



УДК 634.0.372:629.733.34

DOI: 10.37482/0536-1036-2020-2-81-100

## МЕТОДИКА ОПРЕДЕЛЕНИЯ РАЗМЕРОВ ВНЕШНЕГО КОНТУРА ЛЕСОСЕК ПРИ ИХ РАЗРАБОТКЕ АЭРОСТАТНО-КАНАТНЫМИ СИСТЕМАМИ

*А.В. Абузов, д-р техн. наук, проф.; ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-1082-9392>*

*П.Б. Рябухин, д-р техн. наук, проф.; ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-1735-1942>*

Тихоокеанский государственный университет, ул. Тихоокеанская, д. 136, г. Хабаровск, Россия, 680042; e-mail: ac-systems@mail.ru, PРyabukhin@mail.khstu.ru

В настоящее время в лесной отрасли остро встает вопрос внедрения в лесозаготовительный процесс технологий, отвечающих современным экологическим требованиям. К таким технологиям можно отнести воздушный транспорт, в частности аэростатные установки, внедрение которых требует дополнительных исследований в области влияния погодных и ландшафтных условий на процесс эксплуатации. В статье представлены результаты теоретических и практических исследований, направленных на улучшение функционирования аэростатно-канатных систем трелевки при обработке лесных участков различной конфигурации. Установлено, что влияние ветровой нагрузки является основным критическим фактором, который оказывает отрицательное воздействие как на аэростат, так и на тягово-возвратные канаты. Авторами разработаны методика и компьютерная программа для определения размеров внешнего контура эксплуатационного лесного участка, позволяющие устанавливать наземные лебедки или контурные блоки канатной системы на расстояние, обеспечивающее доступ грузозахватного механизма в ранее недоступные точки лесного участка. Результаты работы программы могут быть представлены в табличном и графическом виде, что позволяет манипулировать нагрузками в канатах и одновременно находить габаритные размеры внешних контуров участка. Разработанный алгоритм для определения оптимальных размеров внешнего контура лесозаготовительного участка дает возможность обеспечить распределение нагрузок между тремя тягово-возвратными канатами аэростатно-канатной системы, что повысит управляемость и устойчивость системы в целом, а соответственно, гарантирует доступность грузозахватного механизма в любой точке обрабатываемого лесозаготовительного участка за счет устранения нерабочих зон.

**Для цитирования:** Абузов А.В., Рябухин П.Б. Методика определения размеров внешнего контура лесосек при их разработке аэростатно-канатными системами // Изв. вузов. Лесн. журн. 2020. № 2. С. 81–100. DOI: 10.37482/0536-1036-2020-2-81-100

**Ключевые слова:** аэростатная трелевка, аэростатно-канатная система, натяжение каната, контур лесосеки, периметр лесосеки.

### *Введение*

В ходе проводимых исследований был выполнен анализ опубликованных за предыдущие годы отечественных и зарубежных научно-практических работ в области аэростатных транспортных систем, предназначенных для разработки

лесосек на труднодоступных территориях со сложными технологическими условиями.

Были изучены исследования отечественных авторов (Буткина В.Д., Бойко Ю.С., Гарькуши В.Н., Козловского В.Б., Матвеева Э.Н., Родионова В.И., Стрельникова Д.В., Цветкова А.А., Ярцева И.В. и др.), зарубежных ученых (Brian L. Tuor, Daniel Y. Guimier, Dykstra D.P., Frank Greulich, Robert B. Avery) и отчеты таких организаций, как МПНСУ «Центротехмонтаж», ЦНИИМЭ, Воздухоплавательный центр «Авгурь», ДЦВ «Аэрос», Aerial Crane Systems, Goodyear Aerospace Corp., Skyhook Interprises Ltd., на основании которых определено современное состояние в области научных исследований, посвященных изучению конструктивных и технологических параметров аэростатно-канатных систем (АКС), влияющих на эффективность их применения.

Анализ показал, что большинство работ в данной области морально устарели в силу того, что исследуемые в них АКС в настоящее время не конкурентоспособны по сравнению с современными канатными и наземными видами лесозаготовительного транспорта [4–7, 16–20]. В силу отсутствия в лесозаготовительных операциях прошлых лет таких процессов и механизмов, которые способны проводить воздушную заготовку древесины с вертикальным изъятием древостоя, исследований, связанных с точностью наведения грузозахватного механизма и, соответственно, с его доступностью в определенных точках лесосеки сложной конфигурации, нет.

Так, анализ научных источников [1, 3] показал, что лесозаготовительный процесс с использованием трехлинейной АКС осуществляется на лесосеках, имеющих треугольный контур различной формы. Выявлено, что при транспортировке древесины вдоль периметра рабочего треугольника в тягово-возвратных канатах возникают максимальные усилия, что приводит к небезопасному функционированию системы. Установлено, что в зависимости от направления и силы ветра один или два каната АКС могут быть ослаблены и на определенное время выключены из работы. Это приводит к ситуации, когда грузовая подвеска с грузозахватным механизмом (ГЗМ) смещается от линии периметра рабочего треугольника и становится неуправляемой. Что в свою очередь ведет к образованию недоступной зоны на площади обрабатываемого участка и исключает возможность заготовки леса с использованием ГЗМ.

Соответственно, чтобы обеспечить доступность ГЗМ в любой точке периметра рабочего участка, а также управляемость системы с помощью всех трех канатов, необходимо выполнить смещение наземных лебедок или контурных блоков, располагающихся в углах рабочего треугольника, на оптимальное расстояние, тем самым обозначив внешний контур разрабатываемого лесного участка.

Исходя из перечисленного выше, требуется разработать методику, которая позволит определить размеры недоступной зоны и, соответственно, периметр внешнего контура лесного участка, обеспечив тем самым эффективную эксплуатацию АКС.

#### *Объекты и методы исследования*

Для составления алгоритма методики, позволяющей определить размеры периметра внешнего контура и, соответственно, показатели недоступной зоны, обратимся к исследованиям [2, 8–15], где представлены основные расчетные

схемы и уравнения, с помощью которых можно определить усилия в канатах для любой точки эксплуатируемого участка.

Основная расчетная схема для определения усилий натяжения канатов приведена на рис. 1.

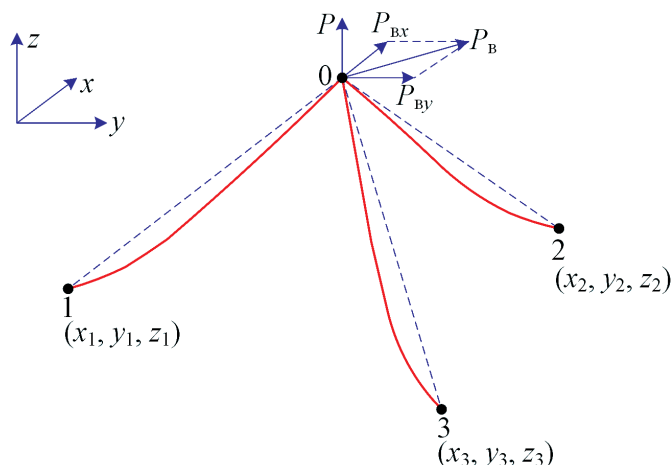


Рис. 1. Основная расчетная схема

Fig. 1. The main calculation scheme

Предполагается, что известны следующие параметры: координаты точек 0, 1, 2, 3; подъемная сила  $P$  и ветровая нагрузка  $P_{\text{в}}$ .

Отрезки (канаты)  $i0$  (т. е. отрезки 10, 20, 30) будем рассматривать как вектор  $\vec{v}_{i0}$  с началом в т.  $i$  и концом в т. 0.

Вектор  $\vec{v}_{i0}$  имеет соответствующие координаты точек 0 и  $i$ :

$$\vec{v}_{i0} = \begin{Bmatrix} |x_0 - x_i \\ |y_0 - y_i \\ |z_0 - z_i \end{Bmatrix}. \quad (1)$$

Длину вектора  $\vec{v}_{i0}$  определим как

$$l_{i0} = \sqrt{\vec{v}_{i0}^T \vec{v}_{i0}}. \quad (2)$$

Направляющие косинусы вектора  $\vec{v}_{i0}$ :

$$\vec{c}_{i0} = \frac{1}{l_{i0}} \vec{v}_{i0}, \quad (3)$$

Компонентами вектора  $\vec{c}_{i0}$  также являются косинусы углов  $\beta_{i0}^x$ ,  $\beta_{i0}^y$ ,  $\beta_{i0}^z$  (это соответственно углы между прямой  $i0$  и осями  $x$ ,  $y$ ,  $z$ ).

Для определения усилий рассмотрим отдельно узел 0. При этом спроектируем все силы на оси  $x$ ,  $y$ ,  $z$ , обозначив выполнение условий равновесия узла 0:

$$[C]\vec{S} = \vec{P}, \quad (4)$$

где  $[C] = [\vec{c}_{10} \ \vec{c}_{20} \ \vec{c}_{30}]$  – матрица направляющих косинусов;

$$\vec{S}^T = \{S_{01} \ S_{02} \ S_{03}\};$$

$$\vec{P}^T = \left\{ P_{\text{вх}} \quad P_{\text{вы}} \quad P - \sum_i V_{i0}^6 \right\}, \quad (5)$$

$\vec{S}$  – наклонная составляющая усилий;  $\vec{P}$  – подъемная сила аэростата;  $V_{i0}^6$  – составляющая для нагрузки  $V_{0i}$ .

В итоге будем иметь систему трех уравнений относительно трех неизвестных  $S_{01}$ ,  $S_{02}$ ,  $S_{03}$ , при решении которой получим соответствующие усилия.

В результате расчета [2] усилий для нити  $i0$  создается ситуация, изображенная на рис. 2.

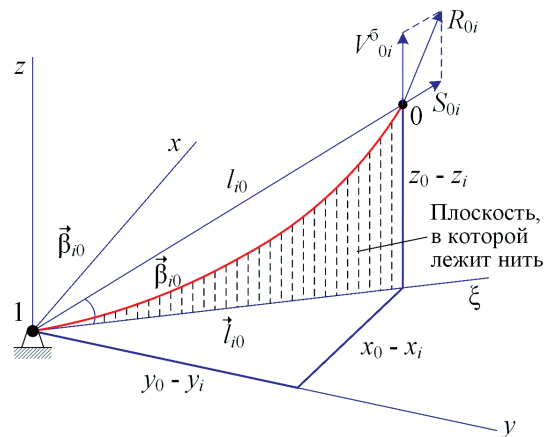


Рис. 2. Общая расчетная схема для определения вертикальной и горизонтальной составляющих реакции  $R_{0i}$

Fig. 2. General calculation scheme for determination of the vertical and horizontal parts of the reaction  $R_{0i}$

Рассмотрим плоскость  $z\xi$ , в которой находится нить  $i0$ .

Определим вертикальную  $V_{0i}$  и горизонтальную  $H_{0i}$  составляющие реакции  $R_{0i}$  в точке подвеса, используя схему, представленную на рис. 3.

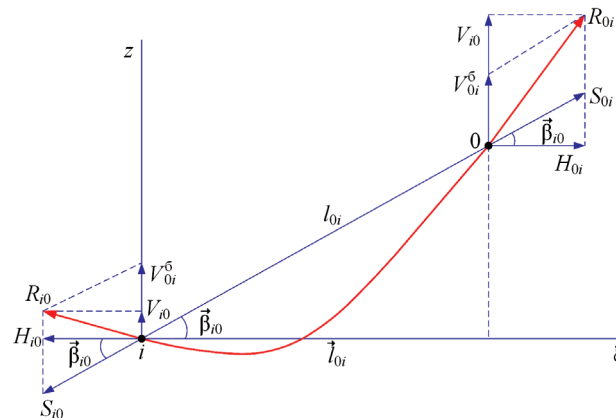


Рис. 3. Подробная расчетная схема для определения вертикальной  $V_{0i}$  и горизонтальной  $H_{0i}$  составляющих реакции  $R_{0i}$

Fig. 3. Detailed calculation scheme for determination of the vertical  $V_{0i}$  and horizontal parts  $H_{0i}$  of the reaction  $R_{0i}$

Горизонтальная и вертикальная составляющие нагрузки, образованной реакцией  $R_{0i}$ :

$$H_{0i} = S_{0i} \cos \bar{\beta}_{i0}; \quad (6)$$

$$V_{0i} = V_{0i}^6 + S_{0i} \sin \bar{\beta}_{i0}. \quad (7)$$

Соответственно, сила натяжения каната  $i0$  в точке подвеса – т. 0:

$$\begin{aligned} R_{0i} &= \sqrt{H_{0i}^2 + V_{0i}^2} = \sqrt{S_{0i}^2 \cos^2 \bar{\beta}_{i0} + (V_{0i}^6 + S_{0i} \sin \bar{\beta}_{i0})^2} = \\ &= \sqrt{S_{0i}^2 \cos^2 \bar{\beta}_{i0} + (V_{0i}^6)^2 + 2S_{0i}V_{0i}^6 \sin \bar{\beta}_{i0} + S_{0i}^2 \sin^2 \bar{\beta}_{i0}} = \\ &= \sqrt{S_{0i}^2 + (V_{0i}^6)^2 + 2S_{0i}V_{0i}^6 \sin \bar{\beta}_{i0}}. \end{aligned} \quad (8)$$

### Результаты исследования и их обсуждение

Дальнейшие расчеты по определению усилий в канатах АКС в различных точках рабочего участка проведем согласно следующему алгоритму.

1. По заданным координатам точек 0, 1, 2, 3 найдем геометрические параметры системы:

$$\text{векторы } \vec{v}_{i0} = \begin{Bmatrix} |x_0 - x_i| \\ |y_0 - y_i| \\ |z_0 - z_i| \end{Bmatrix}, \text{ соединяющие точки } i = 1, 2, 3 \text{ с т. } 0;$$

$$\text{длины } l_{i0} = \sqrt{\vec{v}_{i0}^T \vec{v}_{i0}};$$

$$\text{направляющие косинусы } \vec{c}_{i0} = \frac{1}{l_{i0}} \vec{v}_{i0} \text{ этих векторов к осям } x, y, z;$$

$$\text{проекции длин } \vec{l}_{i0} = \sqrt{(x_0 - x_i)^2 + (y_0 - y_i)^2} \text{ на горизонтальную плоскость;}$$

$$\text{направляющие косинусы } \cos \bar{\beta}_{i0} = \frac{\vec{l}_{i0}}{l_{i0}} \text{ к горизонтальной плоскости.}$$

2. Сформируем грузовой вектор:

$$\vec{P}^T = \left\{ P_{\text{вх}} \quad P_{\text{вy}} \quad P - \sum_i V_{i0}^6 \right\},$$

где  $P_{\text{вх}} = P_x \cos \theta_x$ ;  $P_{\text{вy}} = P_y \sin \theta_y$ ;  $\theta$  – угол между направлением ветровой нагрузки

и осью;  $V_{i0}^6 = \frac{l_{i0} g_{i0}}{2}$ .

3. Сформируем систему уравнений (4):  $[\vec{c}_{10} \quad \vec{c}_{20} \quad \vec{c}_{30}] \vec{S} = \vec{P}$ , решая которую, найдем  $\vec{S}^T = \{S_{01} \quad S_{02} \quad S_{03}\}$ .

4. Если все  $S_{i0} \geq 0$  (все канаты растянуты или, по крайней мере, не сжаты), то определим  $R_{0i}$  по формуле (8):

$$R_{0i} = \sqrt{S_{0i}^2 + (V_{0i}^6)^2 + 2S_{0i}V_{0i}^6 \sin \bar{\beta}_{i0}}.$$

Если в узле 0 действует только подъемная сила  $P$  и при этом точка подвеса находится внутри треугольника 123, то усилия во всех канатах будут растягивающими.

Согласно проведенным исследованиям [2, 3], 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 положение точки подвеса, обеспечивающей возникновение экстремальных усилий в канатах, оказывается на сторонах треугольника.

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

Для удобства расчета примем обозначения для любой из сторон периметра треугольника  $ij$ . Тогда в случае движения точки подвеса по стороне  $ij$  ( $i, j = 1, 2, 3, i \neq j$ ) будут возникать усилия только в двух канатах  $i0, j0$ . При этом усилие в третьем канате  $k0$  ( $k = 1, 2, 3, k \neq i, j$ ) будет равно нулю. На рис. 4 показаны «рабочие» плоскости, в которых лежит система сил  $P, S_{0i} \geq 0, S_{0j} \geq 0$ . Эти плоскости выделены красным цветом.

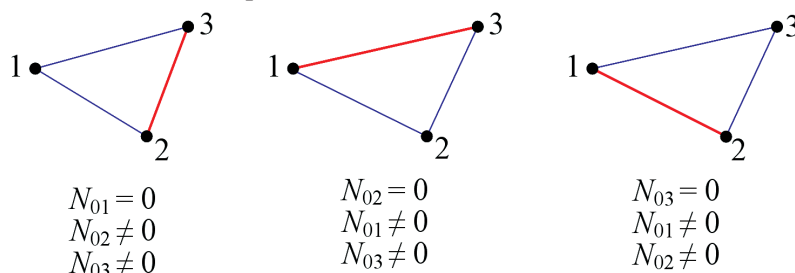


Рис. 4. Рабочие плоскости при перемещении точки подвеса по периметру треугольника 123 ( $N$  – номер каната, который не работает)

Fig. 4. Working plains when moving the suspension point along the perimeter of triangle 123 ( $N$  – no. of the cable that doesn't work)

При расположении точки подвеса над т.  $i$  усилия  $S_{0i} = P$ ;  $S_{0j} = S_{0k} = 0$ .

5. Если одно из усилий  $S_{0i} < 0$ , то следует учесть неспособность каната работать на сжатие (выключение связи из работы). Отметим, что выключение связи возможно только при ветровой нагрузке  $P_v$ .

Рассмотрим случай одновременного действия подъемной силы  $P$  и ветровой нагрузки  $P_v$ . Отметим, что самая критическая ситуация от ветровой нагрузки реализуется в следующих случаях:

- а) точка подвеса находится над одной из сторон треугольника 123 (в данном случае будут работать только два каната из трех);
- б) ветровая нагрузка направлена внутрь треугольника (в данном случае канат, не работающий при отсутствии ветра, не будет работать и при его наличии в силу своей неспособности воспринять сжимающее усилие).

В такой ситуации рассматриваемая система представляет собой механизм, который, повернувшись относительно прямой  $ij$ , окажется в одной плоскости с силой  $P^*$  (рис. 5).

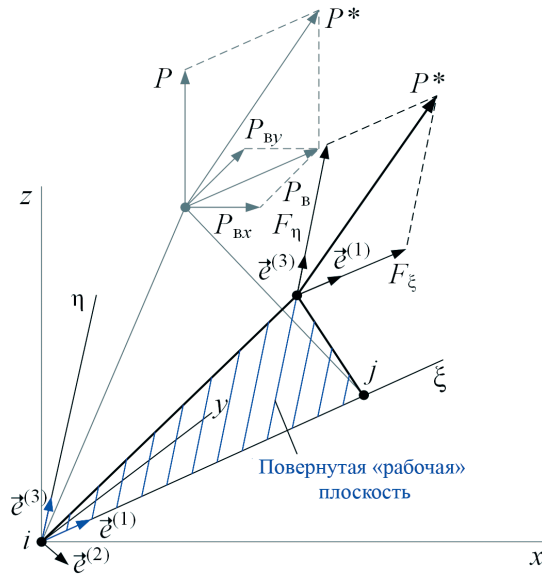


Рис. 5. Расчетная схема для определения силы  $P^*$  в смещенном положении  
 Fig. 5. Calculation scheme for determining force  $P^*$  in a shifted position

На рис. 5 отражены: рабочая плоскость  $\xi\eta$  и компоненты грузового вектора, где орт  $\vec{e}^{(2)}$  перпендикулярен рабочей плоскости, а орты  $\vec{e}^{(1)}$  и  $\vec{e}^{(3)}$  лежат в рабочей плоскости.

Исходя из расчетной схемы определим силу  $P^*$ :

$$P^* = \sqrt{\left(P - \sum_i V_{i0}^6\right)^2 + P_B^2} = \sqrt{\left(P - \sum_i V_{i0}^6\right)^2 + P_{Bx}^2 + P_{By}^2}. \tag{9}$$

Для определения компонентов силы  $P^*$ , действующих в указанной (рабочей) плоскости, осуществим следующую последовательность действий.

1. Выпишем компоненты первого орта повернутой системы координат как компоненты направляющего вектора стороны  $ij$ :

$$\vec{e}^{(1)} = \frac{1}{l_{ij}} \begin{Bmatrix} x_j - x_i \\ y_j - y_i \\ z_j - z_i \end{Bmatrix}, \tag{10}$$

где проекция длины каната на рабочую плоскость,

$$l_{ij} = \sqrt{(x_j - x_i)^2 + (y_j - y_i)^2 + (z_j - z_i)^2}. \tag{11}$$

2. Запишем уравнение плоскости, проходящей через точки  $i, j$  параллельно вектору:

$$\vec{P}^* = \left\{ P - \sum_i V_{i0}^6 \quad P_{Bx} \quad P_{By} \right\}^T = \left\{ P_z \quad P_{Bx} \quad P_{By} \right\}^T. \tag{12}$$

Введем уравнение

$$Ax + By + Cz + D = 0, \quad (13)$$

где

$$A = y_i(z_j - z_i - P_z) + (y_j - y_i)(P_z - z_i) - P_{\text{By}}(2z_i - z_j); \quad (14)$$

$$B = z_i(x_j - x_i - P_{\text{Bx}}) + (z_j - z_i)(P_{\text{Bx}} - x_i) + P_z(2x_i - x_j); \quad (15)$$

$$C = x_i(y_j - y_i - P_{\text{By}}) + (x_j - x_i)(P_{\text{By}} - y_i) + P_{\text{Bx}}(2y_i - y_j); \quad (16)$$

$$D = y_i[(y_j - y_i)P_z - (z_j - z_i)P_{\text{Bx}}] + (y_j - y_i)(P_{\text{Bx}}z_i - P_zx_i) + P_{\text{By}}[x_i(z_j - z_i) - z_i(x_j - x_i)]. \quad (17)$$

3. Запишем компоненты второго орта, перпендикулярного полученной плоскости:

$$\vec{e}^{(2)} = -\text{sign}(D) \frac{1}{\sqrt{A^2 + B^2 + C^2}} \begin{Bmatrix} A \\ B \\ C \end{Bmatrix}. \quad (18)$$

4. Запишем компоненты третьего орта, перпендикулярного плоскостям  $\vec{e}_1, \vec{e}_2$  и лежащего в рабочей плоскости:

$$\vec{e}^{(3)} = \begin{Bmatrix} e_2^{(1)}e_3^{(2)} - e_3^{(1)}e_2^{(2)} \\ e_3^{(1)}e_1^{(2)} - e_1^{(1)}e_3^{(2)} \\ e_1^{(1)}e_2^{(2)} - e_2^{(1)}e_1^{(2)} \end{Bmatrix}. \quad (19)$$

5. Найдем компоненты грузового вектора  $\vec{F}$  в новой системе координат  $\xi\eta$  (с ортами  $\vec{e}_1, \vec{e}_2, \vec{e}_3$ ) из системы уравнений:

$$\begin{bmatrix} \vec{e}^{(1)} & \vec{e}^{(2)} & \vec{e}^{(3)} \end{bmatrix} \vec{F} = \vec{P}^*. \quad (20)$$

Необходимо отметить, что согласно расчетной схеме (рис. 5)  $F_\xi, F_\eta$  лежат в плоскости  $\xi\eta$  и параллельны осям  $\xi, \eta$ . Кроме того, компонента силы в направлении  $\vec{e}^{(2)}$  равна 0, что может послужить контролем правильности вычислений.

Таким образом, в случае выключения одной связи (каната) задача сводится к плоской, расчетная схема которой показана на рис. 6.

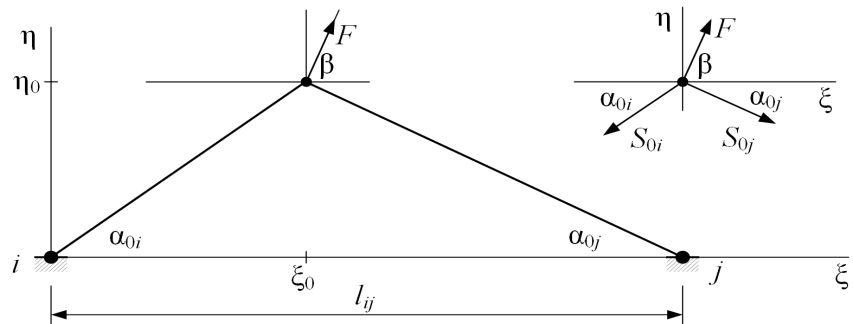


Рис. 6. Расчетная схема для определения усилий

Fig. 6. Calculation scheme for determination of the forces



6. Определим направляющие косинусы сторон  $0i$ ,  $0j$  (рабочая плоскость повернута) относительно осей  $\xi$ ,  $\eta$ :

$$\cos \alpha_{0i} = -\frac{l_{0j}^2 - l_{0i}^2 - l_{ij}^2}{2l_{0i}l_{ij}}; \quad (21)$$

$$\cos \alpha_{0j} = -\frac{l_{0i}^2 - l_{0j}^2 - l_{ij}^2}{2l_{0j}l_{ij}}. \quad (22)$$

7. Система уравнений равновесия узла  $0$  в случае действия ветровой нагрузки имеет следующий вид:

$$\begin{cases} -S_{0i} \cos \alpha_{0i} + S_{0j} \cos \alpha_{0j} + F_{\xi} = 0; \\ -S_{0i} \sin \alpha_{0i} - S_{0j} \sin \alpha_{0j} + F_{\eta} = 0. \end{cases} \quad (23)$$

Решая систему уравнений (23), получим

$$S_{0i} = \frac{F_{\eta} \cos \alpha_{0j} + F_{\xi} \sin \alpha_{0j}}{\Delta}; \quad S_{0j} = \frac{F_{\eta} \cos \alpha_{0i} - F_{\xi} \sin \alpha_{0i}}{\Delta}, \quad (24)$$

где

$$\Delta = \cos \alpha_{0i} \sin \alpha_{0j} + \cos \alpha_{0j} \sin \alpha_{0i}. \quad (25)$$

По результатам решения системы уравнений (23) следует учитывать способность канатов работать только на растяжение, т. е., если  $S_{0i} < 0$ , то  $S_{0i} = 0$  и  $S_{0j} = F = \sqrt{F_{\xi}^2 + F_{\eta}^2} = \sqrt{P_z^2 + P_B^2}$  (рис. 7, а). И, наоборот, если  $S_{0j} < 0$ , то  $S_{0j} = 0$  и  $S_{0i} = \sqrt{P_z^2 + P_B^2}$  (рис. 7, б).

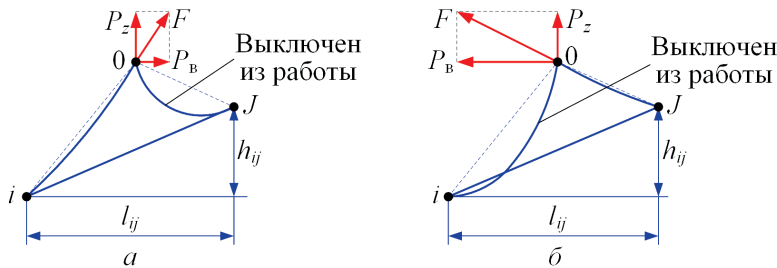


Рис. 7. Расчетная схема в случае работы одного каната из трех при направлении ветрового потока вверх (а) и вниз (б) относительно склона

Fig. 7. Calculation scheme in the case of one cable out of three working up (a) and down (б) towards the slope when directing the wind stream

После определения  $S_{01}$ ,  $S_{02}$ ,  $S_{03}$  усилия натяжения канатов в точке подвеса найдем по формуле (8).

Согласно разработанному алгоритму и исходным данным при испытаниях МТА-500 [3] выполним расчет нагрузок для канатов АКС по всей площади рабочего участка. При этом выберем максимальные показатели ветровой нагрузки  $P_B = 20\,200$  Н, учитывая его положительное направление по оси  $x$ .

Для задания положения точки подвеса в плоскости  $x_0$  используем принцип координат, где координаты  $x_0$ ,  $y_0$  точки подвеса определяются по следующим формулам:

$$x_0 = L_1 x_1 + L_2 x_2 + L_3 x_3; \quad (26)$$

$$y_0 = L_1 y_1 + L_2 y_2 + L_3 y_3. \quad (27)$$

В итоге было рассмотрено 77 положений точки подвеса, показанных на рис. 8 разноцветными кружками (синий, красный, зеленый) и пронумерованных от 0 до 77.

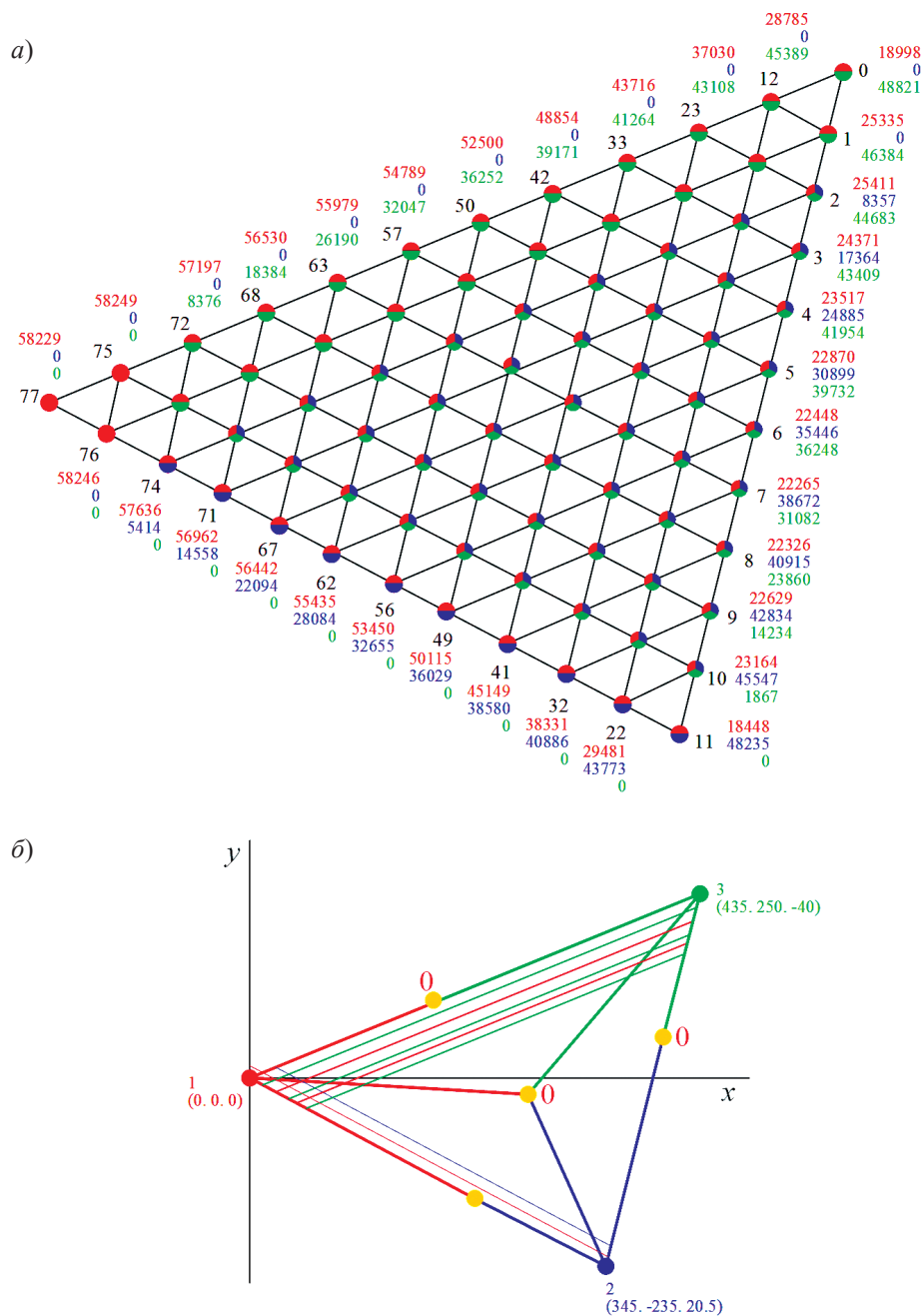


Рис. 8. Результаты расчетов тестового примера с учетом ветровой нагрузки: *a* – точки положения подвеса, отражающие взаимодействие канатов 01, 02, 03; *b* – проекция взаимодействия канатов (подъемная сила  $P = 55\,090$  Н; ветровая нагрузка  $P_w = 20\,200$  Н; высота точки подвеса  $h = z_0 = 190$  м)

Fig. 8. The calculation results of the test case with allowances made for the wind load: *a* – suspension points reflecting the interaction of cables 01, 02, 03; *b* – projection of the cable interaction (lifting force  $P = 55\,090$  N; wind load  $P_w = 20\,200$  N; height of the suspension point  $h = z_0 = 190$  m)

В полученных результатах координаты  $L_1, L_2$  имеют значения от 0 до 1 с шагом 1/11. При этом

$$L_2 \leq 1 - L_1; \quad L_1 + L_2 + L_3 = 1.$$

Значения получившихся усилий показаны рядом с точками положения подвеса и выделены цветом (рис. 8, а), соответствующим цвету канатов 01, 02, 03 (рис. 8, б).

Рассмотрим следующие характерные ситуации.

При расположении точки подвеса над окрестностью лебедки 1 (точки 75, 76, 77 на рис. 8, а) работает только канат 01 (соответствующие кружки выделены красным цветом).

При движении точки подвеса по стороне 13 (рис. 8, б) и параллельной ей линии, соединяющей точки 1 и 76 (рис. 8, а), канат 02 выключен из работы, а внешнюю нагрузку воспринимают канаты 01 и 03 (соответствующие кружки выделены красным и зеленым цветами, а также красно-зеленой штриховкой).

При движении точки подвеса по стороне 12 уже канат 03 выключен из работы и внешнюю нагрузку воспринимают канаты 01 и 02 (соответствующие кружки выделены красным и синим цветами и штриховкой).

Во всех остальных случаях работают все три каната (соответствующие кружки выделены красным, зеленым и синим цветами).

Максимальное усилие в канате 01 наблюдается при расположении точки подвеса над т. 75, в канате 02 – над т. 11, в канате 03 – над т. 0 (соответствующие точки и значения усилий выделены жирным шрифтом).

При этом необходимо учитывать, что с увеличением длины подвески и, соответственно, высоты точки подвеса  $z_0$  усилия в канатах АКС снижаются. Однако это отрицательно влияет на амплитуду колебаний грузовой подвески и ГЗМ, приводя к максимальным отклонениям от точки захвата груза. В связи с этим целесообразно проводить расчеты, позволяющие определять предельное увеличение длины подвески и высоты точки подвеса.

При работе одного каната усилие

$$S_{0i}^{\max} = S_{0i} |_{\xi_0=0} = S_{0i} |_{\xi_0=l} = \sqrt{P_z^2 + P_b^2}.$$

Таким образом, минимальное усилие, которое должен воспринимать канат,  $F_{\text{пр}} = \sqrt{P_z^2 + P_b^2}$ . При малой высоте подвески  $\eta_0$  усилия в канатах могут оказаться больше  $F_{\text{пр}}$ . Поэтому определим такое значение  $\eta_0$ , при котором усилия во всех канатах не больше  $F_{\text{пр}}$ .

Для этого построим серию графиков:  $S_{0i} = S_{0i}(\xi_0, \eta_0)$ ;  $S_{0j} = S_{0j}(\xi_0, \eta_0)$ . График зависимости высоты точки подвеса  $\eta_0$  (такой, что  $S = F_{\text{пр}}$ ) от ее положения  $\xi_0$  при  $\beta = 90^\circ$  показан на рис. 9.

Далее, на рис. 10, приведен пример графического изложения результатов при заданных  $l = l_{ij} = 100$  м и  $\beta = 90^\circ$ , где видно, что усилия в канатах можно регулировать высотой точки подвеса  $\eta_0$  и всегда можно выбрать такую высоту, при которой усилия в канатах будут не больше  $F_{\text{пр}}$ .

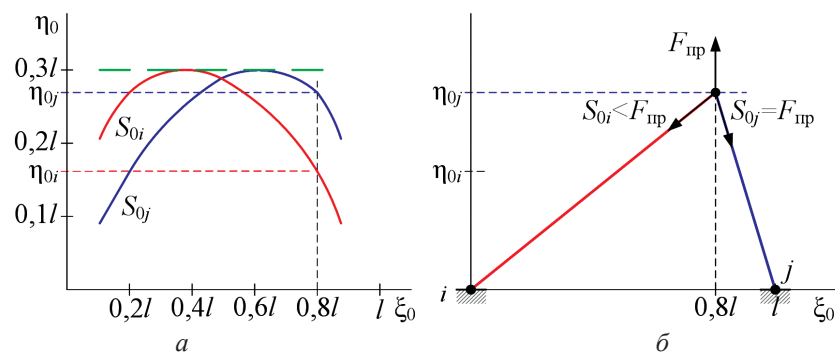


Рис. 9. Зависимость высоты точки подвеса  $\eta_0$  (такой, что  $S = F_{\text{тп}}$ ) от ее положения  $\xi_0$  при  $\beta = 90^\circ$ : *a* – при движении каната вдоль сторон  $0i$  и  $0j$ ; *б* – усилия  $S_{0j}$  и  $S_{0i}$  соответствуют сторонам  $0i$  и  $0j$

Fig. 9. The dependence of the suspension point height  $\eta_0$  (such as  $S = F_{\text{тп}}$ ) on its position  $\xi_0$  at  $\beta = 90^\circ$ : *a* – when the cable moves along the sides  $0i$  and  $0j$ ; *б* – the forces  $S_{0j}$  and  $S_{0i}$  correspond to the sides  $0i$  and  $0j$

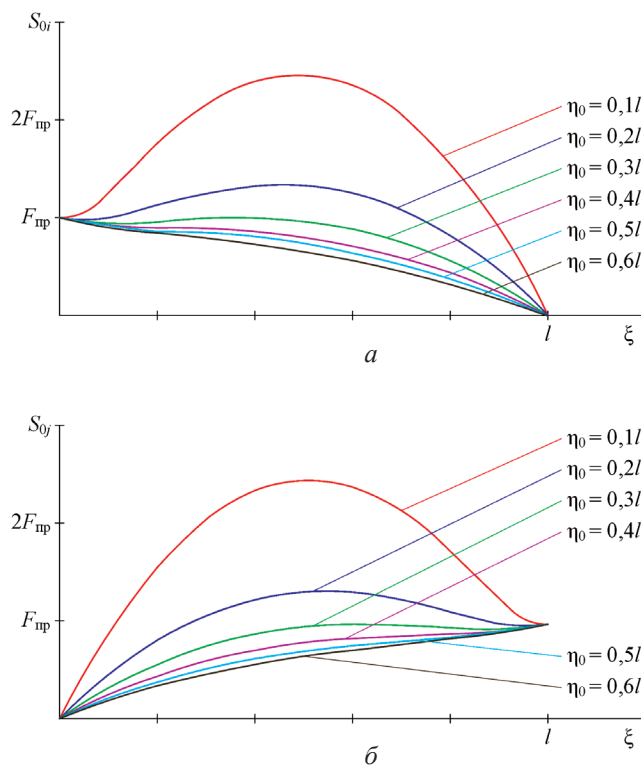


Рис. 10. Зависимость усилий в канатах от расположения точки подвеса при  $\beta = 90^\circ$ : *a* – сторона  $0i$ ; *б* – сторона  $0j$

Fig. 10. The dependence of the forces in the cables on the location of the suspension point at  $\beta = 90^\circ$ : *a* – side  $0i$ ; *б* – side  $0j$

Таким образом, для определения высоты точки подвеса следует:

1. Найти  $\eta_0^{\text{max}}$ , при которой усилия в канатах меньше  $F_{\text{тп}}$ , меняя положение  $\xi_0$  точки подвеса и ветровую нагрузку.
2. Принять высоту точки подвеса больше  $\eta_0^{\text{max}}$ , что обеспечит с запасом условия  $S_{0i} \leq F_{\text{тп}}$ ,  $S_{0j} \leq F_{\text{тп}}$ .

В ситуации, когда требуется найти высоту точки подвеса для трехмерного случая, выполним увеличение высоты точки подвеса с некоторым (заранее заданным) шагом, меняя направление ветра и расположение точки подвеса. При этом определим высоту точки подвеса  $z_0$ , при которой усилия во всех

канатах не превышают  $F_{пр}$ . Допускаемая высота подвеса будет больше либо равна максимальной, установленной в п. 1.

В результате выполнения п. 1, получим три поверхности. Проведем горизонтальную плоскость в уровне  $z_0^{max}$ , касающуюся в верхней точке поверхности, расположенной выше остальных (см. верхнюю пунктирную линию на рис. 9, а). Тогда минимально допустимая высота точки подвеса  $z_0 \geq z_0^{max}$ .

Ниже приведем описание алгоритма реализации программы, позволяющей определять зависимость усилий в канатах от расположения точки подвеса.

Предварительно зададим:

$$z^{min} = \min \begin{cases} z_1 \\ z_2 \\ z_3 \end{cases} \text{ – минимальная высота точки подвеса (начальное приближение);}$$

жение);

$\Delta h$  – шаг увеличения высоты точки подвеса (чем меньше шаг, тем точнее результат);

$\Delta \alpha$  – шаг изменения угла направления ветра  $\alpha = 0, \Delta \alpha, 2 \Delta \alpha, 3 \Delta \alpha, \dots, 2\pi$  (чем меньше шаг, тем точнее результат);

$P_b$  – максимальная ветровая нагрузка;

$P$  – подъемная сила;

$n$  – число дискретных значений  $L_1$  – координаты (чем больше  $n$ , тем точнее результат).

При задании  $F_{пр}$  следует принять ветровую нагрузку максимальной.

1. Цикл по  $z_0$ .

1.1.  $z_0 := z^{min}$ .

2. Цикл по направлению ветровой нагрузки.

2.1.  $\alpha := 0; P_{bx} = P_b \cos \alpha; P_{by} = P_b \sin \alpha$ .

2.2.  $P_{bx} = P_b \cos \alpha; P_{by} = P_b \sin \alpha$ .

3. Циклы по местоположению подвески.

3.1.  $L_1 := 0, \frac{1}{n}, \frac{2}{n}, \frac{3}{n}, \dots, 1; L_2 := 0, \frac{1}{n}, \frac{2}{n}, \frac{3}{n}, \dots, 1 - L_1; L_3 := 1 - L_1 - L_2$ .

3.2. Определение координат  $x_0, y_0$  текущего положения точки подвеса.

3.3. Определение усилий  $R_{01}, R_{02}, R_{03}$  по алгоритму, описанному выше.

3.4. Определение максимального усилия  $R^{max}$ .

2.3. Если  $\alpha < 2\pi$ , то  $\alpha := \alpha + \Delta \alpha$  и переход к п. 2.2.

1.2. Если  $R^{max} > F_{пр}$ , то  $z_0 = z_0 + \Delta h$  и переход к п. 2.

Иначе ВЫВОД  $z_0$  и STOP.

Зная предельные параметры длины грузовой подвески и распределение нагрузок в канатах АКС по всей площади рабочего участка, приступим к определению размеров недоступной зоны и, соответственно, внешних контуров эксплуатационного участка.

В присутствии ветровой нагрузки, направленной в сторону лесосеки, усилие в одном из канатов (или даже в двух) оказывается равным 0, исходя из этого система работающих канатов (см. рабочую плоскость на рис. 5) поворачивается так, что оказывается параллельной силе  $P^*$ . В экстремальном случае,

когда ветровая нагрузка перпендикулярна стороне  $ij$ , плоскость  $ij0$  оказывается наклоненной к горизонтальной плоскости на угол  $\beta = \arctg \frac{P}{P_B}$ , определяя тем самым основную расчетную схему согласно рис. 11.

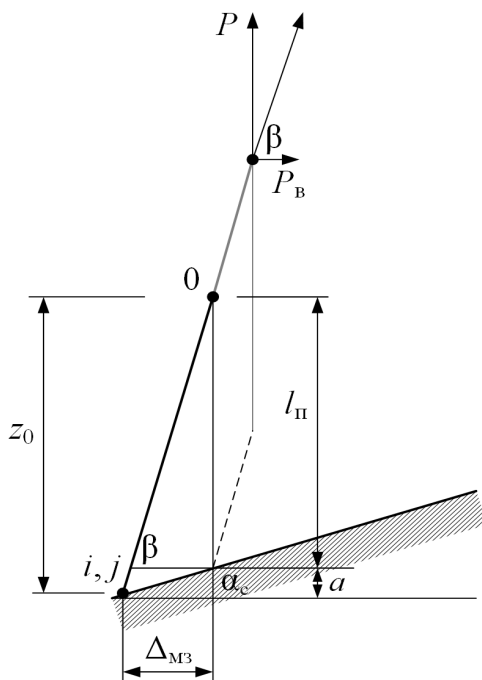


Рис. 11. Расчетная схема для определения размеров недоступной зоны  $\Delta_{M3}$ :  $l_{\Pi}$  – длина грузовой подвески;  $\alpha_c$  – угол наклона поверхности деляны (локальный угол склона);  $\Delta_{M3}$  – размер недоступной зоны  
Fig. 11. Calculation scheme for determination of sizes of the inaccessible zone  $\Delta_{M3}$ :  $l_{\Pi}$  – suspension length;  $\alpha_c$  – angle of surface inclination of the plot (slope local angle);  $\Delta_{M3}$  – size of the inaccessible zone

Полагаем длину грузовой подвески заданной. Натягивая канаты (канат), опустим точку подвеса так, чтобы подвеска с ГЗМ коснулась склона.

Из рис. 11 ясно, что  $\operatorname{tg} \beta = \frac{P}{P_B} = \frac{z_0}{\Delta_{M3}}$ ;  $\operatorname{tg} \alpha_c = \frac{a}{\Delta_{M3}}$ .

Тогда размер  $a = z_0 - l_{\Pi} = \Delta_{M3} \operatorname{tg} \beta - l_{\Pi}$ , с другой стороны –  $a = \Delta_{M3} \operatorname{tg} \alpha_c$ . Следовательно,  $\Delta_{M3} \operatorname{tg} \alpha_c = \Delta_{M3} \operatorname{tg} \beta - l_{\Pi}$ .

Откуда размер недоступной зоны

$$\Delta_{M3} = \frac{l_{\Pi}}{\operatorname{tg} \beta - \operatorname{tg} \alpha_c}. \quad (28)$$

Отметим, что  $\Delta_{M3} = \Delta_{M3}^{\max}$ , если ветровая нагрузка направлена в сторону  $\alpha_c^{\max}$ .

При известном положении деляны и особенностях рельефа (характерные локальные углы склона) следует подсчитать размеры  $\Delta_{M3}$  и установить лебедки так, чтобы территория деляны не попадала в недоступную зону (рис. 12).

Остановимся на этом подробнее. Предположим, что максимальная величина  $\Delta_{M3}$  оказалась на стороне 13. Определим расстояние  $d$  от противоположной вершины треугольника до указанной стороны.

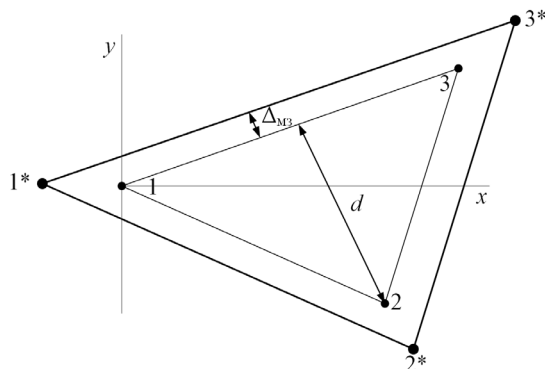


Рис. 12. Расчетная схема для определения точек установки лебедок

Fig. 12. Calculation scheme for determination of the setting points of winches

Зададим направляющий вектор стороны 13:

$$v_{13} = \begin{pmatrix} |x_3 - x_1 \\ |y_3 - y_1 \\ |z_3 - z_1 \end{pmatrix}. \quad (29)$$

Найдем векторное произведение:

$$v_{12} = v_{13} \times \begin{pmatrix} |x_2 - x_1 \\ |y_2 - y_1 \\ |z_2 - z_1 \end{pmatrix}. \quad (30)$$

Соответственно, искомая величина

$$d = \frac{\sqrt{v_{12}^T v_{12}}}{\sqrt{v_{13}^T v_{13}}}. \quad (31)$$

Далее, согласно расчетным схемам на рис. 11 и 12, определим отношение

$$\gamma = \frac{d + \frac{\Delta_{M3}}{\cos \alpha_c}}{d}. \quad (32)$$

Используя расчетную схему на рис. 12, найдем координаты точек  $1^*$ ,  $2^*$ ,  $3^*$ :

$$x_i^* = x_i - (x_c - x_i)(\gamma - 1); \quad (33)$$

$$y_i^* = y_i - (y_c - y_i)(\gamma - 1), \quad (i = 1, 2, 3), \quad (34)$$

где

$$x_c = \frac{x_1 + x_2 + x_3}{3}; \quad y_c = \frac{y_1 + y_2 + y_3}{3}. \quad (35)$$

Координаты  $z_i^*$  определим из уравнения плоскости  $Ax + By + Cz + D = 0$ , проходящей через точки 1, 2, 3:

$$z_i^* = -\frac{1}{C}(Ax_i^* + By_i^* + D). \quad (36)$$

Тем самым оказываются установленными координаты лебедек  $1^*(x_1^*, y_1^*, z_1^*)$ ,  $2^*(x_2^*, y_2^*, z_2^*)$ ,  $3^*(x_3^*, y_3^*, z_3^*)$ .

Приведем *пример расчета* для участка с ситуацией, рассмотренной выше и представленной ранее на рис. 9. Пусть максимальная ветровая нагрузка  $P_B = 20\,200\text{ Н}$  перпендикулярна стороне 13. Подъемная сила  $P = 55\,090\text{ Н}$ . Максимальный локальный угол склона на стороне 13 примем  $\alpha_c = 30^\circ$ , длину подвески  $l_n = 150\text{ м}$ . Тогда

$$\operatorname{tg}\beta = \frac{P}{P_B} = 2,727; \Delta_{\text{мз}} = \frac{l_n}{\operatorname{tg}\beta - \operatorname{tg}\alpha_c} \approx 70\text{ м}; v_{13} = \begin{pmatrix} |x_3 - x_1 \\ |y_3 - y_1 \\ |z_3 - z_1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 435 \\ 250 \\ -40 \end{pmatrix};$$

$$v_{12} = v_{13} \begin{pmatrix} |x_2 - x_1 \\ |y_2 - y_1 \\ |z_2 - z_1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 435 \\ 250 \\ -40 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 345 \\ -235 \\ 20,5 \end{pmatrix} = \begin{vmatrix} i & j & k \\ 435 & 250 & -40 \\ 345 & -235 & 20,5 \end{vmatrix} =$$

$$= i \begin{vmatrix} 250 & -40 \\ -235 & 20,5 \end{vmatrix} - j \begin{vmatrix} 435 & -40 \\ 345 & 20,5 \end{vmatrix} + k \begin{vmatrix} 435 & 250 \\ 345 & -235 \end{vmatrix} = -4275i - 22717,5j - 188475k.$$

Найдем расстояние от вершины 2 треугольника 123 до стороны 13:

$$d = \frac{\sqrt{v_{12}^T v_{12}}}{\sqrt{v_{13}^T v_{13}}} = \frac{\sqrt{\begin{pmatrix} -4275 & -22717,5 & 188475 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} -4275 \\ -22717,5 \\ 188475 \end{pmatrix}}}{\sqrt{\begin{pmatrix} 435 & 250 & -40 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 435 \\ 250 \\ -40 \end{pmatrix}}} = \frac{189\,887}{503,3} = 377,3\text{ м}.$$

С учетом коэффициента пропорционального увеличения имеем:

$$\gamma = \frac{d + \frac{\Delta_{\text{мз}}}{\cos\alpha_c}}{d} = \frac{377,3 + \frac{70}{\cos 30^\circ}}{377,3} = 1,21.$$

Положение центра тяжести треугольника на горизонтальной плоскости:

$$x_c = \frac{x_1 + x_2 + x_3}{3} = \frac{0 + 345 + 435}{3} = 260\text{ м};$$

$$y_c = \frac{y_1 + y_2 + y_3}{3} = \frac{0 + (-235) + 250}{3} = 5\text{ м}.$$

Координаты  $x, y$  лебедек:

$$x_1^* = x_1 - (x_c - x_1)(\gamma - 1) = 0 - (260 - 0)(1,21 - 1) = -55,00\text{ м};$$



$$y_1^* = y_1 - (y_c - y_1)(\gamma - 1) = 0 - (5 - 0)(1,21 - 1) = -1,06 \text{ м};$$

$$x_2^* = x_2 - (x_c - x_2)(\gamma - 1) = 345 - (260 - 345)(1,21 - 1) = 362,98 \text{ м};$$

$$y_2^* = y_2 - (y_c - y_2)(\gamma - 1) = -235 - (5 - (-235))(1,21 - 1) = -285,77 \text{ м};$$

$$x_3^* = x_3 - (x_c - x_3)(\gamma - 1) = 435 - (260 - 435)(1,21 - 1) = 472,02 \text{ м};$$

$$y_3^* = y_3 - (y_c - y_3)(\gamma - 1) = 250 - (5 - 250)(1,21 - 1) = 301,83 \text{ м}.$$

Уравнение плоскости, проходящей через точки 1, 2, 3:

$$Ax + By + Cz + D = 4275x + 22717,5y + 188475z + 0 = 0.$$

Координаты  $z$  лебедек:

$$z_1^* = -\frac{1}{C}(Ax_1^* + By_1^* + D) = -\frac{1}{188475}(4275 \cdot (-55,00) + 22715,5 \cdot (-1,06) + 0) = 1,38 \text{ м};$$

$$z_2^* = -\frac{1}{C}(Ax_2^* + By_2^* + D) = -\frac{1}{188475}(4275 \cdot 362,98 + 22715,5 \cdot (-285,77) + 0) = 26,21 \text{ м};$$

$$z_3^* = -\frac{1}{C}(Ax_3^* + By_3^* + D) = -\frac{1}{188475}(4275 \cdot 472,02 + 22715,5 \cdot 301,83 + 0) = -47,09 \text{ м}.$$

В итоге имеем такие координаты точек расположения лебедек  $1^*(x_1^*, y_1^*, z_1^*)$ ,  $2^*(x_2^*, y_2^*, z_2^*)$ ,  $3^*(x_3^*, y_3^*, z_3^*)$ , что контур рабочего участка с вершинами  $1(x_1, y_1, z_1)$ ,  $2(x_2, y_2, z_2)$ ,  $3(x_3, y_3, z_3)$  лежит вне пределов недоступной зоны.

#### *Заключение*

Разработанный алгоритм для определения оптимальных размеров внешнего контура лесоэксплуатационного участка позволяет: обеспечить распределение нагрузок между тремя тягово-возвратными канатами АКС, тем самым повысить управляемость и устойчивость системы в целом, а соответственно, гарантировать доступность грузозахватного механизма в любой точке обрабатываемого лесоэксплуатационного участка за счет устранения нерабочих зон.

Предложенная методика расчета была преобразована в компьютерную программу, которая учитывает влияющие факторы: температуру воздуха, высоту нахождения аэростата над уровнем моря, направление и скорость ветрового потока, рельефные условия на обрабатываемом участке, длину грузового каната, расстояние трелевки, геометрические размеры участка. Результаты работы программы могут быть приведены как в табличном, так и в графическом виде, представляя обрабатываемый участок с последовательностью критических точек и возможной корректировкой правильного размещения лебедек или контурных блоков, что дает возможность манипулировать нагрузками в канатах и одновременно определять оптимальные внешние контуры участка.

Полученные результаты позволяют повысить эффективность использования и достичь лучшей производительности аэростатно-канатных систем за счет точности наведения грузозахватного механизма и минимизации нагрузок на тягово-возвратные канаты аэростатной трелевочной системы.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

1. Абузов А.В. Технические и конструктивные особенности современной аэростатно-канатной системы для трелевки древесины // Вестн. МГУЛ–Лесн. вестн. 2013. № 1(93). С. 5–9. [Abuzov A.V. Technical and Design Features of the Modern Aero Stately Rope System of Delivery of Wood. *Vestnik Moskovskogo gosudarstvennogo universiteta lesa – Lesnoy vestnik* [Forestry Bulletin], 2013, no. 1(93), pp. 5–9].
2. Абузов А.В. Методика определения усилий, возникающих в канатах трехлинейной аэростатно-канатной транспортной системы // Лесотехн. журн. 2014. № 3. С. 140–153. [Abuzov A.V. Method of Determining the Forces Arising in the Ropes of Trilinear Balloon-Cable Transport System. *Lesotekhnicheskii zhurnal* [Forestry Engineering Journal], 2014, vol. 4, no. 3(15), pp. 140–153]. DOI: [10.12737/6278](https://doi.org/10.12737/6278)
3. Абузов А.В., Рябухин П.Б. Аэростатный транспорт для горных лесозаготовок в условиях Дальнего Востока. Хабаровск: Изд-во Тихоокеан. гос. ун-та, 2013. 199 с. [Abuzov A.V., Ryabukhin P.B. *Balloon Transport for Mountain Logging in the Far East*. Khabarovsk, PNU Publ., 2013. 199 p.].
4. Буткин В.Д. Аэростатно-канатные транспортные системы для открытых горных работ // Горн. журн. № 6. 1998. С. 56–57. [Butkin V.D. Balloon Cable Transport Systems for Surface Mining. *Gornyi Zhurnal* [Mining Journal], 1998, no. 6, pp. 56–57].
5. Волков Е.С., Плютов Ю.А. Результаты испытаний гравитационной аэростатно-канатной транспортной установки // Технологическое оборудование для горной и нефтегазовой промышленности: сб. докл. VIII междунар. науч.-техн. конф. «Чтения памяти В.Р. Кубачека». Екатеринбург: УГТУ, 2010. С. 20–22. [Volkov E.S., Plyutov Yu.A. Test Results of Gravitational Balloon Cable Transport Installation. *Technological Equipment for the Mining and Oil and Gas Industry: Collection of Reports of the 8th International Science and Technology Conference. Readings in Memory of V.R. Kubachek*. Yekaterinburg, USTU Publ., 2010, pp. 20–22].
6. Козловский В.Б., Худоленко О.В., Деревянко В.С. Аэростатические летательные аппараты для отраслей экономики. М.: Воздуш. трансп., 2007. 480 с. [Kozlovsky V.B., Khudolenko O.V., Derevyanko V.S. *Balloon Aircrafts for Economic Sectors*. Moscow, Vozdushnyy transport Publ., 2007. 480 p.].
7. Луценко Е.В., Кравец А.Д., Рябухин П.Б. Новая технология использования аэростатно-канатных систем // Актуальные проблемы лесного комплекса: сб. науч. тр. по итогам междунар. науч.-техн. конф. Вып. 25. Брянск: БГИТА, 2010. С. 163–166. [Lutsenko E.V., Kravets A.D., Ryabukhin P.B. A New Technology of Using Balloon Cable Systems. *Current Issues of the Forest Complex. Collection of Academic Papers Further to the International Science and Technology Conference*. Bryansk, BGITA Publ., 2010, iss. 25, pp. 163–166].
8. Отчет о научно-исследовательской работе «Исследование возможностей использования летательных аппаратов на лесозаготовках в горных условиях». Ч. 1, 2. Химки: ЦНИИМЭ, 1985. 189 с. [Research Report “Study of the Possibilities of Using Aircrafts for Logging in Mountains”. Parts 1, 2. Khimki, TsNIIME Publ., 1985. 189 p.].
9. Отчет об испытаниях аэростата-крана ЭПАК-1. М.: МПНСУ «Центротехмонтаж», 1977. 50 с. [Test Report of the Aerostat Crane EPAC-1. Moscow, MPNSU Tsentrotexhmontazh Publ., 1977. 50 p.].
10. Родионов В.И., Скобей В.В. Статический расчет тягово-удерживающих канатов аэростатно-трелевочной установки (АТУП) // Тр. ЦНИИМЭ. М., 1966. № 75. С. 113–126. [Rodionov V.I., Skobey V.V. *Static Analysis of Tether Line Cables of a Balloon Logging System. Academic Papers of the Central Research and Design Institute of Mechanization and Energy of the Forest Industry*. Moscow, 1966, no. 75, pp. 113–126].

11. Сухинин В.Н. Определение некоторых параметров аэростатной трелевочной установки // Тр. Краснодар. политехн. ин-та. 1970. № 22. С. 85–95. [Sukhinin V.N. Determination of Some Parameters of a Balloon Logging System. *Academic Papers of the Krasnodar Polytechnic Institute*. 1970, no. 22, pp. 85–95].
12. Aglietti G.S. Dynamic Response of a High-Altitude Tethered Balloon System. *Journal of Aircraft*, 2009, vol. 46, no. 6, pp. 2032–2040. DOI: [10.2514/1.43332](https://doi.org/10.2514/1.43332)
13. Avery R.B. *Mathematical Model for Determining the Position and Line Tensions for a Tethered Logging Balloon*. Corvallis, OR, Oregon State University, 1984. 78 p.
14. Avery R.B. Pendulum-Swing Balloon Logging: Developing and Applying a Static Lift Prediction Model. *Forest Products Journal*, 1986, vol. 36(3), pp. 17–22.
15. *Balloon Logging Systems. Phase I – Analytical Study*. Research Report. Portland, OR, Goodyear Aerospace Corporation, 1964. 110 p.
16. *Balloon Logging Systems. Phase II – Logistics Study*. Research Report. Portland, OR, Goodyear Aerospace Corporation, 1964. 171 p.
17. Graeter W.F. *Tethered Balloon Transport Systems: A Proposal*. MS Thesis. Monterey, CA, Naval Postgraduate School, 1978. 229 p.
18. Lambert C. *Dynamics and Control of a Multi-Tethered Aerostat Positioning System*. PhD Thesis. Montreal, Canada, McGill University, 2006. 164 p.
19. Lambert C., Nahon M. An Aerostat Positioning System with Cable Control. *Proceedings of the 17th World Congress of the International Federation of Automatic Control, Seoul, Korea, July 6–11, 2008*. Seoul, Korea, 2008, pp. 779–784. DOI: 10.3182/20080706-5-KR-1001.2912
20. Lambert M.B., Hoke D., Bergstrom G. Lighter-Than-Air Logging under Multiple-Tethered Ground Control. *Proceeding of the International Mountain Logging and Eighth Pacific Northwest Skyline Symposium, Bellevue, Washington, December 14–16, 1992*. Bellevue, WA, 1992. pp. 108–120.

## METHODOLOGY FOR SIZING THE EXTERNAL BORDERS OF CUTTING AREAS WHEN THEIR DEVELOPMENT BY BALLOON CABLE SYSTEMS

*A.V. Abuzov*, Doctor of Engineering, Prof.; ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-1082-9392>

*P.B. Ryabukhin*, Doctor of Engineering, Prof.;

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-1735-1942>

Pacific National University, ul. Tikhookeanskaya, 136, Khabarovsk, 680042, Russian Federation; e-mail: ac-systems@mail.ru, P.Ryabukhin@mail.khstu.ru

Currently, the issue of introducing technologies that meet modern environmental requirements into the logging process is put into sharp relief in the forest industry. Such technologies can include air transport, in particular balloon installations, the introduction of which requires further research relating to the influence of weather and landscape conditions on the operation process. The article presents the results of practical and theoretical studies aimed at improving the functionality of balloon logging systems while processing forest areas of different configuration. It was found that the wind load influence is the crucial factor, which adversely affects the balloon as well as haulback line cables. We have developed a methodology and a computer program for determining the dimensions of the external borders of the operational forest area, which allow to install ground winches or border units of the cable system at a distance that provides access to previously inaccessible points of the forest area for the load-gripping mechanism. The output of the program can be represented in the tabular and the graphical forms, which makes it possible to manipulate the loads in the cables and, simultaneously, find the overall dimensions of the external borders of the site. The developed

algorithm for determining the optimal dimensions of the external borders of the forest exploitation site allows to provide load distribution between the three haulback line cables of the balloon cable system. This will increase the handling and stability of the entire system, and, respectively, ensure the availability of the load gripping mechanism at any point of the processed forest exploitation site by eliminating non-operating zones.

**For citation:** Abuzov A.V., Ryabukhin P.B. Methodology for Sizing the External Borders of Cutting Areas when Their Development by Balloon Cable Systems. *Lesnoy Zhurnal* [Russian Forestry Journal], 2020, no. 2, pp. 81–100. DOI: 10.37482/0536-1036-2020-2-81-100

*Keywords:* balloon logging, balloon cable system, cable tension, borders of a cutting area, perimeter of a cutting area.

Поступила 21.06.19 / Received on June 21, 2019

---

---