ТРЕХГРАННЫЕ ФЕРМЫ ПОКРЫТИЙ (ПЕРЕКРЫТИЙ) И ОПТИМИЗАЦИЯ ИХ ВЫСОТ

А.С. Марутян, В.Н. Оробинская

Институт сервиса, туризма и дизайна (филиал) Северо-Кавказский федерального университета (ИСТуД (филиал) СКФУ в г. Пятигорске), 357500, г. Пятигорск, пр-т 40 лет Октября, д. 56

Аннотация. Представлены новые технические решения трехгранных (трехпоясных) ферм покрытий и перекрытий. В одном из них для сжато-изгибаемых элементов поясов вместо двутавровых профилей использованы составные сечения Z-образной формы из парных уголков сортаментного ряда конструкций типа ЦНИИСК, «Москва». В другом решении для бесфасоночных узловых соединений прямоугольных труб использовано центрирование этих узлов на ребра элементов поясов с V-образной разделкой торцевых кромок элементов решеток. Для стальных трехгранных ферм покрытий приведены оптимальные размеры их высот, при которых расход конструкционного материала минимален. Эти размеры составляют $1/20 \dots 1/12$ пролета и получены из равенства масс поясных и решетчатых элементов с учетом оптимальных углов наклона раскосов. Показана приемлемая сходимости полученных результатов, подтвержденная опытом проектирования предварительно напряженных ферменных конструкций и оптимизации структурных конструкций типа ЦНИИСК с учетом новых изменений граничных условий. Обозначена область эффективного применения рассмотренных конструкций.

Ключевые слова: трехгранные фермы, трехпоясные фермы, фермы покрытий, оптимизация, расход конструкционного материала, оптимальная высота, минимальная масса, минимальный вес

DOI: 10.22227/1997-0935.2017.2.172-183

TRIANGULAR TRUSSES FOR ROOFS (FLOORS) AND OPTIMIZATION OF THEIR DEPTHS

A.S. Marutyanyan, V.N. Orobinskaya

Institute of Service, Tourism and Design (ISTD), Branch of North Caucasus Federal University (NCFU) in Pyatigorsk, 56 40 Let Oktyabrya prospekt, Pyatigorsk, 357500, Russian Federation

Abstract. New technical solutions relating to triangular (three-chord) trusses for roofs (floors) are presented. In one of them for compressed-flexural elements of chords, Z-shaped built-up sections made of paired angle bars of assortment of structures of the TsNIISK, Moskva types are used instead of double-tee sections. In another solution, for gussetless nodal connections of rectangular tubes, the centering of these nodes on the ribbing of elements of chords with a V-shaped preparation of tip edges of elements of webs is used. For steel triangular roof trusses, optimal dimensions of their depths for which the usage of constructional material is minimal are given. These dimensions are $1/20 \dots 1/12$ of the span and are obtained from the equality of masses of chord and web elements, taking into account the optimal inclination angles of braces. Acceptable convergence of the obtained results confirmed by the experience in the design of prestressed truss structures and optimization of structural designs of the TsNIISK type, taking into account new changes of boundary conditions, is shown. Sphere of effective application of the considered structures is defined. Thus, it can be concluded that the proposed technical solutions as to the triangular trusses for roofs (floors) are quite rational and promising for use in load-bearing structures of buildings and installations, and the optimization of depths of such trusses generalizes, to a certain extent, the widespread practice of calculating and designing thereof. The sphere of effective application of the considered triangular trusses can include lightweight metallic structures made of closed roll-welded sections (shaped tubes), rolled shapes and slender galvanized sections. Constituent part of this sphere can be presented by triangular (three-chord) trusses, shaping space frame systems in a form of space frames (see fig. 1, a) or crossed (see fig. 5, e) structures, and the technical and economic characteristics of these structures can be significantly improved due to rigid discs made of composite (steel reinforced concrete) slabs with permanent formwork and external reinforcement.

Key words: triangular trusses, three-chord trusses, trusses for roofs, optimization, constructional material usage, optimal truss depth, minimal mass, minimal weight

Предлагаемое техническое решение трехгранных (трехпоясных) ферм покрытий и перекрытий может быть использовано для производства несущих конструкций покрытий (перекрытий) зданий и сооружений различного назначения. Известно пространственное стерж-

Рис. 1. Схемы пространственного стержневого складчатого покрытия: *a* — аксонометрия; *б* — поперечный разрез; 1 — верхние пояса; 2 — нижние пояса; 3 — раскосы; 4 — поперечные пояса

Fig. 1. Drawings of a shell rod-shaped folded-plate roof: *a* — axonometry; *б* — cross section; 1 — upper chords; 2 — lower chords; 3 — braces; 4 — transversal chords

невое складчатое покрытие, включающее настил, длинноразмерные верхние и нижние пояса, а также систему раскосов с углом наклона между гранями, равным удвоенному углу наклона проекции раскосов на плоскость, перпендикулярную к поясам (рис. 1). Сжато-изгибаемые верхние пояса выполнены с двутавровыми сечениями, растянутые нижние пояса и пространственно расположенные раскосы — с уголковыми [1]. Благодаря жесткому прикреплению настила к верхним поясам структуры из трехгранных ферм объединяются функции прогонов и поясов, повышается устойчивость покрытия, экономится металл и можно использовать подвесные краны грузоподъемностью до 5 т. Приведенное техническое решение оказалось базовым для реализации в типовых конструкциях системы ЦНИИСК [2], и ее более поздней модификации «Москва» [3]. Однако верхние прогонно-поясные элементы, выполненные из двутавровых балок, относятся к дорогостоящим фасонным профилям стального проката, что повышает сметную стоимость несущих конструкций.

Наиболее близкое техническое решение (прототип) представляет собой металлическую ферму с верхними поясами коробчатого сечения, которые изготовлены из парных уголков, состыкованных между собой перьями с выполненными в них прорезями для пропуска листовых фасонки. Через эти фасонки к верхним поясам прикреплен раскосная решетка (рис. 2). Нижние пояса и пространственно расположенные раскосы изготовлены из одиночных уголков [4]. Недостатком прототипа в случае беспрогонного покрытия, когда объединяются функции прогонов и поясов, является явно недостаточная высота коробчатого сечения сжато-изгибаемых верхних поясов, что ограничивает их несущую способность и сопровождается увеличением расхода конструкционного материала. Кроме того, продольные прорези, необходимые для пропуска листовых фасонки, оказывают негативное влияние на трудоемкость изготовления несущих конструкций.

Задача предлагаемого варианта заключается в увеличении несущей способности сжато-изгибаемых верхних поясов, уменьшении трудоемкости

Рис. 2. Схемы трехгранной фермы из равнополочных уголков: *a* — вид сбоку и поперечный разрез; *б* — узел верхнего пояса; 1 — уголки верхнего пояса; 2 — уголок нижнего пояса; 3 — раскосы; 4 — фасонки; 5 — прорези для пропуска фасонки

Fig. 2. Drawings of a triangular truss made of equilateral angles: *a* — side view and cross section; *б* — upper chord panel point; 1 — angles of upper chord; 2 — angle of lower chord; 3 — braces; 4 — gussets; 5 — slits for passing of gussets

их изготовления и снижении сметной стоимости. Для достижения технического результата в металлической ферме, включающей верхние пояса из парных уголков, нижний пояс из одиночных уголков и пространственно расположенные раскосы также из одиночных уголков, прикрепленных к поясам при помощи листовых фасонок, и парные уголки верхних поясов состыкованы между собой посредством листовых фасонок, жестко прикрепленных к их перьям, с образованием составных зетовых (Z-образных) сечений (рис. 3) [5].

Предлагаемая конструкция металлической фермы имеет достаточно универсальное техническое решение. Ее можно использовать в качестве самостоятельной несущей конструкции покрытий (перекрытий) зданий или сооружений. Не менее эффективно ее применение в составе структурных конструкций покрытий одноэтажных производственных зданий пролетом 18 и 24 м. В этом случае появляется возможность существенно повысить степень унификации несущих конструкций за счет замены сжато-изгибаемых двутавров верхних поясов стержневыми элементами составного зетового (Z-образного) сечения из парных уголков, включая в первую очередь уголкового профили, из которых изготовлены нижние пояса и раскосы пространственной решетки. Перспектива дальнейшего повышения технико-экономических характеристик несущих конструкций открывается с переходом на гнутые уголкового профили, особенно тонкостенные оцинкованные, имеющие в последнее время большой спрос. При этом Z-образные профили новых модификаций [6, 7] могут обеспечить до-

полнительный эффект за счет бесфасоночных узлов. Для сравнения предложенного (нового) технического решения с известным в качестве базового объекта принят сортамент уголкового профилей, использованных в структурных конструкциях системы ЦНИИСК, «Москва» [2, 3]. Геометрические характеристики сечений зетовых (Z-образных) поясов предлагаемой фермы и коробчатых поясов металлической фермы прототипа, а также их соотношения приведены в табл., данные которой очевидно показывают, что предложенное решение сопровождается ростом в силовой (вертикальной) плоскости приведенных характеристик в 2...4 раза. Кроме того, из сравнения приведенных вариантов также легко заметить, что отсутствие в предложенном решении вырезов для пропуска листовых фасонок, наличие которых характерно для прототипа, обеспечивает дополнительный положительный эффект в виде снижения трудоемкости изготовления несущих конструкций.

Практический интерес представляет конструкция беспрогонных покрытий из трехгранных бесфасоночных ферм с коробчатыми сечениями всех поясов, скомпонованными из состыкованных перьями двух неравнополочных уголков, сваренных одинаковыми полками. Пояса фермы вписываются в правильный треугольник, что обеспечивает прямыерезы стержням решеток, выполненным также из прямоугольных сварных труб (рис. 4) [8].

Составные сечения из прокатных уголков имеют два недостатка: по расходу конструкционного материала они заметно уступают пря-

Рис. 3. Схемы трехгранной фермы из равнополочных уголков: а — вид сбоку; б — поперечный разрез; в — узел верхнего пояса; 1 — верхний пояс; 2 — уголки верхнего пояса; 3 — фасонки верхнего пояса; 4 — уголок нижнего пояса; 5 — раскосы; 6 — фасонки нижнего пояса

Fig. 3. Drawings of a triangular truss made of equilateral angles: а — side view; б — cross section; в — upper chord panel point; 1 — upper chord; 2 — angles of upper chord; 3 — gussets of upper chord; 4 — angle of lower chord; 5 — braces; 6 — gussets of lower chord.

Рис. 4. Схемы трехгранных ферм из неравнополочных уголков: *а* — вид сбоку; *б* — вид сверху; *в* — поперечный разрез
Fig. 4. Drawings of triangular trusses made of non-equilateral angles: *a* — side view; *б* — top view; *в* — cross section

моугольным трубам (гнуто сварным профилям), а их двойные и протяженные сварные швы увеличивают трудоемкость изготовления. Поэтому наиболее близким техническим решением (принятым за прототип) к еще одной предлагаемой несущей конструкции является бесфасоночная трехгранная ферма беспрогонного покрытия из прямоугольных труб, в качестве которых приняты замкнутые гнутосварные профили. Труба нижнего пояса имеет квадратное сечение, диагонали которого расположены вертикально и го-

ризонтально (рис. 5, *а*) [9]. Здесь во избежание продавливания (выдергивания) ширина трубы решетки не должна быть меньше 0,6 поперечного размера трубы пояса. Учет этого ограничения снижает концентрацию напряжений, но приводит к повышению расхода материала на стержни и увеличению металлоемкости конструкции. Кроме того, примыкания стержней наклонных решеток к нижней и верхним поясным трубам отличаются друг от друга, что сопровождается ростом трудозатрат при их изготовлении.

а

б

в

Рис. 5. Аксонометрия бесфасоночной трехгранной фермы беспрогонного покрытия из квадратных (прямоугольных) труб (*а*), а также снимки опорной части трехгранной фермы (*б*) и диагонально-перекрестной компоновки трехгранных ферм в интерьере строения (*в*)
Fig. 5. Axonometry of girderless triangular truss of girderless roof made of square (rectangular) tubes (*a*), and pictures of a bearing of triangular truss (*б*) and of diagonal-crossed layout of triangular trusses in the interior of building (*в*)

Вестник МГСУ Том 12. Выпуск 2 (101)

Геометрические характеристики поперечных сечений составных зетовых (Z-образных) и коробчатых поясов, скомпонованных из парных уголков, а также их соотношения
 Geometrical data of cross sections of built-up Z-shaped and box-type chords assembled of paired angle bars, and ratios thereof

Сечение, мм / Section, mm	└ 63×5	└ 70×5	└ 75×6	└ 80×7	└ 90×7	└ 100×8	└ 125×8	└ 140×9	└ 160×10	└ 180×11	└ 200×12	└ 200×13	└ 200×14
I_{xz} , см ⁴	360,30	494,06	735,94	1039,0	1474,5	3215,8	4480,9	7040,5	11 677	18 190	27 251	29 568	31 940
W_{xz} , см ³	52,985	65,875	90,857	119,43	152,01	214,43	336,91	472,52	686,88	952,36	1285,4	1388,2	1492,5
i_{xz} , см	5,421	6,001	6,474	6,920	7,742	8,615	10,664	11,94	13,64	15,31	17,01	17,05	17,10
I_{yz} , см ⁴	73,618	101,15	146,98	207,32	299,16	466,30	933,21	1479,8	2454,8	3866,8	5789,3	5960,0	6668,2
W_{yz} , см ³	12,168	14,450	20,414	27,101	30,841	48,573	70,166	99,32	144,40	202,45	298,42	308,02	345,50
i_{yz} , см	2,450	2,715	2,893	3,091	3,487	3,866	4,867	5,473	6,252	7,059	7,839	7,665	7,814
$I = I_{x0} - I_{y0}$, см ⁴	80,184	110,76	163,44	228,15	327,94	513,102	1014,5	1637,8	2709,2	4257,3	6222,6	6909,6	7192,4
$W = W_{x0} - W_{y0}$, см ³	23,584	29,536	40,356	52,450	67,617	95,020	152,56	219,84	318,73	445,79	587,04	648,80	672,20
$i_{x0} = i_{0x}$, см	2,557	2,841	3,051	3,243	3,651	4,055	5,074	5,758	6,568	7,407	8,128	8,243	8,116
I_{xz}/I_{x0}	4,493	4,460	4,503	4,554	4,504	4,513	4,417	4,299	4,310	4,237	4,379	4,279	4,441
W_{xz}/W_{x0}	2,247	2,230	2,251	2,277	2,248	2,257	2,208	2,149	2,155	2,136	2,190	2,140	2,220
i_{xz}/i_{x0}	2,120	2,112	2,122	2,134	2,121	2,125	2,102	2,074	2,077	2,067	2,093	2,068	2,107
I_{yz}/I_{y0}	0,9181	0,9132	0,8993	0,9087	0,9122	0,9088	0,9199	0,9035	0,9061	0,9083	0,9304	0,8626	0,9271
W_{yz}/W_{y0}	0,5159	0,4892	0,5058	0,5168	0,4561	0,5112	0,4599	0,4518	0,4530	0,4541	0,5083	0,4748	0,5140
i_{yz}/i_{y0}	0,9582	0,9556	0,9482	0,9531	0,9551	0,9534	0,9592	0,9505	0,9519	0,9530	0,9644	0,9299	0,9628

Техническим результатом предлагаемого решения является повышение степени унификации стержней решеток, снижение концентрации напряжений в бесфасоночных узлах, увеличение несущей способности конструкции с уменьшением расхода ее конструкционного материала. Указанный технический результат достигается тем, что в трехгранной ферме покрытия (перекрытия) из прямоугольных труб, включающей два верхних пояса, объединенных уложенным по ним профнастилом, один нижний пояс, связанный с верхними поясами посредством двух наклонных решеток, и все стержни обеих решеток выполнены с одинаковыми разделками их торцевых кромок и центрированы в бесфасоночных узлах на ребра между стенками (вертикальными гранями) и полками (горизонтальными гранями) поясных труб (рис. 6) [10].

V-образная разделка торцевых кромок стержней имеет определенную область рационального применения в бесфасоночных узловых соединениях плоских решетчатых конструкций из прямоугольных труб (замкнутых гнутосварных профилей), где поперечные сечения стержневых элементов поясов и решетки развернуты диагонально относительно плоскости конструкции, т.е. диагонали сечений расположены в плоскости решетки. Теоретические (численные) и экспериментальные исследования таких узлов показали, что их использование сопровождается улучшением технико-экономических характеристик несущих конструкций: снижается концентрация напряжений, повышается надежность, коррозионная стойкость и несущая способность, уменьшается расход конструкционного материала [9, 11, 12].

Описываемые узлы реализованы в фермах из квадратных труб [13], а также в конструкциях из прямоугольных, ромбических и пятиугольных замкнутых гнутосварных профилей [14, 15].

Разделка торцевых кромок стержней применяется также в бесфасоночных узлах, где только поперечные сечения стержневых элементов поясов (вариант с «ортогональными» раскосами на рис. 6, а) развернуты диагонально относительно плоскости конструкции. Если в предыдущем случае разделка необходима для всех торцевых кромок (вариант с «диагональными» раскосами на рис. 6, б), то в данном случае разделку V-образной формы должны иметь только торцевые кромки, непараллельные плоскости конструкции [16, 17]. Такие узловые соединения апробированы в фермах и решетчатых прогонах из квадратных труб с верхним поясом, усиленным швеллером [18].

Все приведенные разработки по разделке торцевых кромок выполнены применительно к плоским конструкциям, однако их отражение в пространственных модификациях, включая трехгранные (трехпоясные) фермы, может оказаться не менее рациональным и перспективным. При этом дополнительное повышение технико-экономических характеристик несущих систем покрытий (перекрытий) может дать сочетание новых технических решений трехгранных ферм с оптимизацией их высот при условии, что устойчивость сжатых и сжато-изгибаемых (верхних) поясов обеспечивают жесткие диски из ограждающих конструкций (профилированные листы, сэндвич-панели, железобетонные и сталежелезобетонные плиты).

Рис. 6. Вид сбоку (а) и поперечный разрез (б) фермы с «ортогональными» раскосами, а также вид сбоку (в) и поперечный разрез (г) фермы с «диагональными» раскосами: 1 — нижний пояс; 2 — верхние пояса; 3 — раскосы; 4 — профилированный настил

Fig. 6. Side view (a) and cross section (б) of a truss with “orthogonal” braces, and side view (в) and cross section (г) of a truss with “diagonal” braces: 1 — lower chord; 2 — upper chords; 3 — braces; 4 — shaped decking

Масса (вес) всей трехгранной фермы (поясов и решеток) при треугольных решетках, состоящих из одних раскосов по аналогии с массой плоской фермы (рис. 7, а, б) [19] равна

$$G = 2 \sum \frac{M d \rho \psi_{\Pi}}{h R_y} + 2 \sum \frac{Q h \rho \psi_p}{R_y \cos^2 \alpha \cos^2 \beta}, \quad (1)$$

где M/h — расчетное усилие в поясах; M — изгибающий момент в балочном эквиваленте фермы; d — длина стержня пояса, равная длине полупанели; R_y и ρ — расчетное сопротивление и плотность (удельный вес) стали, соответственно; ψ_{Π} — конструктивный коэффициент поясов; $Q/(\cos \alpha \cos \beta)$ — расчетное усилие в раскосе; Q — поперечная сила в балочном эквиваленте фермы; α — угол между раскосом и высотой наклонной грани; β — угол между наклонной гранью и вертикалью; $h/(\cos \alpha \cos \beta)$ — длина раскоса; ψ_p — конструктивный коэффициент раскосов.

Масса стальной фермы минимальна, а ее высота оптимальна, когда масса поясов равна массе решеток

$$2 \sum \frac{M d \rho \psi_{\Pi}}{h R_y} = 2 \sum \frac{Q h \rho \psi_p}{R_y \cos^2 \alpha \cos^2 \beta}, \quad (2)$$

откуда

$$h = \sqrt{\frac{l \sum M \psi_{\Pi}}{n \sum Q \psi_p}} \cos \alpha \cos \beta, \quad (3)$$

где $d = l/n$; l — длина пролета фермы; n — количество полупанелей.

Оптимальный угол наклона раскосов α в треугольной решетке и в треугольной решетке с дополнительными стойками близок к 45° , а в раскосной решетке — к 55° [20, 21]. Поэтому $\alpha = 45 \dots 55^\circ$ и $\cos \alpha = 0,5736 \dots 0,7071$, а высота с учетом формулы (3) составит

$$h = (0,5736 \dots 0,7071) \sqrt{\frac{l \sum M \psi_{\Pi}}{n \sum Q \psi_p}} \cos \beta. \quad (4)$$

Отношение $\sum M / \sum Q$ можно приравнять к отношению Ω_M / Ω_Q , где Ω_M — площадь эпюры изгибающих моментов балочного эквивалента фермы, $\Omega_M = (2/3)(ql^2/8)l = ql^3/12$; Ω_Q — площадь эпюры поперечных сил балочного эквивалента фермы, $\Omega_Q = (1/2)(ql/2)(l/2)2 = ql^2/4$ (рис. 7, в) [22].

Тогда

$$\sum M / \sum Q = \frac{ql^3/12}{ql^2/4} = \frac{l}{3}. \quad (5)$$

Конструктивные коэффициенты стержней ψ поясов и решетки можно представить отноше-

Рис. 7. Расчетные модели (схемы) ферменных конструкций и их балочных аналогов: а — схема плоской фермы; б — схема трехгранной (трехпоясной) фермы; в — схема симметричного нагружения балочного аналога; з — схема несимметричного нагружения балочного аналога

Fig. 7. Computed models (drawings) of truss structures and girder analogs thereof: а — drawing of plane truss; б — drawing of triangular (three-chord) truss; в — drawing of symmetrical loading of a girder analog; з — drawing of unsymmetrical loading of a girder analog

нием несущей способности этих стержней N_u к расчетным усилиям N в их сечениях: $\psi = N_u / N$. В стержнях поясов распределение расчетных усилий $N = M / h$ графически соответствует эпюре изгибающих моментов. Сечения поясов, подобранные по максимальным (наибольшим) усилиям ($N_{\max} = M_{\max} / h$), в стальных бесфасоночных фермах, как правило, распространяют на всю длину пролета. Иллюстративно это можно представить в виде равномерного распределения по закону прямоугольника. Таким образом, конструктивные коэффициенты стержней поясов ψ можно представить отношением площади прямоугольной эпюры $\Omega_{Nu} = M_{\max} l$ к площади параболической эпюры $\Omega_N = 2 M_{\max} l / 3$:

$$\psi = \frac{\Omega_{Nu}}{\Omega_N} = \frac{M_{\max} l}{2 M_{\max} l / 3} = 1,5. \quad (6)$$

Такой подход при определении конструктивных коэффициентов раскосов ψ_r приводит к завышению их значений:

$$\psi_r = \Omega_{Nu} / \Omega_N = 4, \quad (7)$$

где $\Omega_{Nu} = 2 Q_{\max} l$; $\Omega_N = (Q_{\max} / 2)(l / 2)2 = Q_{\max} l / 2$.

Полученный результат является следствием того, что при нагружении половины пролета напряженное состояние средних раскосов может оказаться более неблагоприятным, чем при нагружении всего пролета [23]. Исходя из этого, уйти от завышения ψ_r можно, используя несимметричное нагружение фермы и ее балочного эквивалента, при котором переход эпюры попе-

речных сил Q через ноль смещается с середины пролета в сторону большей нагрузки (рис. 7, з). В таком случае прямоугольные эпюры достаточно ограничить участками с Q одного знака и не распространять на всю длину пролета [24]:

$$\psi_r = \Omega_{Nu} / \Omega_N = 23 / 10 = 2,3, \quad (8)$$

$$\text{где } \Omega_{Nu} = (7ql / 8)(3l / 8) + (5ql / 8)(l / 2 + l / 8) = 23ql^2 / 32;$$

$$\Omega_N = (1 / 2)(7ql / 8) + (1 / 2)(ql / 8)(l / 8) + ((5ql / 8) + (ql / 8))(1 / 2)(3l / 8) = 10ql^2 / 32.$$

Если полученные значения отношения (5), а также конструктивные коэффициенты из (6) и (8) подставить в выражение (4), то для высоты фермы можно получить следующую формулу:

$$h = (0,2674 \dots 0,3297) l \cos \beta / \sqrt{n}. \quad (9)$$

Для трехгранных ферм, пояса которых вписываются в равнобедренный треугольник с прямым углом (см. рис. 2, 3), $\beta = 45^\circ$, $\cos \beta = 0,7071$:

$$h_{90} = (0,1891 \dots 0,2331) l / \sqrt{n}. \quad (10)$$

Аналогично для трехгранных ферм, пояса которых вписываются в равносторонний треугольник (рис. 4), $\beta = 30^\circ$, $\cos \beta = 0,8660$

$$h_{60} = (0,2316 \dots 0,2855) l / \sqrt{n}. \quad (11)$$

Динамика изменения высоты в зависимости от количества полупанелей наглядно представлена графиками на рис. 8, где рассматриваемые интервалы практически сливаются в один из-за

Рис. 8. Диаграмма изменения размеров высот трехгранных (трехпоясных) ферм покрытий (перекрытий) в зависимости от количества полупанелей их поясов при треугольных решетках

Fig. 8. Diagram of variation of dimensions of depths of triangular (three-chord) trusses for roofs (floors) depending on the quantity of semipanels of the chords thereof at triangular webs

незначительной разницы их граничных значений, остающейся в пределах однопроцентного порога:

$$100(0,2331 - 0,2316)/(0,2331...0,2316) = \\ = 0,644...0,648 \%$$

Обозначенный интервал высоты показывает, что для наиболее распространенных ферм с $l = 18...36$ м и $n = 12...24$ м $h_{opt}/l \approx 1/20...1/12$. Такой результат можно признать достаточно корректным, поскольку он охватывает фактически весь диапазон трехгранных (трехпоясных) ферм от предварительно напряженных ферменных конструкций с выносными затяжками и $h_{opt}/l \approx 1/12...1/10$ для их жестких частей [25, 26] до структурных конструкций типа ЦНИИСК с $h_{opt}/l \approx 1/18...1/12$, оптимизированных в условиях новых изменений граничных условий [27, 28].

Таким образом, подводя некоторые итоги, можно сделать общий вывод, согласно которо-

му предлагаемые технические решения трехгранных ферм покрытий (перекрытий) вполне рациональны и перспективны для использования в несущих конструкциях зданий и сооружений, а приведенная оптимизация высот таких ферм в определенной степени обобщает довольно обширную практику их расчета и проектирования. Область эффективного применения рассмотренных трехгранных ферм может включать легкие металлические конструкции из замкнутых гнутосварных профилей (профильных труб), прокатных профилей и тонкостенных оцинкованных профилей. Составную часть этой области могут представить трехгранные (трехпоясные) фермы, формообразующие пространственно-стержневые системы в виде структурных (см. рис. 1, а) или перекрестных (см. рис. 5, в) конструкций, технико-экономические характеристики которых возможно существенно повысить за счет жестких дисков из сталежелезобетонных плит с несъемной опалубкой и внешним армированием.

ЛИТЕРАТУРА

1. А. с. 488899 СССР, МПК E04C 3/08 Пространственное стержневое складчатое покрытие / В.И. Трофимов, И.Н. Дмитриев, А.М. Косогов, М.Д. Алпатов; ЦНИИСК имени В.А. Кучеренко. № 1896007/29-33; заявл. 21.03.1973; опубл. 25.10.1975. Бюл. № 39.
2. Структурные конструкции покрытий одноэтажных производственных зданий пролетом 18 и 24 м из прокатных профилей типа «ЦНИИСК» / Серия 1.460-6/81. Чертежи КМ, 1981.
3. Стальные конструкции покрытий одноэтажных производственных зданий из прокатных профилей с разреженной решеткой пролетом 18 и 24 м типа «Москва» / Шифр 774 КМ. Чертежи КМ, 1988.
4. А. с. 1544921 СССР, МПК E04C 3/04. Металлическая ферма / С.И. Аванесов, Т.В. Чихачев, А.В. Балоян, А.Г. Абоян; Научно-исследовательский институт строительства и архитектуры Госстроя АрмССР. № 4428227/23-33; заявл. 23.05.1988; опубл. 23.02.1990. Бюл. № 7.
5. Пат. 2553810 RU, МПК E04C 3/04. Металлическая ферма / А.С. Марутян; патентообл. СКФУ. № 2014114112/03, заявл. 09.04.2014; опубл. 20.06.2015. Бюл. № 17.
6. Романюк В.В., Василенко В.Б. Деформативность конструкции перфорированного прогона Z-образного профиля в условиях косоугольного изгиба // Вестник Белорусско-Российского университета. 2015. № 1 (46). С. 111–119.
7. Волков В.П., Волкова О.В. Геометрические характеристики тонкостенного Z-образного стержня с закруглением // Моделирование и механика конструкций. 2015. № 2. Режим доступа: [http://mechanics.pguas.ru/Plone/nomera-zhurnala/no2/stroitelnaaya-](http://mechanics.pguas.ru/Plone/nomera-zhurnala/no2/stroitelnaaya-mehanika/2.10/at_download/file)
8. Кользеев А.А. Оценка влияния замкнутой формы сечения на устойчивость сжатых стальных стержней трехпоясных ферм // Известия высших учебных заведений. Строительство. 2012. № 11–12 (647). С. 108–113.
9. Packer J.A., Wardenier J., Zhao X.-L., van der Vegte G.J. and Kurobane Y. Construction with hollow steel sections. Design Guide for rectangular hollow section (RHS) joints under predominantly static loading. CIDECT, 2009. 156 p.
10. Пат. 154158 RU. Трехгранная ферма покрытия (перекрытия) из прямоугольных труб / А.С. Марутян; патентообл. СКФУ. № 2014148585/03; заявл. 02.12.2014; опубл. 20.08.2015. Бюл. № 23.
11. Кузнецов А.Ф., Кузнецов В.А. Стальные решетчатые прогоны из труб для покрытий зданий, устойчивые против коррозии // Приволжский научный журнал. 2012. № 3. С. 20–26.
12. Байков Д.А., Колесов А.И., Маслов Д.С. Численные исследования действительной работы узлов фермы из квадратных труб, соединенных в узлах на ребро // Приволжский научный журнал. 2012. № 4. С. 36–40.
13. Пат. 116877 RU, МПК E04C 3/08. Ферма из квадратных труб / А.Ф. Кузнецов, В.А. Кузнецов; патентообл. ФГБОУ ВПО «ЮУрГУ» (НИУ). № 2011150569/03; заявл. 12.12.2011; опубл. 10.06.2012. Бюл. № 16.
14. Пат. 116526 RU, МПК E04B 1/58, E04C 3/08. Узловое бесфасоночное соединение трубчатых элементов ферм / А.С. Марутян, Т.Л. Кобалия,

Ю.И. Павленко, С.А. Глухов ; патентообл. А.С. Марутян. № 2010135714/03 ; заявл. 26.08.2010 ; опубл. 27.05.2012. Бюл. № 15.

15. Марутян А.С., Эжба С.И. Проектирование стальных ферм покрытий из прямоугольных, ромбических и пятиугольных замкнутых гнутосварных профилей. Пятигорск : СКФУ, 2012. 120 с.

16. Пат. 2329361 RU, МПК E04C 3/08. Узловое бесфасоночное соединение трубчатых элементов фермы (варианты) / В.А. Зинькова, А.А. Соколов ; патентообл. БГТУ им. В.Г. Шухова. № 2006140596/03 ; заявл. 16.11.2006 ; опубл. 20.07.2008. Бюл. № 20.

17. Зинькова В.А., Солодов Н.В. Исследование напряженно-деформированного состояния бесфасоночных узлов трубчатых ферм // Современные проблемы науки и образования. 2013. № 6. С. 205.

18. Пат. 143426 RU, МПК E04C 3/08. Ферма из квадратных труб с верхним поясом, усиленным швеллером / А.С. Марутян ; патентообл. А.С. Марутян. № 2014105611/03 ; заявл. 14.02.2014 ; опубл. 20.07.2014. Бюл. № 20.

19. Металлические конструкции. Общий курс / под ред. Е.И. Беленя. М. : Стройиздат, 1986. С. 210.

20. Металлические конструкции: в 3 т. / под ред. В.В. Горева. М. : Высшая школа, 2004. Т. 1. Элементы конструкций. С. 425.

21. Металлические конструкции / под ред. Ю.И. Кудишина. 9-е изд., стер. М. : Академия, 2007. С. 267. (Высшее профессиональное образование. Строительство)

22. Лебедева Н.В. Фермы, арки, тонкостенные пространственные конструкции. М. : Архитектура-С, 2007. С. 8–9. (Специальность «Архитектура»)

23. Давыдов Е.Ю., Никитенко М.И., Шайтаров Л.Д. Строительные конструкции. Металлические конструкции, основания и фундаменты. Минск : Технопринт, 2005. С. 142–147.

24. Марутян А.С. Оптимизация высот стропильных перекрестных стальных ферм // Строительная механика и расчет сооружений. 2014. № 4 (255). С. 25–34.

25. Сперанский Б.А. Решетчатые металлические предварительно напряженные конструкции. М. : Стройиздат, 1970. 239 с.

26. Металлические конструкции : в 3 т. / под ред. В.В. Горева. 2. изд., перераб. и доп. М. : Высшая школа, 2002. Т. 3. Специальные конструкции и сооружения С. 287–288.

27. Зуева И.И., Иванова С.Л. Особенности проектирования структурных конструкций типа «ЦНИИСК» // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Строительство и архитектура. 2013. № 1. С. 91–97.

28. Никитюк А.В., Московкина А.А., Зуева И.И. Достоинства и недостатки структурных конструкций // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Строительство и архитектура. 2011. № 1. С. 99–104.

Поступила в редакцию в декабре 2016 г.

Об авторах: **Марутян Александр Суменович** — кандидат технических наук, доцент кафедры строительства, **Институт сервиса, туризма и дизайна (филиал) Северо-Кавказский федерального университета (ИСТИД (филиал) СКФУ в г. Пятигорске)**, 357500, г. Пятигорск, пр-т 40 лет Октября, д. 56, al_marut@mail.ru;

Оробинская Валерия Николаевна — кандидат технических наук, ведущий научный сотрудник отдела планирования и организации научно-исследовательской работы, **Институт сервиса, туризма и дизайна (филиал) Северо-Кавказский федерального университета (ИСТИД (филиал) СКФУ в г. Пятигорске)**, 357500, г. Пятигорск, пр-т 40 лет Октября, д. 56, orobinskaya.val@yandex.ru.

Для цитирования: *Марутян А.С., Оробинская В.Н. Трехгранные фермы покрытий (перекрытий) и оптимизация их высот // Вестник МГСУ. 2017. Т. 12. Вып. 2 (101). С. 172–183. DOI: 10.22227/1997-0935.2017.2.172-183*

REFERENCES

1. Trofimov V.I. A. s. No. 488899 SSSR, MPK E04C 3/08. Prostranstvennoe sterzhnevoe skladchatoe pokrytie [Author's Certificate No. 488899 SSSR, MPK E04C 3/08. Spatial Frame Folded-Plate Roof]. TsNIISK imeni V.A. Kucherenko. No. 1896007/29-33 , appl. 21.03.1973 , publ. 25.10.1975, bulletin No. 39. (In Russian)

2. Strukturnye konstruksii pokrytiy odnoetazhnykh proizvodstvennykh zdaniy proletom 18 i 24 m iz prokatnykh profiley tipa «TsNIISK» / Seriya 1.460-6/81. Chertezhi KM, 1981 [Space Frames for Roofs of Single-Storey Industrial Buildings with a Span of 18 and 24 m Made of the "TsNIISK" Type Rolled Profiles / Series 1.460-6/81. Drawings KM, 1981]. (In Russian)

3. Stal'nye konstruksii pokrytiy odnoetazhnykh proizvodstvennykh zdaniy iz prokatnykh profiley s razrezhennoy reshetkoy proletom 18 i 24 m tipa «Moskva» / Shifr 774 KM. Chertezhi KM, 1988 [Steel Roof Structures for Single-Storey Industrial Buildings with a Span of 18 and 24 m Made of the "Moskva" Type Rolled Profiles with a Low-Density Lattice / Code 774 KM. Drawings KM, 1988]. (In Russian)

4. Avanesov S.I. A. s. 1544921 SSSR, MPK E04C 3/04. Metallichesкая ferma [Author's Certificate No. 1544921 SSSR, MPK E04C 3/04. Metallic Truss]. Nauchno-issledovatel'skiy institut stroitel'stva i arkhitektury Gosstroya ArmSSR, No. 4428227/23-33 , appl. 23.05.1988 , publ. 23.02.1990, bulletin No. 7. (In Russian)

5. Marutyan A.S. Patent No. 2553810 RU, МПК E04C 3/04. Metallichesкая ferma [Patent No. 2553810 RU, МПК E04C 3/04. Metallic Truss]. Patent holder : SKFU, No. 2014114112/03, appl. 09.04.2014 , publ. 20.06.2015, bulletin No. 17. (In Russian)

6. Romanyuk V.V., Vasilenko V.B. Deformativnost' konstruksii perforirovannogo progona Z-obraznogo profilya v usloviyakh kosogo izgiba [Deformability of Design of a Perforated Girder of Z-shaped Profile in Conditions of Oblique Bending]. *Vestnik Belorussko-Rossiyskogo universiteta* [Bulletin of Belarussian-Russian University]. 2015, no. 1 (46), pp. 111–119. (In Russian)

7. Volkov V.P., Volkova O.V. Geometricheskie kharakteristiki tonkostennogo Z-obraznogo sterzhnya s zakrugleniem [Geometrical Characteristics of a Thin-Walled Z-shaped Bar with a Chamfer]. *Modelirovanie i mekhanika konstruksiy* [Structural Modeling and Mechanics]. 2015, no. 2. Available at : http://mechanics.pgus.ru/Plone/nomera-zhurnala/no2/stroitel'naya-mekhanika/2.10/at_download/file. Date of Access : 12.07.2016. (In Russian)

8. Kol'zev A.A. Otsenka vliyaniya zamknutoy formy secheniya na ustoychivost' szhatykh stal'nykh sterzhney trekhpozasnykh ferm [Evaluation of Impact of the Closed Shape of Cross-Section on Stability of Compressed Steel Bars of Three-Chord Trusses]. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Stroitel'stvo* [News of Higher Educational Institutions. Construction]. 2012, no. 11–12 (647), pp. 108–113. (In Russian)

9. Packer J.A., Wardenier J., Zhao X.-L., van der Vegte G.J. and Kurobane Y. Construction with Hollow Steel Sections. Design Guide for Rectangular Hollow Section (RHS) Joints under Predominantly Static Loading. CIDECT, 2009, 156 p.

10. Marutyan A.S. Patent No. 154158 RU. Trekhgran-naya ferma pokrytiya (perekrytiya) iz pryamougol'nykh trub [Patent No. 154158 RU. Triangular Roof (floor) Truss Made of Rectangular Tubes]. Patent holder : SKFU. No. 2014148585/03 , appl. 02.12.2014 , publ. 20.08.2015, bulletin No. 23 (In Russian)

11. Kuznetsov A.F., Kuznetsov V.A. Stal'nye reshetchatye progony iz trub dlya pokrytiy zdaniy, ustoychivye protiv korrozii [Steel Corrosion-Resistant Lattice Girders Made of Tubes, for Roofs of Buildings]. *Privolzhskiy nauchnyy zhurnal* [Privolzhsky Scientific Journal]. 2012, no. 3, pp. 20–26. (In Russian)

12. Baykov D.A., Kolesov A.I., Maslov D.S. Chislen-nye issledovaniya deystvitel'noy raboty uzlov fermy iz kvadratnykh trub, soedinennykh v uzлах na rebro [Numerical Studies of the Actual Operation of Truss Nodes Made of Square Tubes Connected Edgewise in the Nodes]. *Privolzhskiy nauchnyy zhurnal* [Privolzhsky Scientific Journal]. 2012, no. 4, pp. 36–40. (In Russian)

13. Kuznetsov A.F. Patent No. 116877 RU, МПК E04C 3/08. Ferma iz kvadratnykh trub [Patent No. 116877 RU, МПК E04C 3/08. Truss Made of Square Tubes]. Patent holder : FGBOU VPO "YuUrGU" (NIU). No. 2011150569/03 , appl. 12.12.2011 , publ. 10.06.2012, bulletin No. 16. (In Russian)

14. Marutyan A.S. Patent No. 116526 RU, МПК E04B 1/58, E04C 3/08. Uzlovoe besfasonochnoe soedinenie trubchatykh elementov ferm [Patent No. 116526 RU, МПК E04B 1/58, E04C 3/08. Gussetless Nodal Connection of Tubular Members of Trusses]. Patent holder : Marutyan A.S. No. 2010135714/03 , appl. 26.08.2010 , publ. 27.05.2012, bulletin No. 15. (In Russian)

15. Marutyan A.S., Ekba S.I. *Proektirovanie stal'nykh ferm pokrytiy iz pryamougol'nykh, rombi-cheskikh i pyatiugol'nykh zamknutykh gnutosvarnykh profiley* [Designing of Steel Trusses for Roofs Made of Rectangular, Rhombic and Pentagonal Closed Roll-Welded Profiles]. Pyatigorsk, SKFU Publ., 2012, 120 p. (In Russian)

16. Zin'kova V.A. Patent No. 2329361 RU, МПК E04C 3/08. Uzlovoe besfasonochnoe soedinenie trubchatykh elementov fermy (varianty) [Patent No. 2329361 RU, МПК E04C 3/08. Gussetless nodal connection of tubular members of truss (variants)]. Patent holder : BGTU im. V.G. Shukhova. No. 2006140596/03 , appl. 16.11.2006 ; publ. 20.07.2008, bulletin No. 20. (In Russian)

17. Zin'kova V.A., Solodov N.V. Issledovanie napryazhenno-deformirovannogo sostoyaniya besfasonochnykh uzlov trubchatykh ferm [Study of Stress-Strain State of Gussetless Nodes of Tubular Trusses]. *Sovremennye problemy nauki i obrazovaniya* [Modern Problems of Science and Education]. 2013, no. 6, 205 p. (In Russian)

18. Marutyan A.S. Patent No. 143426 RU, МПК E04C 3/08. Ferma iz kvadratnykh trub s verkhnim poyasom, usilennym shvellером [Patent No. 143426 RU, МПК E04C 3/08. Truss Made of Square Tubes, with Upper Chord Reinforced by Channel Bar]. Patent holder : Marutyan A.S. No. 2014105611/03 , appl. 14.02.2014 , publ. 20.07.2014, bulletin No. 20. (In Russian)

19. Belenya E.I. editor. *Metallicheskie konstruksii. Obshchiy kurs* [Metal Structures. General Course]. Moscow, Stroyizdat Publ., 1986, 210 p. (In Russian)

20. Gorev V.V. editor. *Metallicheskie konstruksii : v 3 t.* [Metal Structures. In 3 volumes]. Moscow, Vysshaya Shkola Publ., 2004, T. 1. Elementy konstruksiy [Volume 1. Structural elements], 425 p. (In Russian)

21. Kudishin Yu.I. editor. *Metallicheskie konstruksii* [Metal Structures.]. 9th edition, stereotyped. Moscow, Akademiya Publ., 2007, 267 p. (Vysshее professional'noe obrazovanie. Stroitel'stvo [Higher Professional Education. Construction]) (In Russian)

22. Lebedeva N.V. *Fermy, arki, tonkostennyye prostanstvennyye konstruksii* [Trusses, Arches, Thin-Walled Spatial Structures]. Moscow, Arkhitektura-S Publ., 2007, pp. 8–9. (Spetsial'nost' «Arkhitektura» [Speciality "Architecture"])

23. Davydov E.Yu., Nikitenko M.I., Shaytarov L.D. *Stroitel'nye konstruksii. Metallicheskie konstruksii, osnovaniya i fundamenti* [Building Structures. Metal Structures, Bases and Foundations]. Minsk, Tekhnoprint Publ., 2005, pp. 142–147 (In Russian)

24. Marutyan A.S. Optimizatsiya vysot stropil'nykh perekrestnykh stal'nykh ferm [Optimization of Depths of Roof Grid Steel Trusses]. *Stroitel'naya mekhanika i raschet sooruzheniy* [Structural Mechanics and Analysis of Construction]. 2014, no. 4 (255), pp. 25–34. (In Russian)

25. Speranskiy B.A. *Reshetchatye metallicheskie predvaritel'no napryazhennyye konstruksii* [Lattice Metal Prestressed Structures]. Moscow, Stroyizdat Publ., 1970, 239 p. (In Russian)

26. Gorev V.V. editor. *Metallicheskie konstruksii : v 3 t.* [Metal Structures : in 3 volumes]. 2nd edition, revised and enlarged, Moscow, Vysshaya Shkola Publ., 2002, vol. 3. Spetsial'nye konstruksii i sooruzheniya [Special Structures and Installations], pp. 287–288. (In Russian)

27. Zueva I.I., Ivanova S.L. Osobennosti proektirovaniya strukturnykh konstruksiy tipa «TsNI-ISK» [Peculiarities of Designing of the "TsNIISK" Type Space Frames]. *Vestnik Permskogo natsional'nogo*

issledovatel'skogo politekhnicheskogo universiteta. *Stroitel'stvo i arkhitektura* [PNRPU Bulletin. Construction and Architecture]. 2013, no. 1, pp. 91–97. (In Russian)

28. Nikityuk A.V., Moskovkina A.A., Zueva I.I. Dostoinstva i nedostatki strukturnykh konstruksiy [Advantages

and Disadvantages of Space Frames]. *Vestnik Permskogo natsional'nogo issledovatel'skogo politekhnicheskogo universiteta. Stroitel'stvo i arkhitektura* [PNRPU Bulletin. Construction and Architecture]. 2011, no. 1, pp. 99–104. (In Russian)

Received in December 2016

About the authors: **Marutyan Aleksandr Surenovich** — Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Department of Construction, **Institute of Service, Tourism and Design (ISTD), Branch of North Caucasus Federal University (NCFU) in Pyatigorsk**, 56 40 Let Oktyabrya prospekt, Pyatigorsk, 357500, Russian Federation; al_marut@mail.ru;

Orobinskaya Valeriya Nikolaevna — Candidate of Technical Sciences, Leading Researcher, Department of Planning and Organization of Research Work, **Institute of Service, Tourism and Design (ISTD), Branch of North Caucasus Federal University (NCFU) in Pyatigorsk**, 56 40 Let Oktyabrya prospekt, Pyatigorsk, 357500, Russian Federation; orobinskaya.val@yandex.ru.

For citation: Trekhgrannye fermy pokrytiy (perekrytiy) i optimizatsiya ikh vysot [Triangular Trusses for Roofs (Floors) and Optimization of their Depths]. *Vestnik MGSU* [Proceedings of Moscow State University of Civil Engineering]. 2017, vol. 12, issue 2 (101), pp. 172–183. (In Russian) DOI: 10.22227/1997-0935.2017.2.172-183