

Моделирование поперечных колебаний с учётом изгиба несущего каната лесотранспортной системы

М.А. Кокшаров^{1а}, А.В. Трубников^{2b}, А.Ю. Жук^{1с}, Е.Г. Хитров^{3d}

¹ Братский государственный университет, ул. Макаренко, д. 40, г. Братск, Россия

² Национальный исследовательский университет ИТМО, просп. Кронверкский, д. 49, г. Санкт-Петербург, Россия

³ Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, ул. Политехническая, д. 29, г. Санкт-Петербург, Россия

^а maksont_koksharov@mail.ru, ^б trueinmath@gmail.com, ^с ftslk@brstu.ru, ^д hitrov_eg@spbstu.ru

^а <https://orcid.org/0000-0002-1708-7873>, ^б <https://orcid.org/0000-0001-8542-9380>

^с <https://orcid.org/0000-0002-8307-6945>, ^д <https://orcid.org/0000-0003-4569-9508>

Статья поступила 17.06.2025, принята 15.09.2025

Статья направлена на изучение оценок, получаемых при решении уравнений поперечных колебаний в частных производных, используемых в качестве основы для моделирования динамических процессов в канатных лесотранспортных системах, оснащённых стальными и синтетическими канатами. Методическую основу исследования составляет уравнение динамики каната, совершающего вынужденные поперечные затухающие колебания под воздействием движущейся каретки при транспортировке лесоматериалов, проводится решение дифференциального уравнения изгиба в частных производных четвёртого порядка методом Крылова. Реализация выполняется с использованием численных методов на языке программирования Python. Выполнена реализация модели для двух случаев: несущий канат стальной 25,5 мм, несущий канат синтетический "AmSteel Blue", диаметр сечения 48 мм. Предложены числовые оценки декремента поперечных колебаний, полученные на основе анализа собственных частот канатов. Получено представление базисных функций для произвольного тона колебаний в виде суммы двух составляющих, позволяющее уточнить описание характера поперечных колебаний и напряжения при изгибе. Результаты расчётов показали, что математическая модель передаёт характер возникающих колебательных процессов при изменении изгибной жёсткости каната и демпфирующих свойств материала каната: прогнозируемые напряжения при изгибе синтетического каната меньше, чем стального; при этом перемещения синтетического каната под кареткой с лесоматериалами сопоставимы с «классическим» случаем. Дальнейшие исследования должны быть направлены на уточнение параметров исследованной базовой модели. Дальнейшее уточнение математической модели позволит сформулировать оптимизационную задачу, связанную с обоснованием конструкции канатной лесотранспортной системы при варьировании параметров технологической операции трелёвки лесоматериалов с водной поверхности при выборе типа и характеристик несущего каната.

Ключевые слова: лесотранспортные системы; стальные несущие канаты; синтетические несущие канаты; напряжение при изгибе; демпфирование; метод Крылова

Modeling of transverse vibrations taking into account the bending of the bearing cable of the timber transport system

M.A. Koksharov^{1а}, A.V. Trubnikov^{2b}, A.Yu. Zhuk^{1с}, E.G. Khitrov^{3d}

¹ Bratsk State University; 40, Makarenko St., Bratsk, Russia

² ITMO University; 49, Kronverksky Pr., St. Petersburg, Russia

³ Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University; 29, Politekhnikeskaya St., St. Petersburg, Russia

^а maksont_koksharov@mail.ru, ^б trueinmath@gmail.com, ^с ftslk@brstu.ru, ^д hitrov_eg@spbstu.ru

^а <https://orcid.org/0000-0002-1708-7873>, ^б <https://orcid.org/0000-0001-8542-9380>

^с <https://orcid.org/0000-0002-8307-6945>, ^д <https://orcid.org/0000-0003-4569-9508>

Received 17.06.2025, accepted 15.09.2025

The paper aims at studying the estimates obtained by solving the equations of transverse oscillations in partial derivatives used as a basis for modeling dynamic processes in cable timber transport systems equipped with steel and synthetic ropes. The methodological basis of the study is the equation of the dynamics of a rope performing forced transverse damped oscillations under the action of a moving carriage during the transportation of timber. The differential equation of bending in partial derivatives of the fourth order is solved by the Krylov method. The implementation is performed using numerical methods in the Python programming language. The model is implemented for two cases: a 25.5 mm steel load-bearing cable, and an AmSteel Blue synthetic load-bearing cable with a cross-section diameter of 48 mm. Numerical estimates of the transverse oscillation decrement obtained by analyzing the cables' natural frequencies are proposed. A representation of the basis functions for an arbitrary oscillation tone as a sum of two components is obtained, which makes it possible to clarify the description of the transverse oscillation and bending stress patterns. The calculation results show that the mathematical model conveys the nature of the oscillatory processes that occur when the cable's bending rigidity and the cable material's damping properties change: the predicted bending stresses for the synthetic cable are lower than those for the steel cable; the movements of the synthetic cable under the timber carriage are comparable to the "classical" case. Further research should be aimed at

clarifying the parameters of the basic model under study. Further refinement of the mathematical model will allow formulating an optimization problem related to the justification of the design of a cable timber transport system when varying the parameters of the technological operation of skidding timber from the water surface when choosing the type and characteristics of the load-bearing cable.

Keywords: timber transport system; steel load-bearing cables; synthetic load-bearing cables; bending stress; damping; Krylov method.

Введение. Канатные лесотранспортные системы успешно используются в условиях пересечённой местности, заболоченных и переувлажненных грунтов, а также для транспортировки лесоматериалов с воды [1, 2, 3]. Важно, что канатный транспорт лесоматериалов отвечает критерию природоподобия, поскольку при таком способе перемещения древесины практически не повреждается почва [3], а решение проблемы сбора и транспортировки топляковой древесины критически важно с экологической точки зрения [2, 4–7]. За последние годы были предложены различные перспективные варианты технического исполнения и направления совершенствования канатных лесотранспортных систем, например, за счёт замены «классических» стальных канатов более лёгкими, выполненными из инновационных синтетических материалов [1, 8, 9].

Теоретические основы моделирования растяжения и изгиба каната, необходимые для обоснования параметров лесотранспортных установок, обеспечивающих заданный технологический процесс, заложены ещё в работах советских учёных [10, 11], однако, ввиду сложности получения решений уравнений математической физики, модели на тот момент были реализованы в сравнительно узком диапазоне изменения входных параметров применительно к стальным несущим канатам. В дальнейшем, в работах [1, 2, 12] проведены исследования по обоснованию параметров канатных трелёвочных систем, оснащённых синтетическими канатами [1, 12]. Представлены научные основы процессов возникновения и развития продольных и поперечных колебаний синтетических несущих и тяговых канатов, а также опор канатных установок, транспортирующих древесину с воды, в том числе – с учётом воздействия ветровой и волновой нагрузки [1, 12]. Вопросы моделирования работы канатных систем интересуют и зарубежных ученых, представлены различные модели, учитывающие колебательные процессы [13–16], в том числе с учётом ветрового воздействия [17].

Нисколько не принижая значимости полученных результатов, отметим, что для комплексного обоснования параметров канатных лесотранспортных систем для широкого спектра природно-производственных условий необходимы дальнейшие исследования, связанные с моделированием динамики груза, несущего каната и трелёвочной системы в целом. Уточнение математических моделей за счёт более подробного исследования напряжений при изгибе каната с учётом свойств материала также позволит точнее рассчитать силовые параметры трелёвочных установок. Также, введение в математические модели параметров, учитывающих затухание колебаний, связанных с динамикой движущегося груза и внешним воздействием, позволит точнее исследовать связи свойств материала и сечения канатов с прочностными и силовыми показателями канатных трелёвочных установок. В перспективе на базе результатов развития научных положений в области канатного транспорта станет возможным решать

задачи в области оптимизации конструкции лесотранспортных установок [10, 11, 18–20].

Материалы и методы исследования. На настоящем этапе исследования имплементируем математическую модель поперечных колебаний несущего каната с учётом его изгиба под воздействием движущейся нагрузки и реализуем её для двух случаев:

1. несущий канат стальной 25,5 ГЛ-В-Н 1568, диаметр сечения $d_k = 25,5$ мм, монтажное натяжение $T = 98,1$ кН, изгибная жесткость $B_k = 0,1177$ кН·м², погонная масса каната $\rho = 2,39$ кг/м,

2. несущий канат синтетический "AmSteel Blue", диаметр сечения $d_k = 48$ мм, монтажное натяжение $T = 98,1$ кН, изгибная жесткость $B_k = 0,0298$ кН·м², погонная масса каната $\rho = 1,06$ кг/м, параметры канатов из ассортиментного ряда подобраны так, чтобы получить близкие значения прочности на разрыв (~ 1,5 МН).

В обоих случаях длина пролета $l = 100$ м, вес лесоматериалов $V = 25$ кН, скорость движения груза $v_0 = 2,5$ м/с.

Проверка необходима для ответа на вопрос о принципиальной применимости уравнений поперечных колебаний в постановке [10] в качестве основы для моделирования процессов в лесотранспортных системах, оснащённых стальными и синтетическими канатами.

Таким образом, методическую основу исследования составляет уравнение динамики каната, совершающего вынужденные поперечные затухающие колебания под воздействием движущейся каретки при транспортировке лесоматериалов, проводится решение дифференциального уравнения изгиба в частных производных методом Крылова. Реализация выполняется с использованием численных методов на языке программирования Python.

Результаты исследования. Рассмотрим уравнение в частных производных [10]:

$$\eta B_k \frac{\partial^4 y}{\partial x^4} - T \frac{\partial^2 y}{\partial x^2} + \rho \frac{\partial^2 y}{\partial t^2} = F \quad (1)$$

где η – параметр, учитывающий внутреннее трение в материале каната и затухание его поперечных колебаний; y – перемещение каната в рассматриваемой точке от положения равновесия по вертикальной оси; t – время; x – горизонтальная координата; F – функция, связанная с внешним воздействием на несущий канат.

Решение уравнения предлагается искать при помощи метода Крылова в виде суммы ряда Фурье [10]. В таком случае решение представляют в виде произведения двух функций, соответственно времени t и координаты по горизонтали x :

$$y = \sum_{j=1}^{\infty} \varphi_j X_j \quad (2)$$

В записи (2) функции X_j – функции, связанные с решением уравнения свободных колебаний каната.

Рассмотрим вопрос их составления с учётом способа закрепления каната подробнее.

Уточним выражения для X_j . Воспользуемся подходом, изложенным в [11], но с некоторыми дополнениями. С учётом записи (2) получим на основе (1) уравнение свободных колебаний каната, для произвольного j -го тона запишем:

$$\eta \frac{d^4 X}{dx^4} - \frac{T}{B_k} \frac{d^2 X}{dx^2} - \frac{\rho}{B_k} \omega^2 X_j = 0 \quad (3)$$

где обозначено: $\omega^2 = -\frac{1}{\varphi} \cdot \frac{d^2 \varphi}{dt^2}$.

Общее решение такого уравнения известно:

$$X = C_1 e^{\lambda_1} + C_2 e^{-\lambda_1} + C_3 e^{\lambda_2} + C_4 e^{-\lambda_2} \quad (4)$$

где $\lambda_{1,2}$ – корни характеристического уравнения, например, для (3) получим:

$$\lambda_{1,2} = \mp \sqrt{\frac{-2\eta B_k \left(\mp T + \sqrt{4B_k \eta \rho \omega_j^2 + T^2} \right)}{2\eta B_k}} \quad (5)$$

Постоянные интегрирования в (4) определяются начальными условиями, связанными с закреплением несущего каната. Для этого решается система линейных алгебраических уравнений, составленная из производных (4) соответствующего порядка и начальных условий, задаваемых способом закрепления каната.

Например, для шарнирного способа закрепления:

$$\begin{cases} C_1 e^{\lambda_1} + C_2 e^{-\lambda_1} + C_3 e^{\lambda_2} + C_4 e^{-\lambda_2} = 0 \\ \lambda_1 C_1 e^{\lambda_1} - \lambda_1 C_2 e^{-\lambda_1} + \lambda_2 C_3 e^{\lambda_2} - \lambda_2 C_4 e^{-\lambda_2} = \Theta_0 \\ \lambda_1^2 C_1 e^{\lambda_1} + \lambda_1^2 C_2 e^{-\lambda_1} + \lambda_2^2 C_3 e^{\lambda_2} + \lambda_2^2 C_4 e^{-\lambda_2} = 0 \\ \lambda_1^3 C_1 e^{\lambda_1} + \lambda_1^3 C_2 e^{-\lambda_1} + \lambda_2^3 C_3 e^{\lambda_2} + \lambda_2^3 C_4 e^{-\lambda_2} = -\frac{Q_0}{B_k} \end{cases} \quad (6)$$

В случае (6) получим решение:

$$\begin{aligned} C_1 &= \frac{B_k \Theta_0 \lambda_2^2 + Q_0}{B_k (-\lambda_1^2 + \lambda_2^2) \lambda_1}, C_2 = -C_1, \\ C_3 &= -\frac{B_k \Theta_0 \lambda_1^2 + Q_0}{B_k (-\lambda_1^2 + \lambda_2^2) \lambda_2}, C_4 = -C_3 \end{aligned} \quad (7)$$

Тогда, после подстановки выражений для постоянных интегрирования по (7) в общее решение (4) и преобразований, получим выражение с гиперболическими функциями:

$$\begin{aligned} X &= x_\Theta \Theta_0 + x_Q \frac{Q_0}{B_k} \\ x_\Theta &= \frac{\lambda_2^3 \operatorname{sh}(\lambda_1 x) + \lambda_1^3 \operatorname{sh}(\lambda_2 x)}{\lambda_1^3 \lambda_2 - \lambda_1 \lambda_2^3}, \\ x_Q &= \frac{\lambda_2 \operatorname{sh}(\lambda_1 x) + \lambda_1 \operatorname{sh}(\lambda_2 x)}{\lambda_1^3 \lambda_2 - \lambda_1 \lambda_2^3}. \end{aligned} \quad (8)$$

Частоты собственных колебаний определим с учётом граничных условий. Для рассматриваемого случая шарнирного закрепления несущего каната запишем при $x = l$:

$$X = 0, X^{(2)} = 0 \quad (9)$$

Тогда, после дифференцирования (8) по x , получим однородную систему линейных алгебраических уравнений относительно $\Theta_0, \frac{Q_0}{B_k}$:

$$\begin{cases} x_\Theta \Theta_0 + x_Q \frac{Q_0}{B_k} = 0 \\ \left(\frac{d^2 x_\Theta}{dx^2} \Theta_0 + \frac{d^2 x_Q}{dx^2} \frac{Q_0}{B_k} \right) = 0 \end{cases} \quad (10)$$

Для однородной системы существует нетривиальное решение при условии, что её определитель равен нулю, таким образом, возникает требование:

$$\begin{vmatrix} \frac{\lambda_2^3 \operatorname{sh}(\lambda_1 l) + \lambda_1^3 \operatorname{sh}(\lambda_2 l)}{\lambda_1^3 \lambda_2 - \lambda_1 \lambda_2^3} & \frac{\lambda_2 \operatorname{sh}(\lambda_1 l) + \lambda_1 \operatorname{sh}(\lambda_2 l)}{\lambda_1^3 \lambda_2 - \lambda_1 \lambda_2^3} \\ \frac{\lambda_2^3 \lambda_1^2 \operatorname{sh}(\lambda_1 l) + \lambda_1^3 \lambda_2^2 \operatorname{sh}(\lambda_2 l)}{\lambda_1^3 \lambda_2 - \lambda_1 \lambda_2^3} & \frac{\lambda_2 \lambda_1^2 \operatorname{sh}(\lambda_1 l) + \lambda_1 \lambda_2^2 \operatorname{sh}(\lambda_2 l)}{\lambda_1^3 \lambda_2 - \lambda_1 \lambda_2^3} \end{vmatrix} = 0 \quad (11)$$

из чего следует для корней (5) характеристического уравнения:

$$\lambda_{1,2} = \frac{2j-1}{l} \pi i, \quad (12)$$

где i – мнимая единица, $\sqrt{i^2} = -1$.

Тогда собственные частоты свободных колебаний каната:

$$\omega = \pi \sqrt{\frac{4\pi^2 \eta B_k \left(j - \frac{1}{2} \right)^2 + T l^2}{\rho l^4}} (2j-1). \quad (13)$$

Результаты расчёта по формуле (13) проиллюстрированы на рис. 1.

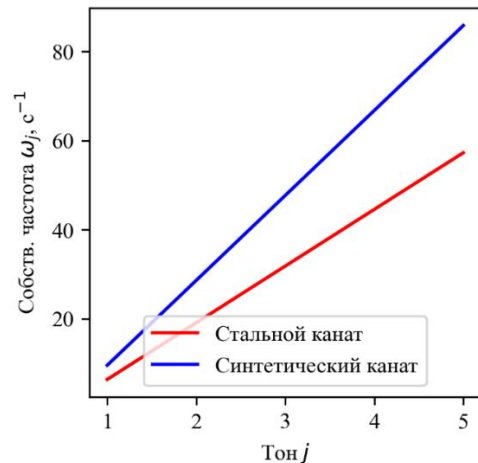


Рис. 1. Собственные частоты j -го тона колебаний несущего каната

По полученным расчётным данным оценим логарифмический декремент колебаний:

$$\delta = \ln \frac{d\omega_j}{j} \quad (14)$$

тогда для стального каната $\delta \approx 2,55$, для синтетического каната $\delta \approx 2,95$. Декремент δ используется для расчёта параметра затухания η [10]:

$$\eta = \frac{\delta}{\pi} \quad (15)$$

Уравнения (4), (5), (8), (13) задают функции X для j -го тона колебаний. Причем, с учётом свойств гиперболических функций комплексного аргумента, получим:

$$\begin{aligned} X &= \tilde{C}_1 \sin(\tilde{\lambda}_1 x) + \tilde{C}_3 \sin(\tilde{\lambda}_2 x) \\ \tilde{C}_1 &= \frac{B_k \Theta_0 \tilde{\lambda}_2^2 + Q_0}{B_k (-\tilde{\lambda}_1^2 + \tilde{\lambda}_2^2) \tilde{\lambda}_1}, \\ \tilde{C}_3 &= -\frac{B_k \Theta_0 \tilde{\lambda}_1^2 + Q_0}{B_k (-\tilde{\lambda}_1^2 + \tilde{\lambda}_2^2) \tilde{\lambda}_2} \\ \tilde{\lambda}_{1,2} &= \mp \sqrt{\frac{2\eta B_k (\mp T + \sqrt{4B_k \eta \rho \omega_j^2 + T^2})}{2\eta B_k}}. \end{aligned} \quad (14)$$

По структуре заметим, что функции X по (14) складываются из двух составляющих, различающихся частотой и амплитудой, которые условно можно охарактеризовать как «медленную» (индекс «1») и «быструю» (индекс «2») относительно x (рис. 2).

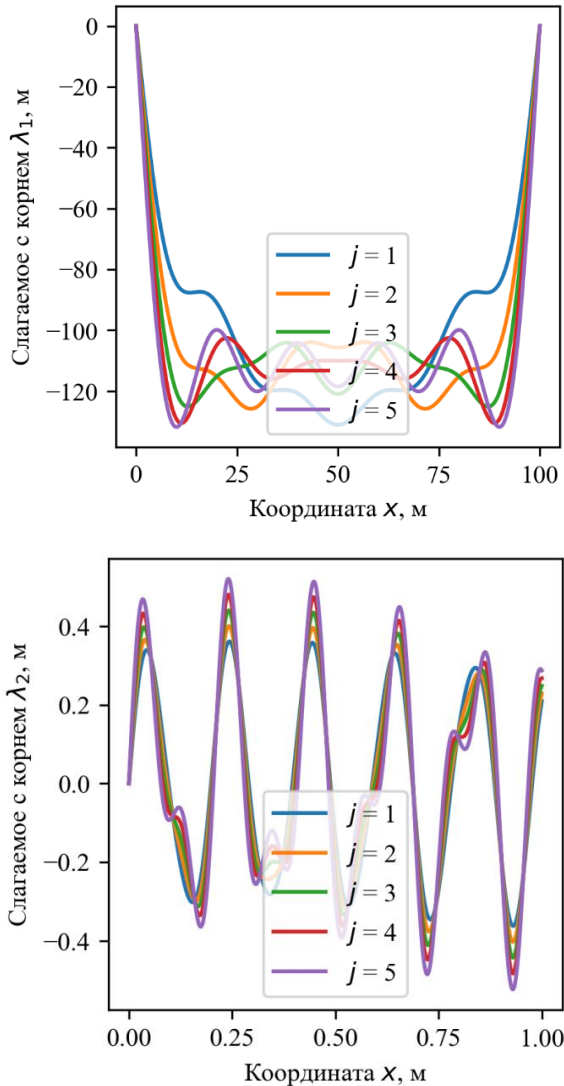


Рис. 2. Слагаемые фундаментальных функций (14) (синтетический канат)

Отметим важное отличие от [11], где результирующее выражение приведено к функции, сходной с «медленной» составляющей, что несколько ограничивает применимость результата в области моделирования напряжений при изгибе каната, где важно учесть производную второго порядка перемещения y по x .

Также сравним суммы X_j , рассчитанные по формулам (14) (рис. 3, 4). В точках 0, l суммы обращаются в нули в пределах ошибок округления, на рисунках границы значений по вертикальной оси подобраны для наглядности.

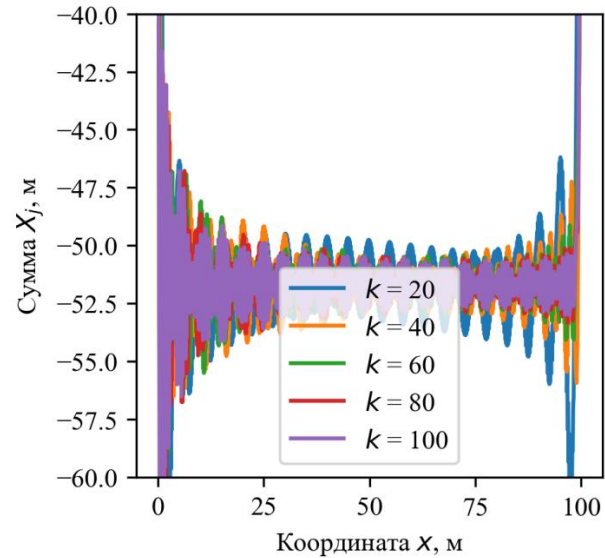


Рис. 3. Суммы k фундаментальных функций (14), стальной канат

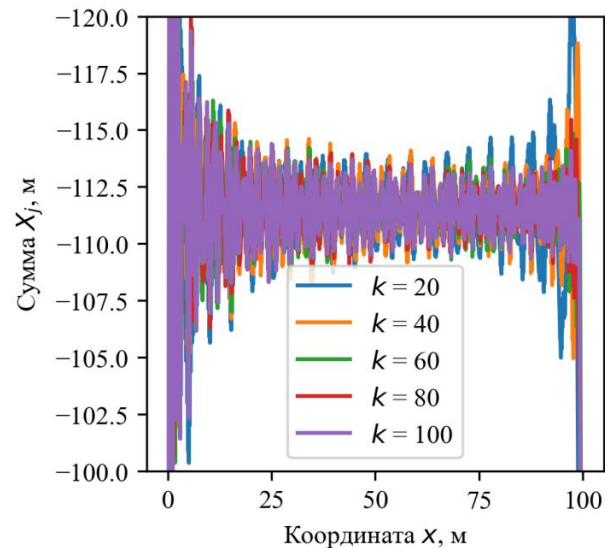


Рис. 4. Суммы k фундаментальных функций (14), синтетический канат

Сопоставление результатов расчётов показывает, что для исследуемого случая число рассматриваемых тонов j должно быть не менее 80–100.

Функции φ_j являются функциями времени, связанными с j -ми тонами колебаний и зависящими от воздействия F . Например, для функции:

$$-V \left(1 - \frac{1}{g} \frac{\partial^2 y(t, x)}{\partial t^2} - \frac{2v_0}{g} \frac{\partial^2 y(t, x)}{\partial x \partial t} - \frac{v_0^2}{g} \frac{\partial^2 y(t, x)}{\partial x^2} \right) \cdot \text{Dirac}(x - v_0 t), \quad (15)$$

где $\text{Dirac}(\arg)$ – функция Дирака, получено для произвольного j -го тона [10]:

$$\varphi = C e^{-(v+r)t} \cos(ut + \gamma) + A \frac{\psi_3^2}{\psi_3^4 + \psi_2^4} \quad (16)$$

В приведённом уравнении (17) используются вспомогательные обозначения [10]:

$$\begin{aligned} r &= \frac{Vv_0}{\Delta} \int_0^l X^{(2)} X dx, \\ A &= -\frac{(\rho g + V)g}{\Delta} \int_0^l X dx \\ \psi_1^2 &= B_k g \int_0^l X^{(4)} X dx + \\ &+ \frac{Vv_0^2 + Tg}{\Delta} \int_0^l X^{(2)} X dx \\ \psi_2^2 &= \eta \frac{B_k g}{\Delta} \int_0^l X^{(4)} X dx, \\ \psi_3^2 &= \psi_1^2 - r^2, \psi_3^2 = \psi_1^2 - r^2 \\ u &= \frac{\psi_3^2}{\sqrt{2(-\psi_3^2 + \sqrt{\psi_2^4 + \psi_3^4})}}, \\ v &= \frac{-\psi_3^2 + \sqrt{\psi_2^4 + \psi_3^4}}{2} \\ \gamma &= \arctg \frac{C \sin \gamma}{C \cos \gamma} \\ C \cos \gamma &= -A \frac{\psi_3^2}{\psi_3^4 + \psi_2^4}, \\ C \sin \gamma &= -\frac{1}{u} \left(v_0 \frac{\int_0^l X dx}{\int_0^l X^2 dx} - v C \cos \gamma \right) \\ \Delta &= (\rho g - V) \int_0^l X^2 dx \end{aligned} \quad (17)$$

где $X^{(n)}$ – производная порядка n функции X по координате x .

Функция (2) приближается частичной суммой ряда для k собственных частот, а напряжение при изгибе рассчитывается численным дифференцированием уравнения траектории груза $y(x, t)$ [10]:

$$\sigma_{\text{изг}} = E_k \frac{d_k}{2} \frac{\partial^2 y}{\partial x^2} \quad (18)$$

Приведем пример результатов решения. На рис. 5 показано перемещение сечения стального несущего каната под грузовой кареткой. Расчёт выполнен для сумм 100 первых собственных тонов.

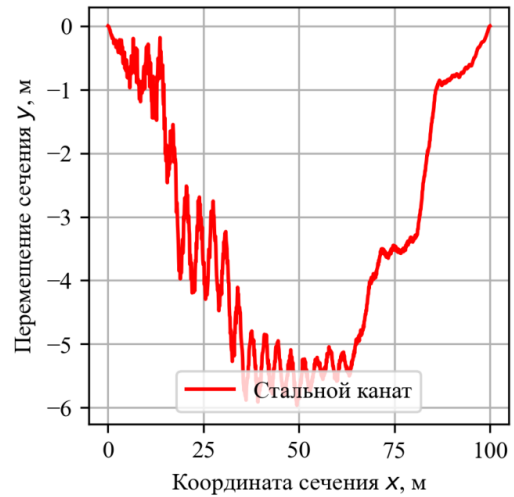


Рис. 5. Перемещение сечения каната под грузовой кареткой, стальной канат

Результаты численного дифференцирования (18) проиллюстрированы на рис. 6.

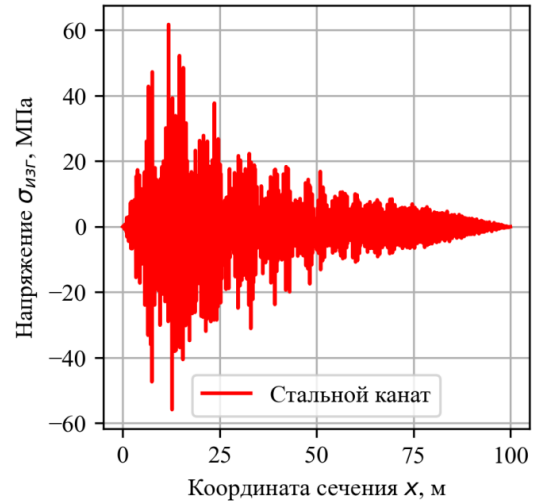


Рис. 6. Расчёт напряжения при изгибе, стальной канат

На рис. 7 показано перемещение сечения синтетического несущего каната под грузовой кареткой.

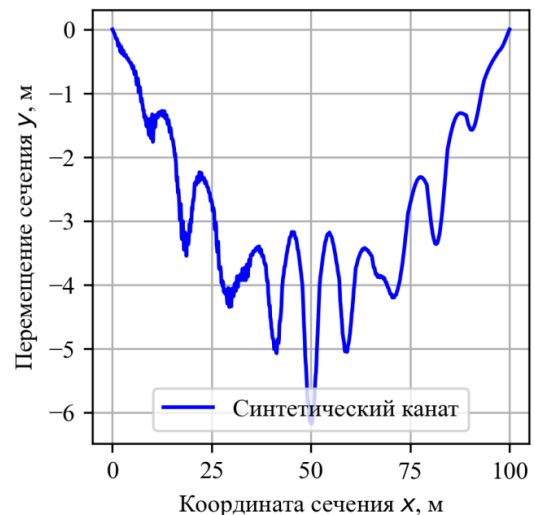


Рис. 7. Перемещение сечения каната под грузовой кареткой, синтетический канат

Результаты численного дифференцирования (18) проиллюстрированы на рис. 8.

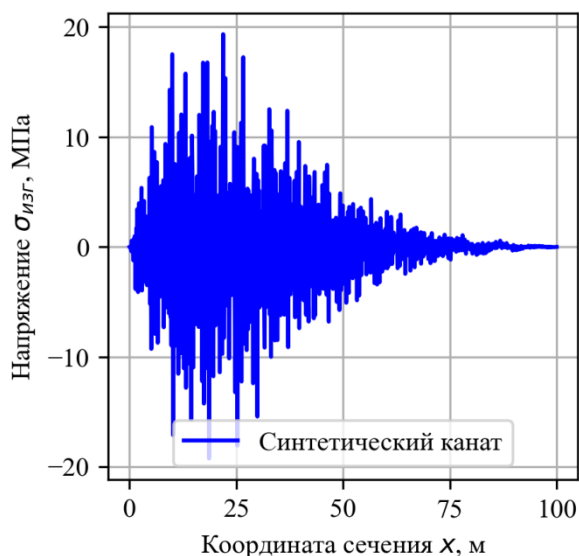


Рис. 8. Расчёт напряжения при изгибе, синтетический канат

Литература

- Абузов А.В. Теоретическое обоснование параметров канатных лесотранспортных систем на базе аэростатических и пневматических конструкций / дисс. д-ра техн. наук // ФГБОУ ВО «Уральский государственный лесотехнический университет». – 2016.
- Жук А.Ю. Повышение эффективности сбора и транспортировки древесины в прибрежных акваториях и береговой зоне водохранилищ / дисс. д-ра техн. наук // ФГАОУ ВО «Северный (Арктический) федеральный университет имени М.В. Ломоносова». – 2016.
- Мехренцев А.В., Герц Э.Ф., Теринов Н.Н., Уразова А.Ф., Ефимов Ю.В. Природоподобные лесные технологии как фактор снижения техногенных угроз в условиях интенсивного ведения лесного хозяйства // Системы. Методы. Технологии. – 2024. – № 4 (64). – С. 144–150.
- Корпачев В.П., Пережилин А.И., Андрияс А.А. Теоретические исследования перемещения лесотранспортных единиц канатными ускорителями // Хвойные бореальной зоны. – 2019. – Т. 37. – № 6. – С. 422–425.
- Корпачев В.П., Пережилин А.И., Андрияс А.А. Технические проблемы, создаваемые строительством водохранилищ ГЭС на лесных землях // Хвойные бореальной зоны. 2022. – Т. 40. – № 1. – С. 38–45.
- Корпачев В.П., Пережилин А.И., Андрияс А.А., Сладикова С.М. Проблемы проектирования лесосводки и лесочистки лож водохранилищ ГЭС Сибири // Вестник Московского государственного университета леса. Лесной вестник. – 2014. – Т. 18. – № S2. – С. 24–29.
- Корпачев В.П., Пережилин А.И., Андрияс А.А., Шункова Н.О., Владыкин Е.А. Оценка объемов топликовой древесины в реке Енисей на участке от Усть-Маны до Красноярска // Хвойные бореальной зоны. – 2019. – Т. 37. – № 2. С. 117–121.
- Абузов А.В., Рябухин П.Б. Технологии промежуточных рубок на труднодоступных территориях // Известия высших учебных заведений. Лесной журнал. – 2021. – № 4 (382). – С. 117–130.
- Морозов Л.И., Абузов А.В. Вариант расширения области применения канатных установок // Ученые заметки ТОГУ. – 2014. – Т. 5. – № 4. – С. 868–871.
- Белая Н.М., Мищенко А.А. О работе сил трения при изгибе несущих канатов подвесных канатных транспортных систем как критерии их долговечности // Известия высших учебных заведений. Лесной журнал. – № 1. – 1989. – С. 28–38.
- Слепко И.И. Свободные поперечные колебания несущего каната // Известия высших учебных заведений. Лесной журнал. – №5, 1989. – С. 35–40.
- Абузов А.В., Рябухин П.Б. Исследование процесса колебаний грузовой подвески лесотранспортной аэростатно-канатной системы // Известия высших учебных заведений. Лесной журнал. – 2018. – № 3 (363). – С. 103–116.
- Martínez-Cercós D., Guéry-Odelin D., Muga Ju.G. Robust load transport by an overhead crane with respect to cable length uncertainties // Journal of Vibration and Control. – 2020. – Vol. 26. – № 17–18. – pp. 1514–1522.
- Popescu M., Rippmann M., Liew A., Reiter L., Flatt R.J., Van Mele T., Block Ph. Structural design, digital fabrication and construction of the cable-net and knitted formwork of the knitcandela concrete shell // Structures. – 2021. – Vol. 31. – pp. 1287–1299.
- Stoilov S. Logging equipment in Bulgaria – current state and future prospective // Forestry Ideas. – 2021. – Т. 27. – № 1. pp. 19–28.
- Stoilov S., Proto A.R., Oslekov D., Angelov G., Papandrea S.F. Forest operations using a combi-forwarder in deciduous forests // Small-Scale Forestry. 2024. Vol. 23. № 1. pp. 25–40.
- Alămoreanu M., Vasilescu A. Analysis of the carrier cable of gravity transport installations subject to the action of the wind // Journal of Engineering Sciences and Innovation. – 2023. – Vol. 8. № 3. – pp. 239–250.
- Gajas Giralt J., Larrodé E. Optimization of operation and efficiency of energy consumption in cable transport // Jornada de Jóvenes Investigadores del I3A. – 2024. – Vol. 12.
- Holzfeind T., Kanzian Ch., Gronalt M. Challenging agent-based simulation for forest operations to optimize the European cable yarding and transport supply chain // International Journal of Forest Engineering. – 2021. – Vol. 32. – № 1. – pp. 77–90.

20. Kotesov A., Kotesova A. Eco-green transport and logistics terminal with the suspended cable car // E3S Web of Conferences. – 2024. – Vol. 549. – pp. 06005.

References

1. Abuzov A.V. Theoretical justification of parameters of cable forest transport systems based on aerostatic and pneumatic structures [Teoreticheskoe obosnovanie parametrov kanatnykh lesotransportnykh sistem na baze aerostaticheskikh i pnevmaticheskikh konstruktсий] / diss. dokt. tekhn. nauk // FGBOU VO "Uralskiy gosudarstvennyy lesotekhnicheskiiy universitet". – 2016. (In Russ.)
2. Zhuk A.Yu. Increasing the efficiency of timber collection and transportation in coastal waters and the coastal zone of reservoirs [Povyshenie effektivnosti sbora i transportirovki drevesiny v pribrezhnykh akvatoriakh i beregovoy zone vodokhranilishch] / diss. dokt. tekhn. nauk // FGAOU VO "Severnnyy (Arkticheskiiy) federal'nyy universitet imeni M.V. Lomonosova". – 2016. (In Russ.)
3. Mekhrentsev A.V., Gerts E.F., Terinov N.N., Urazova A.F., Efimov Yu.V. Nature-like forest technologies as a factor in reducing man-made threats in conditions of intensive forestry [Prirodopodobnye lesnye tekhnologii kak faktor snizheniya tekhnogennykh ugroz v usloviyakh intensivnogo vedeniya lesnogo khozyaystva] // Sistemy. Metody. Tekhnologii. – 2024. № 4 (64). – pp. 144–150. (In Russ.)
4. Korpachev V.P., Perezhelin A.I., Andriyas A.A. Theoretical studies of the movement of timber transport units by cable accelerators [Teoreticheskie issledovaniya peremeshcheniya lesotransportnykh yedinit kanatnymi uskoryatelyami] // Khvoynye boreal'noy zony. – 2019. – T. 37. – № 6. – pp. 422–425. (In Russ.)
5. Korpachev V.P., Perezhelin A.I., Andriyas A.A. Technical problems created by the construction of hydroelectric power station reservoirs on forest lands [Tekhnicheskie problemy, sozdavaemye stroitel'stvom vodokhranilishch GES na lesnykh zemlyakh] // Khvoynye boreal'noy zony. – 2022. – T. 40. – № 1. – pp. 38–45. (In Russ.)
6. Korpachev V.P., Perezhelin A.I., Andriyas A.A., Sladikova S.M. Problems of designing forest harvesting and forest cleaning of reservoir beds of hydroelectric power plants in Siberia [Problemy proektirovaniya lesosvodki i lesosochistki lozh vodokhranilishch GES Sibiri] // Vestnik Moskovskogo gosudarstvennogo universiteta lesa. Lesnoy vestnik. – 2014. T. 18. – № S2. – pp. 24–29. (In Russ.)
7. Korpachev V.P., Perezhelin A.I., Andriyas A.A., Shunkova N.O., Vladykin E.A. Evaluation of the volume of driftwood in the Yenisei River on the section from Ust-Mana to Krasnoyarsk [Otsenka ob'yemov toplyakovoy drevesiny v reke Enisey na uchastke ot Ust-Many do Krasnoyarska] // Khvoynye boreal'noy zony. – 2019. – T. 37. – № 2. – pp. 117–121. (In Russ.)
8. Abuzov A.V., Ryabukhin P.B. Technologies for intermediate felling in hard-to-reach areas [Tekhnologii promezhutochnykh rubok na trudnodostupnykh territoriyakh] // Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Lesnoy zhurnal. – 2021. – № 4 (382). – pp. 117–130. (In Russ.)
9. Morozov L.I., Abuzov A.V. Option for expanding the scope of application of cable installations [Variant rasshireniya oblasti primeneniya kanatnykh ustanovok] // Uchenye zametki TOGU. – 2014. – T. 5. – № 4. – pp. 868–871. (In Russ.)
10. Belaya N.M., Mishchenko A.A. On the work of friction forces during bending of load-bearing ropes of suspended cable transport systems as criteria of their durability [O rabote sil treniya pri izgibe nesushchikh kanatov podvesnykh kanatnykh transportnykh sistem kak kriterii ikh dolgoevichnosti] // Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Lesnoy zhurnal. – № 1. – 1989. – pp. 28–38. (In Russ.)
11. Slepko I.I. Free transverse vibrations of a load-bearing rope [Svobodnye poperechnye kolebaniya nesushchego kanata] // Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Lesnoy zhurnal. – № 5, 1989. – pp. 35–40. (In Russ.)
12. Abuzov A.V., Ryabukhin P.B. Study of the process of oscillations of the cargo suspension of the timber transport balloon-cable system [Issledovanie protsessa kolebaniy gruzovoy podveski lesotransportnoy aerostatno-kanatnoy sistemy] // Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Lesnoy zhurnal. – 2018. – № 3 (363). – pp. 103–116. (In Russ.)
13. Martínez-Cercós D., Guéry-Odelin D., Muga Ju.G. Robust load transport by an overhead crane with respect to cable length uncertainties // Journal of Vibration and Control. – 2020. – Vol. 26. – № 17–18. – pp. 1514–1522.
14. Popescu M., Rippmann M., Liew A., Reiter L., Flatt R.J., Van Mele T., Block Ph. Structural design, digital fabrication and construction of the cable-net and knitted formwork of the knitted concrete shell // Structures. – 2021. – Vol. 31. – pp. 1287–1299.
15. Stoilov S. Logging equipment in Bulgaria - current state and future prospective // Forestry Ideas. – 2021. – Vol. 27. – № 1. – pp. 19–28.
16. Stoilov S., Proto A.R., Oslekov D., Angelov G., Papandrea S.F. Forest operations using a combi-forwarder in deciduous forests // Small-Scale Forestry. – 2024. – Vol. 23. – № 1. – pp. 25–40.
17. Alămoreanu M., Vasilescu A. Analysis of the carrier cable of gravity transport installations subject to the action of the wind // Journal of Engineering Sciences and Innovation. – 2023. – Vol. 8. – 3. – pp. 239–250.
18. Gajas Giralt J., Larrodé E. Optimization of operation and efficiency of energy consumption in cable transport // Jornada de Jóvenes Investigadores del I3A. – 2024. – Vol. 12.
19. Holzfeind T., Kanzian Ch., Gronalt M. Challenging agent-based simulation for forest operations to optimize the European cable yarding and transport supply chain // International Journal of Forest Engineering. – 2021. – Vol. 32. – № 1. – pp. 77–90.
20. Kotesov A., Kotesova A. Eco-green transport and logistics terminal with the suspended cable car // E3S Web of Conferences. – 2024. – Vol. 549. – pp. 06005.