

СТРОИТЕЛЬСТВО И АРХИТЕКТУРА
BUILDING AND ARCHITECTURE

УДК 624.011

DOI:10.21822/2073-6185-2022-49-3-152-160

Оригинальная статья / Original Paper

Особенности работы балочных большепролетных конструкций

А.К. Юсупов, Х.М. Муселемов, Р.И. Вишталов

Дагестанский государственный технический университет,
367026 г. Махачкала, пр. И.Шамиля, 70, Россия

Резюме. Цель. В данной статье рассматриваются плоские большепролетные конструкции, приводятся особенности их работы, а также примеры конструирования. Даются формулы для определения генеральных размеров этих конструкций. Показаны особенности работы и конструирования, а также расчётные формулы. Приведены отправочные марки, виды сечений и узлы сопряжения элементов. **Метод.** Излагается методика, позволяющая уменьшить пролётные изгибающие моменты. Приводятся примеры рационального конструирования балочных ферм. **Результат.** Приведенные конструктивные схемы, а также анализ их работы позволяют проектировать большепролётные плоские конструкции, надёжные, легкие, технологичные по изготовлению, транспортировке и монтажу. Изложенные в статье виды сечений и узлы сопряжения находят применение в практике проектирования и строительства. **Вывод.** Предложены рациональные конструктивные решения, которые позволяют уменьшить собственный вес плоских большепролетных конструкций за счёт оптимального выбора их конструктивной и расчётной схемы.

Ключевые слова: плоские конструкции, балочная ферма, рамные системы, арки, расчётная схема, опорные узлы, вид сопряжения

Для цитирования: А.К. Юсупов, Х.М. Муселемов, Р.И. Вишталов. Особенности работы балочных большепролетных конструкций. Вестник Дагестанского государственного технического университета. Технические науки. 2022; 49 (3):152-160. DOI:10.21822/2073-6185-2022-49-3-152-160

Features of the work of large-span beam structures

A.K. Yusupov, H.M. Muselemov, Vishtalov R.I.

Daghestan State Technical University,
70 I. Shamilya Ave., Makhachkala 367026, Russia

Abstract. Objective. This article discusses flat large-span structures, provides features of their work, as well as design examples. Formulas are given for determining the general dimensions of these structures. Method. Features of work and design, as well as calculation formulas are given. Shipping marks, types of sections and junctions of elements are given. A technique is described that allows to reduce span bending moments. Examples of rational design of beam trusses are given. **Result.** The given structural diagrams, as well as the analysis of their work, allow us to design long-span flat structures that are reliable, lightweight, technologically advanced in terms of manufacturing, transportation and installation. The types of sections and junctions described in the article are used in the practice of design and construction. **Conclusion.** The article discusses rational design solutions that allow reducing the own weight of flat large-span structures due to the optimal choice of their design and design scheme.

Keywords: flat structures, beam truss, frame systems, arches, design scheme, support units, interface type

For citation: A.K. Yusupov, Kh.M. Muselemov, R.I. Vishtalov. Peculiarities of operation of large-span beam structures. Herald of Daghestan State Technical University. Technical Sciences. 2022; 49(3): 152-160. (In Russ.) DOI:10.21822/2073-6185-2022-49-3-152-160.

Введение. Большепролетные конструкции можно разбить на два больших класса:

1. Плоские большепролетные конструкции. К ним относятся: балочные фермы; рамные системы; арочные конструкции.
2. Пространственные большепролетные конструкции. К ним относятся: оболочечные цилиндрические; оболочечные двоякой кривизны; решетчатые оболочечные конструкции; висячие оболочки (вантовые и мембранные); д) надувные (лёгкие быстрособираемые конструкции) [1, 11, 12].

Плоские большепролетные конструкции с точки зрения технологии изготовления, транспортировки и монтажа относительно просты и находят широкое применение в практике проектирования и строительства.

Пространственные большепролетные конструкции относительно сложны. Эти конструкции по сравнению с плоскими легче по затратам материала примерно на 15-25%.

Из-за сложности изготовления транспортировки и монтажа пространственные конструкции применяются относительно реже. Однако по мере разработки более современных технологических приёмов эти конструкции в будущем найдут широкое применение.

Постановка задачи. С увеличением пролёта покрытия внутренние усилия в сечениях несущей конструкции, а также вертикальные перемещения существенно увеличиваются. В связи с этим возникают проблемы, связанные с уменьшением собственного веса пролётного строения, а также обеспечения его необходимой жёсткости для нормальной эксплуатации всего здания.

В статье рассматриваются конструктивные схемы ферм параболического очертания, а также приёмы их компоновки, которые позволяют уменьшить собственный вес и повысить жёсткость большепролетной конструкции. Приводятся соответствующие конструктивные и расчётные схемы, рассматриваются особенности их расчёта.

С увеличением пролёта покрытия фермы с прямоугольным очертанием становятся не рациональными [1-4, 6-8]. При пролётах более 60 м фермы параболического очертания могут успешно «соперничать» с рамными, с арочными и с оболочечными системами покрытия (рис. 1).

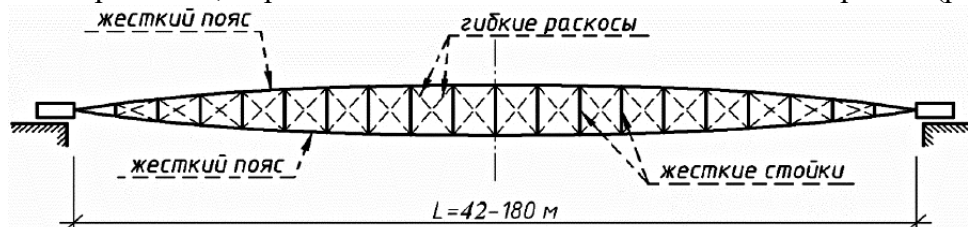


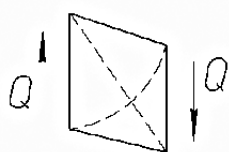
Рис. 1. Поперечный разрез покрытия

Fig. 1. Cross section of the coating

Здесь и далее пунктирными линиями показаны гибкие элементы.

Преимущества покрытия параболического очертания очевидны: очертание, имеющее форму параболы, максимально приближен к эпюре изгибающих моментов от собственного веса покрытия; гибкие раскосы расположены так, что при любой нагрузке один из раскосов растянут, а другой сжат. При этом сжатый раскос теряет устойчивость (рис. 2).

Панель фермы



Панель фермы

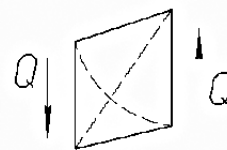


Рис. 2. Схемы работы раскосов

Fig. 2. Schemes of work of braces

Такое конструктивное решение позволяет применять для раскосов высокопрочные и относительно лёгкие прокатные профили малого калибра [5], канаты, полосовую сталь, высокопрочную арматуру и т.д. Всё это приводит к снижению собственного веса покрытия. При больших пролетах возможны и другие варианты расположения гибких раскосов. Например, в варианте, показанном на рис. 3, расчетная длина жестких стоек, работающих на сжатие, уменьшается вдвое, а соответствующая критическая сила увеличивается в 4 раза.

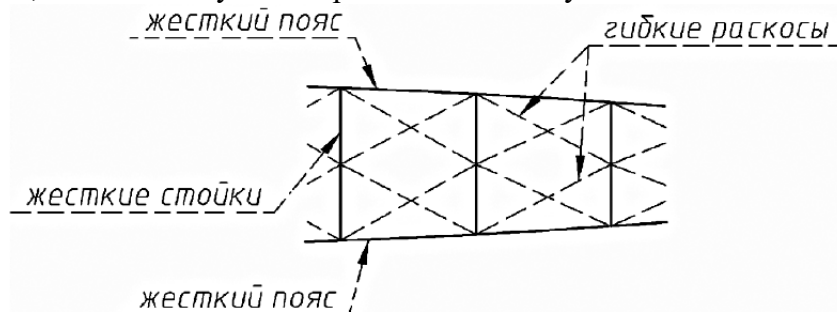


Рис. 3. Фрагмент фермы. Расположение раскосов в двух ярусах.

Пояса и стойки фермы – жесткие, раскосы – гибкие

Fig. 3. Fragment of a farm. Arrangement of braces in two tiers.

Belts and truss racks are rigid, braces are flexible

Фермы параболического очертания могут быть использованы не только в покрытиях зданий, но и в пролетных строениях мостов. При этом необходимо соединять фермы между собой связями, обеспечивающими устойчивость ферм из их плоскости (рис. 4).

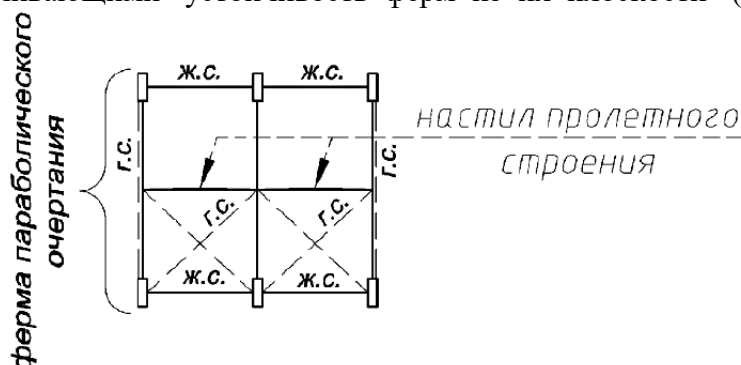


Рис. 4. Расположение в поперечном сечении моста жестких (ж.с.) и гибких (г.с.) связей

Fig. 4. Arrangement in the cross section of the bridge of rigid (l.s.) and flexible (f.s.) connections

Здесь: пояса и стойки ферм жесткие; пунктирами показаны поперечные и продольные гибкие связи. Из основной конструктивной схемы (рис. 1) следуют ещё 2 частных варианта.

Первый вариант

Нижний пояс и стойки – жесткие, верхний пояс и раскосы – гибкие (рис. 5).

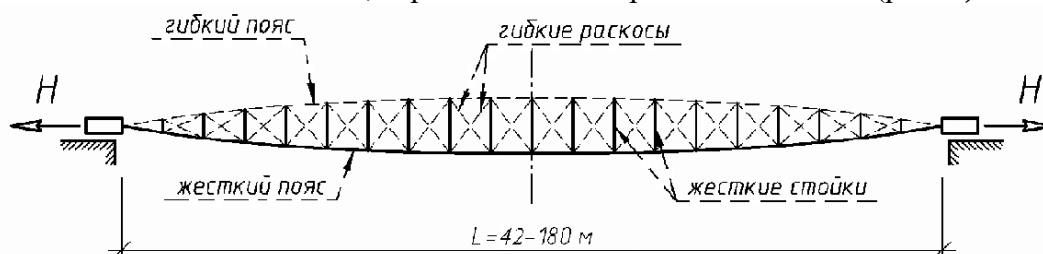


Рис. 5. Ферма - висячая распорная система

Fig. 5. Truss - hanging spacer system

Растянутый нижний пояс представляет собой жесткую нить - это позволяет стабилизировать деформации.

Второй вариант

Нижний и верхний пояса – гибкие; стойки – жесткие; раскосы отсутствуют (рис. 6).

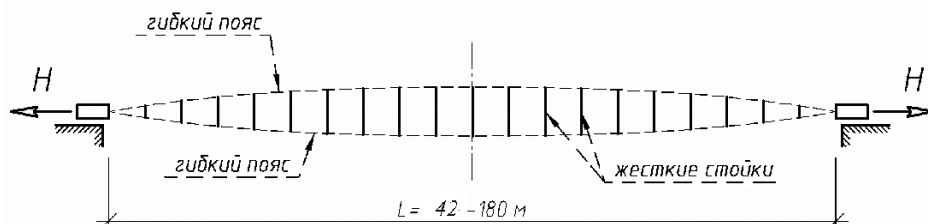


Рис. 6. Ферма превращается в вантовую систему

Fig. 6. The farm turns into a cable-stayed system

Стабилизация деформаций достигается за счёт предварительного напряжения гибких поясов (верхнего и нижнего).

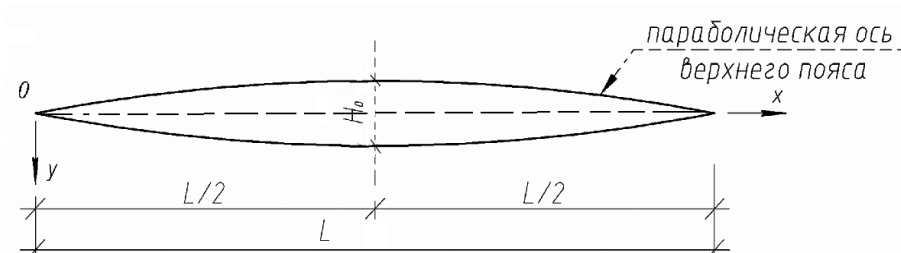


Рис.7. Очертание фермы и система координат

Fig. 7. Truss outline and coordinate system

Методы исследования. Уравнение очертания параболы в координатной системе, принятой на рис. 6, имеет вид:

$$y(x) = -\frac{2H_0}{L^2}x^2 + \frac{2H_0}{L}x. \quad (1)$$

Нижняя парабола определяется зеркальным отражением параболы верхней. Из опыта проектирования можно задаться (рис. 7) отношением:

$$\frac{L}{H_0} = 10 \div 15.$$

После чего, все ординаты фермы вычисляются с помощью функции $y(x)$ (1). Расчетный изгибающий момент от собственного веса покрытия q можно приближенно вычислить по формуле:

$$M(x) = \frac{qL}{2}x - \frac{qx^2}{2}. \quad (2)$$

Условие прочности для поясов фермы также можно приставить приближенно в следующем виде:

$$2 \cdot A_n \cdot R \cdot \gamma \cdot y(x) \geq M(x). \quad (3)$$

Здесь:

A_n – площадь поперечного сечения пояса фермы;

R – расчетное сопротивление металла;

γ – коэффициент условий работы фермы.

Подставляя в выражение (3) функции (1) и (2), получаем:

$$2 \cdot A_n \cdot R \cdot \gamma \cdot \left[-\frac{2H_0}{L^2}x^2 + \frac{2H_0}{L}x \right] \geq \frac{qL}{2}x - \frac{qx^2}{2}.$$

Это условие выполняется для всех значений x , если принять:

$$A_n \geq \frac{qL^2}{8R\gamma H_0} . \quad (4)$$

Другими словами, здесь обеспечивается равнопрочность во всех сечениях поясов фермы, когда на неё действует нагрузка от собственного веса покрытия.

Поскольку на покрытие, кроме постоянных нагрузок, действуют и временные [9]: сейсмические силы, ветровой напор, снеговой покров, обледенение, технологические воздействия, температурные перепады, – необходимо полученное выше значение площади поясов фермы A_n скорректировать с учетом указанных выше нагрузок и требований статической и динамической устойчивости поясов и стоек.

В большепролетных покрытиях фермы параболического очертания рационально проектировать с предварительным их напряжением.

Обсуждение результатов. Итак, высокая эффективность конструкции обеспечивается четырьмя факторами:

1. Параболическим очертанием фермы;
2. Гибкими раскосами с крестообразным их расположением;
3. Предварительным напряжением фермы;
4. Применением высокопрочных и легких материалов.

Если заменить верхние и нижние гибкие пояса жесткими, то вантовая ферма (рис. 6) превращается в безраскосную ферму. Распор H (рис.6) в этом случае воспринимается верхним жестким поясом фермы.

Далее рассмотрим безраскосную ферму двойного параболического очертания (рис.8). Эта конструкция занимает промежуточное положение между фермой и полой оболочкой.

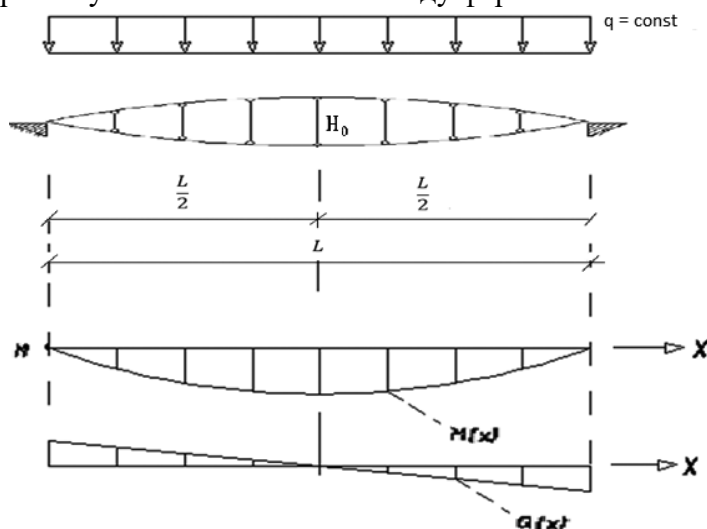


Рис. 8. Конструктивная схема фермы и эпюры M и Q
Fig. 8. Structural scheme of the truss and diagrams M and Q

В координатной системе, показанной на рис. 8, функция изгибающих моментов имеет вид

$$M(x) = \frac{qL}{2}x - \frac{qx^2}{2} \quad (5)$$

Дифференцируя эту функцию, найдем поперечные силы

$$Q(x) = \frac{qL}{2} - qx , \quad (6)$$

В середине пролета поперечная сила, равна нулю, и пояса работают на восприятие только нормального усилия от изгибающего момента

$$M = \frac{qL^2}{8}.$$

А в других сечениях пояса воспринимают усилия как от изгибающих моментов, так и от поперечных сил. Однако сечения поясов всюду по пролету сохраняют равную прочность.

Далее мы докажем это утверждение. С этой целью рассмотрим сечения пояса с произвольной координатой по x . Из рис.9 следует, что площадь сечения пояса по вертикали A_B больше площади сечения по нормали A_n , то есть

$$A_B = \frac{A_n}{\cos \alpha}. \quad (7)$$

Как известно,

$$\cos \alpha = \frac{1}{\sqrt{1 + tg^2 \alpha}}. \quad (8)$$

В вертикальном сечении пояса рис. (9,б) возникают нормальные и касательные напряжения;

$$\sigma = \frac{N}{A_n}, \tau = \frac{Q}{2A_n}. \quad (9)$$

Здесь коэффициент 2 при τ учитывает, что Q воспринимается 2-мя поясами. Условие прочности по IV-теории пластичности для металлов имеет вид [10]:

$$\sqrt{\sigma^2 + 3 \tau^2} \leq \gamma R. \quad (10)$$

Здесь:

R – расчетное сопротивление металла,

γ – коэффициент условий работы.

Подставляя напряжения (9) в условие прочности (10), получаем

$$\frac{1}{A_n} \sqrt{N^2 + \frac{3}{4} Q^2} \leq R \gamma. \quad (11)$$

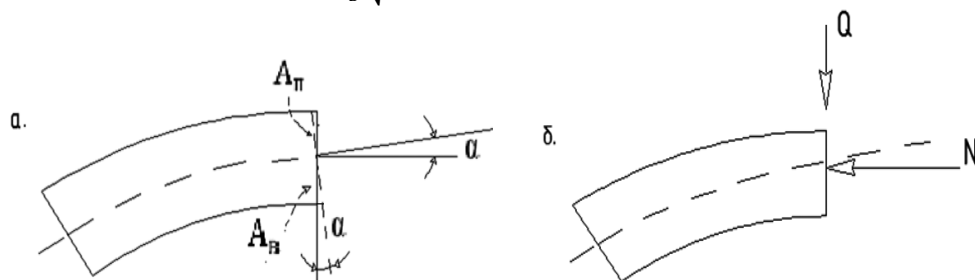


Рис.9. Схемы сечения пояса: а- геометрическая схема; б- расчётная схема

Fig.9. Belt section diagrams: a - geometric scheme; b - calculation scheme

Вертикальную площадь сечения пояса (7) с учетом выражения (9) также представим в удобном виде

$$A_B = A_n \cdot \sqrt{1 + tg^2 \alpha}. \quad (12)$$

Функцию $tg \alpha$, входящую в (12), определим как производную функции очертания пояса фермы:

$$tg \alpha = y'(x) = -\frac{4 H_0}{L^2} x + \frac{2 H_0}{L}. \quad (13)$$

Нормальное усилие N , которое входит в условие прочности (11), можно найти из условия равновесия сечения на восприятие изгибающего момента:

$$N = \frac{M(x)}{2y(x)},$$

или с учетом выражения (1)

$$N = \frac{\left[-\frac{qx^2}{2} + \frac{qL}{2} x \right]}{2 \left[-\frac{2H_0}{L^2} x^2 + \frac{2H_0}{L} x \right]} = \frac{qL^2}{8 H_0}$$

$$\text{или} \quad N = \frac{qL^2}{H_0}. \quad (14)$$

Теперь вернемся к условию прочности (11). С учетом равенств (2), (12), (13), (14) условие (11) запишем так:

$$\frac{q}{A_{\Pi}} \sqrt{\frac{\left(\frac{L^2}{8H_0}\right)^2 + \frac{3}{4}\left(\frac{L}{2} - x\right)^2}{1 + \left[-\frac{4H_0}{L^2}x + \frac{2H_0}{L}\right]^2}} \leq R\gamma. \quad (15)$$

Неравенство (15) можно упростить:

$$\frac{qL^2}{8H_0A_{\Pi}} \sqrt{\frac{1 + 1,5\left(-\frac{4H_0}{L^2}x + \frac{2H_0}{L}\right)^2}{1 + \left(-\frac{4H_0}{L^2}x + \frac{2H_0}{L}\right)^2}} \leq R\gamma \quad (16)$$

Для соотношений $\frac{L}{H_0} = 8 \div 15$ корень, входящий в (16), с высокой точностью можно принять равным 1, для всех значений x .

Например, обозначив корень, входящий в формулу (16), можно показать, что

$$\text{— при } x = 0 \text{ и } \frac{H_0}{L} = \frac{1}{10}$$

$$U = \sqrt{\frac{1 + 1,5 \cdot 0,04}{1 + 0,04}} \approx 1;$$

$$\text{— при } x = \frac{L}{2} \text{ и } \frac{H_0}{L} = \frac{1}{10} \quad \text{для всех соотношений}$$

$$\text{— при } x = L \text{ и } \frac{H_0}{L} = \frac{1}{10}$$

$$U = \sqrt{\frac{1 + 1,5 \cdot 0,04}{1 + 0,04}} \approx 1$$

С учетом сказанного, приняв равным единице корень, входящий в формулу (16), условие прочности с высокой точностью можем представить так:

$$\frac{qL^2}{8H_0A_{\Pi}} \leq R\gamma$$

или

$$A_{\Pi} \geq \frac{qL^2}{8H_0R\gamma} \quad (17)$$

Неравенство (17) говорит о равнопрочности сечения пояса по всей длине пролета фермы. Другими словами, сечения поясов, воспринимая как изгибающие моменты, так и поперечные силы, остаются равнопрочными по всей длине пролета фермы. А это естественно приводит к уменьшению затрат металла на изготовление поясов: нормальные сечения поясов по всему пролету остаются постоянными и определяются формулой (17). Говоря иначе, для рассматриваемой фермы, для фермы с поясами параболического очертания, не требуются раскосы для восприятия поперечных сил, когда нагрузка q – равномерно распределенная. Изгибающие моменты и поперечные силы в этом случае воспринимаются исключительно поясами фермы.

Стойки (рис. 9), необходимы для восприятия местной нагрузки от q , а также для фиксации поясов и обеспечения их местной устойчивости поясов в плоскости самой фермы. При этом пояса остаются безмоментными на всем пролете фермы. К такому выводу можно прийти и иначе. На рис. показана равнодействующая F горизонтального усилия $N = \frac{M}{2y}$ и поперечной силы $\frac{1}{2}Q = \frac{1}{2} \frac{dM}{dx}$.

Здесь коэффициент $\frac{1}{2}$ учитывает наличие 2-х поясов. Из рис. 10 следует, что

$$\operatorname{tg} \alpha = \frac{\frac{1}{2}Q}{N}.$$

Горизонтальное усилие

$$N = \frac{M}{2y}.$$

С учетом этого имеем

$$\operatorname{tg} \alpha = \frac{Q y(x)}{M}$$

или

$$M \operatorname{tg} \alpha = Q y(x).$$

Подставляя в это равенство выражения (1), (2), (13), можно убедиться, что оно выполняется точно. Это значит, что кривая пояса – безмоментна для всех значений x .

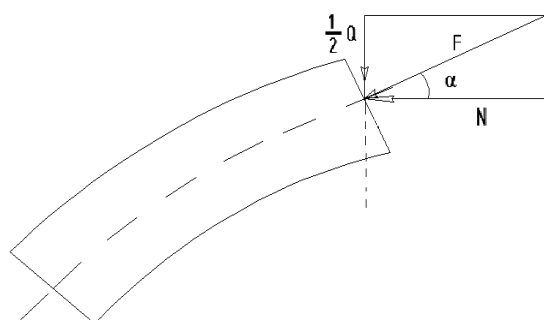


Рис.10. Схема воздействия внутренних усилий в сечении пояса
Fig.10. Scheme of the impact of internal forces in the section of the belt

Выше была рассмотрена фермы параболического очертания. При этом была приведена ферма с гибкими раскосами, а также рассмотрена безраскосная ферма параболического очертания. Фермы параболического очертания имеют минимальный вес, поэтому они позволяют перекрывать достаточно большие пролеты $60 \div 180$ м.

Вывод. Конструктивные схемы большепролетной фермы параболического очертания даются в двух вариантах: раскосная ферма; безраскосная ферма.

Раскосные фермы рациональны, если действующие относительно середины пролёта нагрузки кососимметричны.

Безраскосные фермы рациональны, когда действующие нагрузки относительно середины пролёта симметричны или близки к ним. Эти фермы в отличие от других ферм имеют минимальный вес.

Авторами изложена методика подбора сечения поясов ферм параболического очертания;

1. За счёт параболического вида очертания обеспечивается равнопрочность сечений поясов фермы по всему пролёту, что позволяет уменьшить, собственный вес конструкции;
2. Отсутствие раскосов ферм параболического очертания существенно упрощает технологию изготовления конструкции;
3. Поскольку при вертикальных колебаниях один из поясов фермы всегда растянут, то ферма параболического очертания приобретает высокую сейсмостойкость, что принципиально важно для большепролетных конструкций, возводимых в сейсмоопасных районах.

Библиографический список:

1. «Металлические конструкции» – под редакцией Ю.И. Кудишина, Москва, Академия, 2008 г.
2. «Металлические конструкции» – под редакцией Е.И. Беленя, Москва, Стройиздат, 1986 г.
3. Беленя Е.Н. Предварительно напряженные несущие металлические конструкции. –2-е изд. – Москва, строойиздат, 1975. – 415 с.

4. Металлические конструкции (специальный курс) – 2-е изд. под редакцией Беленя Е.Н., – Москва, Стройиздат, 1976. – 600 с.
5. Брудка Ян, Лубински Мечислав. Легкие стальные конструкции (перевод с польского). – Москва, Стройиздат, 1974.
6. Металлические конструкции: Справочник проектировщика. 2-е изд. Под редакцией Мельникова М.П. – Москва, Стройиздат. 1980. – 776с.
7. Справочник конструктора «Стальные конструкции» – под редакцией Шумакова 2004 г.
8. «Основы металлических конструкций» – В.В. Маслов, Волгоград
9. СП 20.13330.2016 Свод правил. Нагрузки и воздействия. Актуализированная редакция СНиП 2.01.07-85.
10. СП 16.13330.2017 «Стальные конструкции». М.: Стандартинформ, 2017. АО "НИЦ "Строительство" – ЦНИИСК им. В.А. Кучеренко, 92 с.
11. Справочник конструктора «Стальные конструкции» – под редакцией Шумакова 2004 г.
12. Трофимов В.И., Еремеев П.Г. «Мембранные конструкции зданий и сооружений» – Москва, Стройиздат, 1990.

References:

1. Metal structures" – edited by Yu.I. Kudishina, Moscow, Academy, 2008 (In Russ)
2. "Metal structures" - edited by E.I. Belenya, Moscow, Stroyizdat, 1986(In Russ)
3. Belenya E.N. Prestressed load-bearing metal structures. –2nd ed. - Moscow, Stroyizdat, 1975; 415 p. (In Russ)
4. Metal structures (special course) - 2nd ed. under the editorship of Belenya E.N., Moscow, Stroyizdat, 1976; 600. (In Russ)
5. Brudka Jan, Lubinski Mechislav. Light steel structures (translated from Polish). Moscow, Stroyizdat, 1974. (In Russ)
6. Metal structures: A designer's guide. 2nd ed. Under the editorship of Melnikov M.P. - Moscow, stroyizdat. 1980; 776. (In Russ)
7. Handbook of the designer "Steel structures" - edited by Shumakov 2004 (In Russ)
8. "Fundamentals of metal structures" V.V. Maslov, Volgograd (In Russ)
9. SP 20.13330.2016 Code of Practice. Loads and impacts. Updated edition of SNiP 2.01.07-85. (In Russ)
10. SP 16.13330.2017 "Steel structures". M.: Standartinform, JSC "Research Center "Construction" - TsNIISK named after V.A. Kucherenko, 2017; 92. (In Russ)
11. Handbook of the designer "Steel structures" - edited by Shumakov 2004 (In Russ)
12. Trofimov V.I., Eremeev P.G. "Membrane structures of buildings and structures" Moscow, Stroyizdat, 1990. (In Russ)

Сведения об авторах:

Юсупов Абусупян Курашевич, доктор технических наук, профессор, кафедра «Строительные конструкции и гидротехнические сооружения»; hairulla213@mail.ru

Муселемов Хайрулла Магомедмурадович, кандидат технических наук, доцент, кафедра «Строительные конструкции и гидротехнические сооружения»; hairulla213@mail.ru

Вишталов Раджаб Исабекович, кандидат технических наук, доцент кафедры «Строительные конструкции и гидротехнические сооружения»

Information about the authors:

Abusupyan K.Yusupov, Dr. Sci. (Eng.), Prof., Department of Building Structures and Hydraulic Structures; hairulla213@mail.ru

Hairulla M.Muselemov, Cand.Sci. (Eng.), Assoc. Prof., Department of Building Structures and Hydraulic Structures; hairulla213@mail.ru

Rajab I. Vishtalov, Cand.Sci. (Eng.), Assoc. Prof. of the Department of Building Structures and Hydrotechnical Structures; hairulla213@mail.ru

Конфликт интересов/Conflict of interest.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов/The authors declare no conflict of interest.

Поступила в редакцию/ Received 22.07.2022.

Одобрена после рецензирования/ Reviced 20.08.2022.

Принята в печать /Accepted for publication 20.08.2022.