



УДК 623.742.2:621.86.016

© А. В. Абузов, Н. В. Казаков, 2013

## **МЕТОДИКА ОПРЕДЕЛЕНИЯ РЕЙСОВОЙ НАГРУЗКИ И МОЩНОСТИ ЛЕБЕДОЧНЫХ МЕХАНИЗМОВ АЭРОСТАТНО-КАНАТНЫХ СИСТЕМ НА ПРИМЕРЕ АКС-5**

*Абузов А. В.* – канд. техн. наук, доцент кафедры «Технология заготовки и переработки древесных материалов», e-mail: AC-systems@mail.ru, тел. (4212) 76-07-49;  
*Казаков Н. В.* – канд. техн. наук, доцент кафедры «Технология заготовки и переработки древесных материалов», e-mail: kazakov.nikolay@mail.ru, тел. 8-924-414-90-00 (ТОГУ)

В данной статье приведена методика расчета мощности лебедочных механизмов системы АКС-5, необходимой для перемещения аэростата во время трелевочного процесса. Определены факторы, влияющие на всплывную силу аэростата и соответственно на его рейсовую нагрузку. Приведены статистические данные по изменению рейсовой нагрузки аэростата в течении года эксплуатации и выведено среднестатистическое значение. Отражены зависимости рейсовой нагрузки аэростата и мощности лебедки от таких факторов, как высота аэростата над уровнем моря, температура окружающего воздуха, скорость перемещения, скоростной напор ветра. Исходя из возможных скоростей перемещения каретки для обычных канатных трелевочных установок - определены диапазоны возможной конкурентной скорости перемещения аэростата для различных условий эксплуатации.

The paper deals with the design procedure for the winch machines of the ACS-5 class which is needed for moving a balloon. Factors that influence its elevating power and trip loading are determined. The statistical data on change of trip loading of a balloon during one year operation are given and an average value is provided. The trip loading and power of the winch as functions of the balloon above sea level, ambient temperature, motion speed, and wind dynamic head are given. On the basis of possible carriage velocities for ordinary skidding machines ranges of potential competitive velocity of the balloon for various operation conditions are determined.

*Ключевые слова:* мощность лебедки, рейсовая нагрузка аэростата, всплывная сила аэростата, аэростатная трелевка, конкурентноспособность, скорость выбора.



Изучение мощности и рейсовой нагрузки аэростатно-канатных систем является важным и основным направлением в исследовании факторов влияющих на производительность и себестоимость работы данных установок.

Рейсовая нагрузка аэростата и мощность лебедочных механизмов зависят от многих факторов, которые присутствуют в реальной работе аэростатных систем. К основным влияющим факторам относятся:

- Высота нахождения установки и аэростата над уровнем моря;
- Температура окружающего воздуха;
- Скоростной напор ветра, который в свою очередь, зависит от высоты нахождения аэростата, плотности воздуха и скорости ветрового потока;
- Необходимая скорость выбирания (скорости перемещения АКС).

В виду того, что основные тяговые параметры лебедки задаются на основании подъемной силы аэростата, а та в свою очередь выражена его всплывной силой, то необходимо провести анализ, в какой степени влияние температуры окружающего воздуха и высоты нахождения аэростата над уровнем моря, будут сказываться на изменение всплывной силы и соответственно его рейсовой нагрузки. Рейсовая нагрузка аэростата должна быть оптимальной для конкретных показателей лесного фонда, его породного состава, плотности насаждений, способа рубок, а также обеспечивать конкурентную способность по отношению к другим трелевочным механизмам, работающих на данной территории [1]. Исходя из данных аналитических исследований, проведенных по лесному фонду Дальнего Востока, было принято, что средняя оптимальная грузоподъемность трелевочных механизмов, работающих по системе выборочных рубок, должна находиться в пределах 5000 кг [2, 3].

Всплывная сила аэростата  $\Phi_0$  определяется по формуле [3]:

$$\Phi_0 = V_p \times \alpha \times \Delta \times r \times f_0, \quad (1)$$

где:  $\Phi_0$  – полная всплывная сила (кгс);

$V_p$  – раскройный объем аэростата ( $m^3$ );

$\alpha$  – коэффициент, учитывающий расширения газа в оболочке;

$\Delta$  – относительная плотность на высоте ( $P_H/P_0$ );

$r$  – коэффициент, учитывающий перегрев газа в оболочке;

$f_0$  – удельная подъемная сила газа, зависящая от температуры окружающего воздуха ( $кг/м^3$ ).

Подъемную силу аэростата  $P$  можно определить по формуле:

$$P = \Phi_0 - G_{констр}, \quad (2)$$

где -  $G_{констр}$  – масса оболочки и канатов, кг.

Возможную рейсовую нагрузку можно определить по формуле:

$$Q_p = \Phi_0 - G_{констр} - Z_{в.с.} \quad (3)$$

где  $Q_p$  – рейсовая нагрузка аэростата, кг;

$Z_{в.с.}$  – запас всплывной силы аэростата, кг.



Исходя из проведенных расчетов, базирующихся на конструктивных особенностях аэростата и заданной необходимой грузоподъемности, можно утверждать, что температура окружающего воздуха и высота нахождения аэростата над уровнем моря оказывают большое влияние на изменение всплывной силы аэростата, а соответственно и его рейсовой нагрузки. При этом уменьшение температуры влечет увеличение подъемной силы, а увеличение высоты над уровнем моря наоборот ведет к уменьшению грузоподъемности аэростата.

В связи с тем, что аэростатная система эксплуатируется круглогодично и в различных диапазонах высот, то соответственно в процессе работы будут иметься множество температурных и высотных режимов, под влиянием которых, в течение года будут появляться множество различных значений рейсовой нагрузки (рис. 1). Исходя из этого, необходимо определить средне-взвешенную величину рейсовой нагрузки в  $m^3$  при заготовке основных пород, таких как ель и лиственница, в течение года эксплуатации.

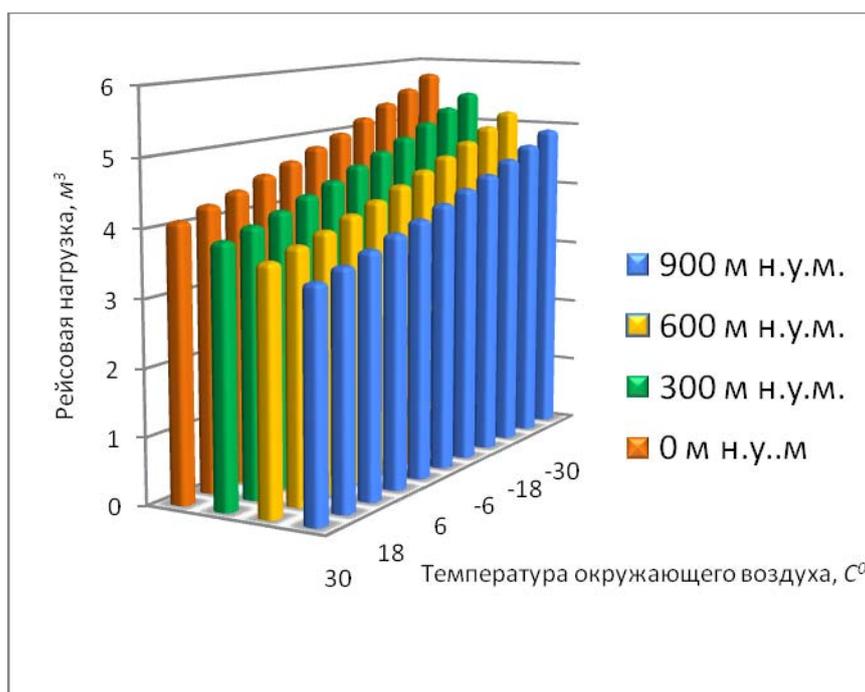


Рис. 1. Изменение рейсовой нагрузки аэростата АКС-5 в зависимости от температуры окружающего воздуха и высоты над уровнем моря.

Обработка расчетных данных по рейсовой нагрузке, в зависимости от времени года, рельефа (высоты) местности и соответственно всплывной силы



аэростата, необходимой для прогнозирования возможной производительности системы АКС представлены в Таблице 1.

Таблица 1

Характеристики положения величины годовой рейсовой нагрузки АКС-5 ( $м^3$ )

Показатели	Группы по высоте рельефа над уровнем моря, м			
	0-200	300-500	600-800	900-1100
Температурный диапазон $+30^{\circ} - +24^{\circ}C$				
$I_{\beta}$	[4,02;4,19]	[3,78;3,94]	[3,55; 3,73]	[3,34; 3,5]
$\sigma[v]$	0,084	0,084	0,073	0,056
Температурный диапазон $+22^{\circ} - +16^{\circ}C$				
$I_{\beta}$	[4,20;4,37]	[3,97;4,13]	[3,73;3,91]	[3,49;3,67]
$\sigma[v]$	0,087	0,076	0,072	0,069
Температурный диапазон $+14^{\circ} - +8^{\circ}C$				
$I_{\beta}$	[4,39;4,57]	[4,15;4,31]	[3,92; 4,08]	[3,66;3,84]
$\sigma[v]$	0,095	0,080	0,079	0,070
Температурный диапазон $+6^{\circ} - +0^{\circ}C$				
$I_{\beta}$	[4,59;4,77]	[4,34;4,52]	[4,09; 4,27]	[3,83;4,03]
$\sigma[v]$	0,102	0,101	0,091	0,082
Температурный диапазон $-2^{\circ} - -8^{\circ}C$				
$I_{\beta}$	[4,80;4,99]	[4,55;4,73]	[4,30; 4,46]	[4,04;4,22]
$\sigma[v]$	0,112	0,089	0,072	0,087
Температурный диапазон $-10^{\circ} - -16^{\circ}C$				
$I_{\beta}$	[5,04;5,23]	[4,76;4,96]	[4,42; 4,78]	[4,24;4,44]
$\sigma[v]$	0,127	0,115	0,363	0,116
Температурный диапазон $-18^{\circ} - -24^{\circ}C$				
$I_{\beta}$	[5,27;5,47]	[4,99;5,18]	[4,72; 4,92]	[4,42;4,71]
$\sigma[v]$	0,138	0,121	0,113	0,241
Температурный диапазон $-26^{\circ} - -32^{\circ}C$				
$I_{\beta}$	[5,53;5,73]	[5,25;5,44]	[4,97; 5,15]	[4,70;4,90]
$\sigma[v]$	0,156	0,129	0,124	0,115



где  $I_{\beta}$  – доверительный интервал для среднего генеральной совокупности, соответствующий 95% уровню надежности;

$\sigma[v]$  – среднее квадратическое отклонение величины годовой рейсовой нагрузки АКС.

На основании статистических данных диапазон среднего значения годовой рейсовой нагрузки в группах составляет 3,42-5,63 м<sup>3</sup>. Вероятность возникновения рейсовой нагрузки АКС не менее 4 м<sup>3</sup>/год составит 74,6%.

Опишем данную величину с вероятностной точки зрения. Для этого рассчитаем математическое ожидание (средневзвешенное значение) величины рейсовой нагрузки  $Q_p$ , которое покажет положение случайной величины, которое укажет ориентировочное значение, около которого группируются все возможные значения.

Ряд распределения случайной величины рейсовой нагрузки имеет вид, представленный в таблице 2, где  $x_i = Q_p$ .

Таблица 2

Вероятности возможных значений величины рейсовой нагрузки

$x_i$	3,4	3,6	3,8	3,9	4,0	4,1	4,2	4,3	4,4
$p_i$	0,03	0,063	0,063	0,063	0,063	0,063	0,063	0,063	0,063
$x_i$	4,5	4,6	4,7	4,8	4,9	5,1	5,3	5,4	5,6
$p_i$	0,03	0,094	0,03	0,063	0,03	0,094	0,03	0,03	0,03

При 95 процентном уровне надежности можно считать, что среднее для генеральной совокупности находится в интервале  $[4,4(7) \pm 0,29]$ , иначе доверительный интервал значений параметра годовой рейсовой нагрузки, не противоречащий опытным данным, имеет вид  $[4,19; 4,77]$ .

Предположим, что величина рейсовой нагрузки является дискретной случайной величиной, тогда математическое ожидание будет определяться:

$$M[X] = M\left[Q_p\right] = \sum_{i=1}^n x_i p_i \quad (4)$$

где  $x_i$  – случайная величина;  $p_i$  – вероятность всплывной силы АКС.

Используя ряд распределения величины рейсовой нагрузки таблицы 2, значение математического ожидания данной величины будет составлять:

$$M[X] = 4,268 \text{ м}^3$$

В случае, когда данная величина будет являться непрерывной величиной, то есть:

$$M[X] = \int_{-\infty}^{\infty} x f(x) dx \quad (5)$$



где  $f(x)$  – плотность распределения величины  $X$ , значение математического ожидания величины рейсовой нагрузки будет составлять:

$$M[X] = M[Q_p] = 4,372 \text{ м}^3$$

Для дальнейшего определения мощности лебедочных механизмов, необходимо задаться теми скоростными параметрами перемещения аэростата, которые будут способствовать наилучшей производительности аэростатно-канатной системы.

Изначально неизвестно, какая скорость будет оптимальной, поэтому мы должны исходить из показателей скорости уже имеющихся подобных механизмов или систем горной трелевки. Таким образом, необходимо исходить от известных скоростей канатных трелевочных установок, но с преобладающим фактором конкурентоспособности.

Это значит, что значение скорости должно обеспечивать производительность равную или большую, чем у канатных установок.

Расчетные данные определения мощности привода АКС в условиях Дальнего Востока определим следующие:

- диапазон температуры окружающего воздуха от +30 °С до -30°С;
- диапазон высоты рельефа от 0 до 1100м над уровнем моря;
- диапазон скорости ветра от 0 до 15 м/с.

Мощность аэростатной лебедки можно рассчитать по формуле [4]:

$$W = \frac{R \cdot v_{\text{выб}}}{\eta}, \text{ кВт} \quad (6)$$

- где:  $W$  – мощность лебедки, кВт  
 $R$  – результирующая нагрузка, действующая на аэростат, Н  
 $v_{\text{выб}}$  – скорость выбирания аэростата, м/с  
 $\eta$  – коэффициент полезного действия,  $\eta = \text{const}$ ,  $\eta = 0,6$

Результирующую нагрузку рассчитываем по формуле:

$$R = \sqrt{Q_y^2 + Q_x^2}, \text{ Н} \quad (7)$$

где:  $Q_y$  – вертикальная соответствующая, равная статической подъемной силе аэростата, Н

$Q_x$  – горизонтальная составляющая.

Вертикальную составляющую рассчитываем по формуле:

$$Q_y = (\Phi_o - G_{\text{констр}}) \cdot 9,81, \text{ Н} \quad (8)$$

- где:  $\Phi_o$  – полная всплывная сила аэростата, кг  
 $G_{\text{констр}}$  – вес конструкции (оболочка+канаты)  
9,81 – переводной коэффициент, при переводе «кг» в «Н»  
Горизонтальную составляющую рассчитываем по формуле:

$$Q_x = C_x \cdot q_n \cdot v^{\frac{2}{3}}, \text{ Н} \quad (9)$$

- где:  $C_x$  – коэффициент лобового сопротивления, равный 0,5;  
 $q_n$  – скоростной напор, Н/м<sup>2</sup>



$V^{2/3}$  – главная поверхность аэростата,  $m^2$

Скоростной напор находим по формуле:

$$q_n = \frac{\rho \cdot v^2}{2}, \quad H/m^2 \quad (10)$$

где:  $\rho$  – плотность воздуха, зависящая от высоты на уровне моря,  $kg/m^3$

$v$  – скорость ветра,  $m/c$

В связи с тем, что на каждой высоте своя плотность воздуха и соответственно свой скоростной напор, то количество значений  $Q_x$  будет соответствовать количеству значений  $q_n$ .

Для определения необходимой мощности лебедки, зададимся условием, при которых аэростат имеет наименьшую тягу в порожнем состоянии. Для Дальневосточного региона значения параметров составляют:

- Температура наружного воздуха  $+30^\circ C$ ;
- Высота над уровнем моря 500-700 метров;
- Ветер от 1 до 5  $m/c$ .

Т.е., эти условия приближены к техническим условиям эксплуатации канатных установок.

Находим наименьшие нагрузки, действующие на аэростат:

$$Q_y^{\min} = \Phi_o - G_{\text{констр}} = (5035-1050) \cdot 9,81 = 39039H \quad (11)$$

Для нахождения минимального значения  $Q_x$ , необходимо найти  $\max$  значение скоростного напора при идеальных условиях. Максимальный скоростной напор в данном случае будет при ветре 5  $m/c$  и составит 15,3  $H/m^2$ .

Находим наименьшее значение  $Q_x$ :

$$Q_x = C_x \cdot q_n \cdot v_{\text{от}}^{2/3} = 0,5 \cdot 15,3 \cdot 5150^{2/3} = 2264,4 H/m^2 \quad (12)$$

Соответственно находим  $R^{\min}$ :

$$R^{\min} = \sqrt{39093^2 + 2264,4^2} = 41357 H \quad (13)$$

Для нахождения потребной мощности для условий минимальной тяги аэростата зададимся скоростными параметрами выбора аэростата:  $v_{\text{выб}} = 1-5 m/c$ . Данные по расчету мощности сведем в таблицу 4.

Таблица 4

Значения потребной мощности лебедки при минимальной тяге аэростата.

Скорость выбора, $m/c$	1	2	3	4	5
Мощность, $kBt$	69	138	206	275	344

Из расчетов видно, что необходимая мощность лебедки, для того чтобы обеспечить конкурентоспособную скорость перемещения 5  $m/c$ , должна быть 344  $kBt$ .

Зная максимальную мощность лебедки при идеальных условиях, зададимся условиями, при которых аэростат имеет максимальную тягу (критиче-



ские условия) и методом сравнения найдем возможную скорость перемещения аэростата в критических условиях при заданной максимальной мощности 344кВт.

Для расчетов принимаем критические условия работы АКС для ДВ региона:

- Температура наружного воздуха -30°C
- Высота над уровнем моря 0-200 м
- Ветер 15м/с

При данных условиях значения:

$$q_n^{\max} = 137,8 \text{ Н/м}^2$$

$$Q_x^{\max} = 20394 \text{ Н}$$

$$Q_y^{\max} = 55132 \text{ Н}$$

$$R^{\max} = 75526 \text{ Н}$$

Данные по расчету мощности, соответствующие максимальной тяги аэростата сведем в Таблицу 5.

Таблица 5  
Значения потребной мощности при критических условиях работы

Скорость вы- бирания, м/с	1	2	3	4	5
Мощность лебедки, кВт	125	252	377	503	629

Сравнивая значения мощности при критических условиях с max мощностью при идеальных условиях, видно, что близкое значение это 377кВт и скорость 3м/с.

Более точное значение максимально возможной скорости при критических условиях можно определить графически. Данная скорость составит 2,8 м/с.

Зная конкурентоспособную скорость выбирания при критических и идеальных условиях, можно пойти от обратного и найти возможную скорость при движении аэростата в груженом состоянии, т.е. тогда, когда система обладает наименьшей тягой.

Для расчета возможной скорости при идеальных условиях зададимся следующими условиями:

- Согласно таксационным исследованиям лесных массивов Дальнего Востока рейсовая нагрузка может составить 3500кг, исходя из этого  $Q_y = 4758 \text{ Н}$ ;

- Температура наружного воздуха +30°C;
- Высота над уровнем моря до 500 м;
- $Q_x = 2264 \text{ Н}$

Находим минимальные значения  $Q_y$  при идеальных условиях:



$$Q_y = (\Phi_o - Q_{рейс} - G_{констр}) \cdot 9,81 = (5035 - 3500 - 1050) \cdot 9,81 = 4758 \text{ Н} \quad (14)$$

Находим значение результирующей нагрузки при движении груженого аэростата в идеальных условиях:

$$R_{сп}^{\min} = \sqrt{4758^2 + 2264^2} = 7022 \text{ Н} \quad (15)$$

Тогда, зная максимальные значения: мощности  $W$ , результирующей нагрузки  $R_{гр}^{\min}$ ,  $\eta=0,6$ ; найдем максимальные значения скорости выбирания.

Значения скорости определяется формулой:

$$v_{выб}^{\max} = \frac{W^{\max} \cdot \eta}{R_{сп}^{\min}} = \frac{344000 \cdot 0,6}{7022} = 29,4 \text{ м/с} \quad (16)$$

Полученное значение превышает реальные значения скорости, имеющейся у подвесных канатных установок в 3 раза. Соответственно можно принять скорость при идеальных условиях равную 10 м/с.

Находим возможную скорость выбирания аэростата при критических условиях.

Для расчета зададимся следующими условиями:

- Горизонтальная нагрузка  $Q_x^{\max} = 20394 \text{ Н}$
- Скорость ветер 15 м/с
- Рейсовая нагрузка 3500 кг
- Температура наружного воздуха  $-30^\circ\text{C}$ .

Находим максимальное значение  $Q_y$ :

$$Q_y^{\text{гр.макс}} = (\Phi_o - Q_p - G_{констр}) \cdot 9,81 = 20797 \text{ Н} \quad (17)$$

Находим максимальное значение  $R$ :

$$R_{сп}^{\max} = \sqrt{20797^2 + 20394^2} = 41191 \text{ Н}$$

Возможную скорость выбирания при критических условиях находим по формуле (12):

$$v_{выб}^{\max} = \frac{W^{\max} \cdot \eta}{R_{сп}^{\max}} = \frac{344000 \cdot 0,6}{41191} = 5,01 \text{ м/с} \quad (18)$$

## Выводы

Выбранный изначально конкурентоспособный скоростной диапазон, соответствует тому, чтобы обеспечить соответствие значению выбранной мощности АКС оптимальную скорость при критических и идеальных условиях работы.

В случае же груженого аэростата (при минимальных нагрузках), скорость выбирания может быть увеличена в три раза.

Исходя из проведенных расчетов принимаем:

- $v_{порож}^{\max}$  – при идеальных условиях 5 м/с
- $v_{порож}^{\max}$  – при средних условиях 3,5 м/с
- $v_{порож}^{\max}$  – при критических условиях 2,8 м/с
- $v_{груз}^{\max}$  – при идеальных условиях 10 м/с



- $v_{\text{груз}}^{\text{max}}$  – при средних условиях  $7\text{ м/с}$
- $v_{\text{груз}}^{\text{max}}$  – при критических условиях  $5\text{ м/с}$

Максимальная мощность привода лебедочного механизма для этих режимов составляет  $344\text{ кВт}$ .

Данная методика позволяет кратко, но точно определить, в зависимости от условий эксплуатации, параметры рейсовой нагрузки и мощности лебедочных механизмов, необходимой для перемещения аэростата с оптимальной скоростью, обеспечивающей конкурентоспособную производительность и рентабельные экономические показатели.

### Библиографические ссылки

1. *Отчет о научно-исследовательской работе «Исследование возможностей использования летательных аппаратов на лесозаготовках в горных условиях»*. Часть 1 и 2. – Химки: ЦНИИМЭ, 1985. – 189 с.
2. *Краткое технико-экономическое обоснование применения аэростатно-канатной системы на трелевки древесины*. – Хабаровск: ДЦВ «Аэрос» (проспект фирмы), 2000. – 25 с.
3. *Абузов А.В. Экспериментальные исследования аэростатно-канатной системы / А.В. Абузов, К.В. Рудица // Вестник ТОГУ*. – Хабаровск: Изд-во ТОГУ, Вып. 1(8), 2008. – с. 259 – 274.
4. *Жевагин В.З., Лазутин В.А. Устройство и эксплуатация автоматических аэростатов и средств их наземного обслуживания*. – Москва: Военное издательство Министерства обороны СССР, 1978. – 120 с.
5. *Федоров С.В. Технико-экономическое обоснование создания аэростатного носителя трелевочного устройства*. – М.: Центр НТТМ «Феникс», 1988. – 20 с.