

УДК 624.012.45

БАЙШЕВ А. Ю.
БАЙШЕВ Ю. П.
ГОЛУБЕВА Е. А.
ГОДЗЕВИЧ Э. В.
ПЛОХИХ В. И.



**Байшев
Андрей
Юрьевич**

инженер
ООО «Компания «ТОЗИС»
e-mail: tozis@yandex.ru



**Байшев
Юрий
Петрович**

доктор технических наук,
профессор кафедры Кон-
струкций зданий и соору-
жений ФГБОУ ВО УралГАХУ
e-mail: tozis@yandex.ru



**Голубева
Екатерина
Александровна**

кандидат архитектуры,
профессор, заведующий
кафедрой Конструкций
зданий и сооружений
ФГБОУ ВО УралГАХУ
e-mail: golubeva@usaaa.ru

Рациональные конструктивные решения стальных элементов большепролетных зданий

Для базового варианта фермы из одиночных прокатных уголков определены показатели снижения расхода стали, трудоемкости и стоимости изготовления по сравнению с известными из технической литературы вариантами. Разработано конструктивное решение стропильной фермы из одиночных прокатных уголков, центрированных в плоскости фермы; варианты конструкции стропильной большепролетной фермы с различными профилями стержней решетки, поясами из одиночных уголков с подкреплениями в виде срединного тяжа и промежуточных стоек верхнего пояса; фермы с поясами из прокатных двутавров с подкреплением сжатых стержней решетки в узлах у нижнего пояса фермы.

Ключевые слова: стержни фермы из одиночных центрированных уголков, внеузловые подкрепления в плоскости наименьшей жесткости, гибкость, устойчивость, узловые подкрепления поясов из двутавров, подкрепления сжатых стержней связями с нижним поясом, беспрогонное опирание, профилированный стальной лист.

BAYSHEV A.Y., BAYSHEV Y.P., GOLUBEVA E.A., GODZEVICH E.V., PLOHIIH V.I.
RATIONAL CONSTRUCTIVE SOLUTIONS OF STEEL ELEMENTS OF LARGE-SPAN BUILDINGS

For the basic variant of the farm, from single rolling corners, the values of the reduction in steel consumption, labor intensity and production cost are determined in comparison with the known variants of the technical literature. A structural solution of the truss saw is developed from single rolling corners centered in the plane of the truss. The variants of the construction of a rafter of a large span with various profiles of lattice rods, belts from single corners with reinforcements in the form of a middle strand and intermediate racks of the upper belt are developed. The indicators of reduction of steel consumption, labor intensity and farm cost are determined in comparison with comparable variants. A version of the farm with belts from rolled I-bars with reinforcement of compressed lattice rods at the nodes at the lower belt of the farm was developed.

Keywords: rods of a farm of single centered corners, out-of-site reinforcements in the plane of the least rigidity, flexibility, stability, nodal reinforcements of I-beam belts, reinforcement of compressed rods with ties to the lower belt, run-away support, profiled steel sheet.



**Годзевич
Эльза
Владимировна**

доцент, профессор
кафедры Конструкций
зданий и сооружений
ФГБОУ ВО УралГАХУ
e-mail:
elza.godzevich@mail.ru



**Плохих
Вячеслав
Игнатьевич**

доцент кафедры
Конструкций зданий
и сооружений
ФГБОУ ВО УралГАХУ

Введение

Одной из основных задач проектировщиков при конструировании зданий с металлоконструкциями, помимо обеспечения общей устойчивости здания и его элементов, является снижение материалоемкости, трудоемкости изготовления и, как следствие, стоимости затрат.

Эффективными и наиболее удовлетворяющими архитектурно-строительным требованиям по прочности, устойчивости и архитектурно-конструктивной выразительности при проектировании большепролетных зданий становятся ферменные металлоконструкции [1, 2]. Основным элементом покрытий большепролетных зданий является стальная стропильная ферма, очертание которой определяется главным образом архитектурно-планировочным решением здания и непременно увязывается с материалом кровли [3, 5].

В практике проектирования металлоконструкций покрытий большепролетных зданий широкое применение нашли фермы из замкнутых профилей (гнуто-сварных, трубчатых) и открытых профилей (из парных уголков, одиночных уголков, тавров и двутавров) [6]. Однако изготовление тавровых профилей из прокатных двутавров требует дополнительных затрат на резку и правку, а применение ферм из одиночных уголков требует введения в расчет коэффициента условия работы γ_c , равного 0,75.

Традиционные фермы отличаются значительным расходом металла на фасонки и прокладки, увеличенной трудоемкостью изготовления, неудобством окраски стержней при эксплуатации (защита металлоконструкций от коррозии) [6]. В специальных источниках [1–7] рассмотрены конструкции ферм с креплением одиночных уголков полками в узлах внахлестку, что не обеспечивает центрирование уголков в узлах. Другим недостатком решений раскосных решеток традиционных ферм является значительная неравноустойчивость стержней относительно их осей. Повышение устойчивости стержней в перекрестных решетках увеличивает количество элементов ферм с поясами из тавров, которые являются более дорогостоящими элементами по сравнению с прокатными уголками.

Сегодня доказано, что наиболее экономичными являются фермы с наименьшим собственным весом, меньшим расходом металла, с максимальной унификацией и типизацией элементов фермы, что является основанием для разработки новых и совершенствования существующих типов ферм, направленных на устранение конструктивных недостатков.

Создание рациональных конструктивных решений стальных большепролетных ферм, направленных на снижение трудоемкости изготовления, расхода стали и стоимости изготовления, становится актуальным.

Цель работы

На основе [1–7] с учетом повышения функциональной и конструктивной безопасности здания, огнестойкости и долговечности конструкций разработать рациональные конструктивные решения стальных ферм большепролетных зданий.

Методика исследования

Методика исследования основана на сравнительном анализе технико-экономических показателей по материалоемкости, трудоемкости и стоимости традиционных и облегченных стальных ферм. В работе рассматриваются стальные фермы большепролетных зданий с конструктивной ячейкой 24×6 м. При анализе в качестве эталонной фермы была выбрана ферма с параллельными поясами, решеткой из парных уголков пролетом 24 м и шагом 6 м.

Основная часть

Эффективное конструирование большепролетных ферм включает следующие условия:

- определение соотношения между стоимостями профилей и выбор профиля с наименьшей стоимостью для стержней решетки фермы;
- центрирование стержней из равнополочных одиночных прокатных уголков путем совмещения их осей $E_0 - E_0$ (биссектрис) со срединной плоскостью фермы;
- сокращение количества элементов решетки фермы.

Данные условия обеспечивают соблюдение требований, предъявляемых ко всем видам металлических конструкций, в соответствии с нормативными документами [4].

Фермы из одиночных уголков по сравнению с фермами из парных уголков имеют следующие преимущества: меньшее количество элементов и фасонки, сокращение трудоемкости изготовления на 30–40% и расхода стали на 5–7%, повышенная коррозионная стойкость открытых сечений элементов (Таблица 1).

По сравнению с традиционными покрытиями, включающими установленные с шагом 6 и 12 м фермы из парных уголков и беспрогонные покрытия с пролетом 24–30 м из одиночных центрированных уголков, ферма оказалась на 4–17% менее металлоемкой, на 17–25% более дешевой (по приведенным затратам) и на 20–38% менее трудоемкой.

Экономическая эффективность открытых профилей обусловлена высокой стоимостью замкнутых профилей. Соотношения между стоимостями круглых труб (цельнотянутых и сварных), прямоугольных гнуто-сварных профилей, профилей из двух прокатных уголков или швеллеров соответственно равны: (153...136): (150...132): (120...115) % (за 100% принята стоимость профилей из парных прокатных уголков).

Таблица 1. Техничко-экономические показатели ферм

Тип ферм	Расход стали, кг/%	Трудоемкость изготовления, %	Стоимость, %
1. Ферма из парных уголков	2093/100	100	100
2. Ферма из одиночных уголков	2009/96	70	80
3. Ферма из одиночных уголков с срединным тяжем и межузловыми подкреплениями	1794/86	75	75
4. Ферма из гнуто-сварных профилей	1735/83	60	120

Примечания:

1. Трудоемкость и стоимость ферм даны в % по сравнению с показателями первого варианта, принятыми за 100%.
2. Расход стали по вариантам определен для схемы фермы, приведенной на Иллюстрации 3.

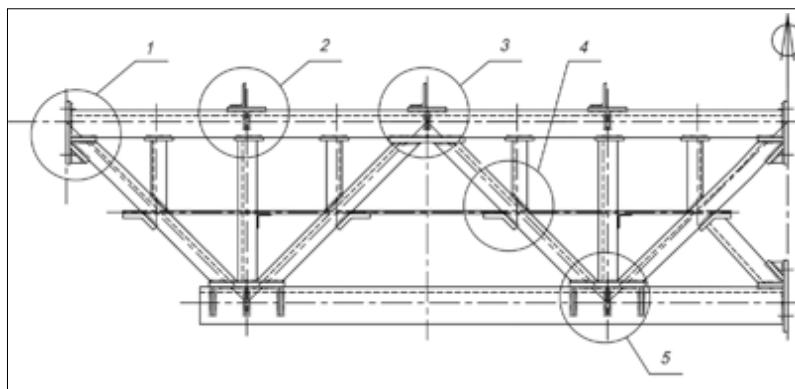


Иллюстрация 1. Ферма из одиночных центрированных уголков с межузловыми подкреплениями: 1, 2...5 — номера узлов

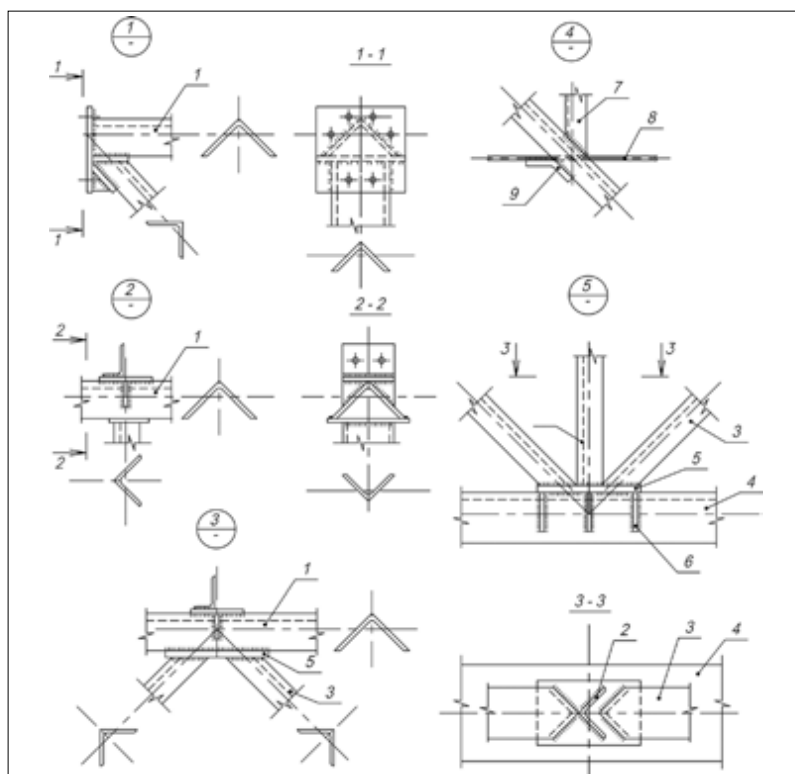


Иллюстрация 2. Узлы и детали фермы из одиночных центрированных уголков: 1 — верхний пояс; 2 — стойка; 3 — раскос; 4 — нижний пояс; 5 — лист; 6 — ребро; 7 — стойка (связь); 8 — тяж; 9 — уголок

Традиционные фермы с поясами и решеткой из одиночных уголков имеют соединения полков уголков в узлах внахлестку. Соединения выполняются угловыми швами, дуговой точечной сваркой со сквозным проплавлением или на высокопрочных болтах.

Одностороннее прикреплении уголков из плоскости фермы и расцентровка стержней в узлах в плоскости фермы приводят к возникновению в стержнях фермы изгибающих моментов. Влияние этих моментов на несущую способность сжатых уголков учитывается коэффициентом условий работы $\gamma_A = 0,75$ в следующих формулах.

Расчет на прочность:

$$N/A_n \cdot R_y \cdot \gamma_c \leq 1. \quad (1)$$

Расчет на устойчивость:

$$N/\varphi \cdot A \cdot R_y \cdot \gamma_c \leq 1, \quad (2)$$

где N — расчетная продольная сила; R_y — расчетное сопротивление прокатной стали по пределу текучести; A_n — площадь сечения нетто; A — площадь сечения брутто.

Из приведенных формул следует, что коэффициент условий работы $\gamma_c = 0,75$ увеличивает требуемую площадь сечения сжатого уголка на 33%. Эта величина выявляет резерв снижения расхода стали, в частности, за счет центрирования одиночных уголков в узлах фермы.

В предложенной облегченной ферме на Иллюстрации 1 центрирование элементов решетки в узлах выполнено на пластинах, приваренных к полкам уголка верхнего пояса 1 фланговыми швами (узел 1).

В нижних узлах фермы пластины приварены ребрами к обуху уголка нижнего пояса. Симметричное, относительно плоскости фермы, расположение наклонных полков уголков книзу уменьшает количество отложений пыли и конденсата. Стыковка в узлах уголков на пластины обеспечивает требуемую точность изготовления и центровки стержней фермы. Стыковые пластины объединяют полки уголков сварными швами, образуя замкнутые треугольные сечения в узлах фермы. Это повышает жесткость узлов и местную устойчивость полков уголков. Для повышения устойчивости верхнего пояса, сжатых раскосов и стоек (в плоскости фермы) в середине каждой панели установлены дополнительные стойки. Нижние концы и середины стоек и раскосов связаны сварными швами, тяжем и уголками.

Требуемая площадь (A) стержня сплошного сечения при центральном сжатии определяется по формуле (2), в которой:

φ — коэффициент устойчивости при центральном сжатии, значение которого при $\lambda \geq 0,4$ вычисляют по формуле

$$\varphi = 0,5 \left(\delta - \sqrt{\delta^2 - 39,48 \cdot \bar{\lambda}^2} \right) / \bar{\lambda}^2. \quad (3)$$

Параметр δ определяется из выражения:

$$\delta = 9,87 \left(1 - \alpha + \beta \cdot \bar{\lambda} \right) + \bar{\lambda}^2.$$

Здесь $\bar{\lambda}$ — условная гибкость стержня. (4)

Ориентация уголков относительно осей $E_0 - E_0$, $y_0 - y_0$ соответствует типу кривой устойчивости «в». Для этого типа $\alpha = 0,04$; $\beta = 0,09$.

Так как радиусы инерции i_{y0} равнополочных уголков в два раза меньше радиусов i_{y0} , то введение в решетку фермы дополнительных элементов уменьшает расчетные длины сжатых стержней также в два раза, т. е. стержни становятся равноустойчивыми.

Применение поясов из широкополочных двутавров вместо поясов из одиночных уголков, даже для легких стропильных ферм, упрощает конструкцию узлов ферм, позволяет опирать профилированный настил на верхние пояса ферм (при шаге ферм 4÷6 м). Это исключает применение прогонов по фермам, уменьшает строительный объем здания и площадь стенового ограждения.

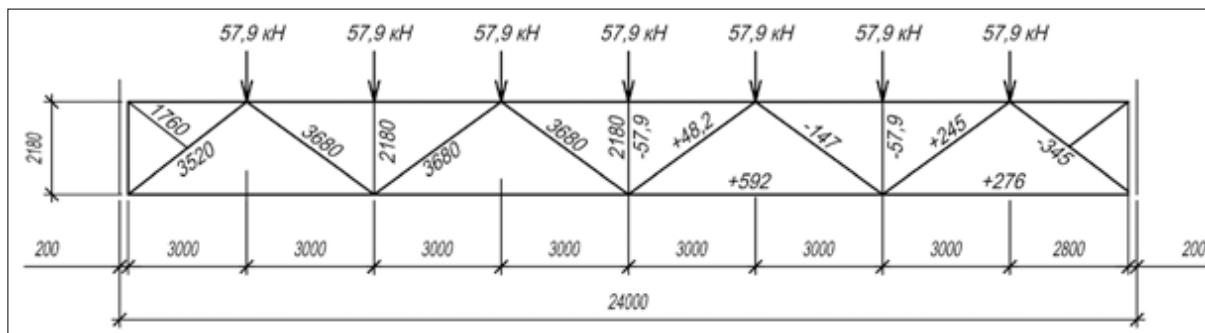


Иллюстрация 3. Схема эталонной фермы из парных уголков для сравнения вариантов ферм

Бесфасоночное крепление решетки из одиночных уголков к верхнему и нижнему поясу фермы из прокатных двутавров возможно при подкреплении сжатых раскосов и стоек в узлах нулевыми стержнями (Иллюстрация 4, 5), что снижает материалоемкость конструкции.

К нижнему поясу крепятся дополнительные связи сжатых одиночных уголков решетки, что повышает их устойчивость в плоскости минимальной жесткости.

Эффективность уменьшения расчетной длины уголка в плоскости фермы l_{ef} обусловлена выражением критической силы по Л. Эйлеру:

$$P_M = \frac{\pi^2 \cdot EJ}{l_{ef}^2}, \quad (5)$$

где J — момент инерции сечения брутто; E — модуль упругости.

Критическое напряжение:

$$\delta_{cr} = \frac{\pi^2 \cdot E}{\lambda^2}, \quad (6)$$

где λ — гибкость; $\lambda = l_{ef}/i$, где i — радиус инерции.

Здесь можно указать на резервы повышения устойчивости сжатых уголков за счет соединения их полок планками и соединения полок уголков с полкой растянутого пояса.

В качестве дополнительных узловых связей («нулевых» стержней) применены одиночные уголки с минимально допустимыми (нормами) размерами профиля. Наклонные планки повышают устойчивость поясов в изгибно-крутильной форме. Эти планки в верхнем поясе увеличивают его несущую способность на действие межузловой нагрузки. Использование прокатных двутавров при конструировании верхнего пояса фермы, воспринимающих сжимающие усилия и изгибающие моменты, позволяет сравнительно просто конструировать узлы примыкания элементов решетки из уголков, отказавшись от фасонки.

Для такой конструкции покрытия предлагается использовать стальные профилированные листы

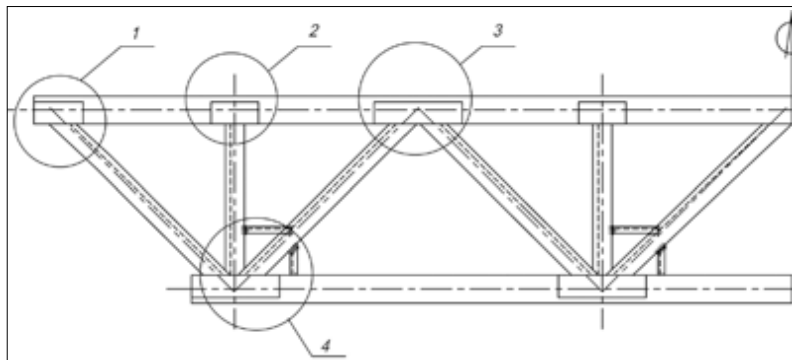


Иллюстрация 4. Ферма из широкополочных двутавров и решеткой из централированных одиночных уголков с узловыми подкреплениями сжатых раскосов и стоек «нулевыми» стержнями: 1, 2...4 — номера узлов

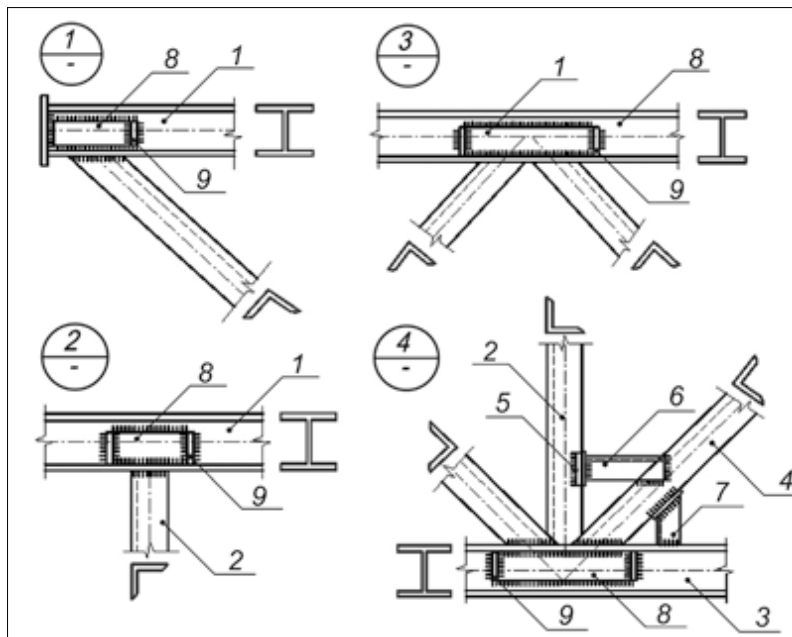


Иллюстрация 5. Узлы и детали фермы с поясами из двутавров: 1 — верхний пояс; 2 — стойка; 3 — нижний пояс; 4 — сжатый раскос; 5 — соединительная планка; 6, 7 — «нулевые» стержни; 8 — наклонная планка; 9 — заглушка

N114-750-0,8 по ГОСТ 24045-84 длиной 12 м, для шага ферм 6 м принята двухпролетная (2×6 м) расчетная схема листов.

При весе стропильной фермы 18,70 кН расход стали на ячейку 24×6 м сократился на 13,40 кН; количество монтажных элементов (прогонов) сократилось до 9 шт. Строительная высота покрытия (до низа

утеплителя кровли) и высота стенового ограждения уменьшились на 30 см.

Заключение

В результате исследования разработаны конструкции двух типов стальных ферм, отличающихся повышенной устойчивостью и экономической эффективностью: с решеткой из одиночных прокатных уголков,

центрированных в плоскости фермы; с поясами из широкополочных прокатных двутавров и решеткой из центрированных одиночных уголков.

Рассмотрены условия при выборе рациональной конструктивной схемы стропильной фермы с решеткой из одиночных центрированных уголков с бесфасоночным креплением в узлах, в том числе к поясам из двутавров.

По результатам анализа сделаны следующие выводы:

- 1 Центрирование одиночных уголков, межузловое подкрепление сжатых элементов фермы срединным тяжем и дополнительными стойками (связями) позволило сократить расход стали на 14% по сравнению с фермой из парных уголков.
- 2 Стоимость фермы из одиночных уголков с межузловыми подкреплениями по сравнению с фермой из гнуто-сварных профилей ниже на 45% при разнице в расходе стали 3%.
- 3 С целью упрощения узлов примыкания уголков решетки впритык к поясам разработана конструкция стропильной фермы с поясами из широкополочных двутавров и решеткой из центрированных одиночных уголков с бесфасоночным соединением стержней в узлах фермы.
- 4 Расход стали стропильной фермы с поясами из широкополочных прокатных двутавров и решеткой из центрированных одиночных уголков на планировочную ячейку 24 × 6 м сократился на 13,40 кН; количество монтажных элементов (прогонов) уменьшилось на 9 шт.; строительная высота проектирования до низа утеплителя кровли уменьшена на 30 см; высота стенового ограждения уменьшена на 30 см.

На основе предложенных конструктивных решений стропильных ферм в дальнейшем целесообразно:

- разработать компоновочное решение пространственного ферменного блока покрытия (включающего продольно-гнутые стальные профилированные листы, диафрагмы жесткости и связи из гнутых профилей);
- разработать методику расчета и технико-экономического обоснования эффективности конструкции такого пространственного блока покрытия.

Список использованной литературы

- 1 Руководство по проектированию сварных ферм из одиночных уголков/ЦНИИСК им. В. А. Кучеренко. М. : Стройиздат, 1977. 14 с.
- 2 Трофимов В. И., Каминский А. М. Легкие металлические конструкции зданий и сооружений. М. : АСВ, 2002. 576 с.
- 3 Бирюлев В. В., Кользеев А. А., Крылов И. И., Стороженко Л. И. Металлические конструкции: вопросы и ответы : учеб. пособие для студ. строит. спец. вузов / под общ. ред. В. В. Бирюлева. М. : АСВ, 1994. 335 с.
- 4 СП 53-102-2004 Общие правила проектирования стальных конструкций.
- 5 Металлические конструкции : в 3 т. : учебник для студ. вузов, обучающихся по спец. «Промышленное и гражданское строительство». Т. 1 : Элементы конструкций / В. В. Горев, Б. Ю. Уваров, В. В. Филиппов ; под ред. В. В. Горева. 3-е изд., стер. М. : Высш. школа, 2004. 551 с.
- 6 Металлические конструкции : в 3 т. Т. 1 : Общая часть. (Справочник проектировщика) / под общ. ред. засл. строителя РФ, лауреата Гос. премии СССР. В. В. Кузнецова (ЦНИИпроектстальконструкция им. Н. П. Мельникова). М. : АСВ, 1998. 576 с.

- 7 Плохих В. И., Байшев Ю. П. Фермы из одиночных центрированных уголков с межузловыми подкреплениями // Перспективные направления науки и техники. Строительство и архитектура : материалы междунар. науч.-практ. конф. 2009. № 9. С. 66–71.

Spisok ispol'zovannoj literatury

- 1 Rukovodstvo po projektirovaniyu svarnyh ferm iz odinochnyh ugolkov/CNIISK im. V. A. Kucherenko. M.: Strojizdat, 1977. 14 s.
- 2 Trofimov V. I., Kaminskij A. M. Legkie metallicheskie konstrukcii zdaniy i sooruzhenij. M.: ASV, 2002. 576 s.
- 3 Biryulev V. V., Kol'zeev A. A., Krylov I. I., Storozhenko L. I. Metallicheskie konstrukcii: voprosy i otvety: ucheb. posobie dlya studentov stroit.spec.vuzov/Pod obshch. red. V. V. Biryuleva. M.: ASV, 1994. 335 s.
- 4 SP 53-102-2004 Obshchie pravila projektirovaniya stal'nyh konstrukcij.
- 5 Metallicheskie konstrukcii: v 3-h tomah: ucheb. dlya stud. vuzov, obuchayushchihsya po spec. «Promyshlennoe i grazhdanskoe stroitel'stvo». T. 1: Ehlementy konstrukcij / V. V. Gorev, B. Yu. Uvarov, V. V. Filippov; pod red. V. V. Goreva. 3-e izd., ster. M.: Vysshaya shkola, 2004. 551 s.
- 6 Metallicheskie konstrukcii. V 3 t. T. 1. Obshchaya chast'. (Spravochnik projektirovshchika)/Pod obshch. red. zasluzh. stroitelya RF, laureata gosud. premii SSSR. V. V. Kuznecova (CNIIProektstal'konstrukciya im. N. P. Mel'nikova). M.: izd-vo ASV, 1998. 576 s.
- 7 Plohih V. I., Bajshev Yu. P. Fermy iz odinochnyh centrrovannyh ugolkov s mezhuzlovymi podkrep- leniyami // Perspektivnye napravleniya nauki i tekhniki. Stroitel'stvo i arhitektura: materialy mezhdunarodnoj nauchno-prakticheskoy konferencii. 2009. № 9. S. 66–71.