетках ферменных конструкций более предпочтительны, чем V-образные профили, включая одиночные уголки с оптимальным углом раскрытия полков.

Расчет оптимальных параметров V-образного профиля

Для вывода оптимального отношения и количественной оценки ресурсов V-образного профиля за его расчетное сечение целесообразно принять составную фигуру, включающую пару наклонных прямоугольников размерами $t \times b$, расположенных под углом α симметрично относительно вертикали (рис. 7):

$$b = \sqrt{V^2 + (0,5U)^2} = U \sqrt{1/n^2 + 0,25}; \quad (2)$$

$$\sin \alpha = 0,5U / b = 0,5 / \sqrt{1/n^2 + 0,25};$$

$$\sin^2 \alpha = 0,25 / (1/n^2 + 0,25); \quad (3)$$

$$\cos \alpha = V / b = 1 / n \sqrt{1/n^2 + 0,25};$$

$$\cos^2 \alpha = 1 / n^2 (1/n^2 + 0,25), \quad (4)$$

где n – отношение габаритных размеров ширины профиля U по средней линии сечения и высоты профиля V также по средней линии сечения,

$$n = U / V. \quad (5)$$

Численные выкладки допустимо выполнять по средней линии расчетного сечения без учета входящих в них величин, содержащих значение толщины, возведенное во вторую и третью степень (t^2, t^3), а также без учета угловых закруглений [23]:

$$A = 2tU \sqrt{1/n^2 + 0,25}; \quad (6)$$

$$I_x = tU^3 (0,1666666 \sqrt{1/n^2 + 0,25}) / n^2; \quad (7)$$

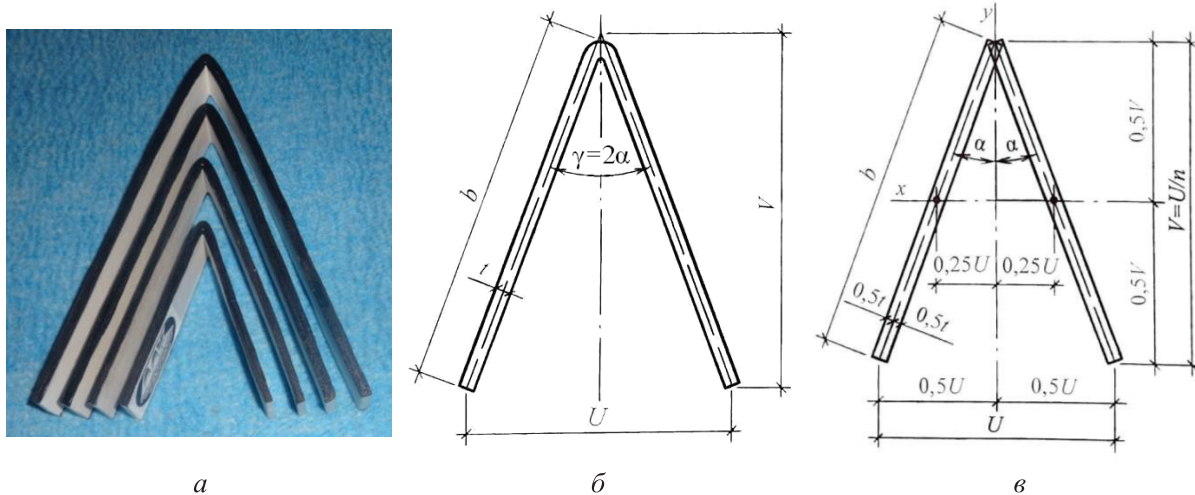


Рис. 7. Снимок среза разнокалиберных V-образных профилей (а) и расчетные схемы их сечения (б, в)

$$I_y = tU^3(0,1666666\sqrt{1/n^2 + 0,25}), \quad (8)$$

где A – расчетная площадь сечения профиля; I_x – расчетный осевой момент инерции сечения относительно оси $x - x$; I_y – расчетный осевой момент инерции сечения относительно оси $y - y$.

Для решения задачи с равноустойчивостью в качестве критерия оптимизации V-образного профиля осевые моменты его сечения должны иметь нулевую разницу, то есть $I_x - I_y = 0$.

Если подставить расчетные значения моментов инерции (7) и (8), то для отношения (5) можно получить уравнение второй степени

$$1/n^2 - 1 = 0$$

с корнями

$$n_1 = -1; n_2 = 1.$$

Из этих корней прикладное значение имеет последний, так как он позволяет определять расчетные параметры оптимизированных по критерию равноустойчивости V-образных профилей в самом общем случае:

$$n = 1 = 1/1; A = 2,2360678tU;$$

$$U = V = 0,4472136A/t; b = 0,5A/t;$$

$$\cos \alpha = 0,8944272; \sin \alpha = 0,4472136;$$

$$\alpha = 26,57^\circ; \gamma = 2\alpha = 53,14^\circ;$$

$$I_x = I_y = 0,1863389U^3 = 0,0166666A^3/t^2, \text{ сечения профиля (рис. 8):}$$

где A и t – соответственно площадь сечения и толщина листовой заготовки для профиля, $A = \text{const}$ и $t = \text{const}$.

Полученное значение угла γ практически совпало с углом раскрытия равнополочного уголка сечением $b \times b \times t = 100 \times 100 \times 7$ мм ($\gamma = 53,1^\circ$) [24], включая расчет по формуле (1):

$$\gamma = 2 \arccos \sqrt{(4 \times 100^2 - 7^2)/(5 \times 100^2 - 2 \times 7^2)} = 2 \arccos 0,8947564 = 2 \times 26,52^\circ = 53,04^\circ$$

при погрешности

$$100(53,14 - 53,04)/(53,14 \dots 53,04) = 0,188 \dots 0,189\%.$$

В необходимой и достаточной корректности приближенной методики расчета можно убедиться еще раз, если в формуле (1) обнулить значение толщины профиля ($t = 0$):

$$2 \arccos \sqrt{(4 \times 100^2 - 0^2)/(5 \times 100^2 - 2 \times 0^2)} = 2 \arccos 0,8944271.$$

Расчет оптимальных параметров U-образного профиля

Расчетное сечение U-образного профиля можно представить составной фигурой из пары вертикальных прямоугольников размерами $t \times (V - 0,5U)$, объединенных круглым полукольцом толщиной t и радиусом по его средней линии $R = 0,5U$, где V (U) – габаритный размер высоты (ширины) по средней линии сечения профиля (рис. 8):

$$A = tU(2/n + 0,57); \quad (9)$$

$$y_0 = U(1/n^2 + 0,034955)/(2/n + 0,57); \quad (10)$$

$$I_x = tU^3(0,6666666/n^5 + 0,95/n^4 + 0,07678/n^3 - 0,018247/n^2 + 0,0098689/n + 0,001058)/(2/n + 0,57)^2; \quad (11)$$

$$I_y = tU^3(0,5/n - 0,53575), \quad (12)$$

где y_0 – ордината центра тяжести расчетного сечения профиля относительно точки пересечения средней линии его полукольцевой части с вертикальной осью симметрии;

$$n = U/V = (B - t)/(H - 0,5t); \quad (13)$$

$B(H)$ – габаритный размер ширины (высоты) профиля по наружной линии его сечения.

Поскольку расчетное сечение U-образных профилей отличается от такого же сечения полуплоскоовальных профильных труб (замкнутых гнутосварных профилей) отсутствием полки (горизонтальной грани), корректность приведенных формул проверена с помощью приближенной методики расчета, апробированной при оптимизации стержневых и балочных элементов из таких труб [25]. С не меньшим успехом полученные формулы проверены на примере расчетного сечения плоскоовальных профильных труб (замкнутых гнутосварных профилей) с отношением габаритных размеров ширины и высоты по средней линии $n = U/V = 1/2,78$, скомпонованного из парных U-образных профилей с отношением $n = U/V = 1/1,39$. Для этого использована методика приближенного расчета, апробированная при оптимизации плоскоовальных профилей применительно к ферменным конструкциям [26].

Равноустойчивость U-образных профилей обеспечена при нулевой разнице осевых моментов инерции их расчетного сечения, то есть когда $I_x - I_y = 0$.

Если подставить расчетные значения моментов инерции по (11) и (12), то для отношения габаритных размеров ширины и высоты ($n = U/V$) можно получить уравнение пятой степени

$$0,6666666/n^5 + 0,95/n^4 - 1,92322/n^3 - 0,9432427/n^2 - 0,0300311/n + 0,0185213 = 0$$

с корнями

$$n_1 = -3,9025612; n_2 = -3,5087055;$$

$$n_3 = 0,7191272; n_4 = 8,7321874.$$

Из этих корней практический интерес вызывает предпоследний, значение которого можно округлить до приведенного выше отношения, а также записать в самом общем случае для оптимизированных по критерию равноустойчивости U-образных профилей:

$$n = 0,7191272 = 1/1,3905754 \approx 1/1,39;$$

$$A = 3,3511491tU;$$

$$U = 0,2984051A/t \quad (66,73\%);$$

$$V = 0,4149545A/t \quad (92,79\%);$$

$$y_0 = 0,5874559U = 0,1752998A/t;$$

$$I_x = 0,6414454tU^3 =$$

$$= 0,0170442A^3/t^2 \quad (102,27\%);$$

$$I_y = 0,6415372tU^3 =$$

$$= 0,0170466A^3/t^2 \quad (102,28\%);$$

$$I_x/I_y = 0,9998569 \approx 1$$

при погрешности $100(0,6415372 - 0,6414454) / (0,6415372 + 0,6414454) = 0,0143\%$, а также $A = \text{const}$ и $t = \text{const}$.

Здесь расчетные параметры оптимизированных V-образных профилей (прототип) приняты за эталонные (100-процентные) показатели. Их сравнение с соответствующими показателями таких же U-образных профилей (предлагаемое решение), приведенных в скобках, со всей определенностью указывает на более высокие геометрические (статические) характеристики и более компактные размеры у U-образных профилей.

Пример замены V-образного профиля U-образным

Для более наглядного примера использования U-образного профиля в качестве стержневого элемента решетки конструкции за базовый объект можно принять прокатной уголок сечением $7 \times 100 \times 100$ мм, оптимизированный по техническому решению из прототипа [24]: $A = 13,024 \text{ см}^2$; $I_x = 75,262 \text{ см}^4$; $I_y = 75,480 \text{ см}^4$; $i_x = 2,404 \text{ см}$; $i_y = 2,407 \text{ см}$; $U = V = 0,4472136 \times 13,024/0,7 = 8,320 \text{ см}$.

Предлагаемое техническое решение представлено U-образным профилем с габаритом высоты $V = 8,32$ см и следующими характеристиками его расчетного сечения:

$$t = 0,4149454 \times 13,024/8,320 = 0,6496 \text{ см} \rightarrow t =$$

$$6,0 \text{ мм (ГОСТ 19903-2015);}$$

$$A = 0,60 \times 8,320/0,4149545 = 12,042 \text{ см}^2 \quad (92,46\%);$$

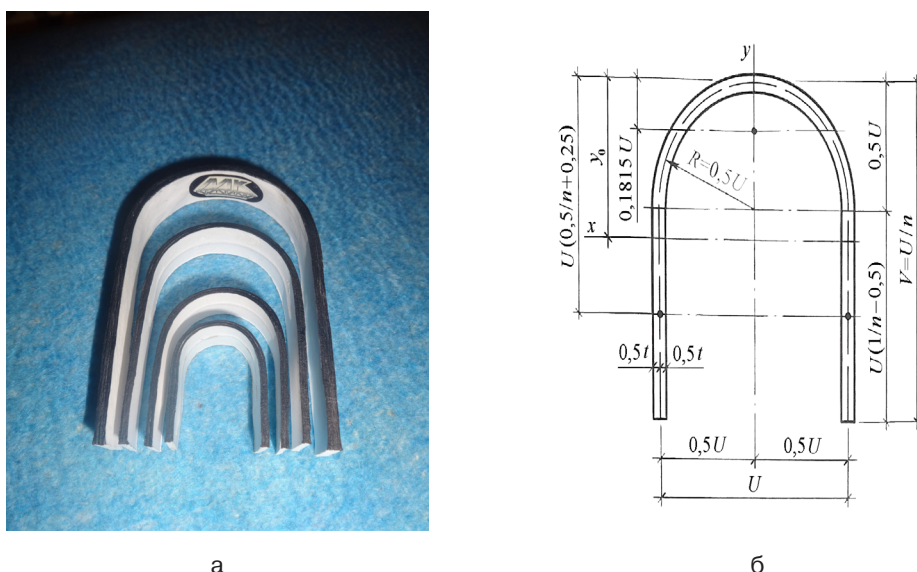


Рис. 8. Снимок среза разнокалиберных U-образных профилей (а) и расчетная схема их сечения (б)

$$U = 0,2984051 \times 12,042 / 0,60 = 5,989 \approx 6,0 \text{ см};$$

$$I_x = 0,0170442 \times 12,042^3 / 0,60^2 = 82,674 \text{ см}^4$$

(109,8%);

$$I_y = 0,0170466 \times 12,042^3 / 0,60^2 = 82,686 \text{ см}^4$$

(109,5%);

$$i_x = \sqrt{82,674 / 12,042} = 2,620 \text{ см (109,0\%);}$$

$$i_y = \sqrt{82,686 / 12,042} = 2,623 \text{ см (109,0\%);}$$

где за эталонные (100-процентные) показатели приняты соответствующие характеристики расчетного сечения из базового объекта.

Судя по полученным результатам сравнительного расчета, замена V-образного профиля, оптимизированного из уголка сечением 100×100×7 мм, в стержневых элементах решетки U-образным профилем сечением 86,2×66×6 мм сопровождается уменьшением площади расчетного сечения и, как следствие, расхода конструкционного материала на 7,54 %, а также увеличением геометрических (статических) характеристик того же сечения на 9,0...9,8 % и соответствующим повышением устойчивости этих элементов.

Заключение

Полученные результаты сопоставительного расчета оптимальных параметров стержневых элементов решеток из V-образных (прототип) и U-образных (предлагаемое решение) гнутых профилей позволяют сделать ряд выводов и обобщений.

1. При использовании одной и той же листовой заготовки U-образный профиль выгодно отличается более компактными размерами ширины и высоты, а также более высокими геометрическими (статическими) характеристиками, чем V-образный профиль.

2. Острый угол раскрытия полков V-образного профиля приводит к определённому росту наклепа и концентрации напряжений, а также сокращению расстояния от расположения конструкционного материала до центра тяжести сечения и, как следствие, уменьшению устойчивости.

3. Круглое полукольцо, соединяющее параллельные стенки U-образного профиля, способствует определённому снижению наклепа и концентрации напряжений, а также обеспечивает расположение конструкционного материала с большим удалением от центра тяжести сечения и, как следствие, увеличением устойчивости.

4. Замена в стержневых элементах решеток V-образных профилей U-образными профилями при прочих равных условиях сопровождается определённым ростом несущей способности и, как следствие, полезной нагрузки, а при неизменной нагрузке приводит к сокращению расхода конструкционного материала и массы (веса) конструкции.

5. Разработку решетчатых конструкций с применением гнутых и гнутозамкнутых про-

филей (ГЗП) можно признать достаточно рациональной, эффективной для перспективного использования в несущих и связевых системах различных зданий (сооружений).

6. Приближенная методика расчета тонкостенного сечения по его средней линии обладает необходимой и достаточной корректностью для практического использования при решении оптимизационных задач и вариантном проектировании строительных конструкций, а ее

погрешности не превышают пределов неточностей конечно-элементного моделирования.

Завершая заключительную часть, представляется вполне уместным отдать поклон светлой памяти и высказать добрые слова благодарности Ивану Леонидовичу Кузнецову, сделавшему так много для разработки и исследования легких металлических конструкций, отрасли которых исполняется в текущем году полста лет.

ЛИТЕРАТУРА

1. Кузнецов И. Л., Салахутдинов М. А., Фахрутдинов А. Э. Ферма // Патент № 2647137. 14.03.2018. Бюл. № 8.
2. Кузнецов И. Л., Салахутдинов М. А., Саянов С. Ф. Строительный элемент для изготовления решетчатой конструкции // Патент № 2633851. 18.10.2017 Бюл. № 29.
3. Кузнецов И. Л., Фахрутдинов А. Э., Салахутдинов М. А. Решетчатая конструкция // Патент № 2715785. 03.03.2020. Бюл. № 3.
4. Бабалич В. С., Сухина К. Н., Сухин К. А., Дубовский Е. А., Слышкина Е. А. Алгоритм расчета основных геометрических характеристик сечения с дефектами // Инженерный вестник Дона. 2019. № 5. ivdon.ru/ru/magazine/archive/n5y2019/5893.
5. Вильгельм Ю. С. Влияние погиба равнополочного уголка на несущую способность конструкции покрытия / К. Н. Сухина, М. Е. Дубовский, В. Н. Слышкина, В. Н. Власов, К. А. Сухин // Инженерный вестник Дона. 2019. № 2. ivdon.ru/ru/magazine/archive/n2y2019/5719.
6. Arthur A. de Menezes, Pedro C. G. da S. Vellasco, Luciano R. O. de Lima, Andre T. da Silva. Experimental and numerical investigation of austenitic stainless steel hot-rolled angles under compression // Journal of Constructional Steel Research 152 (2019) 42-56.
7. Songzhao Qua, Yonghua Guob, Qing Sunc. Resistances of high-strength steel equal-leg-angle section columns eccentrically connected by one leg // Journal of Constructional Steel Research 191 (2022) 107143.
8. Горохов Е. В. Влияние геометрических несовершенств уголков на несущую способность стойки пояса опоры ЛЭП / Е. В. Горохов, В. Н. Васылев, В. Г. Гаврилов, А. В. Танасогло, Р. И. Игнатенко // Металлические конструкции. 2021. № 1. С. 29-43.
9. Aljosa Filipovic, Jelena Dobric, Nancy Baddoo, Primoz Moze. Experimental response of hot-rolled stainless steel angle columns // Thin-Walled Structures 163 (2021) 107659.
10. Fangying Wanga, Yating Liangb, Ou Zhaoa, Ben Youngc. Pin-ended press-braked S960 ultra-high strength steel angle section columns: Testing, numerical modelling and design // Engineering Structures 228 (2021) 111418.
11. Wang Y. Q., Wang Z. X., Hu X. G., Han J. K., Xing H. J. Experimental study and parametric analysis on the stability behavior of 7A04 high-strength aluminum alloy angle columns under axial compression // Thin-Walled Structures 108 (2016) 305-320.
12. Металлические конструкции. В 3 т. Т. 2. Стальные конструкции зданий и сооружений. (Справочник проектировщика) / Под ред. В. В. Кузнецова (ЦНИИпроектстальконструкция им. Н. П. Мельникова). М.: Издательство АСВ, 1998. С. 235-236.
13. Соболев Ю. В., Зинкевич И. В. К расчету элементов решетки ферм типа «Тагил» // Известия вузов. Строительство и архитектура. 1989. № 12. С. 12-17.
14. Проектирование металлических конструкций: Спец. курс / В. В. Бирюлев, И. И. Кошин, И. И. Крылов, А. В. Сильверстов. Л.: Стройиздат, 1990. С. 85, 89-91.
15. Байшев А. Ю., Байшев Ю. П., Годзевич Э. В., Плохих В. И. Рациональные конструктивные решения стальных элементов большепролетных зданий // Академический вестник УралНИИпроект РААСН. 2018. № 1. С. 62-66.

16. Шимановский О. В., Божко В. А., Перельмутер А. В. Новые технические решения симметричных ферм из одиночных уголков: Сборник научных трудов Украинского научно-исследовательского и проектного института стальных конструкций им. В. М. Шимановского. Выпуск 1. 2008. С. 80-84.
17. Марутян А. С. Конструкция с решеткой из U-образного профиля // Патент №207351. 25.10.2021. Бюл. №30.
18. Аветян Н. Ю., Марутян А. С. Плоскоовальные гнутозамкнутые профили // Инвестиции, строительство, недвижимость как драйверы социально-экономического развития территории и повышения качества жизни населения: материалы XI Международной научно-практической конференции, 3-4 марта 2021 г. / Под ред. Т. Ю. Овсянниковой, И. Р. Салагор. Томск: Издательство ТГАСУ, 2019. Ч. 1. С. 342-347.
19. Кузнецов И. Л., Гимранов Л. Р., Салахутдинов М. А., Фахрутдинов А. Э. Совершенствование узлов стальных ферм с поясами из многогранных труб // Известия КГАСУ. 2017. №3. С. 116-123.
20. Марутян А. С. Гнутозамкнутые профили и расчет их оптимальных параметров // Строительная механика инженерных конструкций и сооружений. 2019. Т. 15. №1. С. 33-43. <http://doi.org/10.22363-1815-5235-2019-15-1-33-43>.
21. Липатникова В. С. Фальцевая картина с замком повышенной надежности // Патент №207500. 29.10.2021. Бюл. №31.
22. Салахутдинов М. А., Кузнецов И. Л., Саянов С. Ф. Стальные фермы с поясами из труб многогранного сечения // Известия КГАСУ. 2016. №4. С. 236-242.
23. Марутян А. С. Оптимизация конструкций из трубчатых (гнуто сварных) профилей квадратных (прямоугольных) и ромбических сечений // Строительная механика и расчет сооружений. 2016. №1. С. 30-38.
24. Салахутдинов М. А., Кузнецов И. Л., Фахрутдинов А. Э. Решетчатая конструкция // Академический вестник УралНИИпроект РААСН. 2019. №2. С. 86-90.
25. Марутян А. С. Расчет оптимальных параметров полуплоскоовальных труб для ферменных и балочных конструкций // Строительная механика и расчет сооружений. 2019. №2. С. 68-74.
26. Марутян А. С., Абовян А. Г. Расчет оптимальных параметров плоскоовальных труб для ферменных конструкций // Строительная механика и расчет сооружений. 2017. №4. С. 17-22.

CONSTRUCTION WITH A U-SHAPED PROFILE GRILLE

© A. S. Marutyan

Branch of NCFU, Pyatigorsk, Russia

A comparative calculation of the optimal parameters of rod elements from V- and U-shaped profiles is given. Both of them are optimized according to the criterion of equidistance. The first one was obtained as a result of opening the shelves of an equilateral corner by an angle smaller than a straight one, and was used as a prototype for the second one. The U-shaped profile consists of two vertical walls connected by a circular semicircle, and differs in the ratio of overall dimensions of width and height 1/1.39 along the middle line of its design section. Testing of the approximate calculation method confirmed its necessary and sufficient correctness, remaining within the limits of errors of finite element modeling. The results of the calculations showed that with the same consumption of structural material, the U-shaped profile is more preferable, since its dimensions are more compact, and the load-bearing capacity resources are greater.

Keywords: lattice structure, bent-closed profile, U-shaped profile, optimization calculation, equidistance.

REFERENCES

1. Kuznecov, I. L., Salahutdinov, M. A. and Faxrutdinov, A. (14.03.2018) *Ferma*. [Ferm], Byul, №8, Patent №2647137.
2. Kuznecov, I. L., Salahutdinov, M. A. and Sayanov, S. F. (18.10.2017) *Stroitelnyy element dlya izgotovleniya reshetchatoy konstrukcii*. [Building element for the manufacture of a lattice structure], Byul., №29, Patent №2633851.
3. Kuznecov I. L., Faxrutdinov A. E. and Salaxutdinov M. A. (03.03.2020) *Reshetchataya konstrukciya*. [Lattice structure], Byul. №3, Patent №2715785.
4. Babalich, V. S., Suxina, K. N., Suxin, K. A., Dubovskij, E. A. and Slyshkina, E. A. (2019) 'Algoritm rascheta osnovnyx geometricheskix xarakteristik secheniya s defektami'. *Inzhenernyj vestnik Dona*. [Algorithm for calculating the main geometrical characteristics of a section with defects // Engineering Bulletin of the Don.], №5, available at: [www. ivdon. ru/ru/magazine/ archive/n5y2019/5893](http://www.ivdon.ru/magazine/archive/n5y2019/5893).
5. Vilgelm, Yu. S., Suhina, K. N., Dubovskij, M. E., Slyshkina, V. N., Vlasov, V. N. and Suhin, K. A. (2019) 'Vliyanie pogiba ravnopolochnogo ugolka na nesushhuyu sposobnost konstrukcii pokrytiya' *Inzhenernyj vestnik Dona*. [Influence of the equal-shelf corner bending on the bearing capacity of the coating structure. Engineering Bulletin of the Don], №2, available at: [www. ivdon. ru/ru/magazine/ archive/n2y2019/5719](http://www.ivdon.ru/magazine/archive/n2y2019/5719).
6. Arthur, A. de Menezes, Pedro, C. G. da S. Vellasco, Luciano, R. O. de Lima and Andre, T. da Silva (2019) 'Experimental and numerical investigation of austenitic stainless steel hot-rolled angles under compression'. *Journal of Constructional Steel Research* 152, pp. 42-56.
7. Songzhao, Qua, Yonghua, Guoband and Qing Sunc (2022) 'Resistances of high-strength steel equal-leg-angle section columns eccentrically connected by one leg' *Journal of Constructional Steel Research* 191, 107143 p.
8. Gorohov, E. V., Vasylev, V. N., Gavrilov, V. G., Tanasoglo, A. V. and Ignatenko, R. I. (2021) 'Vliyanie geometricheskix nesovershenstv ugolkov na nesushhuyu sposobnost' stojki poyasa opory LEP'. [Influence of geometrical imperfections of the corners on the bearing capacity of the rack of the belt of the power transmission line support. Metal constructions]. *Metallicheskie konstrukcii*. №1. P. 29-43.
9. Aljosa, Filipovic, Jelena, Dobric, Nancy, Baddoo and Primoz, Moze (2021) Experimental response of hot-rolled stainless steel angle columns. *Thin-Walled Structures* 163, 107659 p.
10. Fangying Wanga, Yating Liangb, Ou Zhaoa, Ben Youngc. Pin-ended press-braked S960 ultra-high strength steel angle section columns: Testing, numerical modelling and design // *Engineering Structures* 228 (2021) 111418.
11. Y.Q. Wang, Z.X. Wang, X.G. Hu, J.K. Han, H.J. Xing. Experimental study and parametric analysis on the stability behavior of 7A04 high-strength aluminum alloy angle columns under axial compression // *Thin-Walled Structures* 108 (2016) 305-320.
12. (1998) *Metallicheskie konstrukcii v 3t. V. 2. Stalnye konstrukcii zdanij i sooruzhenij* (Spravochnik proektirovshhika), pod red. V.V. Kuzneczova (CzNIIproektstal'konstrukciya im. N.P. Mel'nikova). [Steel structures of buildings and structures. (Designer's Handbook). in V.V. Kuznetsova (ed.) (TsNIIprojectstalkonstruktsiya named after N.P. Melnikov)]. ASV Publishing House, Moscow, pp. 235-236.
13. Sobolev, Yu. V. and Zinkevich I. V. (1989) 'K raschetu elementov reshetki ferm tipa «Tagil»'. *Izvestiya vuzov. Stroitel'stvo i arxitektura*. [To the calculation of lattice elements of farms of the "Tagil" type. *Izvestiya vuzov. Construction and architecture*]. №12, Pp. 12-17.
14. Biryulev, V.V. Koshin, I. I., Krylov, I. I. and Silverstov, A.V. *Proektirovanie metallicheskih konstrukcij: Specz. kurs.: Strojizdat*, Leningrad, pp. 85, 89-91.
15. Bajshev, A. Yu., Bajshev, Yu. P., Godzevich, E. V. and Plohih, V. I. (2018) 'Racionalnye konstruktivnye resheniya stalnyx elementov bolsheproletnyx zdanij'. *Akademicheskij vestnik UralNIIproekt RAASN*. [Rational constructive solutions for steel elements of large-span buildings]. №1, pp. 62-66.
16. Shimanovskij, O. V., Bozhko, V. A., and Perelmuter, A. V. (2008) 'Novye texnicheskie resheniya

- simmetrichny'x ferm iz odinochny'x ugolkov'. [New technical solutions for symmetrical trusses from single corners]. *Sbornik nauchny'x trudov Ukrainskogo nauchno-issledovatel'skogo i proektnogo instituta stal'ny'x konstrukcij im. V.M. Shimanovskogo*. Vypusk 1, pp. 80-84.
17. Marutyan, A. S. *Konstrukciya s reshetkoj iz U-obraznogo profilya* (25.10.2021) [Structure with a U-profile grating], Byul. №30, Patent №207351
 18. Avetyan, N. Yu. and Marutyan, A. S. (2019) 'Ploskoovalnye gnutozamknutyje profile'. *Investicii, stroitel'stvo, nedvizhimost kak drazvery socialno-ekonomicheskogo razvitiya territorii i povysheniya kachestva zhizni naseleniya: materialy XI Mezhdunarodnoj nauchno-prakticheskoy konferencii, 3-4 marta 2021 g.* Pod red. T.Yu. Ovsyannikovej, I.R. Salagor. [Plano-oval bent-closed profiles. Investments, construction, real estate as drivers of the socio-economic development of the territory and improving the quality of life of the population: materials of the XI International Scientific and Practical Conference, in T.Yu. Ovsyannikova and I.R. Salagor (ed), Izdatelstvo TGASU, Ch. 1. Tomsk, pp. 342-347.
 19. Kuznecov, I. L., Gimranov, L. R., Salahutdinov, M. A., Fahrutdinov A.E. (2017) *Sovershenstvovanie uzlov stalnyx ferm s poyasami iz mnogogrannyx trub*. *Izvestiya KGASU*. [Improvement of nodes of steel trusses with belts from multifaceted pipes]. №3, pp. 116-123.
 20. Marutyan, A. S. (2019) 'Gnutozamknutyje profili i raschet ix optimalnyh parametrov'. [Bent-closed profiles and calculation of their optimal parameters. *Stroitel'naya mehanika inzhenernyh konstrukcij i sooruzhenij*. V. 15, №1, pp. 33-43, available at: <http://doi.org/10.22363-1815-5235-2019-15-1-33-43>.
 21. Lipatnikova, V. S. (29.10.2021) *Falceвая картина с замком повышенной надежности* [Seam picture with a high security lock], Byul. №31. Patent №207500
 22. Salahutdinov M.A., Kuznetsov I.L. and Sayanov, S. F. (2016) 'Stalnye fermy s poyasami iz trub mnogogrannogo secheniya'. [Steel trusses with belts made of multifaceted pipes]. *Izvestiya KGASU*, №4, pp. 236-242.
 23. Marutyan, A. S. (2016) 'Optimizaciya konstrukcij iz trubchatyh (gnutosvarnyh) profilej kvadratnyh (pyamougolnyh) i rombicheskix sechenij'. [Optimization of structures from tubular (bent-welded) profiles of square (rectangular) and rhombic sections]. *Stroitel'naya mehanika i raschet sooruzhenij*. №1, pp. 30-38.
 24. Salahutdinov, M.A., Kuznetsov, I. L. and Fahrutdinov, A. E. (2019) 'Reshchataya konstrukciya'. [Lattice structure], *Akademicheskij vestnik UralNIIProekt RAASN*. №2, pp. 86-90.
 25. Marutyan, A. S. (2019) 'Raschet optimalnyh parametrov poluploskoovalnyh trub dlya fermennyh i balochnykh konstrukcij'. [Calculation of optimal parameters of semi-flat oval pipes for truss and beam structures]. *Stroitel'naya mehanika i raschet sooruzhenij*. №2, pp. 68-74.
 26. Marutyan, A. S. and Abovyan, A. G. (2017) 'Raschet optimalnyh parametrov ploskoovalnyh trub dlya fermennyh konstrukcij'. [Calculation of optimal parameters of flat-oval pipes for truss structures]. *Stroitel'naya mehanika i raschet sooruzhenij*. №4, pp. 17-22.