

DOI: 10.12737/6278

УДК 623.742.2: 621.86.016

МЕТОДИКА ОПРЕДЕЛЕНИЯ УСИЛИЙ, ВОЗНИКАЮЩИХ В КАНАТАХ ТРЕХЛИНЕЙНОЙ АЭРОСТАТНО-КАНАТНОЙ ТРАНСПОРТНОЙ СИСТЕМЫ

кандидат технических наук **А. В. Абузов**

«Тихоокеанский государственный университет», г. Хабаровск, Российская Федерация

В данной статье освещается вопрос о целесообразности использования аэростатно-канатных транспортных систем при освоении труднодоступных лесных массивов Дальневосточного региона. Дается краткое описание аэростатных транспортных установок, из которого видна необходимость исследования усилий возникающих в тягово-возвратных нитях, представленных синтетическими канатами. Приводится методика пространственного расчета натяжения канатов с определением усилий в нитях при расположении точки их подвеса над любой точкой эксплуатационного участка. Данная методика применима для аэростатных систем различного вида и разной грузоподъемности, но при условии трехлинейной системы управления. Показан алгоритм расчета с учетом изменения подъемной силы аэростата, ветровой нагрузки, угла склона, длины грузовой подвески, а также учтены критические моменты при условии выключения двух из трех канатов из работы. Составленный алгоритм даёт возможность отследить все основные факторы, влияющие на величину напряжений – это перепады рельефа поверхности, изменение угла склона, изменение подъемной силы аэростата за счет меняющихся величин температуры окружающего воздуха и высоты над уровнем моря. Сделаны выводы, определяющие возможности предложенной методики расчета.

Ключевые слова: воздушная транспортировка древесины, натяжение канатов, аэростатно-канатная система, аппроксимация местности, ветровая нагрузка.

METHOD OF DETERMINING THE FORCES ARISING IN THE ROPES OF TRILINEAR BALLOON-CABLE TRANSPORT SYSTEM

PhD in Engineering **A. V. Abuzov**

«Pacific State University», Khabarovsk, Russian Federation

This article addresses the issue of whether to use balloon-cable transport systems during the development of hard-to-forests of the Far East region. Brief description of the balloon transport facilities is given from which the need for research efforts in emerging trailer return filaments is visible, presented with synthetic ropes. The technique of calculating the spatial tension of ropes with some effort in the filaments at the location of the point of suspension over any part of the operational site is given. This method can be used for balloon systems of different types and different capacity, provided with trilinear control systems. The algorithm of the calculation to reflect changes in the lift of the balloon, the wind load, slope angle, length of the cargo suspension is shown, and also the

critical moments are taken into account subject to turn off of the two of the three ropes from work. Composed algorithm makes it possible to keep track of the entire main factors influencing the magnitude of the stress – these are swings of surface topography, changing the angle of the slope, change of lift of the balloon by changing the values of ambient temperature and altitude. Conclusions are made, determining the possibilities of the proposed method of calculation.

Keywords: air transport of wood, rope tension, balloon-cable system, approximation of the terrain, wind load.

В настоящее время, при освоении лесного фонда, большинство лесозаготавливающих организаций Дальневосточного региона ведут заготовку древесины на территориях с характерными признаками труднодоступности и экологической зависимости. При этом, около 33 % лесных площадей, где произрастает качественный и спелый древостой, находятся на склонах свыше 20°, где традиционная наземная техника не в состоянии вести заготовку древесины, либо выполняет её с большими затратами и с явным экологическим несоответствием.

Аналитические и практические исследования доказывают о целесообразности применения, в сложных природных условиях, воздушных систем транспортировки, в частности аэростатно-канатных установок (АКУ). Данные системы являются альтернативной технологией или средним звеном между вертолетной, канатной и наземной технологией лесозаготовок и соответственно обладают, значительно меньшей себестоимостью работ, чем при использовании вертолета, но при этом, более расширенными и качественными возможностями по сравнению с канатными и наземными видами транспорта.

Современный комплекс аэростатно-канатной транспортной системы совме-

щает в себе радио дистанционное управление с элементами пеленгации и совокупность модернизированных технических механизмов и элементов, основными из которых является трехлинейная система управления, представленная специализированными синтетическими канатами (рис. 1).

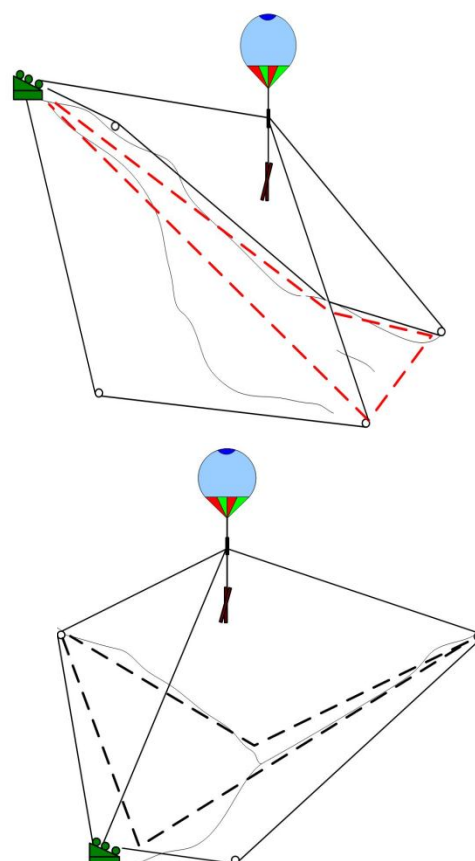


Рис. 1. Технологические схемы эксплуатации трехлинейной аэростатно-канатной системы

Принципиальное отличие современных АКУ от двухлинейных систем, применяющихся в период 1950-1993 года и использующих металлические канаты, требует нового подхода при изучении натяжений, возникающих в канатной системе в процессе эксплуатации данных установок [1].

Из известных нам научных трудов, касающихся рассматриваемой темы, как правило, рассматривался плоский случай работы двух канатов с использованием предположения либо о пологости нити, либо о нити большого провеса [3, 4, 5, 6]. Целью же нашей задачи является определение усилий в трех канатах 01, 02, 03, обеспечивающих расположение точки подвеса 0 в точке с координатами x_0, y_0, z_0 . Расположение лебедок 1, 2, 3 считается заданным, т.к. известны координаты $x_1, y_1, z_1; x_2, y_2, z_2; x_3, y_3, z_3$ точек 1, 2, 3 соответственно. Действие аэростата на канаты заменяется подъемной силой с учетом, при необходимости, ветровой нагрузки. Итак, расчетная схема конструкции представляет собой пространственную систему трех пологих нитей 01, 02, 03, нагруженную в точке подвеса 0 подъемной силой P и ветровой нагрузкой P_e , а также собственным весом канатов (рис. 2).

Главной особенностью задачи является её статическая определимость относительно усилий в канатах в точке подвеса 0 [2].

В силу других особенностей задачи – значительных расстояний между точками 1, 2, 3, 0 и малом (относительно подъемной силы) весом канатов – принимаем расчетную схему каната в виде пологой весо-мной нити. Далее, рассматриваем задачу,

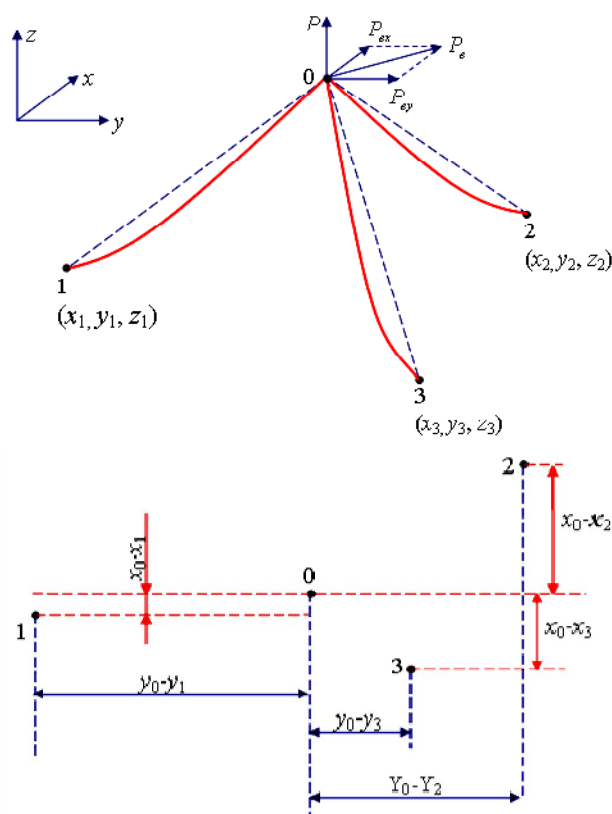


Рис. 2. Основная расчетная схема для трехлинейной системы

как пространственную, с определением усилий в нитях при расположении точки их подвеса над любой точкой, лежащей внутри треугольника 1, 2, 3, в том числе и над точками, принадлежащими периметру треугольника 1, 2, 3. Рельеф местности аппроксимируется плоскостью, проходящей через точки 1, 2, 3, что, однако, не сужает общности задачи. Поскольку в любом частном случае, отличающемся от выше указанного, возможно проведение расчетов по разработанным алгоритмам с учетом конкретных особенностей местности. Отрезок 10 будем рассматривать, как вектор \vec{v}_{10} , имеющий началом точку 1 и концом точку 2 (рис. 3).

Вектор \vec{v}_{10} имеет своими компонен-

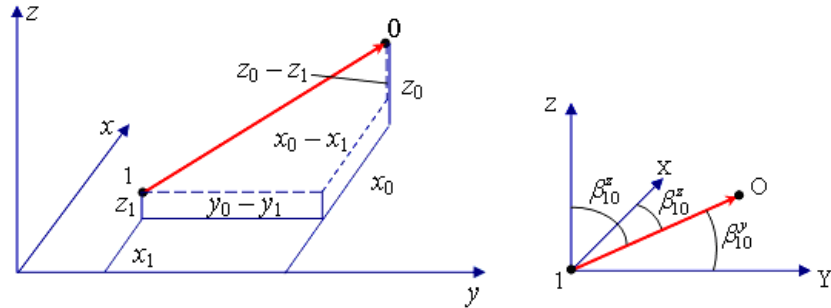


Рис. 3. Координаты вектора

тами разности соответствующих координат точек 0 и 1:

$$\vec{v}_{10} = \begin{Bmatrix} x_0 - x_1 \\ y_0 - y_1 \\ z_0 - z_1 \end{Bmatrix}. \quad (1)$$

Длина вектора \vec{v}_{10}

$$l_{10} = \sqrt{(x_0 - x_1)^2 + (y_0 - y_1)^2 + (z_0 - z_1)^2}. \quad (2)$$

Направляющие косинусы вектора \vec{v}_{10}

(рис. 4):

$$\begin{aligned} \cos \beta_{10}^x &= \frac{x_0 - x_1}{l_{10}} \\ &= \frac{x_0 - x_1}{\sqrt{(x_0 - x_1)^2 + (y_0 - y_1)^2 + (z_0 - z_1)^2}} \end{aligned} \quad ; (3)$$

$$\begin{aligned} \cos \beta_{10}^y &= \frac{y_0 - y_1}{l_{10}} \\ &= \frac{y_0 - y_1}{\sqrt{(x_0 - x_1)^2 + (y_0 - y_1)^2 + (z_0 - z_1)^2}} \end{aligned} \quad ; (4)$$

$$\begin{aligned} \cos \beta_{10}^z &= \frac{z_0 - z_1}{l_{10}} \\ &= \frac{z_0 - z_1}{\sqrt{(x_0 - x_1)^2 + (y_0 - y_1)^2 + (z_0 - z_1)^2}} \end{aligned} \quad , \quad (5)$$

где $\beta_{10}^x, \beta_{10}^y, \beta_{10}^z$ - углы между прямой 10 и осями x, y, z соответственно.

Аналогичным образом для векторов:

$$\vec{v}_{20} = \begin{Bmatrix} x_0 - x_2 \\ y_0 - y_2 \\ z_0 - z_2 \end{Bmatrix}, \quad \vec{v}_{30} = \begin{Bmatrix} x_0 - x_3 \\ y_0 - y_3 \\ z_0 - z_3 \end{Bmatrix} \quad (6)$$

Получаем длины:

$$l_{20} = \sqrt{(x_0 - x_2)^2 + (y_0 - y_2)^2 + (z_0 - z_2)^2} \quad (7)$$

$$l_{30} = \sqrt{(x_0 - x_3)^2 + (y_0 - y_3)^2 + (z_0 - z_3)^2}. \quad (8)$$

Направляющие косинусы:

$$\begin{aligned} \cos \beta_{20}^x &= \frac{x_0 - x_2}{l_{20}} \\ &= \frac{x_0 - x_2}{\sqrt{(x_0 - x_2)^2 + (y_0 - y_2)^2 + (z_0 - z_2)^2}} \end{aligned} \quad ; \quad (9)$$

$$\begin{aligned} \cos \beta_{20}^y &= \frac{y_0 - y_2}{l_{20}} \\ &= \frac{y_0 - y_2}{\sqrt{(x_0 - x_2)^2 + (y_0 - y_2)^2 + (z_0 - z_2)^2}} \end{aligned} \quad ; \quad (10)$$

$$\begin{aligned} \cos \beta_{20}^z &= \frac{z_0 - z_2}{l_{20}} \\ &= \frac{z_0 - z_2}{\sqrt{(x_0 - x_2)^2 + (y_0 - y_2)^2 + (z_0 - z_2)^2}} \end{aligned} \quad ; \quad (11)$$

$$\begin{aligned} \cos \beta_{30}^x &= \frac{x_0 - x_3}{l_{30}} \\ &= \frac{x_0 - x_3}{\sqrt{(x_0 - x_3)^2 + (y_0 - y_3)^2 + (z_0 - z_3)^2}} \end{aligned} \quad ; \quad (12)$$

$$\cos \beta_{30}^y = \frac{y_0 - y_3}{l_{30}} = \frac{y_0 - y_3}{\sqrt{(x_0 - x_3)^2 + (y_0 - y_3)^2 + (z_0 - z_3)^2}} ; \quad (13)$$

$$\cos \beta_{30}^z = \frac{z_0 - z_3}{l_{30}} = \frac{z_0 - z_3}{\sqrt{(x_0 - x_3)^2 + (y_0 - y_3)^2 + (z_0 - z_3)^2}} . \quad (14)$$

Рассмотрим взаимодействие весомой нити с узлом в точке 0 на примере каната 10 (рис. 4).

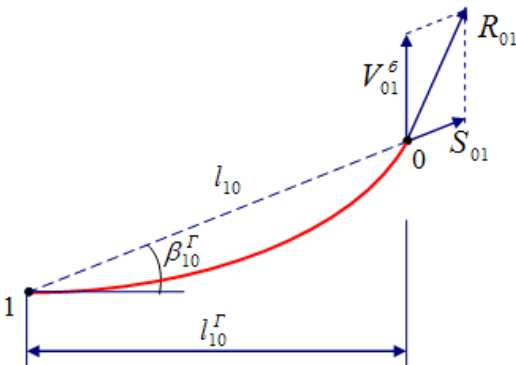


Рис. 4. Взаимодействие весомой нити с узлом в точке 0

На рис. 4 обозначены:

- l_{10}^r – горизонтальная проекция нити;
- β_{10}^r – угол между отрезком 10 и горизонтальной плоскостью $xу$;
- R_{01} – усилие натяжения в канате 10 в точке подвеса 0;
- V_{01}^{σ} , S_{01} – вертикальная и наклонная (под углом β_{10}^r) составляющие усилия R_{01} ;

Найдем:

$$\cos \beta_{10}^r = \frac{l_{10}^r}{l_{10}} = \frac{l_{10}^r}{\sqrt{(x_0 - x_1)^2 + (y_0 - y_1)^2 + (z_0 - z_1)^2}} . \quad (15)$$

В силу предположения о пологости каната 10 его вес Q_{10} можно приближённо считать равномерно распределенным по длине отрезка 10:

$$Q_{10} = l_{10} \cdot g_{10} , \quad (16)$$

где g_{10} – погонный вес каната 10. В этом случае вертикальная составляющая V_{01}^{σ} представляет собой реакцию в балке, нагруженной равномерно распределенной нагрузкой интенсивности

$$q_{10} = \frac{Q_{10}}{l_{10}^r} = \frac{\sqrt{(x_0 - x_1)^2 + (y_0 - y_1)^2 + (z_0 - z_1)^2}}{\sqrt{(x_0 - x_1)^2 + (y_0 - y_1)^2}} \cdot g_{10} , \quad (17)$$

равную (рис. 4)

$$V_{10}^{\sigma} = V_{01}^{\sigma} = \frac{1}{2} \cdot q_{10} \cdot l_{10}^r = \frac{Q_{10}}{2} = \frac{l_{10} \cdot g_{10}}{2} \quad (18)$$

или

$$V_{01}^{\sigma} = V_{10}^{\sigma} = \frac{\sqrt{(x_0 - x_1)^2 + (y_0 - y_1)^2 + (z_0 - z_1)^2}}{2} \cdot g_{10} . \quad (19)$$

Со стороны каната 10 на узел 0 будут действовать: вертикальная составляющая V_{01}^{σ} , направленная вниз; наклонная составляющая S_{01} , направленная от узла 0 к узлу 1 (рис. 5).

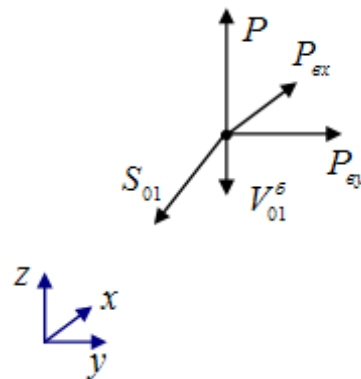


Рис. 5. Схема распределения нагрузок

Со стороны канатов 20, 30 на узел 0 будут действовать вертикальные $V_{02}^{\delta}, V_{03}^{\delta}$ и наклонные S_{02}, S_{03} составляющие усилий натяжения R_{02}, R_{03} канатов 20, 30. При этом:

$$V_{20}^{\delta} = V_{02}^{\delta} = \frac{1}{2} \cdot q_{20} \cdot l_{20}^r = \frac{Q_{20}}{2} = \frac{l_{20} \cdot g_{20}}{2} = \frac{\sqrt{(x_0 - x_2)^2 + (y_0 - y_2)^2 + (z_0 - z_2)^2}}{2} \cdot g_{20}, \quad (20)$$

$$V_{30}^{\delta} = V_{03}^{\delta} = \frac{1}{2} \cdot q_{30} \cdot l_{30}^r = \frac{Q_{30}}{2} = \frac{l_{30} \cdot g_{30}}{2} = \frac{\sqrt{(x_0 - x_3)^2 + (y_0 - y_3)^2 + (z_0 - z_3)^2}}{2} \cdot g_{30}, \quad (21)$$

где g_{20}, g_{30} – погонный вес канатов 20, 30.

Неизвестными остаются усилия S_{01}, S_{02}, S_{03} . Для определения названных усилий вырежем узел 0 и спроектируем все силы на оси x, y, z , потребовав, тем самым, выполнение условий равновесия узла 0:

$$\begin{cases} \cos \beta_{10}^x \cdot S_{01} + \cos \beta_{20}^x \cdot S_{02} + \cos \beta_{30}^x \cdot S_{03} = P_{ax}; \\ \cos \beta_{10}^y \cdot S_{01} + \cos \beta_{20}^y \cdot S_{02} + \cos \beta_{30}^y \cdot S_{03} = P_{ay}; \\ \cos \beta_{10}^z \cdot S_{01} + \cos \beta_{20}^z \cdot S_{02} + \cos \beta_{30}^z \cdot S_{03} = P - V_{10}^{\delta} - V_{20}^{\delta} - V_{30}^{\delta}. \end{cases} \quad (22)$$

В результате имеем систему трех уравнений (22) относительно трех неизвестных S_{01}, S_{02}, S_{03} . Решение этой системы уравнений имеет вид:

$$\begin{aligned} S_{01} &= \frac{1}{\Delta} \left[P(-\cos \beta_{30}^y \cdot \cos \beta_{20}^x + \cos \beta_{30}^x \cdot \cos \beta_{20}^y) + \right. \\ &\quad + P_{ax} (\cos \beta_{30}^y \cdot \cos \beta_{20}^z - \cos \beta_{30}^z \cdot \cos \beta_{20}^y) + \\ &\quad \left. + P_{ay} (\cos \beta_{30}^z \cdot \cos \beta_{20}^x - \cos \beta_{30}^x \cdot \cos \beta_{20}^z) \right]; \\ S_{02} &= \frac{1}{\Delta} \left[P(-\cos \beta_{10}^y \cdot \cos \beta_{30}^x + \cos \beta_{10}^x \cdot \cos \beta_{30}^y) + \right. \\ &\quad + P_{ax} (\cos \beta_{10}^y \cdot \cos \beta_{30}^z - \cos \beta_{10}^z \cdot \cos \beta_{30}^y) + \\ &\quad \left. + P_{ay} (-\cos \beta_{10}^z \cdot \cos \beta_{30}^x + \cos \beta_{10}^x \cdot \cos \beta_{30}^z) \right]; \\ S_{03} &= \frac{1}{\Delta} \left[P(\cos \beta_{20}^x \cdot \cos \beta_{10}^y - \cos \beta_{20}^y \cdot \cos \beta_{10}^x) + \right. \\ &\quad + P_{ax} (-\cos \beta_{20}^z \cdot \cos \beta_{10}^y + \cos \beta_{20}^y \cdot \cos \beta_{10}^z) + \\ &\quad \left. + P_{ay} (-\cos \beta_{20}^x \cdot \cos \beta_{10}^z + \cos \beta_{20}^z \cdot \cos \beta_{10}^x) \right], \end{aligned} \quad (23)$$

где

$$\begin{aligned} \Delta &= \cos \beta_{10}^x \cdot \cos \beta_{20}^z \cdot \cos \beta_{30}^y + \\ &\quad + \cos \beta_{10}^y \cdot \cos \beta_{20}^x \cdot \cos \beta_{30}^z + \\ &\quad + \cos \beta_{10}^z \cdot \cos \beta_{20}^y \cdot \cos \beta_{30}^x - \\ &\quad - \cos \beta_{10}^z \cdot \cos \beta_{20}^x \cdot \cos \beta_{30}^y - \\ &\quad - \cos \beta_{10}^x \cdot \cos \beta_{20}^y \cdot \cos \beta_{30}^z - \\ &\quad - \cos \beta_{10}^y \cdot \cos \beta_{20}^z \cdot \cos \beta_{30}^x. \end{aligned}$$

В результате расчёта для нити 10 имеем ситуацию, изображенную на рис. 6.

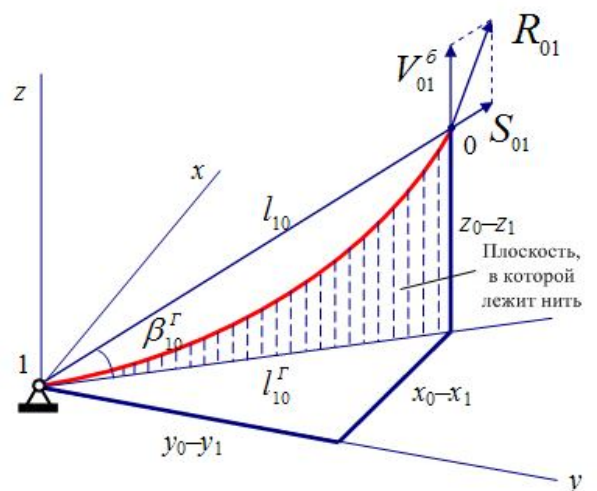


Рис. 6. Расчетная схема для определения вертикальных и горизонтальных нагрузок

Рассмотрим подробнее плоскость $z\xi$ – плоскость, в которой лежит нить 10. Определим вертикальную и горизонтальную составляющие реакции R_{01} (рис. 7):

Распор:

$$H_{01} = S_{01} \cdot \cos \beta_{10}^r, \quad (24)$$

Вертикальная составляющая:

$$V_{01} = V_{01}^{\delta} + S_{01} \cdot \sin \beta_{01}^r. \quad (25)$$

Сила натяжения каната 10 в точке подвеса 0, таким образом, будет:

$$\begin{aligned} R_{01} &= \sqrt{H_{01}^2 + V_{01}^2} = \\ &= \sqrt{S_{01}^2 \cdot \cos^2 \beta_{10}^r + (V_{01}^{\delta} + S_{01} \cdot \sin \beta_{01}^r)^2} = \\ &= \sqrt{S_{01}^2 \cdot \cos^2 \beta_{10}^r + (V_{01}^{\delta})^2 + 2S_{01}V_{01}^{\delta} \sin \beta_{01}^r + S_{01}^2 \cdot \sin^2 \beta_{10}^r} = \\ &= \sqrt{S_{01}^2 + (V_{01}^{\delta})^2 + 2S_{01}V_{01}^{\delta} \sin \beta_{01}^r}. \end{aligned} \quad (26)$$

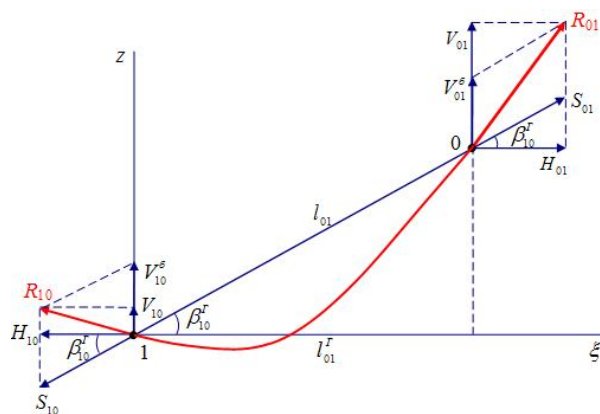


Рис. 7. Основная расчетная схема для определения составляющих нагрузок

Рассмотрим далее точку 1 и определим вертикальную и горизонтальную составляющие опорной реакции:

Распор:

$$H_{10} = H_{01} = S_{01} \cdot \cos \beta_{10}^r, \quad (27)$$

Вертикальная составляющая

$$V_{10} = V_{10}^{\delta} - S_{01} \cdot \sin \beta_{10}^r. \quad (28)$$

Тогда сила натяжения каната 10 в точке 1

$$\begin{aligned} R_{10} &= \sqrt{H_{10}^2 + V_{10}^2} = \\ &= \sqrt{S_{01}^2 \cdot \cos^2 \beta_{10}^r + (V_{10}^{\delta} - S_{01} \cdot \sin \beta_{10}^r)^2} = \\ &= \sqrt{S_{01}^2 + (V_{10}^{\delta})^2 - 2S_{01}V_{10}^{\delta} \sin \beta_{10}^r}. \end{aligned} \quad (29)$$

Отметим, что $R_{10} < R_{01}$.

Для канатов 20, 30 аналогично получаем:

$$\begin{aligned} R_{02} &= \sqrt{H_{02}^2 + V_{02}^2} = \\ &= \sqrt{S_{02}^2 \cdot \cos^2 \beta_{20}^r + (V_{02}^{\delta} + S_{02} \cdot \sin \beta_{20}^r)^2} = \\ &= \sqrt{S_{02}^2 + (V_{02}^{\delta})^2 + 2S_{02}V_{02}^{\delta} \sin \beta_{20}^r}, \end{aligned} \quad (30)$$

$$\begin{aligned} R_{20} &= \sqrt{H_{20}^2 + V_{20}^2} = \\ &= \sqrt{S_{02}^2 \cdot \cos^2 \beta_{20}^r + (V_{20}^{\delta} - S_{20} \cdot \sin \beta_{20}^r)^2} = \\ &= \sqrt{S_{20}^2 + (V_{20}^{\delta})^2 - 2S_{20}V_{20}^{\delta} \sin \beta_{20}^r}, \end{aligned}$$

(31)

$$\begin{aligned} R_{03} &= \sqrt{H_{03}^2 + V_{03}^2} = \\ &= \sqrt{S_{03}^2 \cdot \cos^2 \beta_{30}^r + (V_{03}^{\delta} + S_{03} \cdot \sin \beta_{30}^r)^2} = \\ &= \sqrt{S_{03}^2 + (V_{03}^{\delta})^2 + 2S_{03}V_{03}^{\delta} \sin \beta_{30}^r}, \end{aligned} \quad (32)$$

$$\begin{aligned} R_{30} &= \sqrt{H_{30}^2 + V_{30}^2} = \\ &= \sqrt{S_{03}^2 \cdot \cos^2 \beta_{30}^r + (V_{30}^{\delta} - S_{30} \cdot \sin \beta_{30}^r)^2} = \\ &= \sqrt{S_{30}^2 + (V_{30}^{\delta})^2 - 2S_{30}V_{30}^{\delta} \sin \beta_{30}^r}. \end{aligned} \quad (33)$$

Определим далее в опоре 1 составляющие реакции R_{1x}, R_{1y}, R_{1z} . Ясно, что:

$$R_{1z} = V_{10}, \quad (34)$$

$$R_{1y} = -S_{01} \cdot \cos \beta_{10}^y, \quad (35)$$

$$R_{1x} = -S_{01} \cdot \cos \beta_{10}^x. \quad (36)$$

Для опор 2, 3 формулы аналогичны:

$$V_{20} = V_{20}^{\delta} - S_{02} \cdot \sin \beta_{20}^r. \quad (37)$$

$$R_{2z} = V_{20}, \quad (38)$$

$$R_{2y} = -S_{02} \cdot \cos \beta_{20}^y, \quad (39)$$

$$R_{2x} = -S_{02} \cdot \cos \beta_{20}^x, \quad (40)$$

$$V_{30} = V_{30}^{\sigma} - S_{03} \cdot \sin \beta_{30}^r. \quad (41)$$

$$R_{3z} = V_{30}, \quad (42)$$

$$R_{3y} = -S_{30} \cdot \cos \beta_{30}^y, \quad (43)$$

$$R_{3x} = -S_{30} \cdot \cos \beta_{30}^x. \quad (44)$$

Перейдем далее к определению провисания нити.

При известном распоре $H_{01} = H_{10}$ для пологой нити 10 функция провеса $Y_{10}(\xi)$ (отсчитывается от прямой, соединяющей опору 1 и точку подвеса 0) определяется по формуле:

$$Y_{10}(\xi) = \frac{M_{10}^{\sigma}(\xi)}{H_{01}}, \quad (45)$$

где

$$M_{10}^{\sigma}(\xi) = V_{01}^{\sigma}(l_{10}^r - \xi) - q_{10} \frac{(l_{10}^r - \xi)^2}{2}. \quad (46)$$

– функция изгибающего момента в балке пролетом l_{10}^r , загруженной равномерно распределенной нагрузкой интенсивности q_{10} .

Для канатов 20 и 30 формулы аналогичны:

$$Y_{20}(\xi) = \frac{M_{20}^{\sigma}(\xi)}{H_{02}}, \quad (47)$$

$$M_{20}^{\sigma}(\xi) = V_{02}^{\sigma}(l_{20}^r - \xi) - q_{20} \frac{(l_{20}^r - \xi)^2}{2}, \quad (48)$$

$$Y_{30}(\xi) = \frac{M_{30}^{\sigma}(\xi)}{H_{03}}, \quad (49)$$

$$M_{30}^{\sigma}(\xi) = V_{03}^{\sigma}(l_{30}^r - \xi) - q_{30} \frac{(l_{30}^r - \xi)^2}{2}. \quad (50)$$

Продольные усилия в нитях.

Ясно, что максимальные продольные усилия в нитях будут возникать в точке 0 и будут равны силам натяжения R_{01}, R_{02}, R_{03} .

В силу предположения о пологости нитей, в первом приближении можно считать опору продольных сил линейной. Аналогично для нитей 20, 30.

Исследуем далее зависимость величины натяжения канатов от высоты H рельефа над уровнем моря и температуры t окружающего воздуха. В силу линейности задачи, силу натяжения канатов можно представить в виде:

$$R_{0i} = -\bar{R}_{0i}^q \cdot q_{i0} + \bar{R}_{0i}^p \cdot P + \bar{R}_{0i}^{ex} \cdot P_{ex} + \bar{R}_{0i}^{ey} \cdot P_{ey}, \quad (51)$$

$$R_{i0} = -\bar{R}_{i0}^q \cdot q_{i0} + \bar{R}_{i0}^p \cdot P + \bar{R}_{i0}^{ex} \cdot P_{ex} + \bar{R}_{i0}^{ey} \cdot P_{ey}, \quad (52)$$

$$(i=1, 2, 3)$$

где \bar{R}_{i0}^q – сила натяжения каната $i0$ в сечении у лебёдки от веса погонного метра каната $\bar{q}_{i0} = 1$;

\bar{R}_{0i}^q – сила натяжения каната $i0$ в сечении у точки подвеса от веса погонного метра каната $\bar{q}_{i0} = 1$;

\bar{R}_{i0}^p – сила натяжения каната $i0$ в сечении у лебёдки от подъёмной силы $\bar{P} = 1$;

\bar{R}_{0i}^p – сила натяжения каната $i0$ в сечении у точки подвеса от подъёмной силы $\bar{P} = 1$;

\bar{R}_{i0}^{bx} – сила натяжения каната $i0$ в сечении у лебёдки от единичной горизонтальной ветровой нагрузки $\bar{P}_{ex} = 1$, направленной вдоль оси x ;

\bar{R}_{0i}^{bx} – сила натяжения каната $i0$ в сечении у точки подвеса от единичной горизонтальной ветровой нагрузки $\bar{P}_{ex} = 1$, направленной вдоль оси x ;

\bar{R}_{i0}^{by} – сила натяжения каната $i0$ в сечении у лебёдки от единичной горизон-

тальной ветровой нагрузки $\bar{P}_{by} = 1$, направленной вдоль оси y ;

\bar{R}_{oi}^{by} – сила натяжения каната $i0$ в сечении у точки подвеса от единичной горизонтальной ветровой нагрузки $\bar{P}_{by} = 1$, направленной вдоль оси y ;

Алгоритм расчета:

1. Полагаем $P = 0$, $P_g = 0$, $q_{i0} = \bar{q}_{i0} = 1$. По формулам (26)-(33) находим \bar{R}_{i0}^q , \bar{R}_{oi}^q ;

2. Полагаем $P = \bar{P} = 1$, $P_g = 0$, $q_{i0} = 0$. По формулам (26)-(33) находим \bar{R}_{i0}^p , \bar{R}_{oi}^p ;

3. Полагаем $P = 0$, $P_g = \bar{P}_{ex} = 1$, $q_{i0} = 0$ и по формулам (26)-(33) находим \bar{R}_{i0}^{ex} , \bar{R}_{oi}^{ex} ;

4. Полагаем $P = 0$, $P_g = \bar{P}_{ey} = 1$, $q_{i0} = 0$ и по формулам (26)-(33) находим \bar{R}_{i0}^{ey} , \bar{R}_{oi}^{ey} ;

5. Определяем усилия натяжения канатов по формулам (51), (52).

Результаты расчета по первым четырем пунктам алгоритма можно представить в виде матрицы влияния усилий натяжения канатов

$$[\Lambda] = \begin{bmatrix} \bar{R}_{01}^q & \bar{R}_{01}^p & \bar{R}_{01}^{ex} & \bar{R}_{01}^{ey} \\ \bar{R}_{10}^q & \bar{R}_{10}^p & \bar{R}_{10}^{ex} & \bar{R}_{10}^{ey} \\ \bar{R}_{02}^q & \bar{R}_{02}^p & \bar{R}_{02}^{ex} & \bar{R}_{02}^{ey} \\ \bar{R}_{20}^q & \bar{R}_{20}^p & \bar{R}_{20}^{ex} & \bar{R}_{20}^{ey} \\ \bar{R}_{03}^q & \bar{R}_{03}^p & \bar{R}_{03}^{ex} & \bar{R}_{03}^{ey} \\ \bar{R}_{30}^q & \bar{R}_{30}^p & \bar{R}_{30}^{ex} & \bar{R}_{30}^{ey} \end{bmatrix}. \quad (53)$$

Тогда п. 5 алгоритма можно записать в матричном виде:

$$\bar{R} = [\Lambda]\bar{P}, \quad (54)$$

где $\bar{R} = \{R_{01} \ R_{10} \ R_{02} \ R_{20} \ R_{03} \ R_{30}\}^T$ – вектор усилий в канатах;

$\bar{P} = \{q_{i0} \ P \ P_{ex} \ P_{ey}\}^T$ – вектор нагрузок.

Исследуем далее изменение усилий натяжения канатов при нахождении точки подвеса 0 над любой точкой плоского треугольника, имеющего своими вершинами точки 1, 2, 3. Таким образом, рельеф местности в пределах оговоренного треугольника аппроксимируется плоскостью. Координата z_0 точки подвеса определяется как:

$$z_0 = h_0 + h, \quad (55)$$

где h_0 – координата z точки плоского треугольника 123 под точкой подвеса, h – высота подвески (рис. 8).

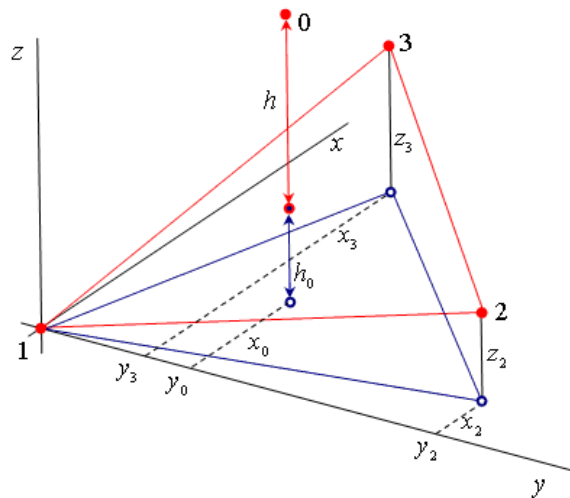


Рис. 8. Расчетная схема для определения усилий при нахождении точки подвеса 0 на любой точкой рабочего контура

Высота подвески h последовательно пробегает значения 50, 100, 150, 200, 250 м. Для задания положения точки подвески в плоскости xu оказалось удобным использовать L -координаты (рис. 9). При

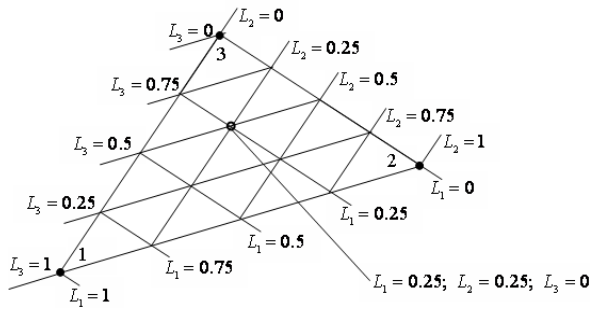


Рис. 9. Относительная система координат

этом координаты x_0, y_0 точки подвеса определяются по формулам

$$x_0 = L_1 x_1 + L_2 x_2 + L_3 x_3, \quad (56)$$

$$y_0 = L_1 y_1 + L_2 y_2 + L_3 y_3. \quad (57)$$

В представляемых ниже результатах координаты L_1, L_2 пробегали значения от 0 до 1 с шагом 0.125. При этом $L_1 + L_2 + L_3 = 1$.

По результатам расчетов можно сделать следующие выводы.

Экстремальные значения усилий в канатах возникают при перемещении точки подвеса по периметру треугольника с вершинами 1, 2, 3. При достаточно большой высоте подвеса максимальные усилия в канатах возникают при расположении точки подвеса над вершинами указанного треугольника. При уменьшении высоты подвеса положение точки подвеса, обеспечивающей возникновение экстремальных усилий в канатах, оказывается на сторонах треугольника. При перемещении точки подвеса по стороне ij ($i, j=1, 2, 3, i \neq j$) возникают усилия только в канатах $i0, j0$. Усилие в третьем канате $k0$ ($k=1, 2, 3, k \neq i, j$) равно нулю – нулевой стержень, не лежащий в плоской системе сил (рис. 10).

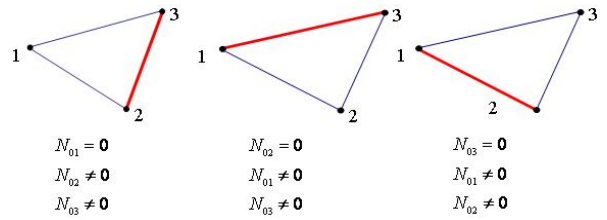


Рис. 10. Схема для алгоритма по определению максимального усилия

Следовательно, алгоритм определения максимального значения усилия в канате состоит в определении максимальных усилий при перемещении точки подвеса по периметру треугольника. Поэтому для расчёта канатов надо рассмотреть три случая перемещения точки подвеса вдоль сторон треугольника 123.

Рассмотрим движение точки подвеса вдоль каждой из сторон в общем виде. Пусть точка подвеса 0 находится над стороной ij треугольника 123. Известными величинами являются координаты x_i, y_i, z_i точки i , координаты x_j, y_j, z_j точки j и высота подвески h (рис. 11).

$$\operatorname{tg} \alpha_{ij} = \frac{h_{ij}}{l_{ij}}; \quad h_0 = \frac{h_{ij}}{l_{ij}} \xi_0 = \xi_0 \operatorname{tg} \alpha_{ij}; \quad (58)$$

$$h + h_0 = h + \xi_0 \operatorname{tg} \alpha_{ij};$$

$$l_{i0} = \sqrt{\xi_0^2 + (h + h_0)^2} = \sqrt{\xi_0^2 + \left(h + \xi_0 \frac{h_{ij}}{l_{ij}} \right)^2} = \sqrt{\xi_0^2 + (h + \xi_0 \operatorname{tg} \alpha_{ij})^2}, \quad (59)$$

$$l_{j0} = \sqrt{(l_{ij} - \xi_0)^2 + (h + h_0 - h_{ij})^2} = \sqrt{(l_{ij} - \xi_0)^2 + (h + \xi_0 \operatorname{tg} \alpha_{ij} - l_{ij} \operatorname{tg} \alpha_{ij})^2} = \sqrt{(l_{ij} - \xi_0)^2 + (h + (\xi_0 - l_{ij}) \operatorname{tg} \alpha_{ij})^2}. \quad (60)$$

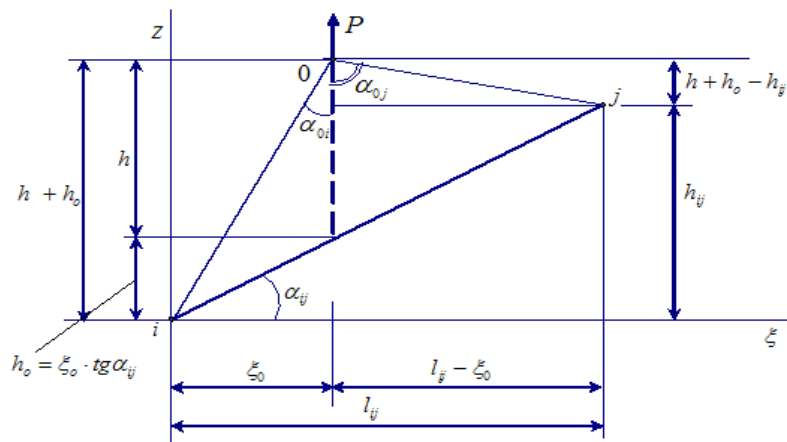
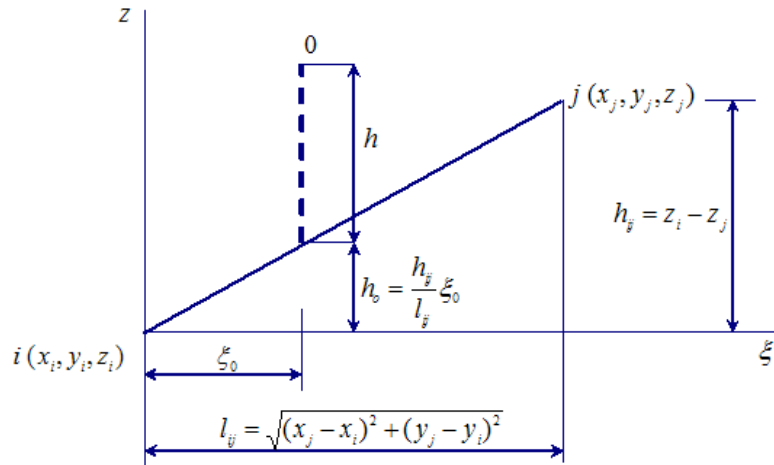


Рис. 11. Расчетная схема при движении аэростата вдоль одной из сторон периметра рабочего контура

$$\cos \alpha_{0i} = \frac{h+h_0}{l_{i0}} = \frac{h+\xi_0 \operatorname{tg} \alpha_{ij}}{l_{i0}}; \quad \sin \alpha_{0i} = \frac{\xi_0}{l_{i0}}; \quad (61)$$

$$\cos \alpha_{0j} = \frac{h+h_0-h_{ij}}{l_{j0}} = \frac{h+(\xi_0-l_{ij}) \cdot \operatorname{tg} \alpha_{ij}}{l_{j0}};$$

$$\sin \alpha_{0j} = \frac{l_{ij}-\xi_0}{l_{j0}}; \quad (62)$$

$$h+h_0-h_{ij} = h+\xi_0 \operatorname{tg} \alpha_{ij} - l_{ij} \operatorname{tg} \alpha_{ij} =$$

$$= h+(\xi_0-l_{ij}) \operatorname{tg} \alpha_{ij}. \quad (63)$$

Рассмотрим сначала для простоты случай без учёта собственного веса канатов и ветровой нагрузки (рис. 12, а). Вырежем узел 0, заменив действие канатов $i0$, $j0$

усилиями S_{0i} , S_{0j} направленными по линиям $i0$, $j0$ соответственно (рис. 12, б).

Запишем уравнения равновесия $\sum F_z = 0$, $\sum F_\xi = 0$ вырезанного узла:

$$\begin{cases} S_{0i} \cos \alpha_{0i} + S_{0j} \cos \alpha_{0j} = P; \\ -S_{0i} \sin \alpha_{0i} + S_{0j} \sin \alpha_{0j} = 0. \end{cases} \quad (64)$$

Решая систему уравнений (64) относительно S_{0i} , S_{0j} , получим:

$$S_{0i} = \frac{\sin \alpha_{0j}}{\Delta} P, \quad (65)$$

$$S_{0j} = \frac{\sin \alpha_{0i}}{\Delta} P, \quad (66)$$

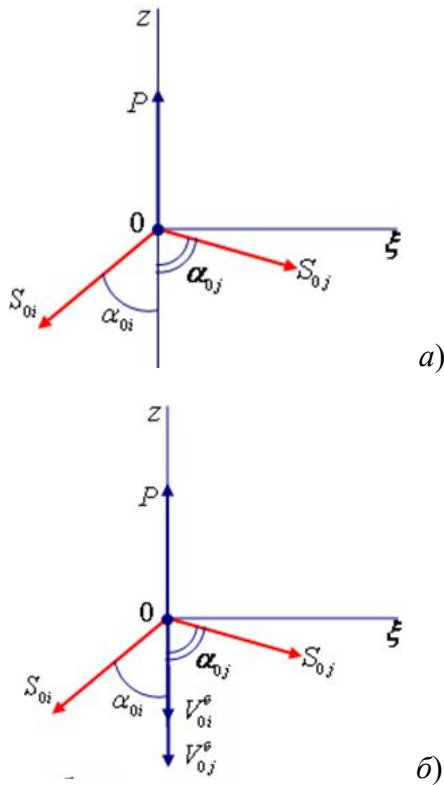


Рис. 12. Расчетная схема усилий без учета собственного веса канатов (а) и с учетом собственного веса канатов (б)

где $\Delta = \sin \alpha_{0j} \cdot \cos \alpha_{0i} + \cos \alpha_{0j} \cdot \sin \alpha_{0i}$. (67)

В рассматриваемом простейшем случае $R_{0i} = R_{i0} = S_{0i}$, $R_{0j} = R_{j0} = S_{0j}$.

Учет собственного веса канатов приводит к следующей системе уравнений (рис. 12, б):

$$\begin{cases} S_{0i} \cos \alpha_{0i} + S_{0j} \cos \alpha_{0j} = P - V_{0i}^{\delta} - V_{0j}^{\delta}; \\ -S_{0i} \sin \alpha_{0i} + S_{0j} \sin \alpha_{0j} = 0. \end{cases} \quad (68)$$

Решая систему уравнений (68) относительно S_{0i} , S_{0j} , получим:

$$S_{0i} = \frac{\sin \alpha_{0j}}{\Delta} (P - V_{0i}^{\delta} - V_{0j}^{\delta}), \quad (69)$$

$$S_{0j} = \frac{\sin \alpha_{0i}}{\Delta} (P - V_{0i}^{\delta} - V_{0j}^{\delta}), \quad (70)$$

где $V_{0i}^{\delta} = \frac{g_{i0} \cdot l_{i0}}{2}$, $V_{0j}^{\delta} = \frac{g_{j0} \cdot l_{j0}}{2}$.

Оценить погрешность, вносимую в расчёт неучётом собственного веса канатов можно по отношению суммы $V_{0i}^{\delta} + V_{0j}^{\delta}$ к величине подъёмной силы. Как правило, такое отношение очень мало. Величины усилий натяжения канатов R_{0i} , R_{i0} , R_{0j} , R_{j0} определяются по формулам:

$$R_{0i} = \sqrt{S_{0i}^2 + (V_{0i}^{\delta})^2 + 2S_{0i}V_{0i}^{\delta} \cos \alpha_{0i}}, \quad (71)$$

$$R_{i0} = \sqrt{S_{0i}^2 + (V_{0i}^{\delta})^2 - 2S_{0i}V_{0i}^{\delta} \cos \alpha_{0i}}, \quad (72)$$

$$R_{0j} = \sqrt{S_{0j}^2 + (V_{0j}^{\delta})^2 + 2S_{0j}V_{0j}^{\delta} \cos \alpha_{0j}}, \quad (73)$$

$$R_{j0} = \sqrt{S_{0j}^2 + (V_{0j}^{\delta})^2 - 2S_{0j}V_{0j}^{\delta} \cos \alpha_{0j}}. \quad (74)$$

Обратимся к рассмотрению совместного действия подъёмной силы и ветровой нагрузки P_e . Из предыдущего ясно, что самая неблагоприятная ветровая нагрузка реализуется в следующей ситуации:

1. точка подвеса находится над одной из сторон треугольника 123 (и тогда работают два каната из трёх);

2. составляющая ветровой нагрузки, перпендикулярная этой стороне, направлена внутрь треугольника (тогда неработающий в отсутствие ветра канат не будет работать и в присутствии ветра в силу невозможности его работать на сжатие).

Ветровую нагрузку P_e следует разложить на две составляющие $P_{e\xi}$ и $P_{e\eta}$ (рис. 13, а). Первая из этих составляющих лежит в плоскости $z\xi$, вторая – направлена вдоль оси η , перпендикулярной плоскости $z\xi$. Причем составляющая ветровой нагрузки $P_{e\eta}$ направлена внутрь треугольника. Итак, следует рассмотреть ситуацию,

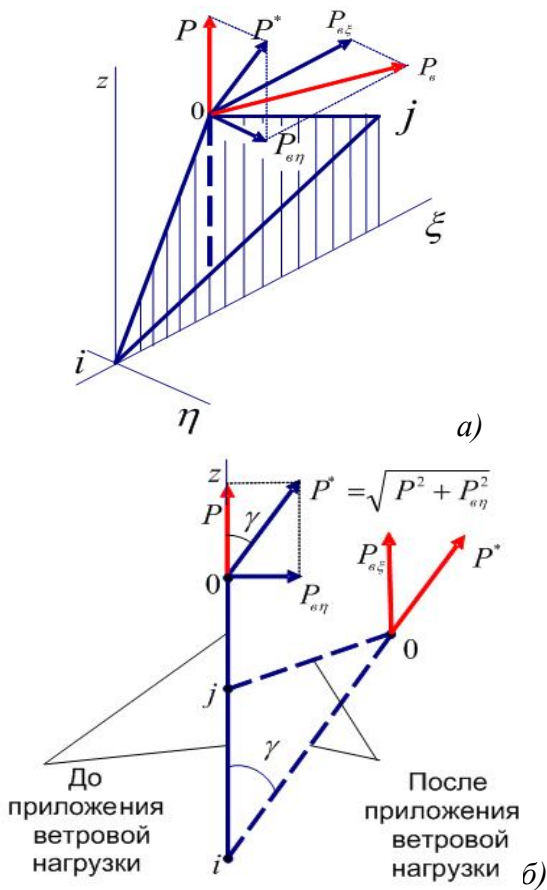


Рис. 13. Расчетная схема при влиянии ветровой нагрузки

когда для системы двух канатов, лежащих в плоскости $z\xi$, появляется составляющая нагрузки $P_{e\eta}$, действующая перпендикулярно этой плоскости. В этом случае рассматриваемая система представляет собой механизм. И этот механизм займёт такое положение, чтобы оказаться в одной плоскости с нагрузкой $P^* = \sqrt{P^2 + P_{e\eta}^2}$, составляющими которой являются подъёмная сила P и составляющая ветровой нагрузки $P_{e\eta}$ (рис. 13, б). В этом случае, задача так же сводится к плоской.

Система уравнений равновесия узла 0 в случае действия ветровой нагрузки примет следующий вид:

$$\begin{cases} S_{0i} \cos \alpha_{0i} + S_{0j} \cos \alpha_{0j} = P^*; \\ -S_{0i} \sin \alpha_{0i} + S_{0j} \sin \alpha_{0j} = P_{e\xi}. \end{cases} \quad (75)$$

В системе уравнений (75) вертикальная составляющая нагрузки равна:

$$P^* = \sqrt{P^2 + P_{e\eta}^2}, \quad (76)$$

Если же не учитывается собственный вес канатов:

$$P^* = \sqrt{(P - V_{0i}^{\delta} - V_{0j}^{\delta})^2 + P_{e\eta}^2}, \quad (77)$$

Если учитывается собственный вес канатов, то решаем систему уравнений (75) и получаем:

$$S_{0i} = \frac{1}{\Delta} (P^* \sin \alpha_{0j} - P_{e\xi} \cos \alpha_{0j}), \quad (78)$$

$$S_{0j} = \frac{1}{\Delta} (P^* \sin \alpha_{0i} + P_{e\xi} \cos \alpha_{0i}), \quad (79)$$

При расчете на ветровую нагрузку необходимо учесть способность канатов работать только на растяжение. То есть, если $S_{0i} < 0$, то следует положить $S_{0i} = 0$ и $S_{0j} = F = \sqrt{(P^*)^2 + P_{e\xi}^2}$ (рис. 14, а). И, наоборот, если $S_{0j} < 0$, то следует положить $S_{0j} = 0$ и $S_{0i} = F = \sqrt{(P^*)^2 + P_{e\xi}^2}$ (рис. 14, б).

Выводы

Предложенная методика расчета позволяет:

1. Достаточно просто определять усилия натяжения тягово-возвратных канатов при нахождении точки подвеса аэростата в любом месте лесозаготовительного участка.

2. Выполнять анализ влияния на усилия в канатах таких факторов, как рельеф местности, подъёмная сила аэростата, величина и направление ветровой нагрузки.

3. Выявлять опасные состояния системы, с учетом длины грузовой подвески, в процессе перемещения аэростата.

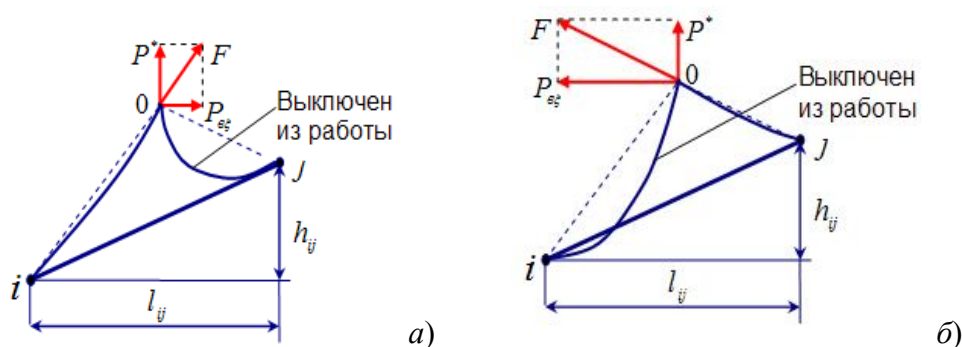


Рис. 14. Расчетная схема при работе одного каната из трех

Библиографический список

1. Абузов, А. В. Технические и конструктивные особенности современной аэростатно-канатной системы для трелевки древесины [Текст] / А. В. Абузов // Лесной вестник. – М. : Изд-во Московского государственного университета леса, 2013. – № 1 (93). – С. 129-132.
2. Ловцов, А. Д. Определение усилий натяжения канатов аэростатных трелевочных систем [Текст] / А. Д. Ловцов, А. В. Абузов // Новые идеи нового века : 7-й международный научный форум ИАС ТОГУ. – Хабаровск : Изд-во ТОГУ, 2007. – С. 466-474.
3. Родионов, В. И. Исследование тяго-удерживающих канатов аэростатно-трелевочной установки [Текст] / В. И. Родионов // Труды ЦНИИМЭ. – 1968. – № 88 – С. 52-64.
4. Родионов, В. И. Статический расчет тягово-удерживающих канатов аэростатно-трелевочной установки (АТУП) [Текст] / В. И. Родионов, В. В. Скобей // Труды ЦНИИМЭ. – 1966. – № 75. – С. 113-126.
5. Сухинин, В. Н. Определение некоторых параметров аэростатной трелевочной установки [Текст] / В. Н. Сухинин // Труды Краснодарского политехнического института. – 1970. – № 22. – С. 85-95.
6. Сухинин, В. Н. Определение основных параметров тягово-удерживающих канатов аэростатно-трелевочной установки [Текст] / В. Н. Сухинин, В. В. Скобей // Лесной журнал. – 1970. – № 5. – С.40-44.

References

1. Abuzov A.V. Technical and design features of modern balloon-cable system for timber skidding [Abuzov A.V. Tehnicheskie i konstruktivnye osobennosti sovremennoj ajerostatno-kanatnoj sistemy dlja trelevki drevesiny]. *Lesnoj vestnik – Forest Gazette*, 2013, no. 1 (93), pp. 129-132. (In Russian).
2. Lovtsov A.D., Abuzov A.V. Determination of efforts of tension of ropes of balloon logging systems [Lovtsov A.D., Abuzov A.V. Opredelenie usilij natjazhenija kanatov ajerostatnyh trelevochnyh sistem. *Novye idei novogo veka : 7-j mezhdunarodnyj nauchnyj forum IAS TOGU*]. New ideas of the new century: the 7th International Scientific Forum IAS PNU, Khabarovsk, 2007, pp. 466-474. (In Russian).
3. Rodionov V.I. Investigation of rod-holding ropes of balloon-skidding installation [Rodionov V.I. Issledovanie tjagouderzhivajushhih kanatov ajerostatno-trelevochnoj ustanovki. *Trudy*

CNIMJe]. Works of TSNIIME, 1968, no. 88, pp. 52-64. (In Russian).

4. Rodionov V.I., Scobey M.M. Static analysis of towing ropes holding balloon-skidding installation (ATUP) [Rodionov V.I., Scobey M.M. Sticheskiy raschet tjagovo-uderzhivajushhih kanatov ajerostatno-trelevochnoj ustanovki (ATUP). *Trudy CNIMJe*]. Works of TSNIIME, 1966, no. 75, pp. 113-126. (In Russian).

5. Sukhinin V.N. Determination of some parameters of balloon logging settings [Sukhinin V.N. Opredelenie nekotoryh parametrov ajerostatnoj trelevochnoj ustanovki]. *Trudy Krasnodarskogo politehnicheskogo instituta – Works of Krasnodar Polytechnic Institute*, 1970, no. 22, pp. 85-95. (In Russian).

6. Sukhinin V.N., Scobey V.V. Determination of the main parameters of towing holding ropes of balloon-skidding setting [Sukhinin V.N., Scobey V.V. Opredelenie osnovnyh parametrov tjagovoderzhivajushhih kanatov ajerostatno-trelevochnoj ustanovki]. *Lesnoj zhurnal – Forest Journal*, 1970, no. 5, pp.40-44. (In Russian).

Сведения об авторах

Абузов Александр Викторович – доцент кафедры технологии заготовки и переработки древесных материалов, «Тихоокеанский государственный университет», кандидат технических наук, г. Хабаровск, Российская Федерация; e-mail: ac-systems@mail.ru.

Information about authors

Abuzov Aleksandr Viktorovich – Associate Professor of the Department Technology Harvesting and Processing Wood Materials of «Pacific State University», PhD in Engineering, Khabarovsk, Russian Federation; e-mail: ac-systems@mail.ru.

DOI: 10.12737/6280

УДК 621.933.2

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ ВЛИЯНИЯ УПЛОТНИТЕЛЬНОЙ КАНАВКИ НА ГРУЗОПОДЪЁМНОСТЬ АЭРОСТАТИЧЕСКИХ ОПОР

кандидат технических наук **М. В. Дербин**¹

кандидат технических наук, доцент **В. М. Дербин**¹

1 – «Северный (Арктический) федеральный университет имени М.В. Ломоносова»,
г. Архангельск, Российская Федерация

Приведены ссылки на теоретические исследования аэростатических опор и методику их расчета для выбора параметров аэростатической направляющей. Представлена схема аэростатической опоры с заданными параметрами, которыми являются ширина и длина. Секция опоры включает замкнутую прямоугольную микроканавку, на серединах продольных сторон которой выполнены отверстия поддува. На схеме аэростатической опоры показаны профили распределительной и уплотнительной канавок, которые использовались при экспериментальных исследованиях. При