

## Исследование напряжений в кабель-канатах и тросах с учетом зависимости физических констант материала проволок от температуры нагрева

Л.М. МАМАЕВ, Д.А. ШИТИКОВ, Д.С. САМОЙЛЕНКО

Днепродзержинский государственный технический университет

В статье рассмотрено влияние температуры, а также физических констант материала проволок канатов и кабель-канатов, на распределение напряжений в их элементах

В статті розглянуто вплив температури, а також фізичних констант матеріалу проволок канатів та кабель-канатів, на розподіл напруги в їх елементах.

The influence of temperature, physical constants of wire rope materials and cable-ropes on distribution of stress in their elements have been considered in the article.

Современный уровень развития техники предъявляет все новые и новые требования к повышению надежности и долговечности стальных канатов и кабелей. При выборе их конструкций в первую очередь необходимо учитывать условия, в которых они будут эксплуатироваться, и расчет вести исходя из этих условий.

Кабель - канаты, биметаллические витые системы, канаты ряда грузоподъемных машин, транспортирующих жидкий или расплавленный металл, работают в условиях температурного воздействия. От интенсивности и характера распределения температурных напряжений существенно зависят: длительная прочность, термическая усталость, термическое выпучивание и другие аналогичные явления, снижающие надежность и долговечность канатов и кабелей, работающих в условиях повышенных температур.

В инженерных расчетах для определения сравнительно небольших границ изменения температуры нагрева влиянием температуры на модуль упругости и коэффициенты линейного расширения обычно пренебрегают, поскольку учет зависимости технических характеристик материала от температуры приводит к значительным трудностям.

В действительности физические константы материала с изменением температуры могут изменяться в широких пределах. Достаточно сказать, что с повышением температуры до 500 °С, модуль упругости стали снижается на 30 %, а меди – на 25 %. При этом коэффициенты линейного расширения соответственно возрастают. При асимметричных циклах изменения температуры это может привести к перераспределению напряжений в элементах витой конструкции и, как следствие, снижению ее долговечности.

Влияние температуры на распределение напряжений в канатах и кабель – канатах рассмотрены в работах [1, 2]. В данной статье исследуются температурные напряжения с учетом зависимости модулей упругости и коэффициентов линейного расширения от температуры нагрева.

Геометрические уравнения деформации основного элемента кабель-каната были получены в виде [1]:

$$\begin{aligned} \varepsilon_s &= \frac{du}{dx} \cos^2 \alpha + V \frac{dV}{dx} \sin \alpha \cos \alpha - (v - \Psi \sin^2 \alpha) t(x); \\ \delta \alpha &= V \frac{dV}{dx} \cos^2 \alpha + \left[ \psi t(x) - \frac{du}{dx} \right] \sin \alpha \cos \alpha; \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \tilde{\varepsilon} &= \frac{dv}{dx} \left( 1 + \cos^2 \alpha \right) \sin \alpha \cos \alpha + \\ &+ \left[ \Psi t(x) - \frac{du}{dx} \right] \frac{\sin^2 \alpha \cos^2 \alpha}{r}; \\ \tilde{\tau} &= \frac{dV}{dx} \cos^4 \alpha + \left[ \frac{du}{dx} - \psi t(x) \right] \frac{\sin^3 \alpha \cos \alpha}{r}, \end{aligned} \quad (1)$$

где  $\varepsilon_s$  - относительное удлинение винтового элемента;  $\delta \alpha$  - приращение угла свивки;  $\tilde{\varepsilon}$  и  $\tilde{\tau}$  - деформации изгиба и кручения;  $u$  и  $V$  - продольное и угловое смещение кабель-каната;  $r$  - радиус свивки;  $v$  - коэффициент линейного расширения;  $\frac{du}{dx}$  и  $\frac{dV}{dx}$  соответственно относительное удлинение и кручение кабель-каната;  $t(x)$  - температура нагрева в функции от координаты длины кабеля;

$$\psi_i = \frac{1}{2ri} \left( \delta_o v_o + 2 \sum_{k=1}^{i-1} \delta_k v_k + \delta_i v_i \right), \quad (2)$$

где  $\delta_o$  - диаметр центральной проволоки;  $\delta_k$  ( $k=1,2,3, \dots, i-1$ ) - диаметры проволок внутрилежащих слоев;  $v_o, v_k, v_i$  - коэффициенты линейного расширения проволок соответствующих слоев.

Для большинства металлов и сплавов модули упругости с повышением температуры нагрева уменьшаются, а коэффициенты линейного расширения возрастают. Причем для наиболее вероятного интервала температур эти изменения с достаточной степенью аппроксимируются линейными зависимостями:

$$\begin{cases} E_{t,x} = E_o - K_E t(x); \\ v_{t,x} = v_o + K_v t(x); \end{cases} \quad (3)$$

где  $E_{t,x}$ ;  $v_{t,x}$  - соответственно нормальный модуль упругости и коэффициент линейного расширения;  $E_o, v_o$  - то же при температуре 20 °С,  $K_E, K_v$  - постоянные, зависящие от температуры.

При линейном контакте проволок осевое усилие  $P_x$  и крутящий момент  $L_x$ , приходящиеся на элемент кабель-каната от действия растягивающей нагрузки и температуры, можно определить, проектируя главный вектор  $\bar{P}$  и главный момент  $\bar{L}$  сил на соответствующие оси подвижного триэдра  $\nu, \eta, \tau$ , связанного с винтовой линией проволоки. Переходя далее от подвижной

системы координат  $\vartheta, \eta, \tau$  к неподвижной  $x, y, z$ , расположенной таким образом, что ось  $x$  совпадает с осью каната, а оси  $y$  и  $z$  находятся в его поперечном сечении, получим:

$$\left. \begin{aligned} P_x &= P_\tau \cos \alpha + P_\vartheta \sin \alpha; \\ L_x &= L_\tau \cos \alpha + L_\vartheta \sin \alpha + r(P_\tau \sin \alpha - P_\vartheta \cos \alpha), \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

где  $P_\tau$  - осевое усилие;  $P_\eta$  и  $P_\vartheta$  - поперечные силы;  $L_\tau$  - крутящий момент;  $L_\eta$  и  $L_\vartheta$  - изгибающие моменты.

Для решения этих уравнений воспользуемся известными из сопротивления материалов зависимостями:

$$\left. \begin{aligned} P_\tau &= EF\varepsilon_s; \\ L_\vartheta &= EJ\tilde{\vartheta}; \\ L_\tau &= GI_p\tilde{\tau}. \end{aligned} \right\} \quad (5)$$

В приведенных формулах  $EF, EI$  и  $GI_p$  - соответственно жесткость при растяжении, изгибе и кручении. Поперечная сила  $P_\vartheta$ , действующая на винтовой элемент кабель-каната, определяется из уравнений Кирхгофа [3]:

$$P_\vartheta = \omega_\eta L_\tau - \omega_\tau L_\vartheta, \quad (6)$$

где

$$\omega_\vartheta = \frac{\sin^2 \alpha}{r}; \quad \omega_\tau = \frac{\sin 2\alpha}{2r} \quad (7)$$

являются соответственно кривизной и кручением винтовой линии.

Решение уравнений (4) с учетом зависимостей (1), (3), (5), (6) и (7) позволяет определить осевое усилие и крутящий момент, действующие на винтовой элемент кабель-каната. Суммируя далее  $P_x$  и  $L_x$  по всему сечению кабель-каната

$$T(x) = \sum_i P(x); \quad M(x) = \sum_i L(x), \quad (8)$$

найдем полное усилие и крутящий момент в кабель-канате в виде:

$$\left. \begin{aligned} T(x) &= A_t \frac{du}{dx} + C_t \frac{dV}{dx} - \lambda_t t(x); \\ M(x) &= C_t \frac{du}{dx} + B_t \frac{dV}{dx} - \gamma_t t(x); \end{aligned} \right\} \quad (9)$$

где

$$A_t = A_o - A_1 t(x); \quad (10)$$

$$B_t = B_o - B_1 t(x); \quad (11)$$

$$C_t = C_o - C_1 t(x); \quad (12)$$

$$\lambda_t = \lambda_o - \lambda_1 t(x); \quad (13)$$

$$\gamma_t = \gamma_o - \gamma_1 t(x). \quad (14)$$

В этих уравнениях коэффициенты  $A_o, B_o, C_o, \lambda_o, \gamma_o$  определяются по формуле [1]. Коэффициенты  $A_1, B_1, C_1, \lambda_1, \gamma_1$  принимают следующий вид:

$$A_1 = \sum \left[ K_E F \cos \alpha + K_E I \frac{\sin^4 \alpha \cos^3 \alpha}{r^2} + K_E I_p \frac{\sin^6 \alpha \cos \alpha}{r^2} \right]; \quad (15)$$

$$B_1 = \sum \left[ K_E F r^2 \sin^2 \alpha \cos \alpha + K_E I (1 + \cos^2 \alpha)^2 \sin^2 \alpha \cos \alpha + K_E I_p \cos^7 \alpha \right]; \quad (16)$$

$$C_1 = \sum \left[ K_E F r \sin \alpha \cos^2 \alpha - K_E I (1 + \cos^2 \alpha) \frac{\sin^3 \alpha \cos^2 \alpha}{r} + K_E I_p \frac{\sin^3 \alpha \cos^4 \alpha}{r} \right]; \quad (17)$$

$$\lambda_1 = \sum \left[ K_E F (v_t - \varphi_t \sin^2 \alpha) \cos \alpha + K_E I \frac{\sin^4 \alpha \cos^3 \alpha}{r^2} \psi_t + K_V I_p \frac{\sin^6 \alpha \cos \alpha}{r} \psi_t \right]; \quad (18)$$

$$\gamma_1 = \sum \left[ K_E F (v_t - \varphi_t \sin^2 \alpha) r \sin \alpha - K_E I (1 + \cos^2 \alpha) \frac{\sin^3 \alpha \cos^2 \alpha}{r} \psi_t + K_V I_p \frac{\sin^3 \alpha \cos^4 \alpha}{r} \psi_t \right]. \quad (19)$$

Полученная система из двух дифференциальных уравнений статики кабель-каната (9) устанавливает взаимосвязь между деформациями кабель-каната и приложенной к нему внешней нагрузкой и температурой. Как видно из уравнений (10-19), агрегатные коэффициенты механической ( $A_t, B_t, C_t$ ) и температурной ( $\lambda_t$  и  $\gamma_t$ ) жесткости являются величинами переменными, зависящими от геометрических и физических характеристик кабель-каната, а также температуры нагрева. Привлекая далее известные из сопротивления материалов зависимости, можно определить силовые факторы и напряжения в любой проволоке кабель-каната или биметаллической витой конструкции.

Рассмотрим на примере влияние модуля упругости и коэффициента линейного расширения материала проволок на распределение температурных напряжений в сталемедном тросе. Параметры троса: конструкция (1+6) М + 12 ст; диаметр  $d = 4,5$  мм; диаметр проволок  $\delta = 0,9$  мм; угол свивки первого слоя проволок  $\alpha = 13^\circ 27'$ ; длина образцов  $\ell = 1000$  мм; модули упругости для стальных проволок  $E_{СТ} = 2,1 \cdot 10^5 \frac{Мн}{м^2}$ , для медных

проволок  $E_M = 1,3 \cdot 10^5 \frac{Мн}{м^2}$ ; коэффициенты линейного расширения для стальных проволок  $\nu_{СТ} = 12 \cdot 10^{-6} \frac{1}{град}$ ; для медных проволок  $\nu_M = 17 \cdot 10^{-6} \frac{1}{град}$ ; постоянные материала проволок

для стали  $K_E = 0,08 \frac{н}{м^{\circ}C}$ ,  $K_V = 0,75 \cdot 10^{-8}$ , для меди

$$K_E = 0,02 \frac{Мн}{м^{\circ}C}, \quad K_V = 0,36 \cdot 10^{-8} \frac{Мн}{м^{\circ}C}.$$

Агрегатные деформации и напряжения в элементах троса определялись для случаев свободной температурной деформации и свободного температурного удлинения в интервале температур 0-300  $^{\circ}C$ . (Таблица).

Таблица. Распределения деформации и напряжений в кабель-канате от температуры нагрева

Случай нагрузки	$t^{\circ}C$	Конструкция троса: (1+6)+12				
		Напряжения по слоям, $Мн/М^2$			Агрегатные деформации	
		$\sigma_1$ (1слой)	$\sigma_2$ (2слой)	$\sigma_3$ (3слой)	$U, м$	$V, рад$
Свободная температурная деформация	100	+18	-15	+40	$1,87 \cdot 10^{-3}$	1,4
	200	+20	-34	+17	$3,7 \cdot 10^{-3}$	2,2
	300	+23	-46	+20	$5,6 \cdot 10^{-3}$	3,0
Свободное температурное удлинение	100	-45	-43,4	+25,1	$1,39 \cdot 10^{-3}$	-
	200	-83,6	-81	+44	$2,9 \cdot 10^{-3}$	-
	300	-110	107	+64,5	$4,6 \cdot 10^{-3}$	-

Анализ полученных результатов позволяет сделать следующие выводы:

1. Учет зависимости физических постоянных материалов проволок от температуры нагрева дает существенную поправку в величине и характере распределения напряжений в сечении кабель-канатов и тросов.
2. При нагреве вследствие структурной неоднородности кабель - каната или биметаллического троса происходит перераспределение напряжений в рассматриваемом сечении, что при циклическом колебании температуры может привести к явлению усталости и снижению прочности материала проволок.
3. Нагрев вызывает снижение продольной жесткости кабель-каната и ухудшение его механических характеристик.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Глушко М.Ф., Волоконский В.Ф., Мамаев Л.М. Расчет канатов и биметаллических тросов линий электропередач с учетом температурного воздействия. Сб. «Стальные канаты», № 5, 1968.
2. Мамаев Л.М. Расчет кабель-каната с учетом температурного воздействия, сб. «Стальные канаты», № 6, «Киев», «Техника», 1969.
3. Мамаев Л.М., Самойленко Д.С. К вопросу о геометрических уравнениях кабель-каната, Сб. научных трудов ДГТУ, Днепропетровск, 2005г., с. 63–68.

пост. 25.11.05

## Моделирование процесса получения азотно-фосфорно-калийных (NPK) удобрений с помощью нейронных сетей

И.А. ПАВЛЮЧЕНКОВ, В.М. ГУЛЯЕВ, В.Н. ЦЫБА, Е.А. ЦЫБА

Днепропетровский государственный технический университет

Приведены результаты анализа существующей многофазной системы процесса аммонизации при производстве NPK удобрений. Разработана модель поглощения аммиака с помощью нейронной сети. Проведен анализ полученной модели.

Наведено результати аналізу існуючої багатofазної системи процесу амонізації при виробництві NPK добрив. Розроблено модель поглинання аміаку за допомогою нейронної мережі. Проведено аналіз отриманої моделі.

The outcomes of the analysis of an existing multiphase system of process amonization about effecting NPK of fertilizings are adduced. The model of absorption of ammonia with the help of a neuron network is designed. The analysis of the obtained model is conducted.

NPK – это комплексное удобрение, основные параметры которого – содержание азота, фосфора и калия. В марке удобрения указывают содержание основных компонентов в процентах, например 15-15-15.

При этом поставлены довольно жёсткие требования к химическому составу. А именно процентному содержанию фосфора, азота и калия в удобрении не может отклоняться не более чем на 1 %.

Производство гранулированных NPK удобрений осуществляется по схеме с аппаратом БГСХ и состоит из стадий:

1. Нейтрализация смеси азотной, фосфорной и серной кислот газообразным аммиаком с получением аммонизированной пульпы.
2. Упаривание аммонизированной пульпы.