

УДК 622.673

DOI: 10.22213/2413-1172-2020-3-46-54

Аналитический метод исследования силового взаимодействия элементов стальных канатов при работе на блоках*

В. Н. Новиков, аспирант, УдмФИЦ УрО РАН, Ижевск, Россия

А. Г. Иванов, кандидат технических наук, доцент, ИжГСХА, Ижевск, Россия

Е. А. Калентьев, кандидат технических наук, УдмФИЦ УрО РАН, Ижевск, Россия

В. В. Тарасов, доктор технических наук, профессор, УдмФИЦ УрО РАН, Ижевск, Россия

Рассматривается вопрос силового взаимодействия элементов стальных канатов (проволока, пряди и др.) при работе на блоках. Первоначально исследуется вопрос взаимного относительного перемещения проволоки при изгибе. Это явление более широко известно как депланация поперечного сечения проволочного каната. При определении дополнительных смещений учтено, что удлинение элементов каната происходит в обе стороны от точки набегания каната на блок (и в прямолинейный, и в криволинейный участки каната). Также учитываются дополнительные смещения, возникающие в изогнутой части каната.

Решается задача аналитического определения сил трения между проволоками каната, набегającego на вращающийся блок. Используемый подход основан на решении уравнения Эйлера для изогнутой на барабане нити. На завершающем этапе установлены зависимости для работы сил трения в зависимости от коэффициента трения между контактирующими поверхностями, обусловленные видом канатной смазки. В частности из полученных выражений следует, что при уменьшении коэффициента трения между элементами каната произойдет снижение совершаемой силами трения работы. Полученные результаты подтверждают, что использование эффективной канатной смазки будет способствовать энергосбережению, продлению срока службы стального каната.

Ключевые слова: канат, долговечность, изгиб, блок, шкив, смазка.

Введение

Стальной канат широко используется в различных отраслях промышленности, таких как подъемно-транспортное оборудование, лифтовое хозяйство, подвесные мосты, шахтное оборудование и многое другое. Уникальное сочетание компактности конструкции, высокой прочности на растяжение и сравнительно небольшой жесткости на изгиб и кручение в ряде практических случаев делает канат незаменимым элементом при решении самых сложных конструкторских и технических задач. Большинство канатов используются в ведущих секторах экономики и ВПК, связанных с безопасным перемещением людей и ответственных грузов, что объясняет актуальность проведения исследований канатов, направленных на оптимизацию их конструкций, а также построение и отработку адекватных расчетных моделей.

В прошлом веке значительные усилия были направлены на создание аналитических моделей и выполнение экспериментальных работ для анализа поведения стальных канатов. Подробные обзоры этих исследований приведены в работах [1–4]. В то же время значительное количество

работ в последнее десятилетие демонстрируют стабильно высокий интерес к проблемам стальных канатов.

Из наиболее интересных можно выделить следующие.

На основе вывода параметров локальной деформации отдельной проволоки была разработана аналитическая модель, характеризующая упругопластическое поведение как моно-, так и многопроволочных канатов [5]. Такие исследования необходимы для понимания характера напряженно-деформированного состояния в многослойной пряди каната. Детали полей поверхностной деформации канатов фиксируются методом цифровой 3D-корреляции изображений, и результаты хорошо согласуются с прогнозом настоящей модели.

В [6] авторы изучали контактное давление между канатом и блоком фрикционной накладки. Эти исследования имеют решающее значение для последующих работ по фрикционному нагреву в условиях скольжения. Контактные уравнения решаются на мелкой сетке с использованием многосеточных методов. Результаты численной модели контакта показывают, что

максимальное локальное контактное давление примерно в 45 раз выше, чем среднее значение, полученное по формуле «плоского метода». Аналитические расчеты по этому параметру дают относительную погрешность порядка 10 %.

С использованием репера Френе и методов дифференциальной геометрии создана математическая модель проволочного каната двойной спирали [7]. На основании этого геометрические параметры вторичной спиральной линии выводятся из необходимых предположений и геометрических соотношений, при этом используется теория упругого тонкого стержня Лява для установления эквивалентной механической модели проволочного каната, а также эквивалентных модулей упругости и сдвига. Расчеты силы деформации реальной конструкции каната показали, что максимальное отклонение удлинения составило менее 8 % по сравнению с моделированием методом конечных элементов и экспериментальными измерениями.

При эксплуатации канат работает в условиях сложного нагружения под действием изменяющихся параметров осевой нагрузки и крутящего момента, что затрудняет построение адекватной расчетной схемы, учитывающей характер контактного взаимодействия между его элементами (пряжами и единичными проволоками). Для решения этой задачи создана модель, основанная на контактной механике и теории тонких стержней, позволяющая в известной степени учесть особенности изменения контактных условий в реальных режимах работы стального каната [8]. Модель решается полуаналитическим методом, в котором для анализа контактного поля используются метод сопряженного градиента и метод быстрого преобразования Фурье. Установлено, что изменение нагрузки меняет характер распределения давления и деформаций между проволоками пряжи, что может привести к снижению жесткости пряжи с углом навивки более 20° [9].

В работе [10] предложена более полная модель анализа эволюции межпроволочного износа каната, подверженного циклической изгибающей нагрузке, где фрикционный контакт и скольжение между проволоками рассматриваются одновременно. Проведенный для изучения характеристик износа проволок эксперимент показал, что изнашивание каната происходит со стороны более удаленной от центра кривизны изогнутой пряжи. Очевидно, что износ отсутствует, когда проволоки отделены друг от друга или между ними нет проскальзывания. При эксплуатации каната в процессе работы об-

ласть изнашивания формируется в направлении нормальной линии контакта сердечника с проволокой, а максимальная глубина износа возникает в среднем положении между нейтральным слоем и на периферии от центра кривизны.

В исследовании [11] реакция предварительно напряженной пряжи на осевую растягивающую нагрузку исследована теоретически и экспериментально. Теории Feurer и Gostello [12] использованы для теоретического расчета значений деформаций и напряжений, возникающих на предварительно напряженных проволоках. Линейная регрессионная модель разработана для прогнозирования отношений нагрузка – деформация и напряжения – деформация с использованием результатов эксперимента. Показано, что существует сильная корреляция между экспериментальными и расчетными данными.

Целью исследования является определение относительного смещения элементов стальных канатов и возникающих сил трения при изгибе на вращающихся блоках.

Определение относительного перемещения (удлинения) проволок при работе каната на блоках

В исследованиях отечественных специалистов [13–17] уделено много внимания вопросам прочности, удлинения канатов, влиянию их геометрии, расчетов нагрузок в сечениях канатов при динамических режимах. В частности в одной из работ раскрыт вопрос смещения элементов каната, набегающего на блок, и предложена методика определения контактной нагрузки между элементами каната. Однако оценке сил трения между проволоками и определению работы этих сил при движении каната на вращающемся блоке уделено недостаточно внимания, например, не учтена роль применения смазочных материалов, которые могут снизить потери энергии на трение и повысить КПД приводов с канатными тяговыми элементами (в грузоподъемных механизмах и скреперных установках, на канатных дорогах и т. п.). Для определения усилий и удлинений элементов каната (проволочек) при огибании им блока используется методика, представленную в работе Сергеева С. Т. «Стальные канаты» (Киев : Техника, 1974. 328 с.).

Рассмотрим прядь спирального каната двойной свивки или его единичную проволоку, которые огибают блок. Если элемент каната жестко прикреплен к сердечнику, огибая его по винтовой линии, то участки каната, лежащие с внешней стороны блока, испытывают растяжение (например, BC , рис. 1), а участки, примы-

кающие к блоку, наоборот, сжимаются (например, CD , рис. 1).

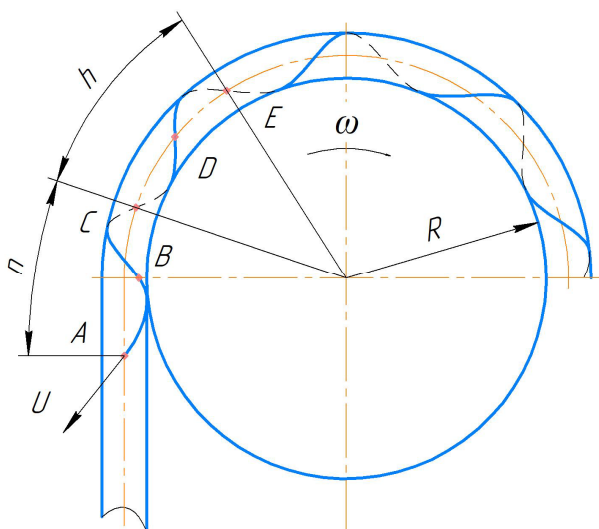


Рис. 1. Схема огибания блока элементом каната

Fig. 1. Block envelope diagram of a rope element

Одна прядь на шаге свивки h будет испытывать поочередно напряжения растяжения и сжатия. В действительности жесткой связи между элементом каната и сердечником нет – они могут свободно перемещаться друг относительно друга, что позволяет выровнять осевую нагрузку на все элементы изогнутого каната, способствуя его более равномерному нагружению. Рассмотрим участок ABC элемента каната со стороны его набегания на блок. Половина его (AB) находится на прямолинейной части каната, вторая половина (BC) испытывает растяжение на изогнутой его части. Упругое перемещение вызовет удлинение проволок в прямолинейной ветви каната на участке AB , не испытывающем дополнительных осевых напряжений. Сила трения препятствует этому перемещению, и оно прекратится в прямолинейной ветви каната на некотором расстоянии от точки набегания на блок. Локальные перемещения проволок вызывают дополнительные местные напряжения, которые накладываются на основные.

Рассмотрим проволоку радиуса r , навитую вокруг сердечника. При изгибе элемента каната внешние волокна проволоки, лежащие выше нейтрального слоя NN_1 , подвергнутся удлинению, а лежащие ниже – сжатию. На участке $1-1'$ после изгиба проволока сократится по длине и займет положение $1''-1'''$, на участке $2-2'$, напротив, растянется и примет положение $2''-2'''$ (рис. 2).

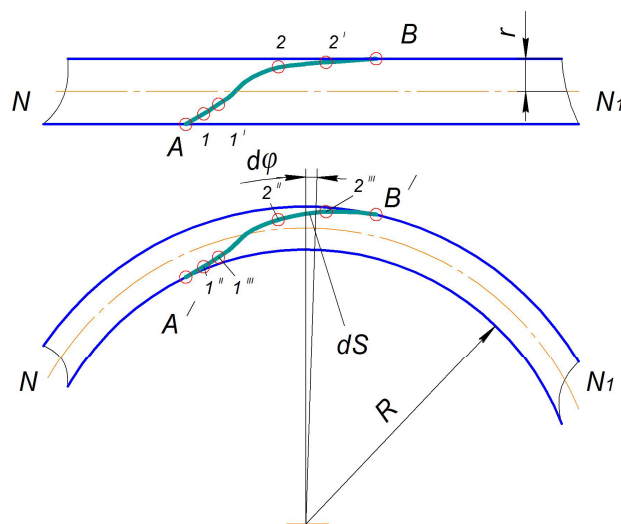


Рис. 2. Деформация элементов каната при его изгибе

Fig. 2. The deformation of the elements of the rope when it is bent

Связь между удлинением сердечника каната ε и удлинением ε_s проволоки, навитой вокруг сердечника, установлена А. Н. Динником [18] как

$$\varepsilon_s = \varepsilon \cos^2(\alpha), \quad (1)$$

где α – угол навивки проволоки на сердечник, рад.

По общеизвестным зависимостям [19] удлинение волокна проволоки, расположенного на расстоянии z от нейтрального слоя, определяется следующим образом:

$$\varepsilon = \frac{z}{R}, \quad z = r \sin \varphi \Rightarrow \varepsilon = \frac{r}{R} \sin \varphi. \quad (2)$$

С учетом равенств (1) и (2) можно определить относительное удлинение проволоки, навитой вокруг сердечника:

$$\varepsilon_s = \frac{r}{R} \sin \varphi \cos^2 \alpha. \quad (3)$$

Но проволоки навиты вокруг сердечника свободно, поэтому к значению ε_s необходимо добавить компенсирующее его относительное удлинение $\frac{dU}{dS}$, где U – относительное удлинение от смещения; S – дуговая координата вдоль нейтрального слоя сердечника, огибающего блок.

В случае если силы трения между элементами каната отсутствуют, осевое натяжение в его элементах до и после изгиба не изменится, значит, общая длина винтового элемента каната

при изгибе в пределах зоны огибания блока также останется неизменной [20]:

$$\varepsilon_s + \frac{dU}{dS} = 0. \quad (4)$$

Учитывая, что дуговая координата $dS = \frac{rd\varphi}{\sin \alpha}$ (из соотношений дифференциальной

геометрии, см. рис. 2), имеем $\frac{dU}{dS} = \frac{dU}{d\varphi} \frac{\sin \alpha}{r}$.

Подставив в (4) выражение (3),

$$\frac{r}{R} \sin \varphi \cos^2 \alpha + \frac{dU}{d\varphi} \frac{\sin \alpha}{r} = 0,$$

получим дифференциальное уравнение первого порядка с разделяющимися переменными:

$$dU = \frac{r^2 \cos^2 \alpha}{R \sin \alpha} \sin \varphi d\varphi. \quad (5)$$

После интегрирования получаем

$$U = -\frac{r^2 \cos^2 \alpha}{R \sin \alpha} \cos \varphi + C. \quad (6)$$

Произвольная константа C определяется из условия, что один конец каната закреплен жестко, и угол, определяющий положение сечения, равен φ_1 . Тогда при $\varphi = \varphi_1, U = 0$ частное решение имеет вид

$$U = \frac{r^2 \cos^2 \alpha}{R \sin \alpha} (\cos \varphi - \cos \varphi_1). \quad (7)$$

Примем, что точка закрепления каната находится в начальном положении в месте набегания его на блок. При вращении блока эта точка перемещается вместе с ним. В связи с этим смещения, возникающие в канате, определяемые выражением (7), распространяются в прямолинейную ветвь каната. Максимальное смещение проволок будет наблюдаться при полярных углах $\varphi = (2k \pm 1)\pi + \varphi_1$, где $k \in N$:

$$U_{\max} = -\frac{2r^2 \cos^2 \alpha}{R \sin \alpha} \cos \varphi_1. \quad (8)$$

Значения, полученные по формулам (7) или (8), должны распространяться на всю длину каната без учета сил трения.

Но в реальных канатах силы трения между его элементами присутствуют, и пренебрегать ими нельзя. За счет этих сил, препятствующих удлинению, происходит затухание смещений и проволок на некотором удалении от точки набегания каната на блок, причем в сторону прямолинейной ветви каната (см. рис. 1). В этой

зоне возникают местные напряжения в проволоках. Увеличение натяжения каната ведет к росту сил трения, уменьшению зоны деформации проволок и увеличению местных напряжений, что сказывается на работе сил трения, потере энергии в канате и снижении его долговечности.

Анализ выражений (7) и (8) показывает, что с увеличением радиуса блока R смещения проволок должно уменьшаться, снижаются местные напряжения, поэтому на блоках большого радиуса долговечность канатов выше.

Полученные зависимости удлинения проволок приняты в первом приближении и не учитывают, что удлинение элементов каната происходит в обе стороны от точки набегания каната на блок (и в прямолинейный и в криволинейный участки каната). Кроме того, в точке набегания каната на блок (см. рис. 1), происходит мгновенное изменение радиуса кривизны каната от ∞ до R . С точки зрения реальных объектов такого разрыва быть не может, поэтому имеется некоторая переходная зона, в которой процесс изменения кривизны происходит плавно.

Величина участка с переменным радиусом кривизны незначительна, удлинением каната на этом участке можно пренебречь. Значения дополнительных смещений $U_{\text{доп}}$, происходящих в изогнутой части каната, определяются согласно [21, 22]:

$$U_{\text{доп}} = \frac{r \cos \alpha}{R} \int_0^{h/2} \sin \omega x dx = \frac{2r^2 \cos^2 \alpha}{R \sin \alpha}, \quad (9)$$

где $\omega = \frac{\text{tg} \alpha}{r} = \frac{2\pi}{h}$.

Суммарное смещение U_{Σ} проволок каната при набегании на блок равно сумме выражений (8) и (9):

$$U_{\Sigma} = \left| \frac{2r^2 \cos^2 \alpha}{R \sin \alpha} \cos \varphi_1 \right| + \frac{2r^2 \cos^2 \alpha}{R \sin \alpha}. \quad (10)$$

В выражении (10) учтено, что знаки выражений (8) и (9) не совпадают, так как смещения проволок происходит в обе стороны от точки контакта набегающего каната на блок, поэтому выражение (8) взято по модулю.

Определение сил трения между проволоками каната

В работах [23, 24] указывается, что смещение проволок каната при его изгибе на блоке вызывает местные дополнительные осевые усилия в проволоках. Сами смещения затухают в небольшой зоне в окрестности точки набегания

каната на блок. Ряд авторов утверждают, что затухание смещений происходит за счет сил трения, однако не указывают на их величину. Естественно предположить, что эти дополнительные местные усилия в проволоках в зоне набегания каната на блок полностью уравниваются силами трения между проволоками и сердечником. При этом следует отметить, что нагружение каната осевым усилием Q приводит к обжиму каната и увеличению контактной нагрузки проволок между собой, а значит, и сил трения между ними. Для прямолинейной ветви каната смещение проволок относительно друг друга при установившейся нагрузке и движении каната не происходит, следовательно, силы трения являются силами трения покоя и работу не совершают.

Но при изгибе каната, набегающего на блок, происходит смещение проволок, их местное удлинение на величину U_{Σ} . Для определения работы сил трения необходимо установить их ве-

личину. Таким образом, ставится задача аналитического определения сил трения между проволоками каната, набегающего на вращающийся блок.

Решение поставленной задачи по закону Амонта – Кулона имеет сложности, связанные с определением числа зон контакта проволок между собой в пряди. Причем для внутренних прядей проволок эта задача является более сложной. Существуют методики определения контактных нагрузок в проволоках. Один из подходов основан на решении уравнения Эйлера для изогнутой на барабане нити. Учитывая, что работу совершают только силы трения, вызванные дополнительными усилиями, вполне обоснованно можно считать, что эти дополнительные осевые усилия $T_{\text{доп}}$ в точности равны искомым силам трения.

Рассмотрим элемент каната $d\varphi$, лежащий на блоке радиуса кривизны R (рис. 3).

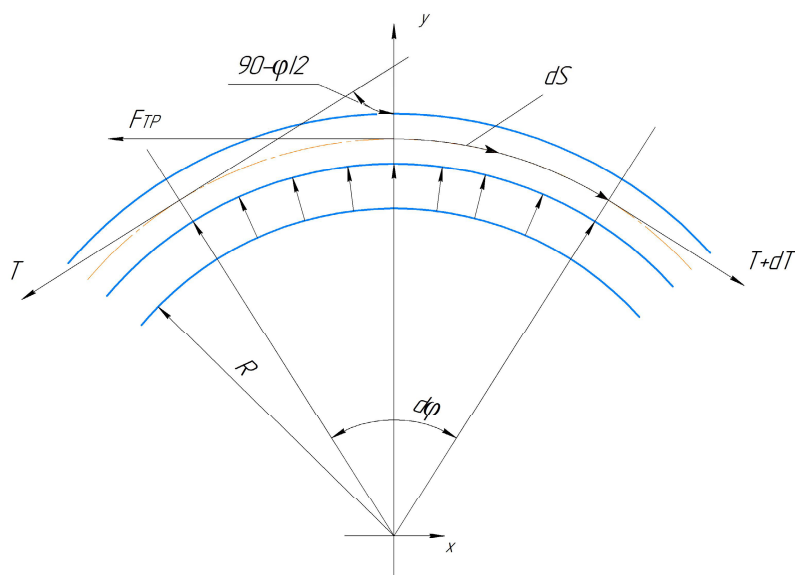


Рис. 3. Схема гибкой проволоки, находящейся на выпуклой поверхности

Fig. 3. Scheme of a flexible wire located on a convex surface

На левую часть проволоки каната действует сила T , на правую – сила $T + dT$, тогда

$$f \frac{T}{R} - \frac{dT}{dS} = 0, \quad (11)$$

где f – коэффициент трения скольжения между проволоками; S – дуговая координата, определяющая положение текущей точки проволоки каната на блоке.

На криволинейном участке проволока воспринимает наряду с основным усилием T еще

и дополнительное усилие ΔT , вызванное смещением элементов в точке набегания на блок:

$$\Delta T = EF \frac{dU_{\Sigma}}{dS}, \quad (12)$$

где E – модуль Юнга, Па; F – площадь поперечного сечения проволоки, м^2 ; U_{Σ} – осевое смещение проволоки из-за изгиба каната, м;

Допустим, что смещение элементов каната, набегающего на блок, незначительно влияет на

изменения начального натяжения пряди каната, тогда уравнение Эйлера можно записать в виде

$$\frac{dT_{\text{доп}}}{dS} = -\frac{f}{R}T_0. \quad (13)$$

Аналогично решению уравнения Эйлера получаем дифференциальное уравнение второго порядка с учетом (12):

$$EF \frac{d^2U}{dS^2} = -\frac{f}{R}T_0.$$

Дважды интегрируя, получаем

$$\frac{dU}{dS} = -\frac{f}{R} \frac{T_0}{EF} S + C_1; \quad (14)$$

$$U = -\frac{f}{R} \frac{T_0}{EF} \frac{S^2}{2} + C_1 S + C_2. \quad (15)$$

Произвольные постоянные C_1 и C_2 находим из краевых условий:

$$U|_{S_0=0} = C_2 = U_0;$$

$$U|_{S=S_1} = -\frac{f}{R} \frac{T_0}{EF} \frac{S_1^2}{2} + C_1 S_1 + U_0 = 0,$$

откуда

$$C_1 = \frac{f}{R} \frac{T_0}{EF} \frac{S_1}{2} - \frac{U_0}{S_1}.$$

Подставляем произвольные постоянные в выражение (15), получаем частное решение

$$U = -\frac{f}{R} \frac{T_0}{EF} \left(\frac{S^2}{2} - \frac{S}{2} S_1 \right) + U_0 \left(1 - \frac{S}{S_1} \right). \quad (16)$$

На основании выражения (16)

$$T_{\text{доп}} = \Delta T = EF \frac{dU}{dS} = -\frac{f}{R} T_0 \left(S - \frac{S_1}{2} \right) - EF \frac{U_0}{S_1}. \quad (17)$$

Из условия, что при координате $S = S_1$ будет равна нулю производная смещения,

$$\begin{aligned} \frac{dU}{dS} &= -\frac{f}{R} \frac{T_0}{EF} \left(S - \frac{S_1}{2} \right) - \frac{U_0}{S_1}; \\ \frac{dU}{dS} \Big|_{S=S_1} &= -\frac{f}{R} \frac{T_0}{EF} \frac{S_1}{2} - \frac{U_0}{S_1} = 0. \end{aligned} \quad (18)$$

Тогда

$$S_1 = \sqrt{-\frac{2U_0 R E F}{f T_0}}. \quad (19)$$

Максимальные дополнительные усилия будут наблюдаться в верхней части сечения каната

в точке набегания его на блок. С учетом (17) и (19)

$$T_{\text{доп}}^{\text{max}} = -\sqrt{-\frac{2fU_0 E F T_0}{R}}. \quad (20)$$

Смещения принимают два экстремальных значения:

– в направлении прямолинейной ветви величина U_0 определяется выражением (8) как

$$(U_0)_I = U_{\text{max}} = -\frac{2r \cos^2 \alpha}{R^2 \sin \alpha} \cdot \cos \varphi_1;$$

– в направлении криволинейной ветви величину U_0 находят по (9) как

$$(U_0)_{II} = U_{\text{доп}} = -\frac{2r^2 \cos^2 \alpha}{R \sin \alpha}.$$

Из этого условия находится вторая точка затуханий: S_2 смещена на криволинейном участке каната.

Работа сил трения

В предыдущих разделах определены дополнительные усилия в проволоках каната, возникающие при его изгибе на блоке. Там же указано, что эти усилия равны силам трения:

$$F_{\text{тр}} = F_{\text{доп}}. \quad (21)$$

Также получены выражения для смещения элементов каната. Тогда работу сил трения можно представить интегралом

$$A = \int_{S_1}^{S_2} F_{\text{тр}} dU, \quad (22)$$

где S_1 и S_2 – границы участка, на котором наблюдаются смещения элементов каната.

Дополнительные усилия в элементах каната, а значит, и силы трения будут возникать только в пределах участка каната, ограниченного точками S_1 и S_2 затухания смещений на прямой и изогнутой ветви каната. За пределами этих участков дополнительные смещения равны нулю.

Подставляя выражения (17) и (18) в интеграл (22), с учетом (21) получаем выражения для работы сил трения в виде двух интегралов. При этом следует учесть, что участок, на котором совершают работу силы трения, имеет прямую часть на отрезке $[S_1, 0]$ и изогнутую часть на отрезке $[0, S_2]$:

$$A_1 = \int_{S_1}^0 \left[-\frac{f}{R} T_0 \left(S - \frac{S_1}{2} \right) - EF \cdot \frac{(U_0)_I}{S_1} \right] \times \\ \times \left[-\frac{f}{R} \cdot \frac{T_0}{EF} \left(S - \frac{S_1}{2} \right) - \frac{(U_0)_I}{S_1} \right] dS; \quad (23)$$

$$A_2 = \int_0^{S_2} \left[-\frac{f}{R} T_0 \left(S - \frac{S_2}{2} \right) - EF \frac{(U_0)_{II}}{S_2} \right] \times \\ \times \left[-\frac{f}{R} \frac{T_0}{EF} \left(S - \frac{S_2}{2} \right) - \frac{(U_0)_{II}}{S_2} \right] dS. \quad (24)$$

С учетом обозначений

$$B = -\frac{f}{R} T_0; \quad B_1 = -\frac{f}{R} \frac{T_0}{EF}; \quad D = EF \frac{(U_0)_I}{S_1}; \\ D_1 = \frac{(U_0)_I}{S_1}; \quad G = EF \frac{(U_0)_{II}}{S_2}; \quad G_1 = \frac{(U_0)_{II}}{S_2}. \quad (25)$$

Суммарная работа сил трения проволоки каната

$$A_{\text{тр}} = A_1 + A_2 = -\frac{1}{3} \frac{f^2 T_0^2}{R^2 EF} (S_1^3 + S_2^3) - \\ - \frac{f}{R} T_0 [(U_0)_I S_1 + (U_0)_{II} S_2] - EF \left[\frac{(U_0)_I^2}{S_1} + \frac{(U_0)_{II}^2}{S_2} \right]. \quad (26)$$

Выражение (26) позволяет определить работу сил трения, совершенную при перемещении любой проволоки каната, набегающего на блок. Для определения полной работы сил трения в канате при огибании им блока следует просуммировать работы для каждого элемента каната с учетом его расположения в пряди и в канате, что учитывается в выражении (8) углом φ_1 . Полученный результат следует удвоить, так как подобные рассуждения по совершаемой работе сил трения верны также для участка каната, сбегаящего с блока.

Выводы

В работе представлен аналитический метод исследования силового взаимодействия проволок и прядей стального каната. При этом разработанный метод учитывает взаимные относительные смещения проволок каната вследствие его изгиба на блоках и шкивах, а также дополнительные смещения на переходном и изогнутом участке каната. При определении дополнительных удлинений проволок (прядей) каната принимается во внимание, что деформация элементов каната происходит в обе стороны от

точки набегающего каната на блок – и в прямолинейном, и в криволинейном участках каната. Разработан оригинальный подход, в основе которого упрощенное представление каната в виде гибкой упругорастяжимой нити на поверхности вращения. Полученные выражения для сил трения между проволоками каната и величин смещений используются для определения совершаемой ими работы.

Библиографические ссылки

1. Spak K., Agnes G., Inman D. Cable Modeling and Internal Damping Developments. Appl. Mech. Rev., 2013, vol. 65, no. 1.
2. Cardou A., Jolicoeur C. Mechanical Models of Helical Strands. Appl. Mech. Rev., 1997, vol. 50, no. 1, pp. 1-14.
3. Feyrer K. Wire Ropes, Tension, Endurance, Reliability. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2007.
4. Feyrer K. Wire Ropes Under Bending and Tensile Stresses. Wire Ropes: Tension, Endurance, Reliability. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2015, pp. 179-330.
5. Xiang L. Elastic-plastic modeling of metallic strands and wire ropes under axial tension and torsion loads. Int. J. Solids Struct. Pergamon, 2017, vol. 129, pp. 103-118.
6. Ma W., Lubrecht A.A. Detailed contact pressure between wire rope and friction lining. Tribol. Int. Elsevier, 2017, vol. 109, pp. 238-245.
7. Wu W., Cao X. Mechanics model and its equation of wire rope based on elastic thin rod theory. Int. J. Solids Struct. Pergamon, 2016, vol. 102-103, pp. 21-29.
8. Chen Y., Meng F., Gong X. Full contact analysis of wire rope strand subjected to varying loads based on semi-analytical method. Int. J. Solids Struct. Pergamon, 2017, vol. 117, pp. 51-66.
9. Meng F. Study on effect of inter-wire contact on mechanical performance of wire rope strand based on semi-analytical method. Int. J. Mech. Sci. Pergamon, 2016, vol. 115-116, pp. 416-427.
10. Chen Y., Meng F., Gong X. Interwire wear and its influence on contact behavior of wire rope strand subjected to cyclic bending load. Wear. Elsevier, 2016, vol. 368-369, pp. 470-484.
11. Onur Y.A. Experimental and theoretical investigation of prestressing steel strand subjected to tensile load. Int. J. Mech. Sci. Pergamon, 2016, vol. 118, pp. 91-100.
12. Costello G.A. Theory of Wire Rope. New York, NY: Springer New York, 1997.
13. Сергеев С. Т. Стальные канаты. Киев: Техника, 1974. 328 с.
14. Глушко М. Ф. Стальные подъемные канаты. Киев: Техника, 1966. 327 с.
15. Малиновский В. А. Стальные канаты. Ч. 1. Некоторые вопросы технологии, расчета и проектирования. Одесса: Астропринт, 2001. 188 с.

16. Малиновский В. А. Стальные канаты. Ч. 2. Основы теории изгиба и взаимодействия с опорной поверхностью. Одесса Астропринт, 2002. 180 с.

17. Талтыкин В. С. Обоснование метода повышения долговечности шахтных канатов с учетом контактного взаимодействия проволок / Московский государственный горный университет, 2009. 132 с.

18. Динник А. Н. Новости по подъемным машинам // Статьи по горному делу. М. : Углетехиздат, 1957.

19. Биргер И. А., Мавлютов Р. Р. Сопrotивление материалов. М. : Наука. Гл. ред. физ.-мат. лит., 1986. 560 с.

20. Сергеев С. Т. Надежность и долговечность стальных канатов. Киев : Техника, 1968. 238 с.

21. Сергеев С. Т. Теоретическое исследование переходных процессов при набегании каната на блок // Стальные канаты. 1964. Т. 1.

22. Глушко М. Ф. Деформация поперечных сечений и напряжения в канатах при изгибе // Стальные канаты. 1967. Т. 4, № 4. С. 65–75.

23. Глушко М. Ф. Исследование напряжений в стальных проволочных канатах // Расчеты на прочность. 1961. № 7.

24. Глушко М. Ф. Определение напряжений в проволоках спиральных канатов при изгибе // Научные тр. Харьковского горного ин-та. 1958. № 6.

References

1. Spak K., Agnes G., Inman D. Cable Modeling and Internal Damping Developments. *Appl. Mech. Rev.*, 2013, vol. 65, no. 1.

2. Cardou A., Jolicoeur C. Mechanical Models of Helical Strands. *Appl. Mech. Rev.*, 1997, vol. 50, no. 1, pp. 1-14.

3. Feyrer K. Wire Ropes, Tension, Endurance, Reliability. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2007.

4. Feyrer K. Wire Ropes Under Bending and Tensile Stresses. Wire Ropes: Tension, Endurance, Reliability. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2015, pp. 179-330.

5. Xiang L. Elastic-plastic modeling of metallic strands and wire ropes under axial tension and torsion loads. *Int. J. Solids Struct. Pergamon*, 2017, vol. 129, pp. 103-118.

6. Ma W., Lubrecht A.A. Detailed contact pressure between wire rope and friction lining. *Tribol. Int. Elsevier*, 2017, vol. 109, pp. 238-245.

7. Wu W., Cao X. Mechanics model and its equation of wire rope based on elastic thin rod theory. *Int. J. Solids Struct. Pergamon*, 2016, vol. 102-103, pp. 21-29.

8. Chen Y., Meng F., Gong X. Full contact analysis of wire rope strand subjected to varying loads based on semi-analytical method. *Int. J. Solids Struct. Pergamon*, 2017, vol. 117, pp. 51-66.

9. Meng F. Study on effect of inter-wire contact on mechanical performance of wire rope strand based on semi-analytical method. *Int. J. Mech. Sci. Pergamon*, 2016, vol. 115-116, pp. 416-427.

10. Chen Y., Meng F., Gong X. Interwire wear and its influence on contact behavior of wire rope strand subjected to cyclic bending load. *Wear. Elsevier*, 2016, vol. 368-369, pp. 470-484.

11. Onur Y.A. Experimental and theoretical investigation of prestressing steel strand subjected to tensile load. *Int. J. Mech. Sci. Pergamon*, 2016, vol. 118, pp. 91-100.

12. Costello G.A. Theory of Wire Rope. New York, NY: Springer New York, 1997.

13. Sergeev S.T. *Stal'nye kanaty* [Steel ropes]. Kiev, Tekhnika Publ., 1974, 328 p. (in Russ.).

14. Glushko M.F. *Stal'nye pod'emnye kanaty* [Steel hoisting ropes]. Kiev, Tekhnika Publ., 1966, 327 p. (in Russ.).

15. Malinovskii V.A. *Nekotorye voprosy tekhnologii, rascheta i proektirovaniya* [Some issues of technology, calculation and design]. Odessa, Astro-print Publ., 2001, 188 p. (in Russ.).

16. Malinovskii V.A. *Osnovy teorii izgiba i vzaimodeistviya s opornoj poverkhnost'yu* [Fundamentals of the theory of bending and interaction with the supporting surface]. Odessa, Astro-print Publ., 2002, 180 p. (in Russ.).

17. Taltykin V.S. *Obosnovanie metoda povysheniya dolgovechnosti shakhtnykh kanatov s uchetom kontaktного vzaimodeistviya provolok* [Substantiation of the method of increasing the durability of mine ropes taking into account the contact interaction of wires]: PhD thesis. Moscow, State Min-ing University, 2009, 132 p. (in Russ.).

18. Dinnik A.N. *Stat'i po gor-nomu delu* [News on lifting machines]. Moscow, Ugletekhizdat Publ., 1957 (in Russ.).

19. Birger I.A., Mavlyutov R.R. *Soprotivlenie materialov* [Resistance Materials: Study Guide]. Moscow, Nauka Publ., 1986, 560 p. (in Russ.).

20. Sergeev S.T. *Nadezhnost' i dolgovechnost' stal'nykh kanatov* [Reliability and durability of steel ropes]. Kiev, Tekhnika Publ., 1968 (in Russ.).

21. Sergeev S.T. [Theoretical study of transient processes when a rope runs onto a block]. *Stal'nye kanaty*, 1964, vol. 1 (in Russ.).

22. Glushko M.F. [Deformation of cross sections and stresses in ropes during bending]. *Stal'nye kanaty*, 1967, no. 4, pp. 65-75 (in Russ.).

23. Glushko M.F. [The study of stresses in steel wire ropes]. *Raschety na prochnost'*, 1961, no. 7 (in Russ.).

24. Glushko M.F. [Determination of stresses in the wires of spiral ropes in bending]. *Nauchnye trudy Khar'kovskogo gornogo instituta*, 1958, no. 6 (in Russ.).

Analytical Method for Studying the Force Interaction of Elements of Steel Ropes when Working on Blocks

V.N. Novikov, Post-graduate, Udmurt Federal Research Center of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences, Izhevsk, Russia.

A.G. Ivanov, PhD in Engineering, Associate Professor, Izhevsk State Agricultural Academy, Izhevsk, Russia.

E.A. Kalentyev, PhD in Engineering, Udmurt Federal Research Center of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences, Izhevsk, Russia.

V.V. Tarasov, DSc in Engineering, Udmurt Federal Research Center of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences, Izhevsk, Russia

The paper considers the issue of force interaction of elements of steel ropes (wire, strands, etc.) when working on blocks. Initially, the issue of mutual relative movement of wires during bending is investigated, this phenomenon is more commonly known as the deployment of a cross section of a wire rope. When determining the additional displacements, it was taken into account that the extension of the rope elements occurs on both sides of the point of incidence of the rope on the block (both in straight and curved sections of the rope). Additional displacements occurring in the curved part of the rope are also taken into account. Next, the problem of the analytical determination of the friction forces between the wires of a rope running onto a rotating block is solved. The approach used is based on solving the Euler equation for a thread bent on a drum. At the final stage, the dependences for the operation of the friction forces are established depending on the coefficient of friction between the contacting surfaces, due to the type of cable lubricant. In particular, it follows from the expressions obtained that with a decrease in the coefficient of friction between the elements of the rope, the work performed by the forces of friction will decrease. The results obtained confirm that the use of effective wire rope lubrication will contribute to energy saving and extend the life of the steel wire rope.

Keywords: rope, durability, bending, block, pulley, grease.

Получено 10.08.2020

Образец цитирования

Аналитический метод исследования силового взаимодействия элементов стальных канатов при работе на блоках / В. Н. Новиков, А. Г. Иванов, Е. А. Калентьев, В. В. Тарасов // Вестник ИжГТУ имени М. Т. Калашникова. 2020. Т. 23, № 3. С. 46–54. DOI: 10.22213/2413-1172-2020-3-46-54.

For Citation

Novikov V.N., Ivanov A.G., Kalent'ev E.A., Tarasov V.V. [Analytical Method for Studying the Force Interaction of Elements of Steel Ropes when Working on Blocks]. *Vestnik IzhGTU imeni M.T. Kalashnikova*, 2020, vol. 23, no. 3, pp. 46-54 (in Russ.). DOI: 10.22213/2413-1172-2020-3-46-54.