

УДК 624.014

Чесноков А.В. – кандидат технических наук, доцент

E-mail: avchesnokov@lipetsk.ru

Михайлов В.В. – доктор технических наук, профессор

E-mail: mmvv46@rambler.ru

Липецкий государственный технический университет

Сабитов Л.С. – кандидат технических наук, доцент

E-mail: sabitov-kgasu@mail.ru

Казанский государственный архитектурно-строительный университет

ДВУХПОЯСНАЯ ПРЕДВАРИТЕЛЬНО НАПРЯЖЁННАЯ ТРОСОВАЯ СИСТЕМА С КОНСТРУКТИВНЫМ ЗАЗОРОМ

АННОТАЦИЯ

Рассмотрена двухпоясная тросовая система, включающая балку жёсткости и имеющая конструктивный зазор. Преимущество данного решения в том, что балка жёсткости, изготовленная из обычной строительной стали, включается в работу лишь при развитии повышенных деформаций, а высокопрочная тросовая основа работает более эффективно на внешнюю нагрузку вследствие полного использования несущей способности и минимизации резервов. Предлагаются расчётные формулы для подбора основных параметров системы.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: двухпоясная тросовая система, балка жёсткости, конструктивный зазор, повышенная деформативность, контактная нагрузка.

Chesnokov A.V. – candidate of technical sciences, associate professor

Mikhailov V.V. – doctor of technical sciences, professor

Lipetsk State Technical University

Sabitov L.S. – candidate of technical sciences, associate professor

Kazan State University of Architecture and Engineering

TWO-LEVEL PRESTRESSED CABLE SYSTEM WITH DESIGN CLEARANCE

ABSTRACT

Two-level cable system including hard girder and design clearance is concerned. The advantages of the system are the following: the girder, made of usual constructional steel, begins to work in case if large deformations occur, and high-strength cable structure carries external load in more effective way using its total load carrying capacity. The solution formulas for obtaining the primary system parameters are given.

KEYWORDS: two level cable system, hard girder, design clearance, high deformations, contact load.

Тросовые системы, обладая очевидными преимуществами, среди которых выделяются лёгкость, архитектурная выразительность и способность перекрывать значительные пролёты, имеют также существенный недостаток: повышенную деформативность под воздействием внешних несимметричных и неравномерных нагрузок. Разгрузка части пролёта (например, очистка снега), перекрытого тросовой системой, может значительно ухудшить её работу, вызвав кинематические перемещения, которые способны превысить упругие деформации от равномерной нагрузки.

В связи с повышенной деформативностью тросовых систем расчёт по второй группе предельных состояний выходит на первый план: сечения элементов подбираются из условия ограничения прогибов системы, что приводит к неэффективному использованию высокопрочных тросов, работающих на внешнюю нагрузку со значительным запасом по прочности.

Применение жёсткой балки в качестве стабилизирующего элемента тросовой системы [1-3] лишь отчасти решает проблему: элемент повышенной жёсткости, изготавливаемый из менее прочной стали, чем трос, воспринимает большую часть внешней нагрузки, а тросовая составляющая полученной системы работает с запасом по прочности.

Предлагаемое решение (рис. 1) позволяет полностью использовать прочностные характеристики элементов системы, вместе с тем, ограничивая прогибы от действия внешних нагрузок.

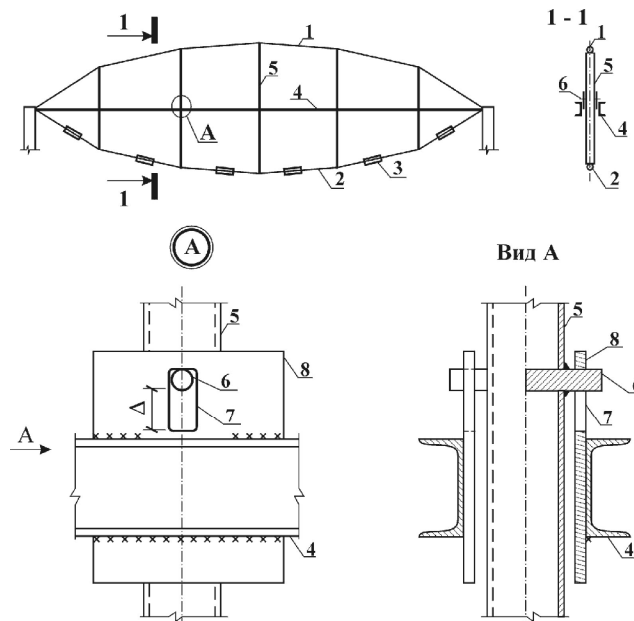


Рис. 1. Тросовая ферма с конструктивным зазором

Система состоит из верхнего 1 и нижнего 2 поясов, выполненных из стальных тросов, стоек-распорок 5, объединяющих пояса 1 и 2 между собой, балки жёсткости 4, средств создания предварительных напряжений 3. Отличие от аналогичных решений – наличие конструктивного зазора между балкой жёсткости и тросовой фермой. К распоркам 5 приварены фиксаторы 6 в виде штырей, проходящие в пазы 7 переходных пластин 8. Пазы 7 имеют строго определённую длину, зависящую от диаметра фиксатора 6 и конструктивного зазора Δ.

Преимущество данного решения заключается в том, что балка жёсткости включается в работу не сразу, а лишь при развитии повышенных деформаций. Таким образом, балка жёсткости, уменьшая деформативность системы, воспринимает меньшую часть внешней нагрузки, в соответствии со своими не высокими прочностными характеристиками, а высокопрочная тросовая основа работает на внешнюю нагрузку с минимальными резервами, что повышает эффективность применения высокопрочных сталей.

Исследования показали, что на этапе создания предварительных напряжений в системе балка жёсткости не должна включаться в работу. После напряжения поясов пластины 8 навешиваются на фиксаторы 6 и привариваются к балке 4.

Работа системы иллюстрируется рисунком 2. На действие симметричного нагружения тросовая ферма с балкой и конструктивным зазором работает аналогично обычной двухпоясной тросовой ферме. Под действием несимметричной нагрузки и больших стрелках верхнего и нижнего поясов, перемещения в четверти пролёта обычной тросовой фермы значительно превышают перемещения в предлагаемой системе. С другой стороны, перемещения в одиночной балке (без тросовой фермы) больше допустимых перемещений, а напряжения превышают её расчётное сопротивление.

При расчёте предлагаемой системы использовались следующие условия:

- условия обеспечения прочности элементов (1), (2), (3);
- условия обеспечения совместности деформаций (4), (5);
- условие ограничения прогибов (6).

$$\frac{N_c}{A_c \cdot R_{y_c}} = 1, \tag{1}$$

$$\frac{N_n}{A_n \cdot R_{y_c}} = 1, \tag{2}$$

$$\frac{M_b}{W_b \cdot R_{y_b}} \leq 1, \tag{3}$$

$$\omega_{n2} = -\omega_{c2}, \tag{4}$$

$$\omega n2 = \Delta\Delta + \omega b2, \tag{5}$$

$$\omega n2 = \Omega\text{lim}, \tag{6}$$

где N_c, N_n, M_b – усилия в стабилизирующем и несущем поясах, а также изгибающий момент в балке от расчётной нагрузки; A_c, A_n, W_b – искомые геометрические характеристики: площади сечений стабилизирующего и несущего поясов, а также момент сопротивления балки жёсткости; R_{y_c}, R_{y_b} – расчётные сопротивления материала поясов и балки жёсткости; $\omega c2, \omega n2, \omega b2$ – перемещения в середине пролёта стабилизирующего и несущего поясов, а также балки жёсткости; $\Delta\Delta$ – искомая величина конструктивного зазора; Ωlim – максимально допустимый прогиб, задаваемый СНиП и конструктивными соображениями.

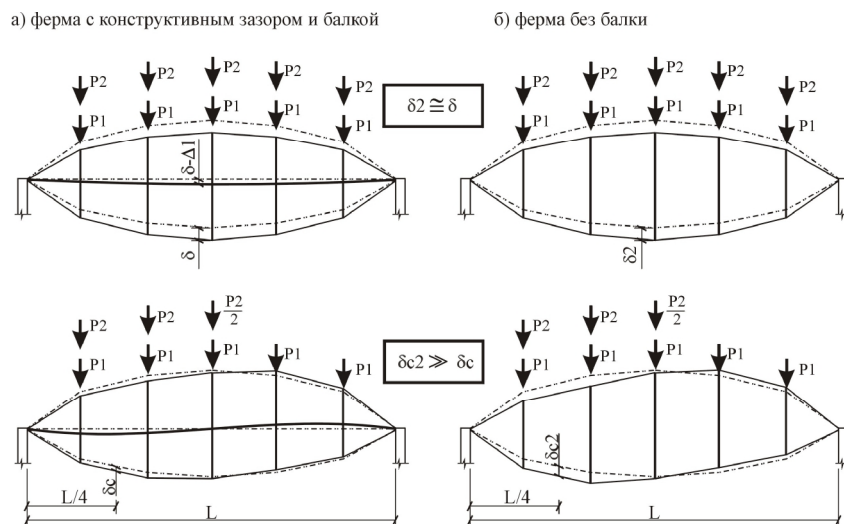


Рис. 2. Работа тросовой фермы

Формулы (1), (2) можно записать в виде:

$$\frac{N_c}{E A_c \cdot R_c} = 1, \tag{7}$$

$$\frac{N_n}{E A_n \cdot R_n} = 1, \tag{8}$$

где N_c, N_n – распоры в стабилизирующем и несущем поясах; $E A_c, E A_n$ – продольные жёсткости поясов; R_c, R_n – коэффициенты, определяемые по формулам (9), (10).

$$R_c = \frac{R_{y_c} \cdot \gamma_c}{E_c \cdot K_{h_c}}, \tag{9}$$

$$R_n = \frac{R_{y_c} \cdot \gamma_c}{E_c \cdot K_{h_n} \cdot \gamma_f}, \tag{10}$$

где γ_c – коэффициент условий работы элемента; E_c – модуль упругости троса; K_{h_c}, K_{h_n} – коэффициенты перехода от распора к продольному усилию в стабилизирующем и несущем поясах, соответственно, определяемые по формуле (11); γ_f – коэффициент надёжности по внешней нагрузке.

$$K_h = \sqrt{16 \cdot f_L^2 + 1}, \tag{11}$$

где f_L – отношение стрелки пояса к пролёту, принимается от 1/30 до 1/10.

Для расчёта прогибов тросовой системы использовалось уравнение (13.25) [4]:

$$\omega^3 + 3 \cdot y_0 \cdot \omega^2 + \left(3 \cdot y_0^2 - \frac{A_n}{B_n} \cdot M_1^2 \right) \cdot \omega + \left(y_0^3 - \frac{A_n}{B_n} \cdot M_1^2 \cdot y_0 - \frac{M_1^3}{B_n} \right) = 0, \tag{12}$$

где ω – прогиб в середине пролёта; y_0 – начальная стрелка провеса пояса; M_1 – балочный момент в середине пролёта; A_n , B_n – коэффициенты, зависящие от характера и интенсивности нагрузки.

Формула (12) после преобразований, с учётом равномерного характера распределения внешней нагрузки, приняла вид:

$$\omega^3 + 3 \cdot y_0 \cdot \omega^2 + \left(2 \cdot y_0^2 + \frac{3 \cdot p_0 \cdot L_1^4}{64 \cdot y_0 \cdot EA} \right) \cdot \omega + \left[\frac{-3}{64} \cdot L_1^4 \cdot \frac{(p_1 - p_0)}{EA} \right] = 0, \quad (13)$$

p_0 и p_1 – внешние нагрузки, соответствующие начальному провесу y_0 и перемещению ω ; L_1 – пролёт; EA – продольная жёсткость пояса.

Для верхнего пояса перемещение на стадии предварительных напряжений определено из формулы (13), при условиях:

$$p_0 = 0, \quad p_1 = q_n, \quad (14)$$

где q_n – заданное предварительное напряжение (начальная контактная нагрузка между поясами).

Формула (13) преобразована к виду:

$$\omega c_0 = \frac{3}{128} \cdot \frac{L_1^4 \cdot q_n}{EA_c \cdot f_0 c^2} - \frac{\omega c_0^2 \cdot (\omega c_0 + 3 \cdot f_0 c)}{2 \cdot f_0 c^2}, \quad (15)$$

где ωc_0 – искомое перемещение верхнего пояса при преднапряжении; $f_0 c$ – начальная стрелка стабилизирующего пояса.

При условиях (7) и (16)

$$H_c = \frac{q_n \cdot L_1^2}{8 \cdot (f_0 c + \omega c_0)}, \quad (16)$$

после преобразования формулы (15), принимая, что:

$$\frac{\omega c_0^3}{2 \cdot f_0 c^3} = 0, \quad (17)$$

получено перемещение верхнего пояса при преднапряжении:

$$\omega c_0 = \frac{-16 \cdot f_0 c^2 + 3 \cdot L_1^2 \cdot R_c + \sqrt{(16 \cdot f_0 c^2 - 3 \cdot L_1^2 \cdot R_c)^2 + 288 \cdot f_0 c^2 \cdot L_1^2 \cdot R_c}}{48 \cdot f_0 c}. \quad (18)$$

С учётом (7), (16) и (18) получена жёсткость верхнего пояса:

$$EA_c = \frac{q_n \cdot L_1^2}{8 \cdot (f_0 c + \omega c_0) \cdot R_c}. \quad (19)$$

При условиях (4), (6), (20) из формулы (13) получена контактная нагрузка q_{c2} на стабилизирующий пояс при действии внешней нагрузки на систему:

$$p_0 = q_n, \quad p_1 = q_{c2}, \quad (20)$$

$$q_{c2} = \frac{64 \cdot \alpha_2 \cdot EA_c}{3 \cdot L_1^4} - \alpha_3, \quad (21)$$

где α_2 и α_3 – параметры, вычисляемые по формулам (22), (23):

$$\alpha_2 = -\Omega \lim^3 + 3 \cdot (f_0 c + \omega c_0) \cdot \Omega \lim^2 - 2 \cdot (f_0 c + \omega c_0)^2 \cdot \Omega \lim, \quad (22)$$

$$\alpha_3 = \frac{q_n \cdot (\Omega \lim - f_0 c - \omega c_0)}{f_0 c + \omega c_0}. \quad (23)$$

При условиях (6), (24) из формулы (13) получена зависимость жёсткости несущего пояса EA_n от контактной нагрузки q_{n2} на него при действии внешней нагрузки на систему:

$$p_0 = q_n, \quad p_1 = q_{n2} + p, \quad (24)$$

$$EA_n = \frac{3 \cdot L_1^4}{64 \cdot \alpha_4} \cdot (q_{n2} + \alpha_5), \quad (25)$$

где α_4 и α_5 – параметры, вычисляемые по формулам (26), (27):

$$\alpha_4 = \Omega_{lim}^3 + 3 \cdot (f_{0n} - \omega_{c0}) \cdot \Omega_{lim}^2 + 2 \cdot (f_{0n} - \omega_{c0})^2 \cdot \Omega_{lim}, \quad (26)$$

$$\alpha_5 = p - qn \cdot \left(1 + \frac{\Omega_{lim}}{f_{0n} - \omega_{c0}} \right). \quad (27)$$

Распор в несущем поясе вычисляется по формуле:

$$H_n = \frac{(qn_2 + p) \cdot L_1^2}{8 \cdot (f_{0n} - \omega_{c0} + \omega_{n2})}. \quad (28)$$

При условиях (8) и (28) получена зависимость жёсткости несущего пояса EAn от контактной нагрузки qn_2 на него при действии внешней нагрузки на систему:

$$qn_2 + p = EAn \cdot \alpha_1, \quad (29)$$

где α_1 – параметр, вычисляемый по формуле:

$$\alpha_1 = \frac{8 \cdot (f_{0n} - \omega_{c0} + \Omega_{lim}) \cdot R_n}{L_1^2}. \quad (30)$$

После совместного преобразования (25) и (29) получена жёсткость несущего пояса EAn и контактная нагрузка qn_2 :

$$EAn = \frac{\alpha_5 - p}{\frac{64}{3} \cdot \frac{\alpha_4}{L_1^4} - \alpha_1}, \quad (31)$$

$$qn_2 = \frac{3 \cdot L_1^4 \cdot \alpha_5 \cdot \alpha_1 - 64 \alpha_4 p}{64 \alpha_4 - 3 \cdot L_1^4 \cdot \alpha_1}. \quad (32)$$

Нагрузка, передаваемая поясами на балку, составит:

$$q_b = q_{c2} - q_{n2}. \quad (33)$$

Момент в середине пролёта балки:

$$M_b = \frac{q_b \cdot L_1^2}{8}. \quad (34)$$

Из формул (3) и (34) находится требуемый момент сопротивления балки. Подобрав по сортаменту необходимый профиль, вычисляется величина конструктивного зазора:

$$\Delta \Delta = \Omega_{lim} - \frac{5}{384} \cdot q_b \cdot \frac{L_1^4}{E_b}, \quad (35)$$

где E_b – жёсткость балки на изгиб.

Полученные формулы позволяют определить основные параметры системы (жёсткостные характеристики, контактные нагрузки, конструктивный зазор) в зависимости от заранее заданного предварительного напряжения qn . Фактическая деформативность системы от несимметричной нагрузки должна быть проверена в любом программном комплексе нелинейного расчёта. Не выполнение требований второго предельного состояния ведёт к необходимости повышения начального напряжения qn . Преимущество предлагаемой методики расчёта заключается в том, что, не считая геометрических размеров конструкции, которые зачастую задаются архитектурными, а не конструктивными соображениями, в системе остаётся только один независимый параметр – преднапряжение, что значительно упрощает решаемую задачу.

Применение тросовой системы с конструктивным зазором имеет целью уменьшение деформаций от внешних нагрузок и повышение эффективности работы высокопрочных стальных канатов. Под воздействием несимметричной нагрузки в тросовых фермах могут возникнуть значительные перемещения, во много раз превышающие деформации от равномерного нагружения равной или даже большей интенсивности. Данные перемещения, называемые кинематическими, не связаны с изменением длин элементов и меняют лишь форму системы. С другой стороны, усилия в элементах тросовой системы, подверженной действию не симметричной нагрузки, меньше, чем при полном равномерном нагружении. Таким образом, работа системы может быть описана двумя моделями: большие деформации при относительно малых усилиях и, наоборот, большие усилия при незначительных деформациях. Высокопрочные стальные тросы, имеющие пониженные модули упругости, по сравнению с обычными сталями, не способны воспринимать ни сжимающие, ни

изгибающие усилия, как нельзя лучше подходят для «второй модели поведения», но не для первой, когда высокая прочность не требуется, но нужна повышенная жёсткость.

Рассмотренное конструктивное решение состоит из двух принципиально разных элементов: жёсткая балка, стабилизирующая кинематические перемещения, и тросовая ферма, воспринимающая основную часть внешней нагрузки. Применение конструктивного зазора позволяет «автоматически» переключаться между разными моделями работы системы, что ведёт к сокращению расхода дорогостоящих материалов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. А.с. 2182208 Российская Федерация, Е04С 3/10. Предварительно напряжённая пространственная шпренгельная ферма / В.В. Егоров, Е.Н. Алексашкин, М.П. Забродин, В.В. Веселов (Российская Федерация). – Заяв. 24.01.2001. Оpubл. 10.05.2002.
2. А.с. 2186914 Российская Федерация, Е04С 3/10. Предварительно-напряжённая шпренгельная ферма / В.В. Егоров (Российская Федерация). – Заяв. 05.04.2001. Оpubл. 10.08.2002.
3. Беленя Е.И. Предварительно напряжённые несущие металлические конструкции. Изд. 2-е, перераб. и доп. – М.: Стройиздат, 1975. – 416 с.
4. Беленя Е.И., Стрелецкий Н.Н., Ведеников Г.С., Клепиков Л.В., Морачевский Т.Н. Металлические конструкции. Специальный курс. / Под ред. Е.И. Беленя. Изд. 3-е, перераб. и доп. – М.: Стройиздат, 1991. – 687 с.