

## Объединенная методика расчета функциональных параметров работы аэростатно-канатных систем

*Л.И.Морозов*

*Тихоокеанский государственный университет*

**Аннотация:** В статье разработана методика расчета основных характеристик работы аэростатно-канатной системы. Контроль значений этих характеристик необходим для правильного проектирования и безопасной эксплуатации АКС.

**Ключевые слова:** аэростат, колебания, грузоподъемность, сила натяжения, длина пролета, провис каната, ветровой поток, угол подъема, скорость перемещения каретки, число Рейнольдса.

В настоящее время ведется работа по внедрению аэростатно-канатных систем (АКС) в лесозаготовительную промышленность. При выборе АКС главной характеристикой является грузоподъемность аэростата, вместе с расстоянием трелевки и скоростью перемещения определяющая производительность системы. В проектировании проблему выбора канатов и трансмиссии решают с использованием коэффициента запаса, что ведет к неоправданным материалу- и энергоемкости трелевки. Расчет динамических процессов в системе позволит избежать излишнего увеличения диаметра несущего каната и производить рациональное расходование энергии на трелевку древесины.

Исследования в области АКС были направлены на изучение каких-либо характеристик в отдельности, т.е. изучались параметры различных видов лебедок [1,2], влияние формы аэростата на его аэродинамические качества [3,4], влияние ветра на тросовую оснастку [5,6]. Результатом этих исследований было изобретение новых конструкций аэростатов, лебедок и канатоблочных систем. Однако, для глубокого анализа работы АКС необходимо рассматривать процесс её функционирования в целом, учитывая все важные характеристики. [7-11,13]

Целью исследования является разработка объединенной методики расчета параметров работы АКС.

Для этого рассмотрим схему аэростатно-канатного спуска (Рис. 1). При теоретическом моделировании воспользуемся следующими допущениями – принимаем канат нерастяжимым, опоры – абсолютно жесткими; деформации аэростата при движении отсутствуют.

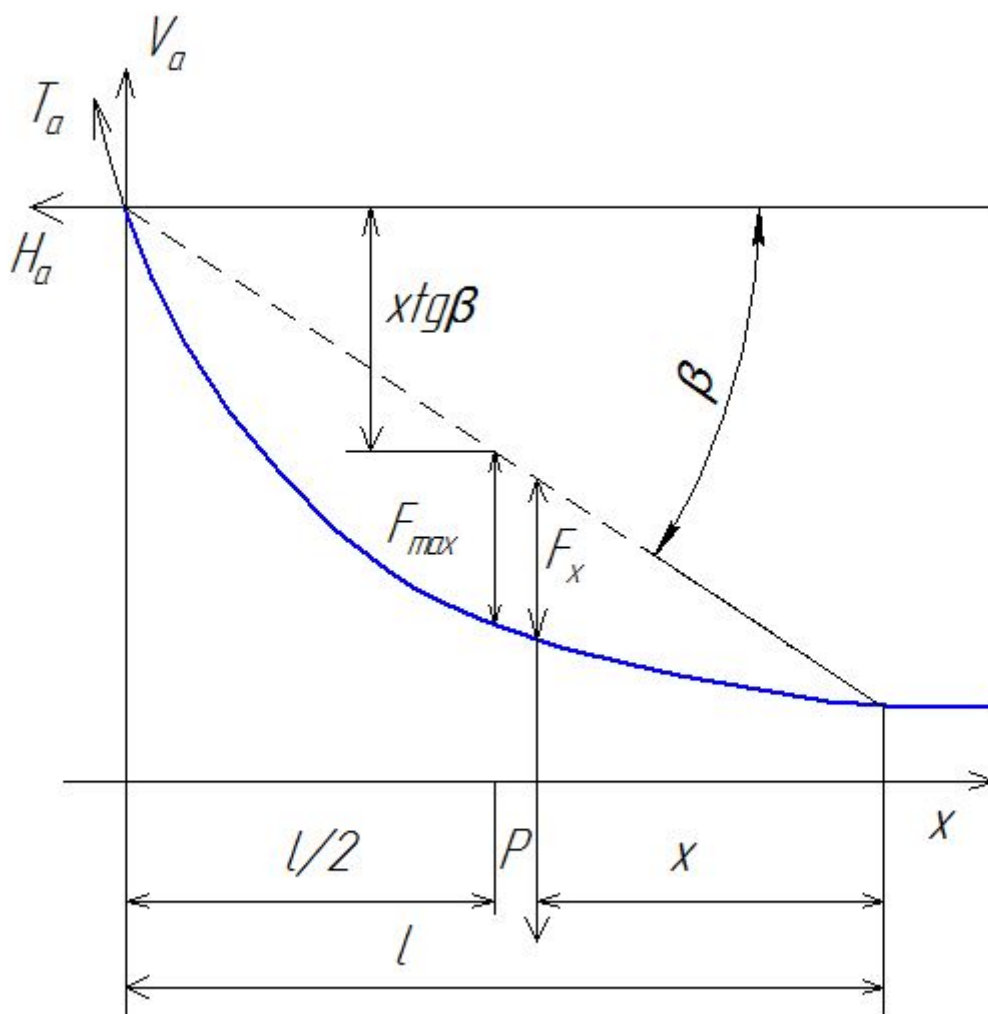


Рис.1 Расчетная схема канатной системы

Где:  $l$  - длина пролета,  $l = 150 м$ ;

$V_e$  - скорость ветра,  $V_e = 5 м/с$ ;

$V_k$  - скорость перемещения грузовой каретки,  $V_k = 3 м/с$ ;

$\beta$  - угол подъема,  $\beta = 20^0$ ;

$m$  - масса груза,  $m = 600\text{кг}$ ;

$\alpha_e$  - угол воздействия ветра на аэростат,  $\alpha_e = 20^0$ .

При расчетах будем считать ветер встречным.

Необходимо определить:

$d$  – диаметр каната (мм);

$\omega$  – частоту колебаний (Гц);

$f$  – величину провиса каната (м);

$T$  – силу натяжения каната (Н);

$F_{сопр}$  – силу сопротивления от ветрового потока (Н).

Одной из важных характеристик работы АКС является монтажное натяжение – растягивающее усилие, необходимое для монтажа каната в пролете. Оно определяется при отсутствии грузовой каретки в пролете.[10]

$$T_0 = \frac{ql}{8\gamma \cos \beta} \sqrt{1 + (tg\beta + 4\gamma)^2} \quad (1)$$

где  $T_0$  - монтажное натяжение;

$q$  – погонный вес каната (кг/100м);

$\gamma = f_{\max} / l$  – относительное провисание каната;

Уравнение кривой провисания несущего каната имеет вид[10]

$$y(x) = xtg\beta + f_x \quad (2)$$

где  $x, y$  – координаты точки кривой;

$\beta$  – угол наклона хорды пролета;

$f_x$  – провисание каната в точке  $x$ . Определяем провисание в точке  $x$  по формуле [10]:

$$f_x = 4 \frac{x}{l} \left(1 - \frac{x}{l}\right) f_{\max} \quad (3)$$

где  $l$  – длина пролета;

$f_{\max}$  – наибольшее провисание каната в пролете;

$x = l/2$  (посередине).

Формула (3) описывает нагружение каната собственным весом, для описания нагружения кареткой (абстрактно – грузом) вводим поперечный коэффициент  $R$ . [10]

$$R = \frac{1}{\sqrt{1 - (1 - \varepsilon^2)\tau^2}} \quad (4)$$

где  $\varepsilon = T_0 / T_m$  – отношение монтажного и срединного натяжения;

$\tau = 1 - \frac{2x}{l}$  – коэффициент, учитывающий положение груза в пролете;

Коэффициент  $\tau$  зависит от соотношения распределенных и сосредоточенных нагрузок и определяется отношением натяжения каната в точке с координатой  $x = x(T_x)$  к натяжению в середине пролета  $T_m$  – максимальное натяжение, которое можно разложить на составляющие:

$V_m$  -вертикальную

$H_m$  -горизонтальную

$$T_m = \sqrt{V_m^2 + H_m^2} \quad (5)$$

В свою очередь, вертикальную составляющую  $V_m$  можно представить в виде [10]

$$V_m = H_m \operatorname{tg} \beta \frac{ql}{2 \cos \beta} + \frac{P}{2} \quad (6)$$

Для правильного выбора диаметра несущего каната необходимо пользоваться в расчетах максимальными нагрузками, в данном случае они являются наибольшими в случае срединного натяжения, при этом  $R = 1$ , поэтому получаем зависимость [10]

$$H_m = \frac{\sqrt{(ql + 2P \cos \beta)^2 + 4\gamma \sin 2\beta (ql + 2P \cos \beta)(ql + 2P \cos \beta) + 16\gamma^2 \cos^2 \beta (ql + 2P \cos \beta)}}{8\gamma \cos^2 \beta} \quad (7)$$

Исходя из выше сказанного, произведем расчеты, внося данные начальных условий. Принимаем  $d = 20\text{мм}$ , для данного каната максимальная нагрузка  $P_{\max} = 8120\text{кг}$ ,  $q = 19.8\text{кг}/100\text{м}$ , провис каната принят  $f_{\max} = 5\text{м}$ ,

$$T_0 = 132.35\text{кг}$$

$$T_m = 5033.3\text{кг}$$

Далее произведем расчет колебаний системы.

Колебания каната определяются соотношением [11]

$$v = \frac{1}{ld} \sqrt{\frac{F}{\pi\rho}} \quad (8)$$

в случае максимального натяжения (положение груза в середине пролета)

$$v = 26.1\text{Гц}.$$

Мощность двигателя привода в случае использования магистрали, состоящей из нескольких пролетов, необходимо выбирать, исходя из:

а) Запаса мощности на преодоление сопротивления движению (включая ветровую нагрузку, динамические факторы перемещения пачки лесоматериалов, возможную перегрузку системы ввиду неправильной эксплуатации);

б) Возможности увеличения протяженности магистрали и/или перемещения начального и конечного пункта транспортировки.

Таким образом, запас мощности энергетической установки необходим не только для возможности удлинения канатной магистрали, но и для комфортной и динамичной работы системы. Целесообразно использование двигателей с отключаемыми цилиндрами для экономии топлива при небольших нагрузках.

Важным фактором эксплуатации АКС является сила сопротивления воздуха. Она складывается из:

- 1) Сопротивления воздуха от собственного движения аэростата
- 2) Действия ветра на движущуюся систему

Рассмотрим два случая действия ветра: 1) встречный 2) попутный последовательно:

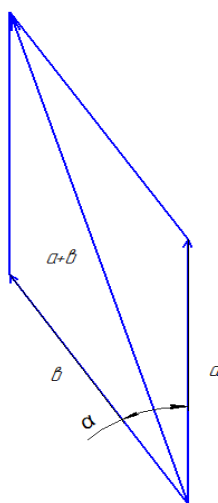


Рис.2 Случай встречного ветра

где:  $a$  – вектор сопротивления от собственного движения каретки,  $b$  – вектор действия ветрового потока,  $\alpha$  – угол воздействия ветра.

Согласно теореме косинусов, большая диагональ полученного силового параллелограмма находится по формуле

$$D = \sqrt{a^2 + b^2 + 2ab \cos \alpha_s} \quad (9)$$

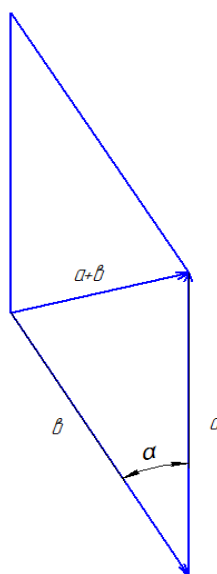


Рис.3 Случай попутного ветра

Меньшая диагональ данного силового параллелограмма находится по формуле

$$d = \sqrt{a^2 + b^2 - 2ab \cos \alpha_e} \quad (10)$$

где:  $\alpha_e$ -угол воздействия (в случае, если  $\alpha > 90^\circ$   $\alpha_e = 180^\circ - \alpha$ )

Для определения модуля и направления результирующей силы необходимо найти сумму векторов действующих сил. Таким образом, чтобы получить полное уравнение движения груза (каретки), нужно рассмотреть сумму вектора движения (тяги), вектора сопротивления воздушной среды и вектора результирующего грузового воздействия, направленного, в зависимости от вида АКС, вверх или вниз.[9,10]

Силу сопротивления воздуха определяем по формуле[14]

$$F_{сопр} = \frac{1}{2} C_D \rho_{возд} V_{рез}^2 \pi r^2 \quad (11)$$

где :  $C_D$ - коэффициент сопротивления системы, зависящий от числа Рейнольдса, формы и размера оболочки,  $\rho_{возд}$  - плотность воздуха,  $r$  – радиус оболочки,  $V_{рез}$  -результирующая скорость потока, находящаяся аналогично с результирующей силой сопротивления, для приведенных начальных данных  $V_{рез} = 7.87 м/с$

Диаметр оболочки вычисляется по формуле [12]

$$d = 1.2408_3 \sqrt{\frac{m}{0.6 \cdot p_{гел}^{м^3}}} \quad (12)$$

$\rho_{гел} = 0.179 \frac{кг}{м^3}$ ,  $\rho_{возд} = 1.225 \frac{кг}{м^3}$ ,  $p_{гел}^{м^3}$  -подъемная сила 1 м<sup>3</sup> гелия.  $p_{гел}^{м^3} = \rho_{возд} - \rho_{гел}$ ,

$p_{гел}^{м^3} = 1.046 \frac{кг}{м^3}$ ,  $d = 12.22 м$

Для определения  $C_D$  вычисляем  $R_e$  [12]

$$R_e = \frac{\rho_{возд} V_{рез}^2}{\mu V_{рез} / L} \quad (13)$$

где :  $\mu$  - динамическая вязкость среды ( $\mu = 18.5 \cdot 10^{-6} \text{ Па} \cdot \text{с}$ )

$L$  – характеристический размер  $L = d = 12.22 \text{ м}$ )

Подставляя значения в формулу (13), получим  $Re = 3.98 \cdot 10^5$

Для этого значения числа Рейнольдса  $C_D = 0.6$ , как следует из работы Джонатана Миллера [14]

Следовательно,  $F_{сопр} = 1356 \text{ Н}$

Как видно из расчетов, для точного определения силы натяжения каната в числе многих параметров необходимо учитывать фактор распределения нагрузок, а для определения силы сопротивления движению аэростата нужно учитывать характеристики среды, в которой происходит движение, в частности, критерий Рейнольдса.

Таким образом, получена обобщенная методика расчета параметров работы АКС с аэростатом круглой формы, полезная при конструировании этих систем. Автором статьи ведется работа над практической проверкой вышеизложенной методики, которая в ближайшее время будет дополнена экспериментальными данными.[15]

### Литература

1. Bell J.L. Aerial load lifting and transporting method and system, №3807577, patented 30.04.1974, Oregon
2. Kindling P.K. V-shaped configuration of tethered balloons, № 5465776, patented 06.10.1964, Claims.
3. Walters V. Shiftable tale-block logging skyline. , № 6145679, patented 14.11.2000. Colorado.
4. Rock W.H. Kite logging, №3326392, patented 20.06.1967, Portland
5. Морозов Л.И. Анализ существующих разработок в области аэростатических систем. «Ученые заметки ТОГУ» 2015, Том 6, № 2, С. 140 – 143



6. Forces in a Cable-Restrained Balloon System/ Jack M. Angevine, David W. 1970, Colorado, 132 p.
7. Balloon logging systems. Phase 1 – Analytical study. // Goodyear Aerospace Corporation. 1964. -180 p.
8. Абузов А.В. Основные технологические направления по освоению горных лесов Дальневосточного региона // Вестник ТОГУ. 2013. №3(30). С. 92–100.
9. Skyhook: balloon logging system. –Skyhook Enterprises Ltd. 1993. – 55 p.
10. Куропятник А. С. Уточнение к моделированию кривой провисания несущего каната маятниковой подвесной дороги. Днепропетровск, 2007. 23 с
11. Прочность, устойчивость, колебания. Справочник в 3 т. Т. 1 / Под общ. ред. Биргера И. А., Пановко Я. Г. – М.: Машиностроение, 1968. – 831 с.
12. Бойко Ю.С. Воздухоплавание: привязное, свободное, управляемое. - М.: МГУП, 2001. -462с.
13. Абузов А.В., Казаков Н.В., Иванов В.И. Теория динамических напряжений, возникающих в верхней подвеске аэростатно-канатной системы // Инженерный вестник Дона, 2014, №3 URL: [ivdon.ru/ru/magazine/archive/n3y2014/2493](http://ivdon.ru/ru/magazine/archive/n3y2014/2493)
14. The Design of Robust Helium Aerostats/Jonathan I. Miller. 2005. 43 p
15. И.Р. Шегельман. Исследование направлений модернизации технологий и техники лесозаготовок // Инженерный вестник Дона, 2012, №2 URL: [ivdon.ru/ru/magazine/archive/n2y2012/866](http://ivdon.ru/ru/magazine/archive/n2y2012/866)

### References

1. Bell J.L. Aerial load lifting and transporting method and system. №3807577, patented 30.04.1974, Oregon.
  2. Kindling P.K. V-shaped configuration of tethered balloons. № 5465776, patented 06.10.1964, Claims.
-



3. Walters V. Shiftable tale-block logging skyline. № 6145679, patented 14.11.2000. Colorado
4. Rock W.H. Kite logging. №3326392, patented 20.06.1967, Portland
5. Morozov. L.I. «Uchenyie zametki TOGU» 2015, Tom 6, № 2, p. 140-143
6. Jack M. Angevine, David W. Forces in a Cable-Restrained Balloon System. 1970, Colorado. 132p
7. Balloon logging systems. Phase 1. Analytical study. Goodyear Aerospace Corporation. 1964. 180 p.
8. Abuzov A.V. Vestnik TOGU. 2013. №3 (30). p. 92-100.
9. Skyhook: balloon logging system. Skyhook Enterprises Ltd. 1993. 55 p.
10. Kuropyatnik A. S. Utochnenie k modelirovaniyu krivoy provisaniya nesuschego kanata mayatnikovoy podvesnoy dorogi. [Clarification to modeling sagging curve of the cable pendulum monorail] Dnepropetrovsk, 2007. 23p.
11. Prochnost, ustoychivost, kolebaniya. [Strength, stability, fluctuations]. Spravochnik v 3t. T. 1. Pod obsch. red. Birgera I. A., Panovko YA. G. M.: Mashinostroenie, 1968. 831 p.
12. Boyko Y.S. Vozduhoplavanje: privyaznoe, svobodnoe, upravlyaemoe. [Aeronautics: tethered, free, manageable] M.: MGUP, 2001. 462p.
13. Abuzov A.V., Kazakov N.V., Ivanov V.I. Inzhenernyj vestnik Dona (Rus), 2014, №3 URL: [ivdon.ru/ru/magazine/archive/n3y2014/2493](http://ivdon.ru/ru/magazine/archive/n3y2014/2493)
14. The Design of Robust Helium Aerostats. Jonathan I. Miller. 2005. 43p
15. I.R. Shegelman. Inzhenernyj vestnik Dona (Rus), 2012, №2. URL: [ivdon.ru/ru/magazine/archive/n2y2012/866](http://ivdon.ru/ru/magazine/archive/n2y2012/866)

