

УДК 629.733.34:519.711.3

## Математическое моделирование основных параметров аэростатно-канатной системы для трелевки древесины АКС-5

А.В. Абузов

Тихоокеанский государственный университет, Тихоокеанская 136, Хабаровск, Россия

AC-systems@mail.ru

Статья получена 15.03.2014, принята 19.05.2014

*Рассмотрена задача математического моделирования основных технологических показателей аэростатно-канатной системы АКС-5. Основные параметры, оказывающие прямое влияние на себестоимость работ аэростатно-канатных систем, были определены, исходя из проведения практических исследований аэростатной системы МТА-500. Оптимизация параметров установки проведена с учетом многофакторного анализа исследуемых показателей. Для анализа выбраны двенадцать наиболее влияющих факторов. В ходе исследований установлено, что рейсовая нагрузка и соответственно производительность работ могут меняться на протяжении смены и даже рабочего цикла. Особое влияние на процесс транспортировки оказывают температура и высота аэростата над уровнем моря. Получены уравнения регрессии для таких параметров, как рейсовая нагрузка, мощность установки, производительность и себестоимость работ. Методика позволяет определять оптимальные показатели эксплуатации системы при минимальной себестоимости работ.*

**Ключевые слова:** аэростатно-канатная система, аэростатная трелевка, моделирование параметров, статистика, рейсовая нагрузка, грузоподъемность.

## Mathematical modelling of the key parameters of aerial skidding system AKS-5

A.V. Abuzov

Pacific National University, 136 Tihookeanskaya St., Khabarovsk, Russia

AC-systems@mail.ru

Received 15.03.2014, accepted 19.05.2014

*The task of mathematical modelling of the key technological parameters of aerial skidding system AKS-5 has been considered. Key parameters, having direct influence on the cost of production of work of aerial skidding systems, have been determined by carrying out practical research of aerial skidding system MTA-500. Optimization of unit parameters has been done by taking multi-factor analysis into account. The analysis has shown that truck load and productivity of work can vary through the shift or even a working cycle. Temperature and altitude of an aerostat have a special influence on transportation process. The equations of regress for such parameters as truck load, unit capacity, unit productivity and the cost of production of work have been received. The technique allows determining optimum parameters of system operation at the minimal cost of production of work.*

**Keywords:** aerial skidding system, aerial skidding, modelling of parameters, statistics, truck load, load-carrying capacity.

**Введение.** Аэростатно-канатные транспортные установки относятся к технологическим системам с периодически меняющимися эксплуатационными параметрами, которые напрямую зависят от таких показателей, как температура окружающего воздуха и высота нахождения аэростата над уровнем моря. В течение рабочей смены эти показатели могут меняться неоднократно, тем самым изменяя основные эксплуатационные параметры системы, а именно, подъемной силы, рейсовой нагрузки, мощности лебедочных механизмов и соответственно производительности и себестоимости.

**Постановка и методика решения задачи.** Для многофакторного анализа на основе множественной линейной регрессии, позволяющей проводить оптимизацию параметров исследуемой системы,

производительности и себестоимости аэростатно-канатных систем, были рассмотрены все имеющиеся и разработанные в настоящее время установки [1 – 3].

Для анализа выбраны наиболее значимые факторы, влияющие на поведение исследуемых показателей:

- $x_1$  – всплывная сила аэростата  $F_v$ , кг;
- $x_2$  – температура окружающей среды  $T$ ,  $^{\circ}C$ ;
- $x_3$  – высота подъема аэростата  $H$ , м;
- $x_4$  – рейсовая нагрузка аэростата  $Q_p$ ,  $m^3$ ;
- $x_5$  – среднее расстояние трелевки  $l_{cp}$ , м, в зависимости от формы исследуемого участка;
- $x_6$  и  $x_7$  – скорость перемещения аэростата при различных режимах работы  $v_{хол}$ ,  $v_{раб}$ , м/с;
- $x_8$  – результирующая нагрузка  $R$ ,  $H$ ;
- $x_9$  – вертикальная нагрузка  $Q_y$ ,  $H$ ;

$x_{10}$  – горизонтальная нагрузка, действующая на аэростат  $Q_x$ , зависящая от скоростного напора и воздушного потока,  $H$ ;

$x_{11}$  – скорость выбирания аэростата лебедкой  $v_{выб}$ ,  $м/с$ ;

$x_{12}$  – мощность лебедки  $W$ ,  $кВт$ ;

$y_1$  – производительность АКС  $\Pi_{час}$ ,  $м^3$ ;

$y_2$  – себестоимость  $C$   $1 м^3$  древесины, при использовании АКС,  $руб/м^3$ .

В процессе расчетов определялись зависимости вида:

$$Q_p = f(T, H), \quad (1)$$

$$R = f(Q_y, Q_x), \quad (2)$$

$$W = f(R, v_{выб}), \quad (3)$$

$$\Pi = f(l_{cp}, v_{хол}, v_{раб}, Q_p), \quad (4)$$

$$C = f(\Pi, l_{cp}, v_{хол}, v_{раб}, Q_p), \quad (5)$$

где  $Q_p$  – рейсовая нагрузка,  $м^3$ ;  $T$  – температура окружающего воздуха,  $С^0$ ;  $H$  – высота над уровнем моря,  $м$ ;  $R$  – результирующая нагрузка,  $Н$ ;  $Q_y$  – вертикальная составляющая результирующей нагрузки,  $Н$ ;  $Q_x$  – горизонтальная составляющая результирующей нагрузки,  $Н$ ;  $v_{выб}$  – скорость перемещения аэростата,  $м/с$ ;  $l_{cp}$  – среднее расстояние трелевки,  $м$ ;  $v_{хол}$  – скорость перемещения аэростата в порожнем состоянии,  $м/с$ ;  $v_{раб}$  – скорость перемещения аэростата в груженом состоянии,  $м/с$ ;  $\Pi$  – производительность системы,  $м^3$ ;  $W$  – мощность лебедочного механизма,  $кВт$ .

Оценка коэффициентов регрессии базировалась на незакодированных исходных значениях факторов. Интервал варьирования факторов определялся исходя из реальных диапазонов изменения величин. Численное моделирование выходных величин  $y_i$  производилось на основании вычисленных выражений при изменении совокупности факторов для количества случаев от 42 до 1500.

Для полученных уравнений определены коэффициенты детерминированности  $r = 0,67$ ;  $F$ -статистика = 5,417. Для определения уровня надежности модели положим величину Альфа = 0,05. Для числа степеней свободы  $\nu_1 = 5$  и  $\nu_2 = 49$  по таблице процентных точек  $F$ -распределения Фишера найдено  $F$ -критическое = 2,3683, что меньше значения  $F$ -наблюдаемого. Следовательно, полученное уравнение применимо для оценки себестоимости и производительности АКС-5.

Для получения уравнения регрессии исследуемых параметров АКС-5 использован пакет прикладных программ Статистика 6.0. Статистический анализ основан на расчетных данных – значениях факторов, полученных в ходе экспериментальных исследований.

Размер совокупности значений факторов имеет достаточный объем для выявления степени корреляционной связи между величинами производительности, себестоимости и параметрами, характеризующими эффективность и целесообразность вовлечения АКС в лесотехническую отрасль промышленности.

Обработка статистических данных на основе результатов всестороннего анализа позволила получить математические модели в качестве уравнений регрессии и их компьютерную реализацию в виде диаграммы поверхности зависимых переменных, как функции факторов, анализируя которые, можно сделать вывод о стабильности характера изменения исследуемых параметров АКС, показателя производительности АКС и оптимальном значении показателя себестоимости установки по рассматриваемым критериям в зависимости от варьирования их совокупности.

Регрессионные уравнения полученных типов заданы в соответствии с фактическими данными факторов и структурой корреляционных взаимосвязей.

Рейсовая нагрузка  $Q_p$  ( $м^3$ ) представлена уравнением регрессии и графиком на рис. 1:

$$Q_p = 4,8824 - 0,0256T - 0,0009H, \quad (6)$$

где  $T$  – температура окружающего воздуха,  $С^0$ ;  $H$  – высота над уровнем моря,  $м$ .

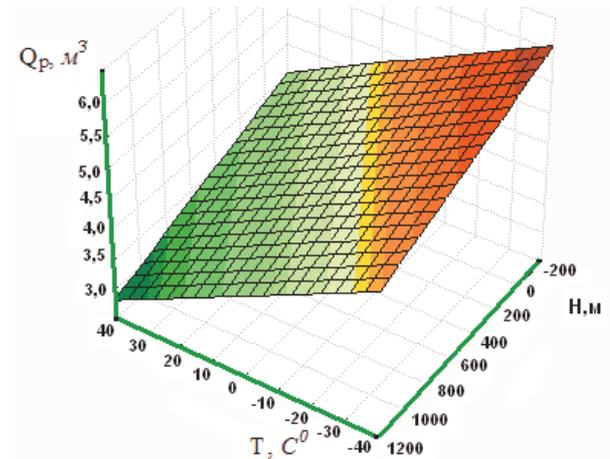


Рис. 1. Модель рейсовой нагрузки аэростата АКС-5

Результирующая нагрузка подъемной силы аэростата  $R$ ,  $Н$ :

– порожний аэростат, высота рельефа от 0 до 200  $м$ :

$$R = 9,8099Q_y + Q_x, \quad (7)$$

где  $R$  – результирующая нагрузка,  $Н$ ;  $Q_y$  – вертикальная составляющая,  $Н$ ;  $Q_x$  – горизонтальная составляющая,  $Н$ ;

– порожний аэростат, высота рельефа от 300 до 500  $м$ :

$$R = 9,8099Q_y + 0,9999Q_x, \quad (8)$$

– порожний аэростат, высота рельефа от 600 до 800  $м$ :

$$R = 9,8099Q_y + Q_x, \quad (9)$$

– порожний аэростат, высота рельефа от 900 до 1100 м (рис. 2):

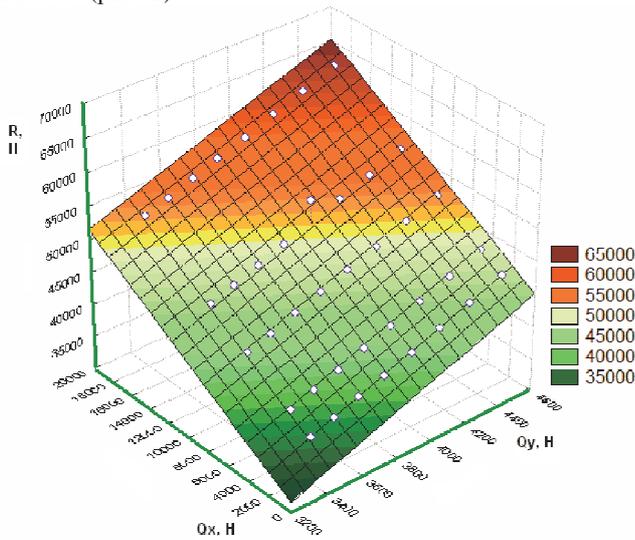


Рис. 2. Модель результирующей нагрузки, высота от 900 до 1100 м

Мощность лебедочного механизма аэростатной лебедки  $W$ , кВт:

– в режиме порожнего аэростата, высота от 0 до 200 м:

$$W = 0,01004R + 61,8917v_{\text{выб}}, \quad (11)$$

– в режиме груженого аэростата, высота от 0 до 200 м:

$$W = 0,0035R + 21,7974v_{\text{выб}}, \quad (12)$$

– в режиме порожнего аэростата, высота от 900 до 1100 м (рис. 3):

$$W = 0,799 \cdot 10^{-3}R + 61,3023v_{\text{выб}}, \quad (13)$$

– в режиме груженого аэростата, высота от 900 до 1100 м (рис. 4):

$$W = 0,0032R + 21,8232v_{\text{выб}}, \quad (14)$$

где  $W$  – мощность, кВт;  $R$  – результирующая нагрузка, Н;  $v_{\text{выб}}$  – скорость выбирания аэростата, м/с.

Модель мощности аэростатной лебедки в зависимости от основных влияющих факторов для условий Дальнего Востока можно записать:

$$W = f \left[ R(\chi, Q_x(q_H), Q_y(\Phi_{0_n})) \right] \frac{v_{\text{выб}}^\kappa}{\eta}. \quad (15)$$

Данная модель представляет собой параметризацию  $f(t)$  при замене параметра  $t = R(\chi, Q_x, Q_y)$  при условиях:

$$\eta = \text{const} = 0,6; v_{\text{выб}}^\kappa \in [1, 5] \text{ м/с, при } \kappa = \overline{1,2,\dots,5}.$$

$$\Phi_{0_n} = f(\varphi, T_i, h_m) - \text{функция параметра всплывной}$$

силы аэростата при  $n = \overline{1,1000}$ ;  $T_i \in [-30, +30]^\circ\text{C}$ ;  $h_m \in [0, 1100]$  м; где  $\varphi$  – характеристический показатель полной всплывной силы аэростата, учитывающий совокупность параметров  $(V_p, \alpha, \Delta, r, f_o)$ ;

$$R = 9,8162Q_Y + 1,0066Q_X. \quad (10)$$

$q_n = f(\psi, v_e, h_m)$  – функция параметра скоростного напора;  $v_e \in [0, 15]$  м/с; где  $\psi$  – характеристический показатель величины скоростного напора, учитывающий влияние параметра  $\rho$ ;  $\chi$  – характеристический показатель составляющих результирующей нагрузки, действующей на аэростат, учитывающий совокупность параметров  $(C_x, G_{\text{констр}} V^{2/3}, k_{\text{кз}}^H)$ .

Модель (15) наиболее полно дает представление о множественной зависимости, представленной характеристическими коэффициентами параметров и наиболее значимыми показателями, влияющими на величину мощности аэростатной лебедки.

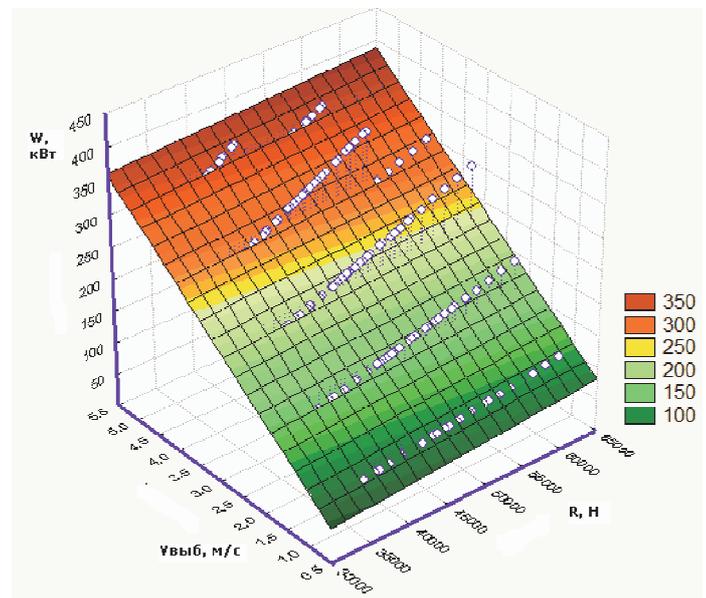


Рис. 3. Мощность лебедочного механизма на высоте от 900 до 1100 м. Порожний аэростат

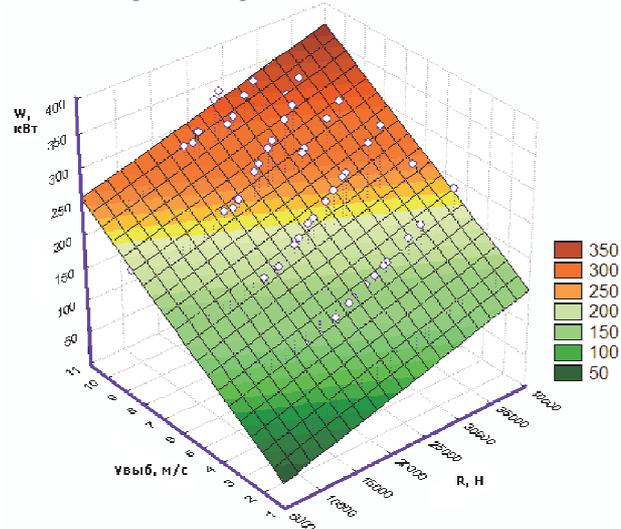


Рис. 4. Мощность лебедочного механизма на высоте от 900 до 1100 м. Груженный аэростат

Полученные модели (рис. 5, 6) показателя часовой производительности АКС-5 реализуются через уравнение следующего вида:

где  $L_{cp}$  – среднее расстояние трелевки, м;  $V_{хол}$  – скорость холостого хода аэростата, м/с;  $V_{раб}$  – скорость рабочего хода аэростата, м/с;  $Q_p$  – рейсовая нагрузка аэростата, м<sup>3</sup>.

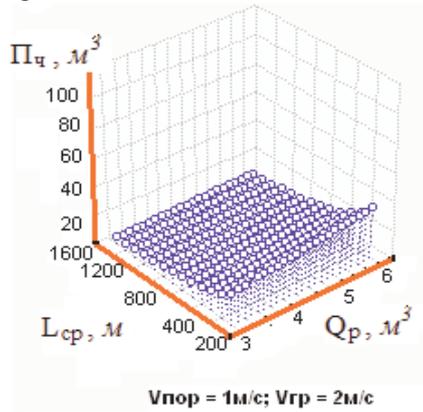


Рис. 5. Модель производительности АКС-5 при  $V_{пор} = 1$  м/с,  $V_{гр} = 2$  м/с

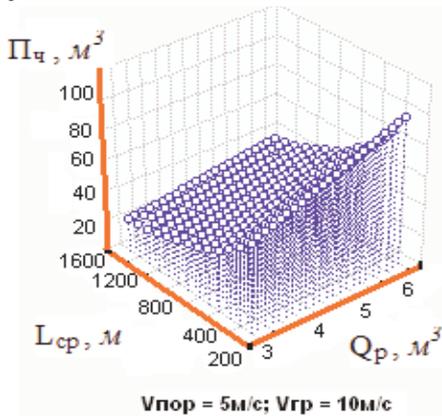


Рис. 6. Модель производительности АКС-5 при  $V_{пор} = 5$  м/с,  $V_{гр} = 10$  м/с

По аналогии расчетов производительности был выполнен анализ на основе множественной линейной регрессии для показателя себестоимости. Основные параметры, оказывающие прямое влияние на себестоимость работ аэростатно-канатных систем, были определены, исходя из проведения практических исследований аэростатной системы МТА-500 [4, 5].

Была получена зависимость, с помощью которой можно вычислять себестоимость заготовленной древесины в течение года эксплуатации, при влиянии различных природных и технологических факторов:

$$C_{м.куб} = \frac{Z_{час}}{P_{час}}, \quad (17)$$

где  $Z_{час}$  – комплекс затрат за один час эксплуатации АКС, руб.;

$$Z_{час} = A + ГСМ + ВБЗ + ЗП + ЗГ + ОЗЧпР + ОНЗ ; \quad (18)$$

$$P_{час} = 0,000018 L_{cp}^2 - 0,06003 L_{cp} + 53,0404 V_{хол} - 22,227 V_{раб} + 9,40406 Q_p \quad (16)$$

$A$  – амортизационные отчисления, руб.; ГСМ – затраты на горюче-смазочные материалы, руб.; ВБЗ – вспомогательно-бытовые затраты, руб.; ЗП – фонд заработной платы, руб.; ЗГ – затраты на газ и газовое оборудование, руб.; ОЗЧпР – отчисления на запасные части и ремонт, руб.; ОНЗ – непредвиденные затраты, руб.;  $P_{час}$  – производительность АКС в течение часа эксплуатации, м<sup>3</sup>.

Рассмотрен вариант для зависимости  $C = f(P, l_{cp})$  (рис. 7). С помощью программы Статистика 6.0 был проведен анализ совокупности влияющих факторов на основании их распределения, которые прослеживают динамику изменения в пространственном распределении численного моделирования выходных величин:

$$C = 0,276 P^2 - 26,519 P + 1,804 L_{cp} - 0,83 \cdot 10^{-3} L_{cp} \quad (19)$$

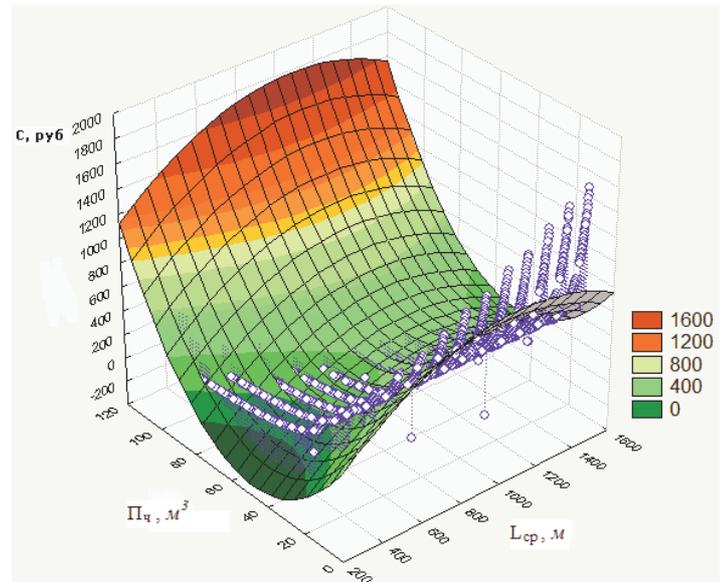


Рис. 7. Модель себестоимости АКС-5 при  $C = f(P, l_{cp})$

### Заключение

1. Комплексная оценка всех полученных моделей показывает, что оптимальная по выбранному типу АКС в заданных условиях (в каждом исследуемом участке заданного варианта) должна обеспечивать минимальную величину расчетных затрат ( $C \rightarrow \min$ ) при оптимальном диапазоне показателей производительности системы.

2. Статистическую значимость результатов построения уравнений регрессии представляет  $p$ -уровень, находящийся в диапазоне 0,000000-0,017044 для модели рейсовой нагрузки и мощности и 0,00000000-0,039699 – для модели производительности при Альфа = 0,05, что соответствует уровню надежности ( $p$ -уровень  $\ll$  Альфа) практического использования уравнений.

3. Полученные полиномы позволяют проводить планирование установленных параметров рейсовой нагрузки аэростата, скоростей перемещения, средней

линии трелевки обрабатываемого участка, производительности системы и исследования эффективности сберегающих мероприятий, направленных на оптимизацию показателя целесообразности применения АКС-5 с учетом региональных особенностей.

### *Литература*

1. А.В. Абузов, П.Б. Рябухин. Аэростатный транспорт для горных лесозаготовок в условиях Дальнего Востока. Моногр. – Хабаровск: Изд-во Тихоокеан. гос. ун-та, 2013. – 199 с.
2. Бойко Ю.С. Воздухоплавание в изобретениях. – М: Транспорт, 1999. – 352 с.
3. Бойко Ю.С. Воздухоплавание: Привязное. Свободное. Управляемое. – М.: МГУП, 2001. – 462 с.
4. 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.
5. Отчет о проведении испытаний трехлинейной системы управления в совокупности с аэростатом МТА-500. – Хабаровск: ДЦВ «Аэрос», 2002. – 43 с.

себестоимости АКС путем воздействия на указанные факторы.

4. При реализации моделей, полученных в данной работе для комплекса децентрализованных лесных массивов или его части, необходимо выявить условия

### *Referenses*

1. Abuzov A.V., Ryabukhin P.B. Aerial transport for mountain timber logging in the Far East Region. monogr. Khabarovsk: Izd-vo Tikhookean. gos. un-ta, 2013. 199 p.
2. Boyko Yu.S. Aerial navigation in investigations. M: Transport, 1999. 352 p.
3. Boyko Yu.S. Aerial navigation: Tethered. Free. Controlled. M.: MGUP, 2001. 462 p.
4. Abuzov A.V. Ruditsa K.V. Experimental research of aerial skidding system // Vest. Tikhookean. gos. un-ta. 2008. Issue 1(8). P. 259-274.
5. Pikalkin V.M. Report about testing three-phase control system linked with aerostat. Khabarovsk: Aeros, 2002. 43 p.