

УДК (UDC) 621.86

ИССЛЕДОВАНИЕ ДИНАМИЧЕСКОЙ НАГРУЖЕННОСТИ  
МОБИЛЬНОЙ КАНАТНОЙ ТРАНСПОРТНО-ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЙ МАШИНЫ,  
РАЗМЕЩЕННОЙ НА СКЛОНЕTHE DYNAMIC LOADING STUDY OF A MOBILE TRANSPORT  
AND TECHNOLOGICAL MACHINE, PLACED ON A SLOPEХимич А.В., Лагерев И.А.  
Khimich A.V., Lagerev I.A.Брянский государственный университет имени академика И.Г. Петровского (Брянск, Россия)  
Academician I.G. Petrovskii Bryansk State University (Bryansk, Russian Federation)

**Аннотация.** В работе рассматриваются подходы к моделированию динамики мобильной канатной транспортно-технологической машины, рабочий орган которой перемещается вдоль линейно протяженного кабеля с помощью лебедки. Мобильная машина состоит из двух пространственно разнесенных модулей, размещенных на склоне, и закреплена канатной оттяжкой. Разработана математическая модель, учитывающая колебания рабочего органа на тяговом и несущем канатах при его движении вдоль склона. Выполнено численное решение. Проанализированы результаты.

**Ключевые слова:** мобильная канатная машина, склон, лебедка, канат, динамика.

**Дата принятия к публикации:** 11.06.2022  
**Дата публикации:** 25.06.2022

**Сведения об авторах:**

**Химич Анна Васильевна** – аспирант ФГБОУ ВО «Брянский государственный университет имени академика И.Г. Петровского»,  
*e-mail: annahimich14@mail.ru.*

**Лагерев Игорь Александрович** – доктор технических наук, доцент, проректор по инновационной работе ФГБОУ ВПО «Брянский государственный университет имени академика И.Г. Петровского»,  
*e-mail: lagerev-bgu@yandex.ru.*

ORCID: 0000-0002-0921-6831

**Abstract.** The paper considers approaches to modeling the dynamics of a mobile cable lifting machine, the working body of which is moved along a linearly extended cable using a winch. The mobile machine consists of two spatially spaced modules placed on the slope, and is secured by a cable car. A mathematical model has been developed that takes into account the vibrations of the working body on the traction and load-bearing ropes when it moves along the slope. Numerical integration of the equations of motion is carried out. The results are analyzed.

**Keywords:** mobile rope machine, slope, winch, rope, dynamics.

**Date of acceptance for publication:** 11.06.2022  
**Date of publication:** 25.06.2022

**Authors' information:**

**Anna V. Khimich** – student, Academician I.G. Petrovskii Bryansk State University,  
*e-mail: annahimich14@mail.ru.*

**Igor A. Lagerev** – Doctor of Technical Sciences, Assistant Professor, Vice rector for Innovations at Academician I.G. Petrovskii Bryansk State University,  
*e-mail: lagerev-bgu@yandex.ru.*

ORCID: 0000-0002-0921-6831

**Благодарности**

*Исследование выполнено при поддержке Российского научного фонда (проект № 22-29-00798)*

**Acknowledgements**

*The study was supported by the grant of Russian science Foundation (project No. 22-29-00798)*

**1. Введение**

Выполнение рабочих операций мобильными транспортно-технологическими машинами на крутых склонах сопряжено с рядом технических сложностей. Наиболее важным при этом является обеспечение общей ус-

тойчивости машины во всех рабочих режимах. Для этого помимо усовершенствования аутригеров и иных опорных устройств машин традиционных конструкций, возможен переход к инновационным конструкциям – канатным транспортно-технологическим машинам [1, 2].

Исследуемая канатная транспортно-технологическая машина в общем виде показана на рис. 1. По крутому склону 1 длиной  $L$  и углом наклона к горизонту  $\alpha$  (как правило,  $\alpha > 30^\circ$ ) между верхней 2 и нижней 3 базовыми станциями (модулями) машины расположен несущий канат 7, по которому движется рабочий орган или груз 4, приводимый в движение тяговым канатом 6 с помощью лебедки 5. Верхняя станция (модуль) машины закреплена оттяжкой 8, которая зафиксирована на склоне [1].

При работе машины тяговый и несущий канат оказывают воздействие на рабочий орган. Расчетная схема этого процесса показана на рис. 2. Грузо захватный орган совершает колебательные движения вдоль тягового каната по координате  $x_0$ , а также в вертикальном направлении по координате  $y_0$ .

Линейное перемещение тягового каната при работе лебедки описывается координатой  $x_1$ . При работе машины рабочий орган может покоиться на месте.

Верхняя базовая станция закреплена на склоне оттяжкой и колеблется на ней вдоль координаты  $x_2$ .

Нижняя базовая станция связана с верхней тяговым канатом, по направлению которого она совершает колебания по координате  $x_3$ . Этот процесс также оказывает влияние на колебания рабочего органа из-за влияния на жесткость несущего каната, по которому передвигается рабочий орган.

Рабочий орган смещается из точки  $O$  в точку  $O_1$  на расстояние  $\delta_0$  (перемещение вдоль тягового каната  $\delta_{0x}$ , вертикальное перемещение  $\delta_{0y}$ ).

В статье приведена математическая модель для исследования динамической нагруженности данной системы. Под динамической нагруженностью понимается состояние машины при воздействии рабочих воздействий, выраженное в виде реализаций процессов изменения координат и скоростей, а также динамических усилий в канатах.

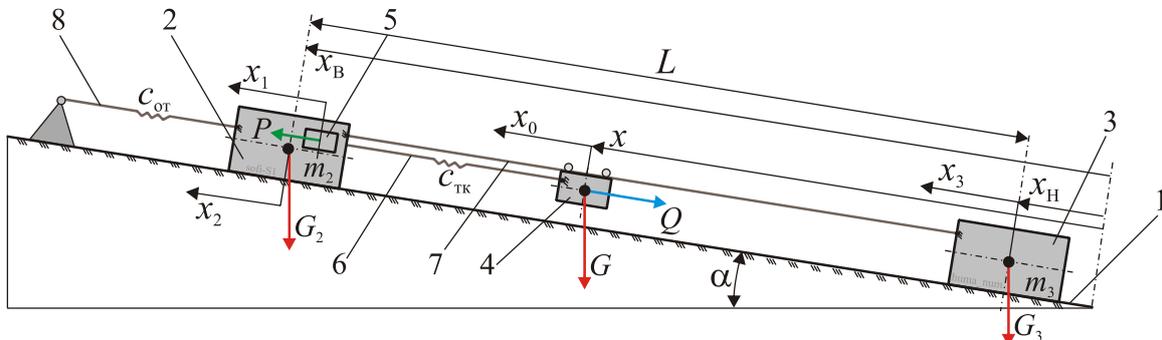


Рис. 1. Исходная расчетная схема канатной грузоподъемной машины: 1 – склон; 2 – верхняя базовая станция (модуль); 3 – нижняя базовая станция (модуль); 4 – рабочий орган; 5 – лебедка; 6 – тяговый канат; 7 – несущий канат [1]; 8 – оттяжка

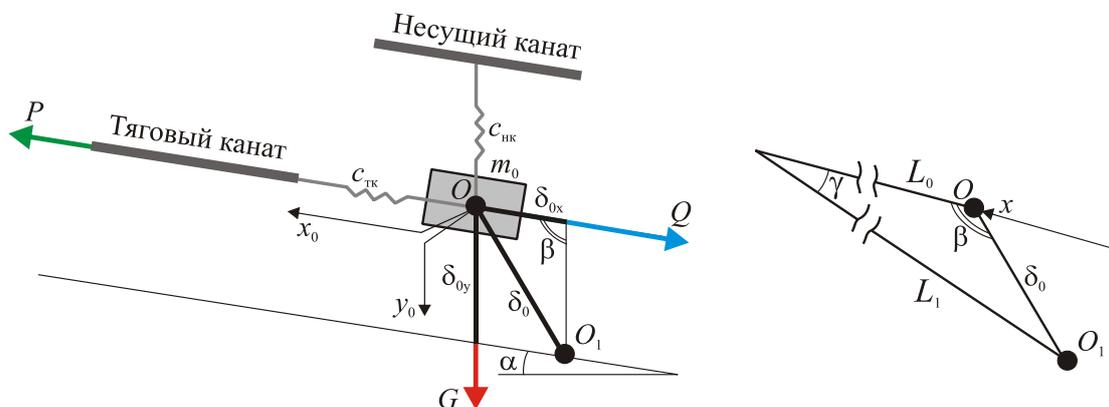


Рис. 2. Расчетная схема канатной грузоподъемной машины с учетом влияния тягового и несущего канатов

## 2. Математическая модель для исследования нагруженности

Как было указано выше, можно выделить два режима работы машины:

- режим 1 – рабочий орган перемещается вдоль склона, приводимый в движение лебедкой, что создает дополнительные динамические воздействия на всю систему, при этом базовые станции совершают колебания около положения равновесия, при позиционировании рабочего органа внешние воздей-

$$\begin{cases} m_0 \ddot{x}_0 + c_{\text{тк}}(x_1 - x_0 - x_2) - c_{\text{нк}} y_0 \sin \alpha = -Q - G \sin \alpha; \\ m_0 \ddot{y}_0 - c_{\text{нк}} y_0 + c_{\text{тк}}(x_1 - x_0 - x_2) \sin \alpha = G + Q \sin \alpha; \\ m_1 \ddot{x}_1 + c_{\text{тк}}(x_0 + x_2 - x_1) = P(\dot{x}_1); \\ m_2 \ddot{x}_2 + c_{\text{от}} x_2 + c_{\text{нк23}}(x_2 - x_3) = -G_2 \sin \alpha; \\ m_3 \ddot{x}_3 + c_{\text{нк23}}(x_3 - x_2) = -G_3 \sin \alpha, \end{cases} \quad (1)$$

где  $x_0, y_0, x_1, x_2$  и  $x_3$  – линейные координаты (соответственно) рабочего органа вдоль тягового каната, в вертикальном направлении, привода лебедки, верхней базовой станции (модуля), нижней базовой станции (модуля), м;  $m_0$  – масса рабочего органа канатной машины с грузом, кг;  $m_1$  – приведенная к линейному движению тягового каната масса привода и вращающихся частей лебедки, кг;  $m_2, G_2$  – масса, кг, и вес, Н, верхней базовой станции (модуля);  $m_3, G_3$  – масса, кг, и вес, Н, нижней базовой станции (модуля);  $c_{\text{тк}}$  – жесткость тягового каната, Н/м;  $c_{\text{нк}}$  – жесткость несущего каната при колебаниях рабочего органа вдоль координаты  $y_0$ , Н/м;  $c_{\text{нк23}}$  – жесткость несущего каната при анализе колебаний базовых станций, Н/м;  $c_{\text{от}}$  – жесткость оттяжки, Н/м;  $Q$  – внешнее воздействие со стороны рабочего органа, которое задается в виде закона или совокупности значений, Н;  $G$  – вес рабочего органа с грузом, Н;  $P(\dot{x}_1)$  – приведенное к линейному движению тягового каната тяговое усилие лебедки, зависящее от скорости ее вращения [3], Н.

ствия со стороны предмета труда постоянны или равны нулю (холостой ход);

- режим 2 – рабочий орган покоится на месте, при этом рабочий орган и базовые станции совершают колебания около положения равновесия, как правило, в этом режиме рабочий орган активно взаимодействует с предметом труда, что вызывает интенсивное воздействие на всю систему.

Математическая модель для исследования нагруженности мобильной канатной транспортно-технологической машины в режиме 1 имеет следующий вид:

Начальные условия для решения системы уравнений (1):

$$\begin{aligned} x_0(t=0) &= x; \\ y_0(t=0) &= y; \\ \dot{x}_1(t=0) &= x_{10}; \\ x_2(t=0) &= x_B; \\ x_3(t=0) &= x_H, \end{aligned}$$

где  $t$  – модельное время в ходе численного интегрирования, с;  $x, y$  – начальное положение рабочего органа вдоль тягового каната и в вертикальном направлении соответственно, м;  $x_B, x_H$  – начальное положение базовых станций на склоне, м;  $x_{10}$  – номинальная скорость вращения лебедки, приведенная к линейному движению тягового каната, м/с.

Остальные начальные условия при  $t=0$  считаются нулевыми (кроме случаев поэтапного моделирования, когда начальные условия для моделирования текущего рабочего цикла машины определяются исходя из расчетов для предыдущего цикла).

Решение уравнений движения проводится численно методом Рунге-Кутты в программе собственной разработки. Шаг интегрирования по времени с учетом рекомендаций был выбран 0,01 с.

Математическая модель для исследования нагруженности мобильной канатной транспортно-технологической машины в режиме 2 имеет следующий вид:

$$\begin{cases} m_0 \ddot{x}_0 + c_{\text{тк}}(-x_0 - x_2) - c_{\text{нк}} y_0 \sin \alpha = -Q - G \sin \alpha; \\ m_0 \ddot{y}_0 - c_{\text{нк}} y_0 + c_{\text{тк}}(-x_0 - x_2) \sin \alpha = G + Q \sin \alpha; \\ m_1 \ddot{x}_1 = 0; \\ m_2 \ddot{x}_2 + c_{\text{от}} x_2 + c_{\text{нк}23}(x_2 - x_3) + c_{\text{тк}}(x_0 + x_2) = -G_2 \sin \alpha; \\ m_3 \ddot{x}_3 + c_{\text{нк}23}(x_3 - x_2) = -G_3 \sin \alpha. \end{cases} \quad (2)$$

Начальные условия для решения системы уравнений (2):

$$\begin{aligned} x_0(t=0) &= x; \\ y_0(t=0) &= y. \end{aligned}$$

Жесткость несущего каната изменяется в зависимости от положения грузозахватного органа между базовыми станциями.

Расчетная схема к определению  $c_{\text{нк}}$  приведена на рис. 3. В основу определения же-

сткости положено вычисление податливостей  $\varepsilon_i$  – деформаций каната (прогибов) при приложении единичной силы в  $i$ -й его точке. Тогда жесткость  $c_{\text{нк}i}$  несущего каната в  $i$ -й его точке можно вычислить как  $\varepsilon_i^{-1}$ . При численном интегрировании  $c_{\text{нк}}$  вычисляется на каждой итерации с учетом текущего значения  $x$ .

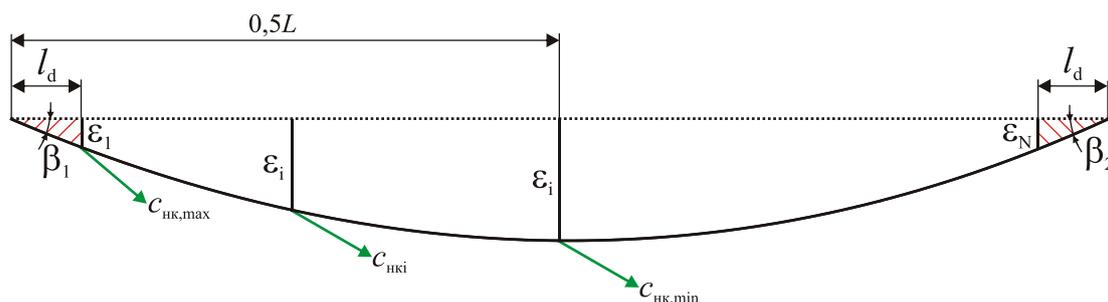


Рис. 3. Расчетная схема к определению жесткости несущего каната

Жесткость несущего каната можно вычислить следующим образом:

$$c_{\text{нк},i} = \left( (L-x)^2 + (L-x+\Delta)^2 + (L-x)(L-x+\Delta) \right)^{-0.5},$$

где

$$\Delta = \left[ EF \left( \sin \beta_1 + \frac{\cos \beta_2}{\cos \beta_1} \sin \beta_2 \right) \right]^{-1},$$

$E$  – модуль упругости, Па;  $F$  – площадь сечения несущего каната,  $\text{м}^2$ ; углы ветвей

$$\beta_1 = \arcsin \left( \frac{H}{L-x} \right), \quad \beta_2 = \arcsin \left( \frac{H}{x} \right).$$

Минимального значения жесткость несущего каната  $c_{\text{нк},\text{мин}}$  достигает на середине склона при  $x = 0,5L$  (здесь максимален прогиб каната). Максимальное значение жесткость несущего каната достигает на краях. С целью обхода сингулярности при вычис-

лении жесткости, считаем, что грузозахватный орган не доходит до базовой станции на величину

$$l_d = \min(x - x_H).$$

### 3. Результаты моделирования нагруженности

Моделирование выполнено для канатной транспортно-технологической машины со следующими параметрами:  $m_0 = 500$  кг,  $m_1 = 126000$  кг,  $m_2 = m_3 = 5000$  кг,  $c_{\text{тк}} = 100000$  Н/м,  $c_{\text{от}} = 500000$  Н/м,  $c_{\text{нк},\text{мин}} = 900000$  Н/м,  $c_{\text{нк},\text{маx}} = 2100000$  Н/м,  $Q = 0$  Н,  $G = 4905$  Н,  $G_2 = G_3 = 49050$  Н, максимальное значение  $P = 5396$  Н,  $x = 0,2$  м,  $x_H = 0$  м,  $x_B = 7$  м,  $y_0 = 0$  м,  $x_{10} = 0,129$  м/с,  $l_d = 0,2$  м,  $\alpha = 30^\circ$ .

Закон изменения тягового усилия лебедки принят аналогичным закону, приведенному в [3]. При моделировании рабочий орган поднимается из начального положения до точки

$$x = x_B - l_d,$$

где  $Q = 100 \sin(2t) 100 \sin t$  Н.

Результаты интегрирования уравнений движения показаны на рис. 4 – 6.

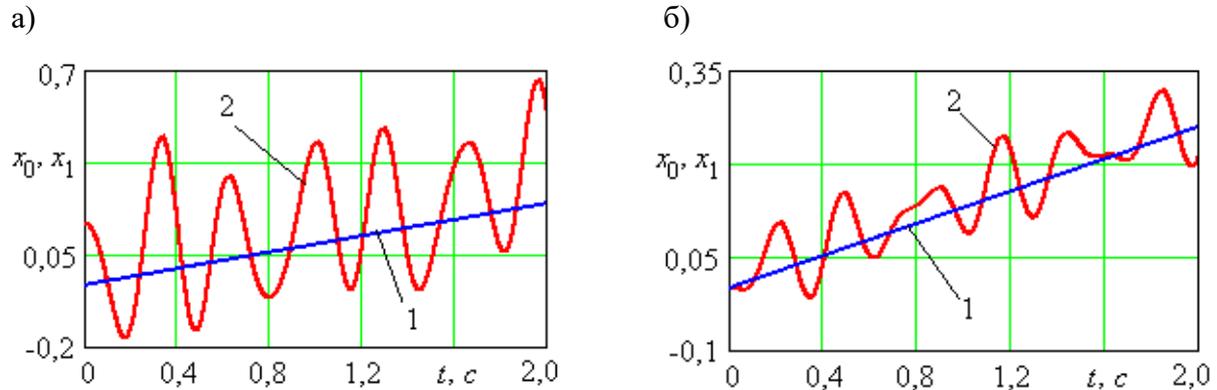


Рис. 4. Результаты расчета подъема грузозахватного органа: а – с учетом колебаний базовых станций и оттяжки; б – без учета (упрощенная модель [1]); 1 – для лебедки; 2 – для грузозахватного органа

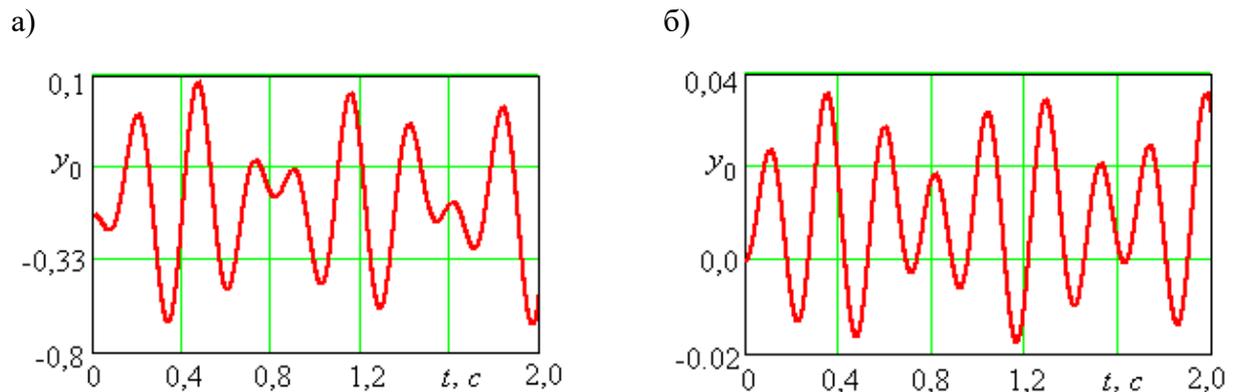


Рис. 5. Результаты расчета вертикальных колебаний грузозахватного органа: а – с учетом колебаний базовых станций и оттяжки; б – без учета (упрощенная модель [1]); 1 – для лебедки; 2 – для грузозахватного органа

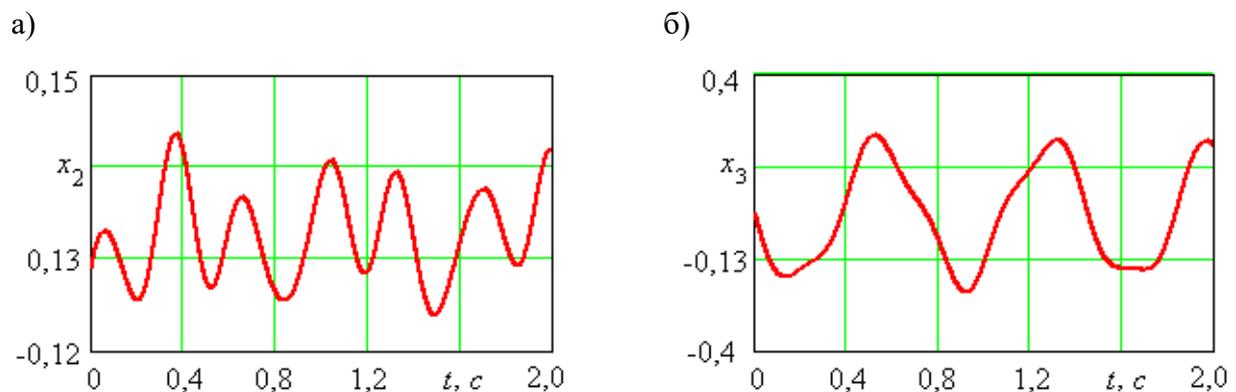


Рис. 6. Результаты расчета колебаний базовых станций: а – верхняя базовая станция; б – нижняя базовая станция

#### 4. Основные выводы

На основе результатов исследования можно сделать следующие выводы.

1. Учет влияния тягового и несущего каната позволяет повысить точность исследования рабочих процессов. Амплитуды и частоты колебательных процессов координат и скоростей вдоль тягового каната выше, чем без учета влияния несущего каната (по данным работы [1]).

#### Список литературы

1. Лагерев И.А., Химич А.В. Математическое моделирование динамики кабельной грузоподъемной машины // Ученые записки Брянского государственного университета. 2022. №1. С. 7-10.

2. Лагерев И.А. Динамическая нагруженность крана-манипулятора машины для сварки трубопроводов при движении с грузом // Подъемно-транспортное дело. 2011. №3. С. 7-10.

3. Лобов, Н.А. Динамика грузоподъемных кранов / Н.А. Лобов. М.: Машиностроение, 1987. 160 с.

2. Подвижность базовых станций при их закреплении растяжкой приводит к увеличению амплитуд горизонтальных колебаний грузозахватного органа в 2 раза, вертикальных колебаний – в 2,5 раза (по сравнению с системой с жестко закрепленными базовыми станциями). В 2...2,5 раза растут динамические усилия в канатах. Частоты колебаний остаются примерно одинаковыми, но меняется фаза колебаний, что обусловлено колебаниями базовых станций относительно положений равновесия.

#### References

1. Lagerev I.A., Khimich A.V. Mathematical modeling of dynamics cable lifting machine. *Uchenye zapiski Bryanskogo gosudarstvennogo universiteta*, 2022, No.1, pp. 7-10. (In Russian)

2. Lagerev I.A. Trunk pipeline welding machine crane-manipulator dynamics during freight movement. *Podemno-transportnoe delo*, 2011, No.3, pp. 7-10. (In Russian)

3. Lobov N.A. *Dinamika gruzopodemnykh kranov* [Overhead cranes dynamics]. Moscow, Mashinostroenie, 1987. 160 p.