

УДК 624.014.072.2

Легкие металлоконструкции из перекрестных систем, включая модули типа «Пятигорск»

Марутян А.С., к.т.н.

Филиал Северо-Кавказского федерального университета, Российская Федерация

Анотація. Наведено деякі результати розроблення і дослідження, проектування та запровадження легких металевих конструкцій комплектної поставки на основі систем перехресних ферм із гнотозварних профілів, у тому числі, модулів (блоків) покриттів (перекриттів) типу «П'ятигорськ». Сталеві ферми та їх перехресні системи оптимізовані при сітці колон 6×6, 12×12, 18×18, 24×24, 30×30, 36×36 і 42×42 м із використанням в якості критерію оптимізації витрати конструкційного матеріалу. Показана ефективність збільшення поверховості з підвищенням сейсмостійкості при реконструкції існуючої забудови, а також у новому будівництві за рахунок гнучкого верхнього поверху з модулів типу «П'ятигорськ». Виявлено перспективність поєднання в сталевих фермах та їх перехресних системах стержневих елементів із прямокутних (квадратних), ромбічних і п'ятикутних труб (замкнутих гнотозварних профілів).

Аннотация. Приведены некоторые результаты разработки и исследования, проектирования и внедрения легких металлических конструкций комплектной поставки на основе систем перекрестных ферм из гнотосварных профилей, в том числе, модулей (блоков) покрытий (перекрытий) типа «Пятигорск». Стальные фермы и их перекрестные системы оптимизированы при сетке колонн 6×6, 12×12, 18×18, 24×24, 30×30, 36×36 и 42×42 м с использованием в качестве критерия оптимизации расхода конструкционного материала. Показана эффективность увеличения этажности с повышением сейсмостойкости при реконструкции существующей застройки, а также в новом строительстве за счет гибкого верхнего этажа из модулей типа «Пятигорск». Выявлена перспективность сочетания в стальных фермах и их перекрестных системах стержневых элементов из прямоугольных (квадратных), ромбических и пятиугольных труб (замкнутых гнотосварных профилей).

Abstract. Some results of research and development, design and implementation of light-weight metal structures on basis of complete delivery systems for cross steel trusses of bent and welded profiles, including modules (blocks) of coatings (overlaps) of the "Pyatigorsk" type are considered in this article. Steel trusses and their cross systems are optimized for column grid of 6×6, 12×12, 18×18, 24×24, 30×30, 36×36 and 42×42 m using structural material flow as an optimization criterion. The effect of increasing number of stories with earthquake resistance during reconstruction of both existing and new constructed buildings due to the flexible top floor of the modules of the "Pyatigorsk" type is shown. Promising combinations in the steel truss systems and cross-bar elements of the rectangular (square), rhombic and pentagonal tubes (closed bent and welded profiles) are identified.

Ключевые слова: легкие металлические конструкции, перекрестные системы, замкнутые гнотосварные профили, перекрестные стальные фермы, модуль типа «Пятигорск», блок (секция) покрытия (перекрытия), реконструкция, этажность, сейсмостойкость.

Пространственно-стержневые системы из перекрестных стальных ферм типа «Пятигорск» представляют собой модули (блоки) покрытий и перекрытий [1] и относятся к легким металлическим конструкциям комплектной поставки. Они отличаются решетками с наклонными стойками (рис. 1), скомпонованными на основе бесфасоночных раскосных узлов гнутосварных профилей (ГСП) прямоугольного сечения [2]. Практика последних лет по разработке и исследованию, проектированию и внедрению показывает стабильность их спроса. Необходимый и достаточный ресурс несущей способности был подтвержден еще раз во время контрольных испытаний блоков покрытий размерами в плане 7,5×7,5 м цеха с подвесным краном грузоподъемностью 3,2 т [3].



Рис. 1. Снимки трехэтажного модуля при возведении служебного строения (а) и блока перекрытия в интерьере офисного здания (б)

Модули типа «Пятигорск», имея габариты в пределах 6×6...12×12 м, заняли ту нишу, которая обозначилась после разработки легких металлоконструкций с использованием перекрестных систем из гнутосварных профилей (ГСП) для производственных зданий и сооружений, имеющих квадратную сетку колонн 18×18 и 24×24 м [4, 5]. Введение ГОСТ Р 54157-2010 «Трубы стальные профильные для металлоконструкций» стало импульсом для продолжения оптимизационных расчетов перекрестных систем из ГСП при сетке колонн 30×30, 36×36 и 42×42 м. Результаты этих расчетов позволяют сделать определенные выводы, важнейший из которых заключается в том, что минимальный расход конструкционного материала (примененный в качестве критерия оптимизации) во всех модулях (блоках покрытий) получен при таком количестве ячеек поясной сетки перекрестных систем $n \times n$, когда размер этих ячеек (или шаг перекрестных ферм в каждом из ортогональных направлений) совпадает или немного превышает 6-метровый параметр, принятый в модульной координации размеров в строительстве (МКРС). Развернуто этот результат можно представить в следующем виде:

Сетка колонн, м	Оптимальное число ячеек, $n \times n$	Оптимальные размеры ячеек, м
6×6	2×2	3×3
12×12	2×2-3×3	4×4...6×6
18×18	2×2-3×3	6×6...9×9
24×24	3×3-4×4	6×6...8×8
30×30	4×4-5×5	6×6...7,5×7,5
36×36	5×5-6×6	6×6...7,2×7,2
42×42	6×6-7×7	6×6...7×7

Полученные значения оптимальных параметров позволяют сделать своего рода условный прогноз для продолжения ряда перекрестных систем из стальных ферм:

Сетка колонн, м	Оптимальное число ячеек, $n \times n$	Оптимальные размеры ячеек, м
48×48	7×7-8×8	6×6...6,9×6,9
54×54	8×8-9×9	6×6...6,8×6,8
60×60	9×9-10×10	6×6...6,7×6,7

Здесь верхний предел ряда перекрестных систем может быть лимитирован несущей способностью максимальных калибров замкнутых гнутосварных профилей, включенных в действующие сортаменты.

Проведенные оптимизационные расчеты и их итоги позволили сделать еще одно, весьма характерное, обобщение. Оно заключается в том, что суммарная масса настила с подкрепляющими его дополнительными стержневыми элементами-прогонами в перекрестных системах оказалась меньше, чем масса настила без дополнительных опор (беспрогонное покрытие). Кроме того, еще один немаловажный вывод представляет собой тот факт, что общая масса модулей в отдельных вариантах может отличаться очень незначительно. Тогда, допустив некоторый малозаметный перерасход материала за счет ощутимого сокращения количества составных элементов несущих конструкций, можно получить весьма существенный положительный эффект в виде уменьшения трудоемкости их изготовления и монтажа, сокращения продолжительности строительства.

При уточнении общего расхода конструкционного материала блоков покрытий масса вспомогательных элементов учтена с помощью строительного коэффициента массы ψ_m , который легко вычислить по формуле, апробированной неоднократно для разных перекрестных систем, включая их консольные модификации [6]:

$$\psi_m = 1,03 + 107,2(n + 1)/(pl^2), \quad (1)$$

где p – нагрузка на блок покрытия, кН/м², l – длина пролета, м.

Как видно, зависимость между строительным коэффициентом массы и числом ячеек поясной сетки при фиксированных параметрах нагрузки и пролета имеет линейный характер. Понятно, что на величине этого коэффициента сказываются также и конструктивное оформление узлов пересечения, и интенсивность нагрузки, и длина пролета, однако эти влияния менее существенны, и параметры строительного коэффициента определяются главным образом количеством узлов (или шагов). Расчетные значения строительного коэффициента достаточно близко совпали с фактическими, полученными в результате проектно-конструкторских проработок модулей (блоков покрытий) размерами в плане 18×18 и 24×24 м из замкнутых гнутосварных профилей, а также 30×30 м из прокатных профилей открытого (незамкнутого) сечения (табл. 1). Причем узлы пересечения поясов были решены в четырех вариантах (рис. 2) [7–12]: на гнутых фланцах с диафрагмами жесткости [13]; на гнутых фланцах без диафрагм; с поэтажным расположением пересекающихся поясных элементов; на уголковых фасонках с листовыми накладками [14]. Полученные результаты подтвердили возможность использования выражения (1) для строительного коэффициента массы при разработке перекрестных систем не только из замкнутых гнутосварных профилей, но и из прокатных профилей открытого сечения.

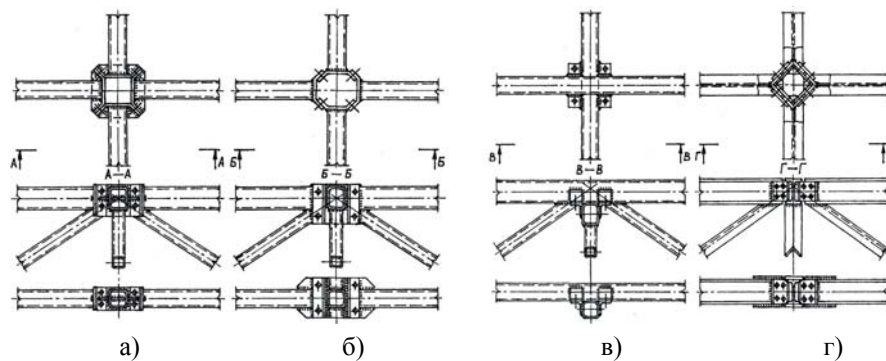


Рис. 2. Схемы узлов пересечения стальных перекрестных ферм в виде монтажных стыков: а – на гнутых фланцах с диафрагмами жесткости; б – на гнутых фланцах без элементов жесткости; в – с поэтажным расположением пересекающихся поясов; г – на уголковых фасонках с листовыми накладками

Стальные стропильные фермы наименьшей (минимальной) массы (веса) имеют наивыгоднейшую (оптимальную) высоту h_{opt} , тогда, когда масса их поясов равна массе их решеток. Для таких ферм, а также для перекрестных систем из контурных, средних и промежуточных ферм получены следующие выражения:

$$\text{Стропильные фермы} \quad h_{opt} = (0,3786...0,4667)l/(n_d)^{1/2}; \quad (2)$$

$$\text{Контурные фермы} \quad h_{opt} = (0,3662...0,4514)l/(n_d)^{1/2}; \quad (3)$$

$$\text{Средние фермы} \quad h_{opt} = (0,3276...0,4038)l/(n_d)^{1/2}; \quad (4)$$

$$\text{Промежуточные фермы} \quad h_{opt} = (0,3088...0,3807)l/(n_d)^{1/2}; \quad (5)$$

где n_d – число панелей, а в случаях с треугольной решеткой n_d – число полупанелей.

Таблица 1

Параметры строительного коэффициента массы

Сетка колонн, м	Нагрузка, p , кН/м ²	Кол-во шагов, $n \times n$	Конструкция узлов*	Строительный коэффициент, ψ_m		
				факт.	расчет.	разница, %
18×18	4	3×3	ГФДЖ	1,213	1,361	10,9
24×24		4×4		1,202	1,263	4,8
18×18		3×3	ГФ	1,255	1,361	7,8
24×24		4×4		1,205	1,263	4,6
18×18	6	3×3	ГФДЖ	1,253	1,251	0,2
18×18	4	3×3	ПР	1,261	1,361	7,3
24×24		4×4		1,146	1,263	9,3
18×18		3×3	ГФ	1,264	1,361	7,1
24×24		4×4		1,219	1,263	3,5
30×30	2,5	5×5	УФЛН	1,195	1,316	10,1

*В таблице приняты следующие обозначения: ГФДЖ – узлы на гнутых фланцах с диафрагмами жесткости; ГФ – узлы на гнутых фланцах без диафрагм; ПР – узлы с поэтажным расположением пересекающихся поясных элементов; УФЛН – узлы на уголковых фасонках с листовыми накладками.

В современных стальных фермах (стропильных и подстропильных фермах или фермах покрытий) высота приближается к минимально допустимому по условиям жесткости значению h_{\min} , поэтому по аналогии с оптимальной высотой h_{opt} можно записать:

Стропильные фермы $h_{\min} = (1,1/4)(\sigma/E)[l/f](1+2h/l...2,8h/l)$; (6)

Контурные фермы $h_{\min} = (1,1/5)(\sigma/E)[l/f](1+2h/l...2,8h/l)l$; (7)

Средние фермы $h_{\min} = (1,1/6)(\sigma/E)[l/f](1+2h/l...2,8h/l)l$; (8)

Промежуточные фермы $h_{\min} = (1,1/7)(\sigma/E)[l/f](1+2h/l...2,8h/l)l$; (9)

где σ – максимальное напряжение в поясе от нагрузки, при которой проверяется жесткость конструкции; E – модуль продольной упругости конструкционного материала (стали); $[l/f]$ – величина, обратная предельно допустимому относительному прогибу фермы (в практике проектирования $[l/f]=1/1000...1/250$); f и h – прогиб и высота фермы; $(1+2h/l...2,8h/l)$ – коэффициент, учитывающий влияние податливости решетки.

В частном случае при пролетах $l \times l = 6 \times 6...12 \times 12$ м определяющее значение оказывают расчетные параметры контурных ферм по формуле: (7) $h_{\min} = l/20,7...l/19,9$, где $[l/f] = 250/1$; $\sigma = 0,8R_y$; R_y – расчетное сопротивление стали по пределу текучести ($R_y = 2100$ кгс/см²). Поэтому при реконструкции существующих зданий и сооружений, а также при строительстве новых объектов с применением модулей типа «Пятигорск» высота перекрестных ферм, как правило, принимается равной 1/20 их пролета [15].

Первая апробация перекрестных ферм из ГСП после их полномасштабного теоретического и лабораторного (стендового) изучения успешно состоялась при натуральных исследованиях блока покрытия (размерами в плане 19,2×15,2 м) на испытательном полигоне Армянского НИИ строительства и архитектуры (г. Ереван) с 13 ноября 1987 г. по 5 марта 1988 г. (рис. 3), что предопределило их внедрение в практику отечественного строительства, включая восстановительную зону землетрясения в Спитаке (7 декабря 1988 г.) [4, 5]. На этом же полигоне была исследована конструктивная схема сейсмостойких 9-этажных жилых зданий серии 111, оснащенных динамическими гасителями колебаний в виде гибкого верхнего этажа (ГВЭ) [16].

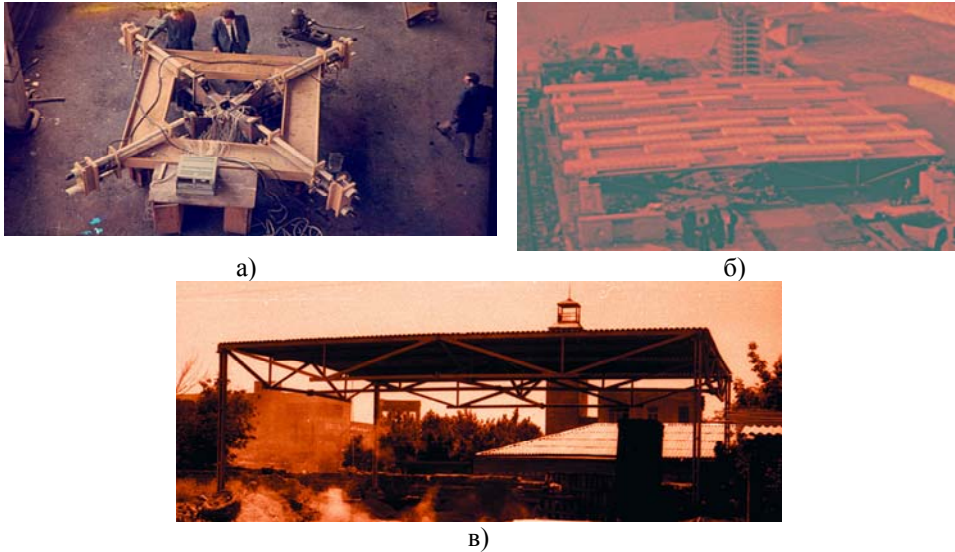


Рис. 3. Общие виды стендовых испытаний узловых соединений (а), натуральных испытаний блока покрытия (б) и его повторного монтажа для эксплуатации на объекте

Модули типа «Пятигорск», увеличивая при реконструкции этажность существующих строений (рис. 4а), по сути своей формируют каждый раз подобный ГВЭ, что способствует повышению сейсмостойкости зданий и сооружений. Такое повышение сейсмостойкости вполне реализуемо не только при реконструкции и модернизации существующих объектов, но и в новом строительстве [17]. Так, например, в поселке Иноземцево введено в эксплуатацию двухэтажное здание торгово-логистического предприятия (рис. 4б). Технической новизной его конструктивного решения является компоновка из восьми 6-метровых и четырех 12-метровых модулей, разделенных по высоте междуэтажным перекрытием в виде настила из монолитной железобетонной плиты [18]. Покрытие второго этажа выполнено в форме облегченной пространственной конструкции с применением настила из стальных оцинкованных профилированных листов. Четырехветвенные колонны жестко заделаны в столбчатых фундаментах из монолитного железобетона, расположенных с шагом 6 м в обоих ортогональных направлениях. По среднему ряду колонны первого этажа, где расположены служебные помещения, в уровне междуэтажного перекрытия прерываются, что обеспечивает полную свободу планировки торгового зала на втором этаже. В итоге получилась весьма рациональная и эффективная совмещенная пространственно-стержневая комбинированная сталежелезобетонная конструкция здания с ГВЭ, обладающая

необходимым и достаточным ресурсом несущей способности. При этом очевидно, что, с одной стороны, такой подход может делать конъюнктурный спрос на модули типа «Пятигорск» еще более стабильным и привлекательным для частных инвестиций, а с другой – вовлекать формирующие их перекрестные системы в сферу дальнейших разработок и исследований легких металлических конструкций нового поколения.



Рис. 4. Общие виды реконструкции трехэтажного здания с ГВЭ из восемнадцати блоков покрытия размерами 6×6 м (а), а также строительства торгового-логистического предприятия с первым этажом из восьми блоков перекрытия размерами 6×6 м и вторым этажом (ГВЭ) из четырех блоков покрытия размерами 12×12 м (б)

В 2011 г. модуль типа «Пятигорск» был модернизирован, что позволило более чем вдвое сократить количество зон монтажной сварки [19], а также выиграть тендер ОАО «Кубанские электросети» на строительство в Краснодарском крае различных промышленных и гражданских объектов, включая жилье (рис. 5).

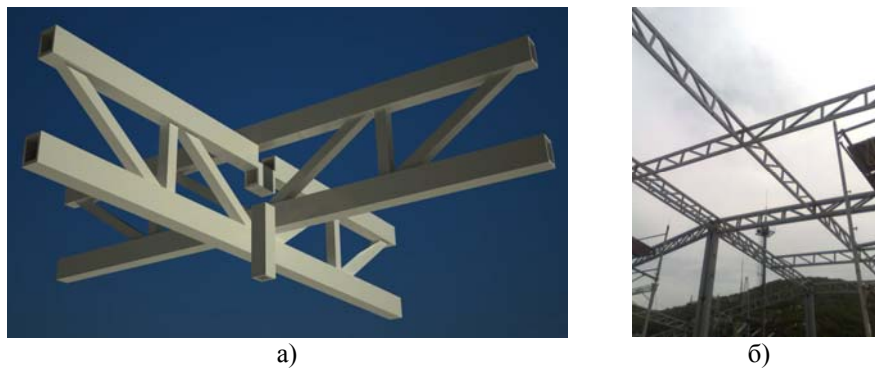


Рис. 5. Схема узла сопряжения перекрестных ферм с монтажным окном в верхнем (сжатом) поясе модернизированного модуля типа «Пятигорск» (а) и его общий вид (б)

Перспектива дальнейшего развития модулей типа «Пятигорск» открывается с переходом на пятиугольные [20] и ромбические замкнутые гнутосварные профили (рис. 6). Жесткость у пятиугольных труб при прочих равных условиях на 1,4...11 % выше, чем у квадратных и прямоугольных аналогов. Рабочая версия их полного сортамента составлена на базе уже упомянутого выше ГОСТ Р 54157-2010 [21]. В бесфасоночных узлах поясов из пятиугольных профилей квадратные трубы раскосов развернуты диагонально с образованием ромбических сечений, углы которых можно оптимально регулировать (рис. 7) [22].

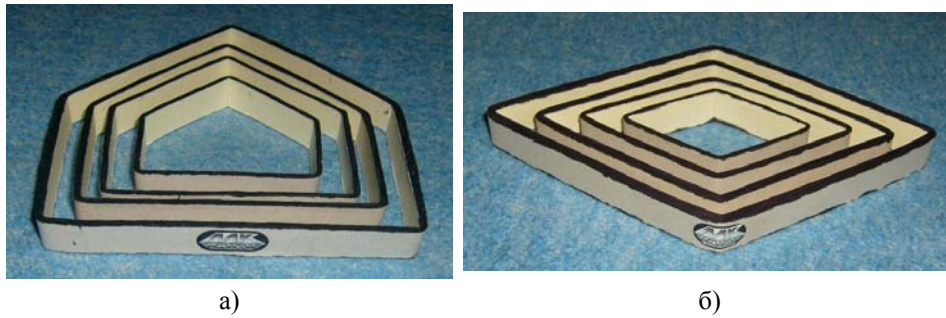


Рис. 6. Общий вид пятиугольных (а) и ромбических (б) замкнутых гнутосварных профилей

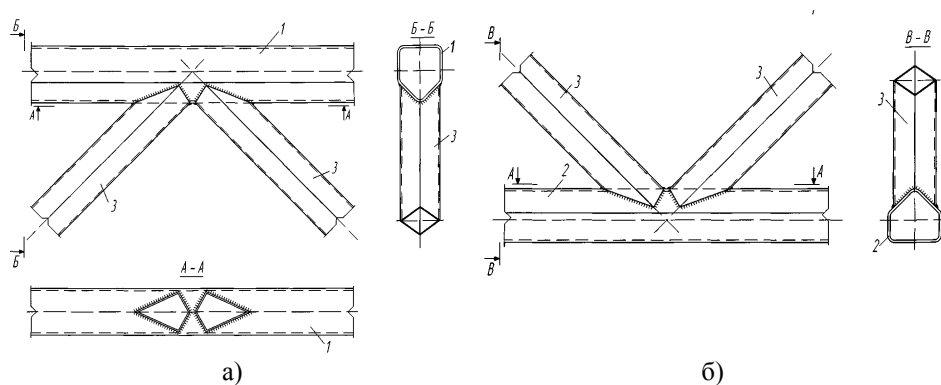


Рис. 7. Схемы узлов трубчатых элементов верхнего (а) и нижнего (б) поясов фермы

Отмеченные и подобные им новые технические решения прорабатывают в рамках учебного процесса при курсовом и дипломном проектировании для ускорения эффективного внедрения в практику строительства. Производство перекрестных систем из ГСП отличается экологической безопасностью и обеспечивает квалифицированные рабочие места, что весьма актуально для курортного региона Кавказских Минеральных Вод.

Выводы

В качестве послесловия необходимо отметить, что разработка и исследование перекрестных систем из гнутосварных профилей относится к числу тех проектов, которыми руководил Виктор Иванович Трофимов – Инженер, Ученый, Учитель. 100-летие со дня его рождения совпадает с временным промежутком активной фазы конференции «Проектирование, изготовление и монтаж стальных конструкций. Опыт и перспективы развития». Отдавая дань светлой памяти, представляется весьма полезным такое стечение обстоятельств рассмотреть как повод для проведения подобных форумов с некоторой регулярностью, переходящей в традицию.

Литература

- [1] Пат. 117944 Российская Федерация, МПК E04B7/00, E04B5/14. Модуль (блок) покрытия (перекрытия) из перекрестных ферм типа «Пятигорск» / А. С. Марутян, Т. Л. Кобаля. – № 2010139770 ; заявл. 27.09.2010 ; опубл. 10.07.2012, Бюл. № 19. – 2 с. : ил.
- [2] Пат. 100784 Российская Федерация, МПК E04B1/58. Бесфасоночный раскосный узел трубчатых ферм / А. С. Марутян, Т. Л. Кобаля. – № 2009123715 ; заявл. 22.06.2009 ; опубл. 27.12.2010, Бюл. № 36. – 1 с. : ил.
- [3] Марутян А. С. Перекрестные системы из стальных ферм с бесфасоночными раскосными узлами / А. С. Марутян // Строительная механика и расчет сооружений. – 2011. – № 1. – С. 70–75.
- [4] Трофимов В. И. Легкие металлические конструкции зданий и сооружений (разработка конструкций, исследования, расчет, изготовление, монтаж) : учебное пособие / В. И. Трофимов, А. М. Каминский. – М. : Изд-во АСВ, 2002. – С. 72–75, 107–115.
- [5] Марутян А. С. Легкие металлоконструкции из перекрестных систем / А. С. Марутян // Пятигорский государственный технологический университет. – Пятигорск : РИА КМВ, 2009. – 348 с.
- [6] Арутюнян Т. К. Разработка и исследование пространственных стержневых блоков покрытия : дис. ... канд. техн. Наук : 05.23.01. – М. : ЦНИИСК им. В. А. Кучеренко, 1993. – 202 с.
- [7] Блоки покрытий из ферм типа «Молодечно» при сетке колонн 18×18 и 24×24 м : рабочая документация : 17070-01 КМ, 17070-02 КМ / УкрНИИПСК. – Киев, 1987.
- [8] Металлический каркас экспериментальных зданий размером 36×96 м с квадратной сеткой колонн 18×18 и 24×24 м, перекрываемых блоками из перекрестных ферм типа «Молодечно» : рабочая документация : Э17023 КМ / УкрНИИПСК. – Киев, 1987.

- [9] Покрытия производственных зданий с использованием перекрестных систем и применением крупноблочного монтажа : рабочая документация : Э16262 КМ / УкрНИИПСК. – Киев, 1983.
- [10] Стальные конструкции покрытий производственных зданий с сеткой колонн 18×18 и 24×24 м : рабочая документация : Э15838-1 КМ / УкрНИИПСК. – Киев, 1982.
- [11] Одноэтажное производственное двухмодульное здание склада санитарно-технических материалов : рабочая документация архитектурно-строительной части : 05.0182-87 / ЦНИИпромзданий. – Москва, 1989.
- [12] Покрытие производственных зданий с использованием перекрестных систем размерами в плане 30×30 м и применением крупноблочного монтажа : техническая документация / АрмНИИСА. – Ереван, 1989. – Инв. №28383-28389.
- [13] А. с. 1283322 СССР, МКИ E04B1/58, 1/24. Узел соединения перекрестных стержневых конструкций / С. И. Аванесов, В. И. Трофимов, А. С. Марутян, А. Я. Прицкер, В. А. Аденский, И. Л. Пименов. – № 3956855 ; заявл. 26.09.1985 ; опубл. 15.01.1986, Бюл. № 2. – 2 с. : ил.
- [14] А. с. 1649045 СССР, МКИ E04B1/58. Узловое соединение пространственной стержневой конструкции / С. И. Аванесов, В. И. Трофимов, А. И. Рамазян, А. В. Балоян, А. С. Марутян, К. Л. Аванесов. – № 4699652 ; заявл. 31.05.1989 ; опубл. 15.05.1991, Бюл. № 18. – 2 с. : ил.
- [15] Марутян А. С. Разработка и исследование, проектирование и внедрение стальных ферм и их перекрестных систем типа «Пятигорск» / А. С. Марутян. – Пятигорск : ПГТУ, 2012. – 209 с.
- [16] Мелкумян М. Г. Исследование эффективности одно- и двухмассового динамического гасителя колебаний на модели каркасного здания при вибрационных испытаниях / М. Г. Мелкумян // Инженерно-строительный журнал. – 2012. – № 5. – С. 23–29.
- [17] Харланов В. Л. Детерминированный анализ металлических каркасов на динамические нагрузки высокой интенсивности: монография / В. Л. Харланов. – Волгоград : ВолгГАСУ, 2006. – С. 102–106.
- [18] Марутян А. С. Модули (блоки) покрытий (перекрестных) из перекрестных ферм типа «Пятигорск» с железобетонными настилами / А. С. Марутян // Актуальные проблемы бетона и железобетона. Материалы и конструкции, расчет и проектирование : материалы научно-практической конференции (академических чтений) в Кисловодске 6-9 октября 2010 г. – Ростов-на-Дону : РГСУ, 2010. – С. 119–124.
- [19] Пат. 2485257 Российская Федерация, МПК E04B7/00, E04B5/14. Пространственная решетчатая несущая конструкция / А. С. Марутян, Т. Л. Кобаля, С. А. Боков, Д. А. Ковалев, С. А. Глухов. – № 2011153166 ; заявл. 26.12.2011 ; опубл. 20.06.2013, Бюл. № 17. – 11 с. : ил.

- [20] Пат. 104582 Российская Федерация, МПК E04C3/00. Пятиугольный замкнутый гнутосварной профиль / А. С. Марутян, Т. Л. Кобалия, С. А. Глухов, Г. М. Янукян, Ю. И. Павленко. – № 2009147247 ; заявл. 18.12.2009 ; опубл. 20.05.2011, Бюл. № 14. – 2 с. : ил.
- [21] Марутян А. С. Проектирование стальных ферм покрытий из прямоугольных, ромбических и пятиугольных замкнутых гнутосварных профилей : учебно-справочное пособие / А. С. Марутян, С. И. Эмба. – Пятигорск : СКФУ, 2012. – 156 с.
- [22] Пат. 116526 Российская Федерация, МПК E04B1/58, E04C3/08. Узловое бесфасоночное соединение трубчатых элементов фермы / А. С. Марутян, Т. Л. Кобалия, Ю. И. Павленко, С. А. Глухов. – № 2010135714 ; заявл. 26.08.2010 ; опубл. 27.05.2012, Бюл. № 15. – 2 с. : ил.

Надійшла до редколегії 22.05.2013 р.