

УДК 624.014

Несущие конструкции из квадратных (прямоугольных) и ромбических труб

Марутян А.С., к.т.н., Чернов П.С., к.т.н.

Филиал Северо-Кавказского федерального университета в г. Пятигорске,
Российская Федерация

Анотація. У статті серед загального ряду сучасних металевих конструкцій з використанням замкнутих гнutoзварних профілів (профільних труб) прямокутного (квадратного) перерізу виділені блоки покриттів і перекриттів з перехресних ферм типу «П'ятигорськ». Внаслідок невеликих розмірів вони умовно класифіковані як «кишенькові» модулі і виготовлені суцільнозварними з безфасонними вузлами. За допомогою аналізу цих вузлів виявлена перспективність застосування профільних труб ромбічного перерізу для подальшої модернізації несучих конструкцій. Показана цілком прийнятна коректність і простота розрахунку ромбічних перерізів за наближеною методикою. Приведено два нові технічні рішення ґратчастих конструкцій, що сприяють поліпшенню їх техніко-економічних характеристик. Виявлено зниження витрат конструкційного матеріалу при реалізації таких рішень на прикладі кроквяних ферм.

Анотация. В статье среди общего ряда современных металлических конструкций с использованием замкнутых гнutoсварных профилей (профильных труб) прямоугольного (квадратного) сечения выделены блоки покрытий и перекрытий из перекрестных ферм типа «Пятигорск». Из-за небольших размеров они условно классифицированы как «карманные» модули и изготовлены цельносварными с бесфасонными узлами. При помощи анализа этих узлов выявлена перспективность применения профильных труб ромбического сечения для дальнейшей модернизации несущих конструкций. Показана вполне приемлемая корректность и простота расчета ромбических сечений по приближенной методике. Приведены два новых технических решения решетчатых конструкций, способствующих улучшению их технико-экономических характеристик. Выявлено снижение расхода конструкционного материала при реализации таких решений на примере стропильных ферм.

Abstract. In the article within the general range of modern metal structures with closed-end roll-welded sections (shaped tubes) of rectangular (square) cross-section there are blocks of roofs and ceilings made of cross-type trusses type "Pyatigorsk" emphasized. Due to small size they are conventionally classified as "pocket" modules and are made as welded ones with gussetless joints. By analyzing these joints promising application is identified for shaped pipes of rhombic cross-sections for further modernization of load-bearing structures. It demonstrates quite acceptable accuracy and ease of rhombic cross-sections calculation by means of approximate methods. There are two new technical solutions of lattice structures presented that improve their technical and economic characteristics. Reduction in construction material consumption at implementation of these solutions on example of roof trusses is shown.

Ключевые слова: несущие конструкции, фермы покрытия, замкнутые гнutoсварные профили, прямоугольные (квадратные) трубы, ромбические трубы.

Благодаря высоким эксплуатационным и эстетическим свойствам квадратные (прямоугольные) трубы (гнуто сварные профили – ГСП) нашли довольно широкое распространение в зарубежной и отечественной практике строительства. Так, уже в 1964 г. в Англии было использовано 80 тыс. т этих профилей [1]. Применение ГСП в строительных металлоконструкциях обеспечивает значительное снижение материальных и трудовых затрат, а также сокращение продолжительности строительства. При этом наиболее экономичными среди конструкций из ГСП являются фермы покрытий (перекрытий), эффективность которых особенно возрастает при наличии внеузловых нагрузок [2–18]. В общем ряду подобных технических решений свою нишу занимают легкие металлические конструкции комплектной поставки в виде блоков покрытий и перекрытий из перекрестных ферм типа «Пятигорск». Несмотря на конъюнктурную нестабильность, они продолжают пользоваться спросом, привлекая внимание инвесторов и заказчиков своими технико-экономическими характеристиками. Из-за небольших размеров (6×6...12×12 м) их можно условно классифицировать как «карманные» модули и изготавливать цельносварными из прямоугольных и квадратных труб с бесфасонными узловыми соединениями (рис. 1) [19, 20]. Для поддержания и увеличения конкурентоспособности таких конструкций необходима дальнейшая модернизация при помощи разработки и исследования стальных ферм из гнуто сварных профилей (профильных труб) и их перекрестных систем.

Наибольшее распространение в трубчатых фермах получили узловые бесфасонные соединения с непосредственным примыканием стержней решетки к поясам. Здесь во избежание продавливания (выдергивания) диаметр трубы решетки не должен быть меньше 0,3 диаметра трубы пояса. В фермах из прямоугольных (квадратных) труб такое ограничение ужесточено в два раза, то есть ширину стержня решетки следует принимать не менее 0,6 поперечного размера пояса. Недостаток описанных узлов заключается в отмеченном ограничении, учет которого приводит к повышению расхода материала на стержни и увеличению металлоемкости конструкции. Еще одним известным техническим решением является решетчатая конструкция с узловым бесфасонным соединением трубчатых элементов фермы, в котором диагональ поперечного сечения квадратного пояса расположена в осевой плоскости фермы, а раскосы в месте примыкания имеют сквозной вырез (V-образной формы), полностью повторяющий геометрию этого примыкания. За счет такого выреза соединение каждого из элементов решетки с поясом осуществляется по двум смежным его стенкам [21, 22]. Аналогичным образом в осевой плоскости фермы из квадратных труб расположены диагонали поперечных сечений всех стержневых элементов (и верхнего

пояса, и нижнего пояса, и раскосов решетки между ними) [23–27]. Недостатком этого известного технического решения является сложность его применения в фермах беспрогонных покрытий, так как ребро пояса может смять листы профилированного настила. В прогонных покрытиях уже само ребро пояса может быть смято прогоном, поэтому необходимо устройство опорных столиков под прогоны, что негативно влияет на материалоемкость конструкций, а также увеличивает трудоемкость их изготовления и монтажа.



а)



б)

Рис. 1. Снимки блоков покрытий и перекрытий из перекрестных ферм типа «Пятигорск» на строительстве торгового предприятия в поселке Иноземцево (а), и складского объекта в городе Лермонтов (б)

Наиболее близким техническим решением к предлагаемому является строительная металлическая тонкостенная решетчатая конструкция, включающая пояса трубчатого сечения и жестко прикрепленную к ним решетку. В одном варианте эта решетка выполнена из трубчатых элементов со сплюснутыми в плоскости конструкции концами, а в другом – из прутковых элементов V- или W-образного (зигзагообразного) очертания [28]. Такому техническому решению присущи недостатки известных трубчатых ферм с бесфасоночными примыканиями решетки к поясам, увеличивающими жесткость узловых соединений, так как стержневые

элементы со сплюснутыми в плоскости конструкции концами еще больше ужесточают узлы в этой плоскости, что сопровождается ростом металлоемкости. Решетка, выполненная из стальных изогнутых элементов V- или W-образного (зигзагообразного) очертания, отличается незначительной несущей способностью, что ограничивает нагрузку на конструкцию [29].

Техническим результатом предлагаемого решения является возрастание несущей способности конструкции с уменьшением расхода ее конструкционного материала. Указанный технический результат достигается тем, что в конструкции с решеткой из ГСП, включающую пояса трубчатого сечения и жестко прикрепленную к ним решетку, выполненную со сплюснутыми концами из изогнутых элементов V- или W-образного (зигзагообразного) очертания, стержневые элементы решетки имеют трубчатое сечение ромбической формы с отношением диагоналей 1/2, где большая диагональ расположена в плоскости конструкции, а меньшая – из плоскости (рис. 2) [30].



Рис. 2. Предлагаемое решение несущей конструкции с решеткой из ромбической трубы:

а – при треугольной системе решетки; б – при раскосной системе решетки

В предлагаемой металлической конструкции треугольная или раскосная решетка выполнена из ромбического замкнутого ГСП. Для непосредственного примыкания к поясам с образованием бесфасоночных узлов ромбический профиль в заданных по проекту местах сплюсывают и двойными гиами придают ему V- или W-образное (зигзагообразное) очертание, характерное решеткам из прутковых элементов. Протяженность полосовой (ленточной) заготовки ромбического профиля можно подобрать так, что его хватит на всю длину конструкции или ее отправочной марки. По сравнению с прутковой такая решетка имеет более высокую несущую способность (особенно при сжатии), что позволяет увеличить нагрузку на конструкцию или при фиксированной нагрузке снизить ее металлоемкость.

Сплющивание и двойные гибы ромбического профиля обеспечивают компоновку бесфасоночных узловых соединений без конструктивных эксцентриситетов, характерных для трубчатых ферм из прямоугольных (квадратных) гнутосварных профилей, что исключает появление изгибающих моментов и позитивно влияет на расход конструкционного материала. Сплющивание предохраняет стенку поясных элементов от продавливания и позволяет уменьшить ее толщину. По линиям гибов ромбического профиля в плоскости конструкции образуются листовые шарниры, которые соответствуют шарнирно-стержневой расчетной схеме (модели) и избавляют от необходимости учитывать жесткости узлов, что также способствует снижению металлоемкости. Из плоскости конструкции те же гибы сплюснутых участков ромбического профиля имеют наибольшую жесткость, приближенную к жесткости рамного крепления, за счет которого в несущих конструкциях можно сократить связевые элементы, как это сделано в конструкциях покрытий типа «Тагил» [31].

При шарнирных закреплениях в плоскости конструкции и жестких (рамных) из плоскости расчетная длина стержневых элементов решетки в плоскости конструкции в два раза больше расчетной длины из плоскости. Исходя из этого, чтобы стержневые элементы решетки в плоскости и из плоскости конструкции имели одну и ту же гибкость, целесообразен такой профиль поперечного сечения, у которого радиусы инерции по главным центральным осям отличаются между собой также в два раза.

Такому условию вполне отвечает тонкостенное трубчатое сечение ромбической формы с отношением диагоналей $1/2$, где большая диагональ расположена в плоскости конструкции, а меньшая – из плоскости. Причем значение радиуса инерции по большей диагонали превышает величину радиуса инерции аналогичного ромбического профиля с равными диагоналями, то есть квадратного, что определенным образом способствует дальнейшему снижению металлоемкости несущих конструкций. Здесь можно выявить резервы несущей способности верхнего (сжатого) пояса фермы, если и его выполнить из подобного ромбического профиля с соответствующим сплющиванием в бесфасоночных узлах. Кроме того, ромбические профили в предлагаемой конструкции отношением диагоналей $1/2$ отличаются от труб стальных ромбических, ребристых по ГОСТ 8647-57 [32].

Для количественной оценки резервов несущей способности целесообразно использовать расчетные формулы осевых моментов инерции I_x и I_y ромбического (в том числе и квадратного) профиля (рис. 3):

$$I_x = (4/3)b^3t(1/(n^2 + 1)) + (1/3)bt^3(n^2 + 1)/n^2 ; \quad (1)$$

$$I_y = (4/3)b^3tn^2/(n^2 + 1) + (1/3)bt^3(n^2 + 1) , \quad (2)$$

где b – длина срединной линии стенки, то есть линии, проходящей через середину толщины стенки;

$$b = B - t; \quad (3)$$

B – наружный габарит квадратного (исходного) профиля; A – площадь поперечного сечения профиля (его листовой заготовки);

$$A = 4bt; \quad (4)$$

t – толщина стенки; n – отношение горизонтальной (меньшей) диагонали U к вертикальной (большей) V ,

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

При двукратной разнице радиусов инерции ($i_x = 2i_y$) $I_x = 4I_y$, тогда можно составить следующее уравнение:

$$\begin{aligned} & (4/3)b^3t(1/(n^2 + 1)) + (1/3)bt^3(n^2 + 1)/n^2 - \\ & - 4((4/3)b^3tn^2/(n^2 + 1) + (1/3)bt^2(n^2 + 1)) = 0; \\ & (4n^2 - 1)((4/3)b^3t(1/(n^2 + 1)) + (1/3)bt^3(n^2 + 1)) = 0. \end{aligned}$$

Откуда $4n^2 - 1 = 0$ и $n = 1/2$.

Для тонкостенного трубчатого сечения ромбической формы с отношением диагоналей $1/2$ ($n = 0,5$):

$$\begin{aligned} I_{xp} &= (4/3)b^3t(1/(0,5^2 + 1)) + (1/3)bt^3(0,5^2 + 1)/0,5^2 = \\ &= 1,0667b^3t + 1,6667bt^3; \end{aligned} \quad (6)$$

$$\begin{aligned} I_{yp} &= (4/3)b^3t \times 0,5^2/(0,5^2 + 1) + (1/3)bt^3(0,5^2 + 1) = \\ &= 0,2667b^3t + 0,4167bt^3 \end{aligned} \quad (7)$$

Для тонкостенного трубчатого сечения квадратной формы ($n=1$):

$$\begin{aligned} I_{xk} &= (4/3)b^3t(1/(1^2 + 1)) + (1/3)bt^3(1^2 + 1)/1^2 = \\ &= 0,6667bt(b^2 + t^2); \end{aligned} \quad (8)$$

$$\begin{aligned} I_{yk} &= (4/3)b^3t \times 1^2/(1^2 + 1) + (1/3)bt^3(1^2 + 1) = \\ &= 0,6667bt(b^2 + t^2). \end{aligned} \quad (9)$$

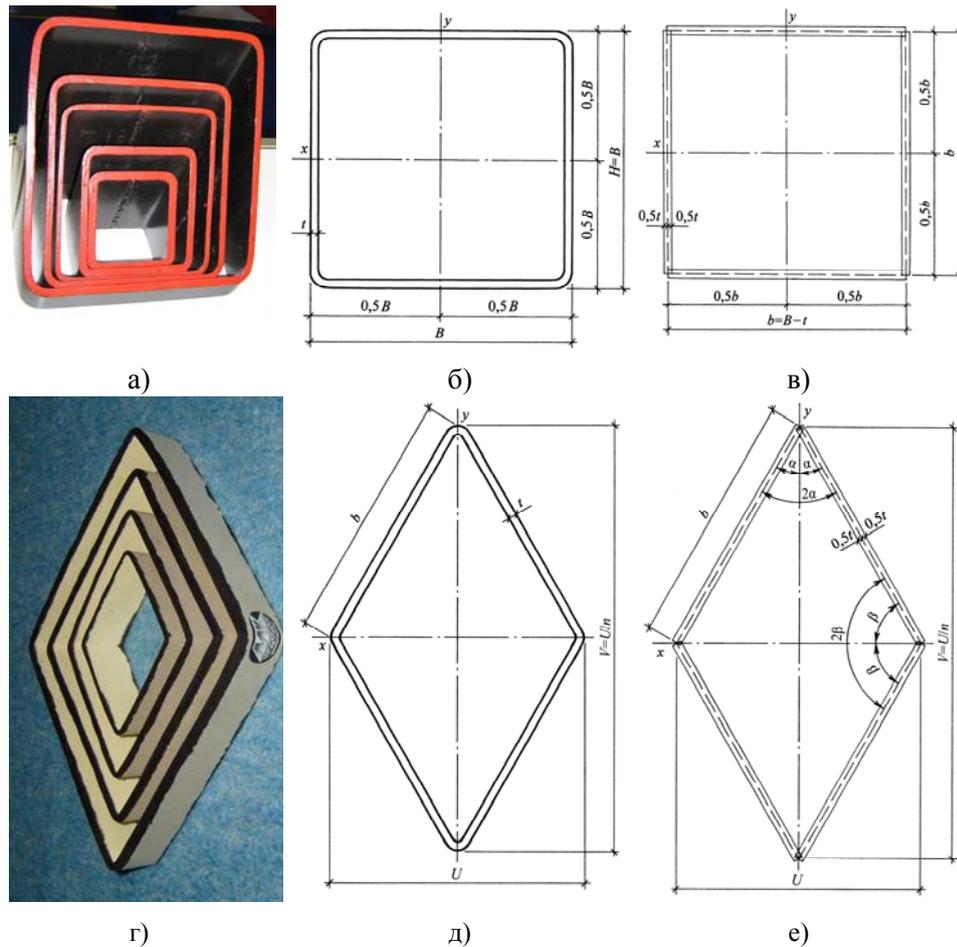


Рис. 3. Замкнутые гнутосварные профили (профильные трубы):
а – срезы разнокалиберных квадратных труб; б – поперечное сечение квадратных труб; в – расчетная схема сечения квадратных труб; г – срезы разнокалиберных ромбических труб; д – поперечное сечение ромбических труб; е – расчетная схема сечения ромбических труб

Если ввести параметры тонкостенности, характерные для ГСП ($b/t = 25...50$) [33], то очевидно, что в ромбическом элементе осевой момент инерции сечения увеличивается в $I_{xp} / I_{xk} = 1,6003...1,6014$ раза, а гибкость уменьшается в $i_{xp} / i_{xk} = 1,2650...1,2655$ раза, где i_{xp} и i_{xk} – радиусы инерции сечения ромбической и квадратной трубы соответственно.

Расчетные выкладки сделаны без учета угловых закруглений (сопряжений) квадратных и ромбических профилей [34–37]. Практический интерес представляет их дальнейшее упрощение, если пренебречь вторыми слагаемыми, в которых значения толщины возведены в третью степень. В качестве базового объекта тестового расчета для количественной оценки сделанных допущений и их неточностей приняты профильные трубы квадратного сечения ($n=1$) по ТУ 36-2287-80 из сортамента несущих конструкций типа «Молодечно» ($\square 80 \times 3$, $\square 100 \times 3$, $\square 100 \times 4$, $\square 100 \times 5$, $\square 120 \times 3$, $\square 120 \times 4$, $\square 120 \times 5$, $\square 120 \times 6$, $\square 140 \times 4$, $\square 140 \times 5$, $\square 140 \times 6$, $\square 140 \times 7$, $\square 140 \times 8$, $\square 160 \times 5$, $\square 160 \times 6$, $\square 160 \times 7$, $\square 160 \times 8$) [38, 39]:

$$\begin{aligned} A &= 4bt; \quad I_{xk} = I_{yk} = 0,6667b^3t; \\ W_{xk} = W_{yk} &= 0,6667b^3t/(b/2 + t/2); \quad i_{xk} = i_{yk} = 0,4083b. \end{aligned} \quad (10)$$

Результаты такого тестового расчета, собранные в табл. 1, показали, что погрешность приближенной методики (без учета угловых закруглений и вторых слагаемых) для 17 профилей по ТУ 36-2287-80 не превышает полупроцентного предела. Для этих же профилей из сортаментов по ГОСТ Р 54157-2010, ГОСТ 30245-2003 (ГОСТ 30245-2012), ГОСТ 30245-94 и ГОСТ 12336-66, а также по EN 10219:1997, DIN 2395 неточность тестового расчета при неизменной площади ($A = 4bt = const$) возрастает до 5...8%. Эту погрешность можно отнести в общий запас несущей способности.

Итоги дополнительного расчета практически совпадают с результатами основного теста, если в его расчетных выкладках длину срединной линии стенки b заменить численным параметром b_{ef} , найденным с поправкой на площадь сечения (дополнение табл. 1):

$$\begin{aligned} b_{ef} &= A/(4t); \quad I_{xk} = I_{yk} = 0,6667b_{ef}^3t; \\ W_{xk} = W_{yk} &= 0,6667b_{ef}^3t/(b_{ef}/2 + t/2); \quad i_{xk} = i_{yk} = 0,4083b_{ef}. \end{aligned} \quad (11)$$

Для трубчатого сечения ромбической формы с отношением диагоналей $1/2$ ($n = 0,5$):

$$\begin{aligned} A &= 4bt; \quad U = 0,8944b; \quad V = 1,7888b; \quad n = 0,8944b/1,7888b = 1/2; \\ I_{xp} &= 1,0667b^3t; \quad I_{yp} = 0,2667b^3t; \\ I_{xp}/I_{yp} &= 1,0667b^3t/(0,2667b^3t) = 3,9996 \approx 4; \\ W_{xp} &= 1,1926b^2t; \quad W_{yp} = 0,5964b^2t; \end{aligned} \quad (12)$$

$$W_{xp}/W_{yp} = 1,1926b^2t/(0,5964b^2t) = 1,9997 \approx 2;$$

$$i_{xp} = 0,5164b; i_{yp} = 0,2582b; i_{xp}/i_{yp} = 0,5164b/(0,2582b) = 2; \quad (12)$$

$$i_{xp}/i_{xk} = 0,5164b/(0,4083b) = 1,2648.$$

Таким образом, приближенное определение расчетных характеристик поперечных сечений квадратных и ромбических труб вполне корректно для практического применения в строительном проектировании. В качестве примера в таблице 2 приведена рабочая версия сортамента ромбических труб, выполненная на базе тех же 17 профилей по ТУ 36-2287-80.

Таблица 1

Расчетные параметры поперечных сечений квадратных труб

Сечения □ мм (номинал)	A см ² %	$I_x=I_y$ см ⁴ %	$W_x=W_y$ см ³ %	$i_x=i_y$ см %	Примечания
77×3 (80×3)	9,24 100	91,311 100	22,829 100	3,144 100	Приближенный расчет
	9,24 100	91,4 100,1	22,8 99,87	3,14 99,87	ТУ 36-2287-80
	9,01 97,51	87,84 96,20	21,96 96,19	3,12 99,24	ГОСТ Р 54157-2010
	9,01 97,51	87,81 96,17	21,95 96,15	3,12 99,24	ГОСТ 30245-2003 ГОСТ 30245-2012
	9,20 99,57	89,50 98,02	22,40 98,12	3,12 99,24	ГОСТ 30245-94
	8,85 95,78	85,3 93,42	21,3 93,30	3,1 98,60	ГОСТ 12336-66
	9,01 97,51	87,8 96,15	22 96,37	3,12 99,24	EN 10219:1997, DIN 2395
97×3 (100×3)	11,640 100	182,544 100	36,509 100	3,961 100	Приближенный расчет
	11,64 100	182,7 100,09	36,5 99,98	3,96 99,97	ТУ 36-2287-80
	11,41 98,02	177,05 96,99	35,41 96,99	3,94 99,47	ГОСТ Р 54157-2010
	11,41 98,02	177,0 96,96	35,40 96,96	3,94 99,47	ГОСТ 30245-2003 ГОСТ 30245-2012
	11,60 99,66	180,20 98,72	36,0 98,61	3,94 99,47	ГОСТ 30245-94
	11,03 94,76	173 94,77	34,6 94,77	3,94 98,96	ГОСТ 12336-66
	11,4 97,94	177 96,96	35,4 96,96	3,92 99,47	EN 10219:1997, DIN 2395

Сечения □ мм (номинал)	A см ² %	$I_x=I_y$ см ⁴ %	$W_x=W_y$ см ³ %	$i_x=i_y$ см %	Примечания
96×4 (100×4)	15,360 100	235,141 100	47,028 100	3,920 100	Приближенный расчет
	15,36 100	236,3 100,15	47,2 100,37	3,92 100	ТУ 36-2287-80
	14,95 97,33	226,35 95,94	45,27 96,26	3,89 99,23	ГОСТ Р 54157-2010
	14,95 97,33	225,1 95,73	45,02 95,73	3,88 98,98	ГОСТ 30245-2003 ГОСТ 30245-2012
	15,30 99,61	231,30 98,37	46,30 98,45	3,89 99,23	ГОСТ 30245-94
	14,7 95,70	219 92,82	45,9 97,60	3,87 98,72	ГОСТ 12336-66
	14,9 97,01	226 95,79	45,3 96,33	3,89 99,23	EN 10219:1997, DIN 2395
95×5 (100×5)	19,000 100	285,806 100	57,161 100	3,879 100	Приближенный расчет
	19,0 100	286,5 100,24	57,3 100,24	3,89 100,28	ТУ 36-2287-80
	18,36 96,63	271,1 94,85	54,22 94,85	3,84 98,99	ГОСТ Р 54157-2010
	18,36 96,63	270,9 94,79	54,19 94,80	3,84 98,99	ГОСТ 30245-2003 ГОСТ 30245-2012
	18,90 99,47	278,70 97,51	55,70 97,44	3,84 98,99	ГОСТ 30245-94
	17,9 94,21	260 90,97	52 90,97	3,81 98,22	ГОСТ 12336-66
	18,4 96,84	271 94,82	54,2 94,82	3,84 98,99	EN 10219:1997, DIN 2395
117×3 (120×3)	14,040 100	320,339 100	53,390 100	4,777 100	Приближенный расчет
	14,04 100	320,5 100,05	53,4 100,02	4,77 99,85	ТУ 36-2287-80
	13,81 98,36	312,35 97,51	52,06 97,51	4,76 99,64	ГОСТ Р 54157-2010
	13,81 98,36	312,3 97,49	52,05 97,49	4,76 99,64	ГОСТ 30245-2003 ГОСТ 30245-2012
	14,0 99,72	315,10 98,36	52,50 98,33	4,76 99,64	ГОСТ 30245-94
	-	-	-	-	*ГОСТ 12336-66
	13,8 98,29	312 97,40	52,2 97,77	4,76 99,64	EN 10219:1997, DIN 2395

Сечения □ мм (номинал)	A см ² %	$I_x=I_y$ см ⁴ %	$W_x=W_y$ см ³ %	$i_x=i_y$ см %	Примечания
116×4 (120×4)	18,560 100	416,260 100	69,377 100	4,736 100	Приближенный расчет
	18,56 100	416,7 100,11	69,4 100,03	4,74 100,08	ТУ 36-2287-80
	18,15 97,79	402,28 96,64	67,05 96,65	4,71 99,45	ГОСТ Р 54157-2010
	18,15 97,79	402,2 96,61	67,03 96,62	4,71 99,45	ГОСТ 30245-2003 ГОСТ 30245-2012
	18,50 99,68	408,50 98,14	68,10 98,16	4,71 99,45	ГОСТ 30245-94
	-	-	-	-	*ГОСТ 12336-66
	18,1 97,52	402 96,57	67 96,57	4,71 99,54	EN 10219:1997, DIN 2395
115×5 (120×5)	23,000 100	506,984 100	84,497 100	4,695 100	Приближенный расчет
	23,0 100	507,9 100,18	84,6 100,12	4,69 99,89	ТУ 36-2287-80
	22,36 97,22	485,47 95,76	80,91 95,75	4,66 99,25	ГОСТ Р 54157-2010
	22,36 97,22	485,3 95,72	80,88 95,72	4,66 99,25	ГОСТ 30245-2003 ГОСТ 30245-2012
	22,90 99,57	497,90 98,21	83,0 98,23	4,66 99,25	ГОСТ 30245-94
	-	-	-	-	*ГОСТ 12336-66
	22,4 97,39	485 95,66	80,9 95,74	4,66 99,25	EN 10219:1997, DIN 2395
114×6 (120×6)	27,360 100	592,647 100	98,775 100	4,655 100	Приближенный расчет
	27,36 100	594,2 100,26	99,0 100,23	4,66 100,11	ТУ 36-2287-80
	26,43 96,60	562,16 94,86	93,69 94,85	4,61 99,03	ГОСТ Р 54157-2010
	26,43 96,60	561,8 94,80	93,64 94,80	4,61 99,03	ГОСТ 30245-2003 ГОСТ 30245-2012
	27,40 100,15	583,40 98,44	97,20 98,41	4,61 99,03	ГОСТ 30245-94
	-	-	-	-	*ГОСТ 12336-66
	26,4 96,49	562 94,83	93,7 94,86	4,61 99,03	EN 10219:1997, DIN 2395

Сечения □ мм (номинал)	A см ² %	$I_x=I_y$ см ⁴ %	$W_x=W_y$ см ³ %	$i_x=i_y$ см %	Примечания
136×4 (140×4)	21,760 100	670,822 100	95,832 100	5,553 100	Приближенный расчет
	21,76 100	671,3 100,07	95,9 100,07	5,55 99,95	ТУ 36-2287-80
	21,35 98,12	651,62 97,14	93,09 97,14	5,52 99,41	ГОСТ Р 54157-2010
	21,35 98,12	651,5 97,12	93,07 97,12	5,52 99,41	ГОСТ 30245-2003 ГОСТ 30245-2012
	21,60 99,26	657,90 98,07	94,0 98,09	5,52 99,41	ГОСТ 30245-94
	21,1 96,97	638 95,11	91,1 95,06	5,5 99,05	ГОСТ 12336-66
	21,3 97,89	652 97,19	93,1 97,15	5,52 99,41	EN 10219:1997, DIN 2395
135×5 (140×5)	27,000 100	820,166 100	117,167 100	5,512 100	Приближенный расчет
	27,0 100	821,2 100,13	117,3 100,11	5,51 99,96	ТУ 36-2287-80
	26,36 97,63	790,56 96,39	112,94 96,39	5,48 99,42	ГОСТ Р 54157-2010
	26,36 97,63	790,3 96,36	112,9 96,36	5,48 99,42	ГОСТ 30245-2003 ГОСТ 30245-2012
	26,90 99,63	808,40 98,57	115,50 98,58	5,48 99,42	ГОСТ 30245-94
	25,9 95,93	769 93,76	110 93,88	5,45 98,88	ГОСТ 12336-66
	26,4 97,78	791 96,44	113 96,44	5,48 99,42	EN 10219:1997, DIN 2395
134×6 (140×6)	32,160 100	962,490 100	137,499 100	5,471 100	Приближенный расчет
	32,16 100	964,3 100,19	137,7 100,15	5,48 100,16	ТУ 36-2287-80
	31,23 97,11	920,43 95,63	131,49 95,63	5,43 99,25	ГОСТ Р 54157-2010
	31,23 97,11	920,0 95,59	131,4 95,60	5,43 99,25	ГОСТ 30245-2003 ГОСТ 30245-2012
	32,10 99,81	947,10 98,40	135,30 98,40	5,43 99,25	ГОСТ 30245-94
	30,6 95,15	890 92,47	127 92,36	5,39 98,52	ГОСТ 12336-66
	31,3 97,33	920 95,59	131 95,27	5,43 99,25	EN 10219:1997, DIN 2395

Сечения □ мм (номинал)	A см ² %	$I_x=I_y$ см ⁴ %	$W_x=W_y$ см ³ %	$i_x=i_y$ см %	Примечания
133×7 (140×7)	37,240 100	1097,952 100	156,850 100	5,430 100	Приближенный расчет
	37,20 100	1100,9 100,27	157,2 100,22	5,43 100	ТУ 36-2287-80
	35,56 95,49	1020,68 92,96	145,81 92,96	5,36 98,71	ГОСТ Р 54157-2010
	35,56 95,49	1020 92,90	145,7 92,89	5,36 98,71	ГОСТ 30245-2003 ГОСТ 30245-2012
	37,20 99,89	1077,10 98,10	153,90 98,12	5,38 99,08	ГОСТ 30245-94
	35,1 94,25	999 90,99	143 91,17	5,33 98,16	ГОСТ 12336-66
	-	-	-	-	*EN 10219:1997, DIN 2395
132×8 (140×8)	42,240 100	1226,711 100	175,244 100	5,390 100	Приближенный расчет
	42,24 100	1231,1 100,27	175,8 100,32	5,39 100	ТУ 36-2287-80
	40,04 94,79	1126,77 91,85	160,97 91,85	5,30 98,33	ГОСТ Р 54157-2010
	40,04 94,79	1126 91,79	160,8 91,76	5,30 98,33	ГОСТ 30245-2003 ГОСТ 30245-2012
	42,30 100,14	1201,70 97,96	171,70 97,98	5,33 98,89	ГОСТ 30245-94
	39,6 93,75	1099 89,59	157 89,59	5,27 97,77	ГОСТ 12336-66
	40,0 94,70	1127 91,87	161 91,87	5,30 98,33	EN 10219:1997, DIN 2395
155×5 (160×5)	31,000 100	1241,354 100	155,169 100	6,329 100	Приближенный расчет
	31,0 100	1242,5 100,10	155,3 100,08	6,33 100,02	ТУ 36-2287-80
	30,36 97,94	1202,36 96,86	150,29 96,86	6,29 99,38	ГОСТ Р 54157-2010
	30,36 97,94	1202 96,83	150,3 96,86	6,29 99,38	ГОСТ 30245-2003 ГОСТ 30245-2012
	30,70 99,03	1214,60 97,84	151,80 9,78	6,29 99,38	ГОСТ 30245-94
	29,9 96,45	1174 94,57	147 94,74	6,26 98,91	ГОСТ 12336-66
	30,4 98,06	1202 96,83	150 96,67	6,29 99,38	EN 10219:1997, DIN 2395

Сечения □ мм (номинал)	A см ² %	$I_x=I_y$ см ⁴ %	$W_x=W_y$ см ³ %	$i_x=i_y$ см %	Примечания
154×6 (160×6)	36,960 100	1460,979 100	182,622 100	6,288 100	Приближенный расчет
	36,96 100	1463,1 100,10	182,8 100,10	6,29 100,03	ТУ 36-2287-80
	36,03 97,48	1405,48 96,20	175,69 96,20	6,25 99,40	ГОСТ Р 54157-2010
	36,03 97,48	1405 96,17	175,6 96,15	6,24 99,24	ГОСТ 30245-2003 ГОСТ 30245-2012
	36,80 99,57	1435,10 98,23	179,40 98,24	6,24 99,24	ГОСТ 30245-94
	35,4 95,78	1365 93,43	171 93,64	6,21 98,73	ГОСТ 12336-66
	36,0 97,40	1405 96,17	176 96,37	6,25 99,40	EN 10219:1997, DIN 2395
153×7 (160×7)	42,840 100	1671,486 100	208,936 100	6,247 100	Приближенный расчет
	42,84 100	1674,9 100,21	209,3 100,17	6,25 100,05	ТУ 36-2287-80
	41,16 96,08	1569,69 93,91	196,21 93,91	6,18 98,93	ГОСТ Р 54157-2010
	41,16 96,08	1569 93,87	196,1 93,86	6,17	ГОСТ 30245-2003 ГОСТ 30245-2012
	42,8099 9,91	1640,80 98,16	205,10 98,16	6,20 99,25	ГОСТ 30245-94
	40,7 95,01	1542 93,91	193 92,37	6,15 98,40	ГОСТ 12336-66
	-	-	-	-	*EN 10219:1997, DIN 2395
152×8 (160×8)	48,640 100	1873,058 100	234,132 100	6,206 100	Приближенный расчет
	46,4401 100	1878,1 100,27	234,7 100,24	6,21 100,05	ТУ 36-2287-80
	46,44 95,48	1741,23 92,96	217,65 92,96	6,12 98,61	ГОСТ Р 54157-2010
	46,44 95,48	1740 92,90	217,5 92,90	6,12 98,61	ГОСТ 30245-2003 ГОСТ 30245-2012
	48,70 100,12	1836,90 98,07	229,60 98,06	6,15 99,03	ГОСТ 30245-94
	45,9 94,37	1705 91,03	213 90,97	6,09 98,13	ГОСТ 12336-66
	46,4 95,39	1741 92,95	218 93,11	6,12 98,61	EN 10219:1997, DIN 2395

*Дополнение таблицы 1

Сечения □ мм (номинал)	A см ² %	$I_x=I_y$ см ⁴ %	$W_x=W_y$ см ³ %	$i_x=i_y$ см %	Примечания
119,17×3 (125×3)	14,3 100	348 100	55,7 100	4,94 100	ГОСТ 12336-66
	14,3004 99,007	338,495 97,27	55,414 99,49	4,866 98,50	Приближенный расчет
116,88×4 (125×4)	18,7 100	446 100	71,4 100	4,89 100	ГОСТ 12336-66
	18,701 99,995	425,805 95,47	70,451 98,67	4,772 97,59	Приближенный расчет
114,5×5 (125×5)	22,9 100	536 100	85,7 100	4,83 100	ГОСТ 12336-66
	22,90 100,0	500,40 93,36	83,749 97,72	4,675 96,79	Приближенный расчет
112,5×6 (125×6)	27,0 100	616 100	98,6 100	4,78 100	ГОСТ 12336-66
	27,0 100,0	569,560 92,46	96,128 97,49	4,593 96,08	Приближенный расчет
132,14×6,3 (140×6,3)	33,3 100	984 100	141 100	5,44 100	EN 10219:1997, DIN 2395
	33,299 99,997	969,112 98,49	140,00 5 99,29	5,395 99,17	Приближенный расчет
151,98×6,3 (160×6,3)	38,3 100	1500 100	187 100	6,26 100	EN 10219:1997, DIN 2395
	38,299 99,997	1474,45 1 98,30	186,30 9 99,63	6,205 99,12	Приближенный расчет

Возвращаясь к предлагаемому решению несущей конструкции с решеткой из ромбической трубы (рис. 2), следует заметить, что оно достаточно универсально для применения как в беспрогонных конструкциях покрытий зданий и сооружений, так и в обычных кровельных ограждениях с прогонами. Для покрытий с прогонами предлагаемое решение можно модернизировать таким образом, чтобы вся конструкция (ферма) была выполнена из ромбических профилей с отношением диагоналей поперечных сечений 1/2. При этом у всех сжатых стержней большая диагональ расположена в плоскости конструкции, меньшая диагональ – из плоскости, а у всех растянутых стержней меньшая диагональ расположена в плоскости конструкции, а большая – из плоскости, причем верхний и нижний пояса в местах бесфасоночных примыканий решетки сплющены (рис. 4) [40].

Таблиця 2

Сортамент квадратних труб по ТУ 36-2287-80 и рабочая версия сортамента ромбических труб

Характеристики квадратной трубы для осей х и y				Характеристики ромбической трубы для осей х и y															
Размеры профиля, мм	t	R	C _к	C _к	C _к	C _к	C _к	C _к	C _к	C _к	C _к	Моменты инерции, см ⁴		Моменты сопротивления, см ³		Радиусы инерции, см			
												I _{кx} =I _{кy}	I _{кz}	I _{кx}	I _{кy}	I _{кx}	I _{кy}	I _{кx}	I _{кy}
B=H	r	t	α	β	γ	δ	ε	ζ	η	θ	ι	κ	λ	μ	ν	ξ	ο	π	
80	6	3	9,24	91,4	182,8	100%	22,8	3,14	68,9	137,7	0,5004	146,1	36,5	182,6	21,2	10,6	3,98	1,99	2,0
				100%	100%			100%				159,8%		99,89%			126,8%		
100	6	3	11,64	182,7	365,4	100%	35,41	3,96	86,8	173,4	0,5006	292,1	73,0	365,1	33,7	16,8	5,01	2,51	1,996
				100%	100%			100%				159,9%		99,92%			126,5%		
100	8	4	15,36	236,3	472,6	100%	47,2	3,92	85,9	171,6	0,5006	377,5	94,4	471,9	44,0	22,0	4,95	2,48	1,996
				100%	100%			100%				159,8%		99,85%			126,3%		
100	10	5	19,0	286,5	573,0	100%	57,3	3,89	85,0	169,9	0,5003	457,3	114,3	571,6	53,8	26,9	4,91	2,45	2,004
				100%	100%			100%				159,6%		99,76%			126,2%		
120	6	3	14,04	320,5	641,0	100%	53,4	4,77	104,6	209,2	0,50	512,5	128,2	640,7	49,0	24,5	6,04	3,02	2,0
				100%	100%			100%				159,9%		99,95%			126,6%		
120	8	4	18,56	416,7	833,4	100%	69,4	4,74	103,8	207,4	0,5005	666,0	166,5	832,5	64,2	32,1	5,99	3,0	1,997
				100%	100%			100%				159,8%		99,89%			126,4%		
120	10	5	23,0	507,9	1015,8	100%	84,6	4,69	102,9	205,6	0,5005	811,2	202,8	1014,0	78,9	39,4	5,94	2,97	2,0
				100%	100%			100%				159,7%		99,82%			126,7%		
120	12	6	27,36	594,2	1188,4	100%	99,0	4,66	102,0	203,8	0,5005	948,2	237,1	1185,3	93,0	46,5	5,89	2,94	2,003
				100%	100%			100%				159,6%		99,74%			126,4%		
140	8	4	21,76	671,3	1342,6	100%	95,9	5,55	121,6	243,2	0,50	1073,3	268,4	1341,7	88,2	44,1	7,02	3,51	2,0
				100%	100%			100%				159,7%		99,93%			126,5%		
140	10	5	27,0	821,2	1642,4	100%	117,3	5,51	120,8	241,4	0,5010	1312,3	328,1	1640,4	108,7	54,4	6,97	3,49	1,997
				100%	100%			100%				159,8%		99,88%			126,5%		
140	12	6	32,16	964,3	1928,6	100%	143,7	5,48	119,9	239,6	0,5004	1540,0	385,0	1925,0	128,5	64,3	6,92	3,46	2,0
				100%	100%			100%				159,7%		99,81%			126,3%		
140	14	7	37,20	1100,9	2201,8	100%	165,1	5,43	119,0	237,8	0,5004	1756,7	439,2	2195,9	147,7	73,9	6,87	3,44	1,997
				100%	100%			100%				159,6%		99,73%			126,5%		
140	18	8	42,24	1231,1	2462,2	100%	175,8	5,39	118,1	236,0	0,5004	1962,7	490,7	2453,4	166,2	83,1	6,82	3,41	2,0
				100%	100%			100%				159,4%		99,64%			126,5%		
160	10	5	31,0	1242,5	2485,0	100%	155,3	6,33	138,6	277,2	0,50	1986,1	496,6	2482,7	143,3	71,7	8,0	4,0	2,0
				100%	100%			100%				159,8%		99,91%			126,4%		
160	12	6	36,96	1463,1	2926,2	100%	182,8	6,29	137,7	275,4	0,50	2337,5	584,4	2971,9	169,7	84,9	7,95	3,98	1,997
				100%	100%			100%				159,8%		99,85%			126,4%		
160	14	7	42,84	1674,9	3349,8	100%	209,3	6,25	136,9	273,6	0,5004	2674,3	668,7	3343,0	195,4	97,7	7,90	3,95	2,0
				100%	100%			100%				159,7%		99,80%			126,4%		
160	16	8	46,44	1878,1	3756,2	100%	234,7	6,21	136,0	271,8	0,5004	2996,8	749,3	3746,1	220,4	110,2	7,85	3,93	1,997
				100%	100%			100%				159,6%		99,73%			126,4%		

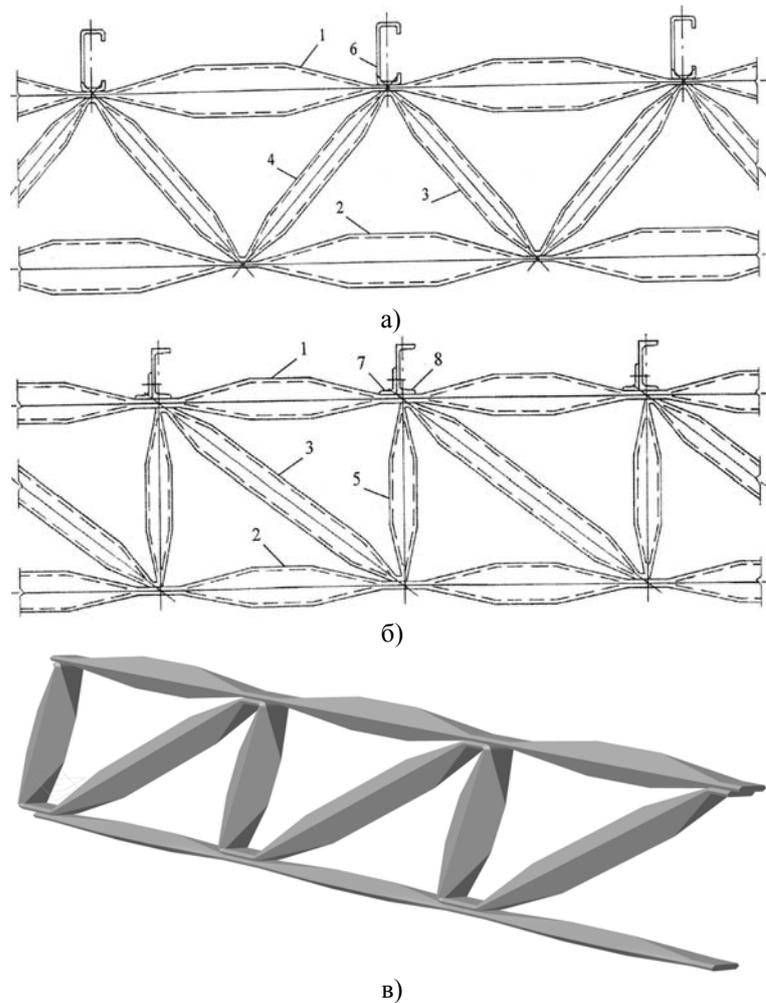


Рис. 4. Схемы фрагментов ферм прогонных покрытий:
а – при треугольной системе решетки; б – при раскосной системе решетки; в – аксонометрия; 1 – верхний пояс; 2 – нижний пояс; 3 – растянутый раскос; 4 – сжатый раскос; 5 – стойка; 6 – прогон из гнутого профиля; 7 – уголкового коротыш; 8 – прогон из прокатного профиля

Формирование переходной и сплюсненной частей стержневых элементов трубчатого сечения поясов и решетки между ними рекомендуется производить с обеспечением уклона переходного участка $1/6 \dots 1/4$ [5, с. 102; 41]. По линиям двойных гибов образуются листовые шарниры, расстояние между которыми можно подобрать из условия абсолютной

центровки бесфасоночных узлов фермы, как с треугольной решеткой, так и раскосной (рис. 5). Между этими шарнирами сплюснутый участок ромбического профиля решетки подкрепляет такой же участок ромбического профиля поясного элемента, одновременно обеспечивая необходимое и достаточное размещение сварных швов. Последние должны рассчитываться лишь на разность усилий в примыкающих раскосах треугольной решетки или раскосе и стойке раскосной, а свариваться они могут в самом удобном (нижнем) положении. В собранной и сваренной конструкции (ферме) оптимальный угол наклона раскосов треугольной системы решетки составляет $45^\circ \dots 50^\circ$, раскосной системы решетки – $30^\circ \dots 35^\circ$.

Кроме того, следует заметить, что листовые шарниры в рассматриваемых бесфасоночных узловых соединениях обеспечивают приближение решетчатых конструкций к их расчетным схемам (моделям) в виде шарнирно-стержневых систем [42], что повышает степень надежности и конструкционной безопасности зданий и сооружений.

Для сравнения предлагаемых (новых) технических решений с известным в качестве базового объекта принят вариант стальной фермы покрытия промышленного здания пролетом 18 м из ГСП прямоугольного (квадратного) сечения [43]. По результатам такого сравнения, приведенного в таблице 3, видно, что в новых решениях расход конструкционного материала уменьшается на 3,3...11,2 %.

Таким образом, предлагаемые технические решения позволяют в зависимости от проектных решений определенным подбором отношения диагоналей сечения ромбических труб, а также расположением этих диагоналей в осевой плоскости конструкции (фермы) или из плоскости с учетом знака продольных усилий в стержневых элементах (растяжения или сжатия) регулировать напряженно-деформированное состояние конструкции. При этом появляется возможность в качестве исходных заготовок для ромбических профилей применить соответствующие им по калибру квадратные трубы, что может привести к дополнительному положительному эффекту. В стержневых элементах решетки знаки усилий чередуются, поэтому после сплющивания квадратных заготовок их целесообразно прессовать в той же последовательности с необходимым расположением большей и меньшей диагоналей сечения в плоскости или из плоскости конструкции. Подобное регулирование не ограничивается приведенными значениями $1/2$ ($n=0,5$) и $1/1$ ($n=1$), но имеет весьма широкий диапазон (рис. 6) и в общем случае может обеспечить эффективность дальнейшей оптимизации несущих конструкций зданий и сооружений.

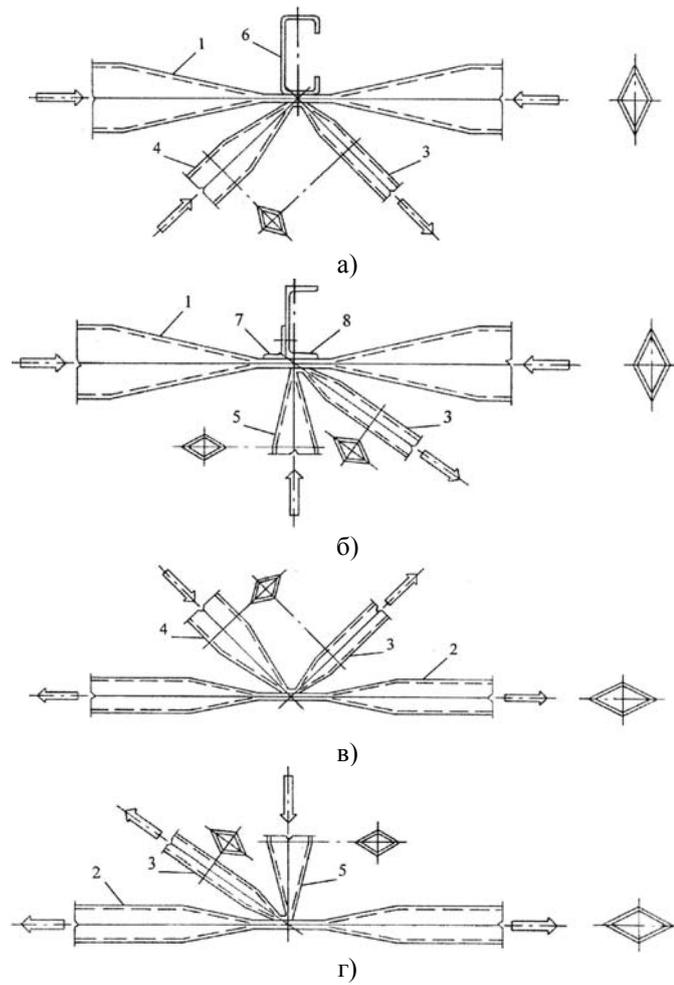


Рис. 5. Схемы узлов ферм прогонных покрытий:
а – узел верхнего пояса фермы с треугольной решеткой; б – узел нижнего
пояса фермы с треугольной решеткой; в – узел верхнего пояса фермы с
раскосной решеткой; г – узел нижнего пояса фермы с раскосной решеткой;
1 – верхний пояс; 2 – нижний пояс; 3 – растянутый раскос; 4 – сжатый раскос;
5 – стойка; 6 – прогон из гнутого профиля; 7 – уголкового коротыш;
8 – прогон из прокатного профиля

Таблиця 3

Сечение, мм	Длина, мм*	Кол-во, шт.	Масса, кг				Примеч.
			1 м	1 шт.	всех	итого	
□160×120×5	9000	2	20,7	186,3	372,6	880,4 (100 %)	Пояса
□120×4	7500	2	14,3	107,3	214,6		Решетка
□100×4	2390	8	11,8	28,2	225,6		
□80×3	2390	4	7,07	16,9	67,6		
□160×120×5	9000	2	20,7	186,3	372,6	851,7 (96,7%)	Пояса
□120×4	7500	2	14,3	107,3	214,6		Решетка
∅80×4	2390	12	9,22	22,04	264,5		
∅140×4	9000	2	16,8	151,2	302,4	781,5 (88,8 %)	Пояса
∅120×4	7500	2	14,3	107,3	214,6		Решетка
∅80×4	2390	12	9,22	22,04	264,5		

*Размеры приведены в осях без учета детализовки

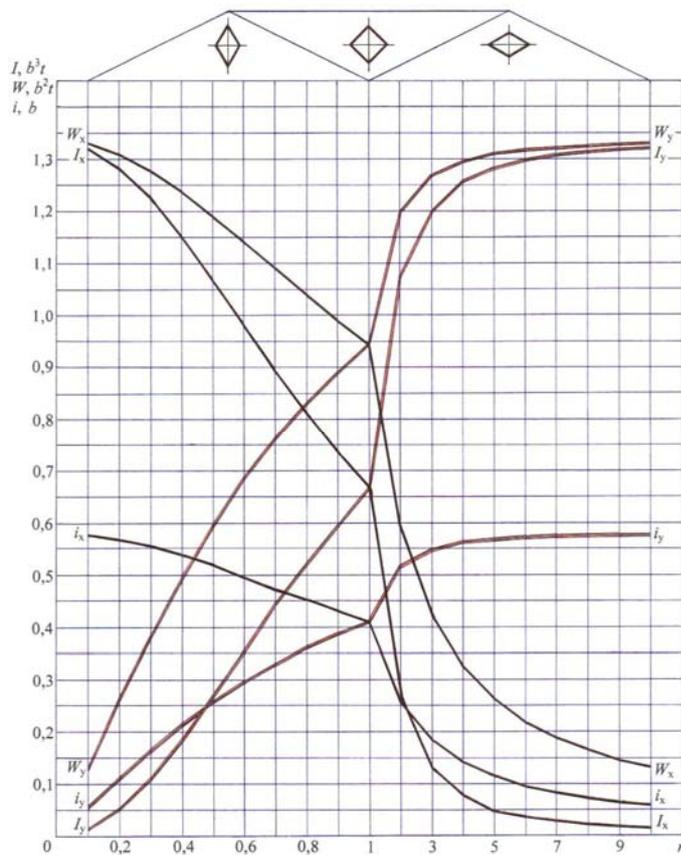


Рис. 6. Графики изменения статических характеристик сечения ромбических труб

Актуальность и перспективность описываемых разработок подтверждается тем фактом, что 12 августа 2014 г. введены в действие новые типовые конструкции из ГСП квадратного (прямоугольного) сечения [44], а дата введения нового ГОСТ на такие профили [45] с 1 октября 2014 г. перенесена на 1 января 2016 г.

Выводы

Выполненные проработки двух новых технических решений несущих конструкций (ферм) из квадратных (прямоугольных) и ромбических труб, а также расчетные выкладки ромбических, в том числе, квадратных сечений позволяют сделать ряд выводов.

1. Для поддержания и увеличения конкурентоспособности несущих конструкций из квадратных (прямоугольных) труб, включая модули из перекрестных ферм типа «Пятигорск», целесообразна их модернизация с использованием профильных труб ромбического сечения, а также их бесфасоночных примыканий в соединительных узлах за счет сплющиваний и двойных гибов.
2. Приближенный расчет ромбических, в том числе, квадратных сечений подтвердил его корректность и простоту для практического решения задач по оптимизации несущих конструкций.
3. Подбор оптимальных параметров труб ромбических сечений и их применение в несущих конструкциях взамен квадратных профилей обеспечивает увеличение жесткости (или уменьшение гибкости) стержневых элементов решеток и поясов.
4. Сравнение на одном и том же базовом объекте предлагаемых (новых) технических решений с известным выявило уменьшение расхода конструкционного материала (стали), что обеспечивает поддержание и увеличение конкурентоспособности несущих конструкций.

Литература

- [1] Мельников Н. П. Холодногнутые замкнутые сварные профили – высокоэффективный материал для легких конструкций / Н. П. Мельников, О. Н. Винклер, И. В. Левитанский // Промышленное строительство. – 1973. №6. – С. 24-27.
- [2] Тришевский И. С. Металлические облегченные конструкции / И. С. Тришевский, В. В. Клепанда. – Киев: Будівельник, 1978. – 112 с.
- [3] Кузьменко С. М. Рациональные принципы разработки типовых серийных строительных конструкций на примере проектирования беспрогонного покрытия «Молодечно» / С. М. Кузьменко // Промышленное строительство. – 1984. – № 12. – С. 34–37.

- [4] Ведяков И. И. Современные тенденции развития российской индустрии строительных металлических конструкций / И. И. Ведяков // Промышленное и гражданское строительство. – 2007. – № 3. – С. 8–9.
- [5] Packer J. A. Construction with hollow steel sections. Design Guide for rectangular hollow section (RHS) joints under predominantly static loading / [Packer J. A., Wardenier J., Zhao X.-L., G. J. van der Vegte and Kurobane Y.]. – CIDECT, 2009. – 156 p.
- [6] Ферменные конструкции системы ТрассконTM / Обнинск : ООО «Руукки Рус», 2009. – 88 с.
- [7] Стальные конструкции. Актуализированная редакция СНиП II-23-81* : СП 16.13330.2011 / Минрегион России. – М. : ОАО «ЦПП», 2011. – С. 159–161. – (Свод правил по проектированию и строительству)
- [8] Specification for Structural Steel Buildings / American Institute of Steel Construction. – June 22, 2010 – P. 425–436.
- [9] Heinisuo M. Tubular truss design using steel grades S355 and S420 [Электронный ресурс] / Markku Heinisuo, Teemu Tiainen, Timo Jokinen (2013) – 35 p. – Режим доступа: <https://cloud.mail.ru/public/6j76/c5P8kRVsy>. – Название с экрана. – (Дата обращения 12.10.2015).
- [10] Corona E. Buckling of elastic-plastic square tubes under bending / E. Corona, S.P. Vaze // International Journal of Mechanical Sciences. – 1996. – V. 38. № 7. – P. 753–775.
- [11] Reyes A. Square aluminum tubes subjected to oblique LOADING / A. Reyes, M. Langseth, O. S. Hopperstad // International Journal of Impact Engineering. – 2003. –V. 28, № 10. – P. 1077–1106.
- [12] Karagiozova D. Dynamic buckling of elastic-plastic square tubes under axial impact-II: structural response / D. Karagiozova, N. Jones // International Journal of Impact Engineering. – 2004. – V. 30, № 2. – P. 167–192.
- [13] Zhao H. On the strength enhancement under impact loading of square tubes made from rate insensitive metals / H. Zhao, S. Abdennadher // International Journal of Solids and Structures. – 2004. – V. 41, № 24–25. – P. 6677–6697.
- [14] Utsumi N. Countermeasures against undesirable phenomena in the draw-bending process for extruded square tubes / N. Utsumi, S. Sakaki // Journal of Materials Processing Technology. – 2002. – V. 123, №2. – P. 264–269.

- [15] El-Hage H. A numerical study on the quasi-static axial crush characteristics of square aluminum-composite hybrid tubes / H. El-Hage, P. K. Mallick, N. Zamani // *Composite Structures*. – 2006. – V. 73, № 4. – P. 505–514.
- [16] Liu Y.-B. A simplified approach to define the yield surface of concrete-filled square steel tubes subjected to compression-bending / [Liu Y.-B., Zheng N.-N., Liu J.-B., Han Q.] // *Chongqing Daxue Xuebao*. – 2010. – V. 33, № 10. – P. 70–75+93.
- [17] Кользеев А. А. Оценка влияния толщины полок на устойчивость внецентренно-сжатых стержней из прямоугольных труб / А. А. Кользеев // *Известия вузов. Строительство*. – 2005. – № 6. – С. 85–88.
- [18] Псюк В. В. Распределение остаточных напряжений в стальных трубах квадратного сечения / В. В. Псюк, И. А. Никишина // *Збірник наукових праць Українського інституту сталевих конструкцій ім. В. М. Шимановського*. – 2014. – Вип. 14. – С. 129–135.
- [19] Марутян А. С. Легкие металлоконструкции из перекрестных систем, включая модули типа «Пятигорск» / А. С. Марутян // *Збірник наукових праць Українського інституту сталевих конструкцій ім. В. М. Шимановського*. – 2013. – Вип. 11. – С. 34–45.
- [20] Марутян А. С. Проектирование легких металлоконструкций из перекрестных систем, включая модули типа «Пятигорск» / А. С. Марутян. – Пятигорск : СКФУ, 2013. – 436 с.
- [21] Пат. 2329361 Российская Федерация, МПК E04C3/08. Узловое бесфасоночное соединение трубчатых элементов фермы (варианты) / В. А. Зинькова, А. А. Соколов. – № 2006140596; заявл. 16.11.2006; опубл. 20.07.2008, Бюл. № 20. – 8 с.: ил.
- [22] Соколов А. А. Численные исследования напряженно-деформированного состояния узловых бесфасоночных соединений трубчатых элементов ферм / А. А. Соколов, К. И. Логачев, В. А. Зинькова // *Промышленное и гражданское строительство*. – 2007. – № 8. – С. 40–41.
- [23] Ono T. Local failure of joints of new truss system using rectangular hollow sections subjected to out-of-plane bending moment / T. Ono, M. Iwata, K. Ishida // *Proceedings of VI International Symposium on Tubular Structures (Melbourne, Australia; Rotterdam, the Netherlands)*. – 1994. – P. 441–448.
- [24] Davies G. The effect of purlin loads on the capacity of overlapped bird-beak K-joints / G. Davies, J. S. Owen, R. B. Kelly // *Proceedings of IX International Symposium on Tubular Structures (Dusseldorf, Germany)*. – 2001. – P. 229–238.

- [25] Пат. 116877 Российская Федерация, МПК E04C3/08. Ферма из квадратных труб / А. Ф. Кузнецов, В. А. Кузнецов. – № 2011150569; заявл. 12.12.2011; опубл. 10.06.2012, Бюл. № 16. – 1 с. : ил.
- [26] Кузнецов А. Ф. Стальные решетчатые бесфасоночные прогоны для покрытий зданий из пятигранных и квадратных труб / А. Ф. Кузнецов, В. А. Кузнецов // Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия: Строительство и архитектура. – 2012. № 38(297). – С. 9–13.
- [27] Байков Д.А. Численные исследования действительной работы фермы из квадратных труб, соединенных в узлах на ребро / Д. А. Байков, А. И. Колесов, Д. С. Маслов // Приволжский научный журнал. – 2012. – № 4. – С. 36–40.
- [28] А.с. 1760041 СССР, МКИ E04B1/58, E04C3/08. Строительная металлическая тонкостенная решетчатая конструкция / В. М. Орлик. – № 4776531; заявл. 03.01.1990 ; опубл. 07.09.1992, Бюл. № 33. – 4 с. : ил.
- [29] Подлипский А. А. Стальные прутковые конструкции покрытий / А. А. Подлипский. – М. : Государственное издательство литературы по строительству и архитектуре, 1954. – 148 с.
- [30] Пат. 2500863 Российская Федерация, МПК E04C3/08. Металлическая конструкция с решеткой из ромбических замкнутых гнутосварных профилей / А. С. Марутян, С. И. Эмба. – № 2012115185; заявл. 16.04.2012; опубл. 10.12.2013, Бюл. №34. – 13 с. : ил.
- [31] Металлические конструкции : справочник проектировщика : в 3 т. / [Под ред. В. В. Кузнецова]; ЦНИИпроектстальконструкция им. Н.П. Мельникова. – М. : Изд-во АСВ, 1998. – Т. 2. Стальные конструкции зданий и сооружений. — С. 235–236.
- [32] Сальников Г. П. Краткий справочник машиностроителя / Г. П. Сальников. – Киев : Государственное издательство технической литературы УССР, 1963. – С. 106.
- [33] Трубы стальные профильные для металлоконструкций. Технические условия : ГОСТ Р 54157-2010. – Офиц. изд. – М. : Стандартинформ, 2010. – С. 14–23. – (Национальный стандарт Российской Федерации).
- [34] Дехтярь А. С. К проектированию призматических оболочек / А. С. Дехтярь // Строительная механика и расчет сооружений. – 2008. – № 6. – С. 7–9.

- [35] Гарднер Л. Руководство для проектировщиков к Еврокоду 3: Проектирование стальных конструкций EN 1993-1-1, 1993-1-3, EN 1993-1-8 / Л. Гарднер, Д. А. Нетеркот; пер. с англ.; ред. серии Х. Гульванесян; М-во образования и науки Росс. Федерации; ФГБОУ ВПО «Моск. гос. строит, ун-т»; науч. ред. пер. А. И. Данилов. – Москва: МГСУ, 2012. – 224 с. (Серия «Издано в МГСУ: Еврокоды»; науч. ред. серии В. О. Алмазов). – С. 186–188.
- [36] Сидоров А. В. Определение геометрической жесткости кручения тонкостенной трубы прямоугольного сечения методом интерполяции по коэффициенту формы / А. В. Сидоров // Строительство и реконструкция. – 2014. – № 2(52). – С. 36–39.
- [37] Грудев И. Д. Местная устойчивость трубы прямоугольного сечения при изгибе / И. Д. Грудев // Academia. Архитектура и строительство. – 2015. – № 1. – С. 103–107.
- [38] Стальные конструкции покрытий производственных зданий пролетами 18, 24 и 30 м с применением замкнутых гнутосварных профилей прямоугольного сечения типа «Молодечно»: типовой проект: серия 1.460.3-14 / разработ. ГПИ Ленпроектстальконструкция. – Госстрой СССР, 1980. – 135 с.: черт. КМ.
- [39] Стальные конструкции покрытий производственных зданий из замкнутых гнутосварных профилей прямоугольного сечения пролетом 18, 24 и 30 м с уклоном кровли 10%: типовой проект: серия 1.460.3-23.98. Выпуск I / разработ. ОАО ПИ Ленпроектстальконструкция. – Госстрой РФ, 2000. – 78 с.: черт. КМ.
- [40] Пат. 2548301 Российская Федерация, МПК E04B1/58, E04C3/08. Ферма из ромбических труб (гнутосварных профилей) / А. С. Марутян. – № 2013149437; заявл. 06.11.2013; опубл. 20.04.2015, Бюл. №11. – 11 с.: ил.
- [41] Трофимов В. И. Легкие металлические конструкции зданий и сооружений / В. И. Трофимов, А. М. Каминский. – М.: Изд-во АСВ, 2002. – С. 152.
- [42] Покровский А. А. Об учете жесткостей узлов в расчетах ферм с элементами малой гибкости / А. А. Покровский // Строительная механика и расчет сооружений. – 2011. – № 3. – С. 31–32.
- [43] Кузин Н. Я. Проектирование и расчет стальных ферм покрытий промышленных зданий / Н. Я. Кузин. – М.: Изд-во АСВ, 1998. – С. 157–172.

- [44] Стальные конструкции покрытий для отапливаемых одноэтажных торговых зданий. Конструкции ферм из гнутосварных профилей квадратного (прямоугольного) сечения пролетами 18 и 24 м : типовой проект : серия 1.263.3-6с.14. Выпуск I / разработ. ЗАО «Проектный институт Ленпроектстальконструкция». – ЗАО «Тандер» (Краснодар), 2014. – 113 с.: черт. КМ.
- [45] Профили стальные гнутые замкнутые сварные квадратные и прямоугольные для строительных конструкций. Технические условия : ГОСТ 30245-2012. – Офиц. изд. – М. : Стандартимформ, 2014. – 42 с. – (Национальный стандарт Российской Федерации).

Надійшла до редколегії 29.05.2015 р.