

УДК [621.86.065:539.38]:539.62

А.В. Непомнящий, инженер,
И.М. Чаюн, д-р техн. наук, проф.,
Одес. нац. политехн. ун-т

УЧЕТ МЕЖЭЛЕМЕНТНОГО ТРЕНИЯ В ДЕФОРМИРОВАННОМ СОСТОЯНИИ КАБЕЛЬ-КАНАТОВ

Введение. Трение между контактирующими слоями элементов витых проволочных изделий является важным фактором, влияющим на точность определения их деформированно-напряженного состояния.

Анализ последних исследований и публикаций. Проблема трения между проволоками, токоведущими жилами, изоляционными слоями в кабель-канатах рассматривалась многими исследователями, но не имеет полного законченного решения с выходом на методики практического применения [1...3]. На основе экспериментов построена теория учета трения для определения изгибной жесткости канатов [2]. Однако в расчетную схему этой теории не заложена механика взаимодействия элементов с учетом трения, и это не позволяет определять деформированно-напряженное состояние кабель-канатов, зависящее от внутреннего трения. Проведено исследование методами теории упругости по определению смещений и дополнительных усилий, связанных с трением, в проволоках стального каната, покрытого шланговой оболочкой [3]. Однако не приведено ни методики, ни примеров практических расчетов деформированно-напряженного состояния канатов.

Цель работы. В расчетную схему энергетического метода [4] предлагается добавить учет трения путем введения соответствующих коэффициентов в геометрические уравнения деформирования элементов. Это обеспечит предпосылку существенного повышения точности прочностных и жесткостных расчетов кабель-канатов.

Изложение основного материала. Предлагается отказаться от учета трения в классическом виде (рис. 1) и использовать экспериментальные коэффициенты, непосредственно отражающие влияние трения на взаимодействие элементов кабель-каната (рис. 2).

Для спиральных канатов, каротажных кабелей деформации проволок — продольную (растяжения) e , кручения t , изгиба b относительно бинормали представим с учетом всех факторов в однообразной компактной форме:

$$\begin{aligned} e &= \varepsilon K_{e\varepsilon} + \theta K_{e\theta} + \omega K_{e\omega} + \chi K_{e\chi} + \zeta K_{e\zeta} + \eta(K_{e\eta} + \nu); \\ t &= \varepsilon K_{t\varepsilon} + \theta K_{t\theta} + \omega K_{t\omega} + \chi K_{t\chi} + \zeta K_{t\zeta}; \\ b &= \varepsilon K_{b\varepsilon} + \theta K_{b\theta} + \omega K_{b\omega} + \chi K_{b\chi} + \zeta K_{b\zeta}, \end{aligned} \quad (1)$$

где $\varepsilon, \theta, \omega, \chi, \zeta, \eta$ — соответственно деформации кабель-каната: растяжения, кручения, поперечная, связанная с гидростатическим давлением, изгибные в плоскости навивания на барабан и в плоскости ей ортогональной, а также повышение температуры;

$K_{e\varepsilon}; K_{e\theta}; \dots; K_{b\zeta}$ — удельные деформации проволок, обусловленные деформациями кабель-каната (принцип их индексации: первый знак указывает вид деформации проволоки, а второй — причину, т.е. деформацию кабель-каната, которая вызывает данную деформацию проволоки, например, $K_{e\varepsilon}$ — удельная продольная деформация e проволоки, связанная с деформацией растяжения ε кабель-каната;

DOI 10.15276/opus.2.44.2014.05

© А.В. Непомнящий, И.М. Чаюн, 2014

$K_{e\eta}$ — удельная продольная e деформация проволок, связанная с поперечной температурной деформацией кабель-каната.

Удельные деформации без учета трения рассмотрены ранее [5]. Рассмотрим удельные деформации, для которых фактор трения имеет наиболее существенное влияние. Это определяется схемой нагружения кабель-каната и соответствующими видами его деформаций. При этом используется принцип суперпозиции, в данном случае независимости в последовательности возникновения деформаций кабель-каната. Применим этот принцип в представлении деформации растяжения как суммы составляющих

$$\varepsilon = \varepsilon(e) \pm \varepsilon(\theta) \pm \varepsilon(\omega),$$

где $\varepsilon(e)$ — составляющая, которая образуется деформацией растяжения проволок;

$\varepsilon(\theta)$ — составляющая от деформации кручения кабель-каната (“+” относится к слоям, которые раскручиваются; “-” относится к слоям, которые закручиваются);

$\varepsilon(\omega)$ — составляющая от поперечной деформации кабель-каната (“+” при сужении; “-” при расширении).

Рассмотрим особенности учета трения при различных схемах нагружения.

Чистое растяжение. Кабель получает продольную ε и поперечную ω деформации. Рассмотрим учет трения в удельных деформациях проволок, присущих данной схеме.

Удельная продольная деформация проволок, связанная с продольной деформацией ε ,

$$K_{e\varepsilon} = \cos^2 \alpha (1 - \nu_{e\omega} \mu_\varepsilon \operatorname{tg}^2 \alpha), \quad (2)$$

где $\nu_{e\omega} \mu_\varepsilon$ — удельная поперечная деформация от эффекта Пуассона;

$\nu_{e\omega}$ — коэффициент, учитывающий трение;

μ_ε — коэффициент поперечной деформации, связанный с сужением элементов [5].

Руководствуясь принципом суперпозиции, вначале принимаем во внимание только продольную деформацию $e(\varepsilon)$ проволок, а затем деформацию $e(\omega)$. При таком условии в пределах упругого деформирования между элементами в $K_{e\varepsilon}$ находится только трение покоя. Именно к такой ситуации можно отнести вывод М.Ф. Глушко о том, что в виду совместности упругих смещений слоев проволок, несмотря на контактное давление между ними силы трения не реализуются [1].

На рис. 1 показана общая суть модели трения скольжения, а на рис. 2 — модель трения скольжения между проволоками слоев кабель-каната [6]. В состоянии покоя (рис. 1) и равномерного движения $N = Q$; $F = F_c$, где N — нормальная реакция на действие прижимающей силы Q ; F — сила трения; F_c — сдвигающая сила. С ростом силы F_c увеличивается сила трения покоя. Рост силы F заканчивается с наступлением состояния трения движения: $F \leq F_c$. В состоянии движения сила F остается постоянной. Эту силу, пропорциональную коэффициенту трения и нормальной реакции N , называют силой трения.

Сила Q соответствует силе контактного давления между слоями проволок и порождается силой P растяжения кабель-каната (рис. 2). Этой же силой порождается и сила сдвига F_c , от которой растет сила трения покоя до наступления состояния трения движения. Коэффициент трения в (2)

$$\nu_{e\omega} = \frac{c(\omega)}{\max c(\omega)} = 1 - \frac{e_{\text{жк}}(\omega)}{\omega \sin^2 \alpha}; \quad \nu_{e\theta} = \begin{cases} 1 & \text{— при отсутствии трения;} \\ 0 & \text{— при трении покоя,} \end{cases}$$

где $c(\omega)$ и $\max c(\omega)$ — относительное продольное перемещение проволоки от поперечной деформации ω кабель-каната при наличии трения и ее максимально возможное значение при отсутствии трения;

$e_{ек}$ — продольная деформация, определенная экспериментально, т.е. при реально существующем трении.

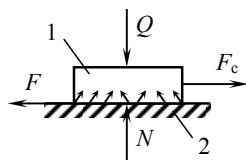


Рис. 1. Силовая схема трения скольжения:

1 — тело прижатое силой,
2 — опорная поверхность

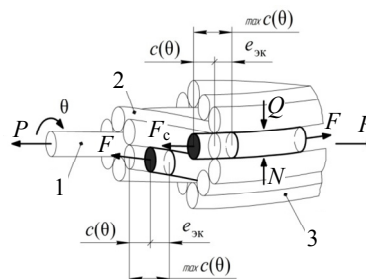


Рис. 2. Модель межэлементного трения между

проволоками в кабеле: 1 — сердечник,
2, 3 — слои брони

Отметим, что для спиральных канатов весомость влияния на напряженно-деформированное состояние коэффициента $v_{e\theta}$ в (2) так же незначительна, как и влияние сужения элементов от эффекта Пуассона. Для каротажных кабелей за счет податливого сердечника указанное влияние значительней, и его следует учитывать.

Свободное растяжение кабель-каната. При такой нагрузке кабель получает продольную ε крутильную θ и поперечную ω деформации. Рассмотрим удельные деформации с учетом трения при этой схеме нагружения.

Удельная деформация K_e связана с деформацией кручения кабель-каната, продольной деформацией проволоки и трением

$$K_{e\theta} = 0,5v_{e\theta}r \sin 2\alpha,$$

где $v_{e\theta}$ — коэффициент, который учитывает влияние трения на продольную деформацию проволоки в части деформации кручения θ кабель-каната.

В предположении отсутствия трения для проволок слоя, который раскручивается, составляющая $\theta K_{e\theta}$ в выражении (1) отрицательная и не представляет продольную деформацию $e(\theta)$, а является полностью относительным перемещением $\max c(\theta) = |\theta K_{e\theta}|$. Руководствуясь принципом суперпозиции, это перемещение наглядно можно представить высывиванием всех проволок данного слоя из поперечного сечения кабель-каната, а для проволок слоя, который закручивается, наоборот это можно представить обратным направлением перемещения, т.е. всовывиванием в сечение (рис. 2).

Реально наличие трения создает сопротивление таким перемещениям. Проволока испытывает продольную деформацию $e(\theta)$ до наступления состояния трения движения в соответствии с условием $F_c \geq F$. При этом относительное перемещение $c(\theta) = |\theta K_{e\theta} - e(\theta)|$. Эта механика обеспечивается коэффициентом

$$v_{e\theta} = \frac{c(\theta)}{\max c(\theta)} = \frac{e_m - e_{ек}}{\max c(\theta)}; v_{e\theta} = \begin{cases} 1 & \text{— при отсутствии трения;} \\ 0 & \text{— при трении покоя,} \end{cases} \quad (3)$$

где $c(\theta)$ и $\max c(\theta)$ — относительное продольное перемещение проволоки от деформации кручения θ кабель-каната при наличии трения и ее максимально возможное значение при отсутствии трения;

e_m — теоретическое значение продольной деформации проволоки при свободном растяжении кабель-каната без учета трения, т.е. при $v_{e\theta} = 1$ [5];

$e_{ек}$ — та же деформация, определенная экспериментально, т.е. при существующем трении.

С учетом выражений удельных деформаций [5]

$$v_{e\theta} = \left| \frac{\cos^2 \alpha (\varepsilon (1 - \mu_\varepsilon \operatorname{tg}^2 \alpha) + \theta (r - \mu_\theta \operatorname{tg} \alpha) \operatorname{tg} \alpha) - e_{ек}}{\theta (r - \mu_\theta \operatorname{tg} \alpha) \cos \alpha \sin \alpha} \right|.$$

Удельная деформация $K_{t\theta}$, связанная с деформацией кручения θ кабель-каната, деформацией кручения проволоки t и трением,

$$K_{t\theta} = v_{t\theta} \cos^4 \alpha. \quad (4)$$

Влияние коэффициента трения $v_{e\theta}$ на деформацию кручения t проволоки в кабель-канате такое же, как и на его крутильную жесткость, которая согласно [5]

$$G_{\theta\theta} = \sum \Lambda (\Phi_p K_{e\theta}^2 + \Phi_t K_{t\theta}^2 + \Phi_n (K_{b\theta}^2 + K_{n\theta}^2)). \quad (5)$$

Представим сплошной стержень с формой сечения, например двухслойной брони кабеля. Его крутильная жесткость отвечает состоянию трения покоя между проволоками

$$G_{\theta\theta} = \sum \Phi_t K_{t\theta} = \sum G J_{01},$$

где J_{01} — полярный момент инерции сечения проволоки относительно центра 0_1 сечения кабель-каната (рис. 3)

$$J_{01} = \frac{\pi \delta^4}{32} \sqrt{1 + 8 \left(\frac{r}{\delta} \right)^2}.$$

В состоянии трения движения для спирального каната, брони каротажного кабеля удельная деформация $K_{t\theta}$ определяется выражением (4), а коэффициент $v_{t\theta}$, который учитывает влияние трения,

$$v_{t\theta} = (1 + 8k(r/\delta)^2)^{0.5}, \quad k = 0 \text{ — трение покоя; } k = 1 \text{ — отсутствие трения.}$$

Исследованиями установлено, что на основе (5) и зависимости несущей способности кабель-канатов от параметра неуравновешенности $\psi = G_{\theta\theta} / \max G_{\theta\theta}$ [4] можно определять экспериментальные значения коэффициентов трения $v_{e\theta}$ и $v_{t\theta}$, влияние которых на жесткости и на напряженное состояние на порядок больше, чем остальных, присущих свободному растяжению кабель-каната.

Трение в зоне навивки кабель-каната на барабан. В исходном прямолинейном натянутом состоянии изгибная жесткость имеет максимально возможное значение $\max G_{\chi\chi}$, поскольку между элементами есть трение покоя. Для фиксированного натяжения такая жесткость сохраняется при изгибе до определенной кривизны χ . В этом состоянии сила трения F пропорциональна коэффициенту трения и силе прижатия Q , которая образуется натяжением кабель-каната. Вследствие изгиба кабель-каната возникает сила сдвига F_c . В состоянии трения покоя

$$F_c = \chi r E A \cos^2 \alpha \cos \varphi,$$

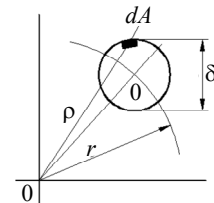


Рис. 3. К определению коэффициента $v_{t\theta}$

где EA и φ — продольная жесткость проволоки и ее положение в соответствующем слое.

В состоянии покоя проволока получает продольную деформацию растяжения $e(\chi)$ в зависимости от кривизны кабель-каната. Это продолжается до приобретения предельной кривизны χ_r . При этом

$$F_{cr} = v_{e\chi} \chi_r r EA \cos^2 \alpha \cos \varphi = F. \quad (6)$$

При дальнейшем росте кривизны вплоть до кривизны барабана деформация растяжения проволоки e_r остается неизменной. На основе (6) коэффициент влияния трения

$$v_{e\chi} = \frac{R e_r}{r \cos^2 \alpha \cos \varphi},$$

где R — радиус кривизны изгиба кабель-каната на барабане (или на блок-балансе).

Гидростатическое давление. Удельная деформация $K_{e\omega}$, связанная с поперечной деформацией ω кабель-каната от гидростатического давления,

$$K_{e\omega} = v_{e\omega} r_i r_k^{-1} \sin^2 \alpha,$$

где $v_{e\omega}$ — коэффициент, который учитывает влияние трения на продольную деформацию проволоки от поперечной деформации ω по наружному диаметру кабель-каната.

Температурное воздействие. Удельная деформация $K_{e\eta}$, связанная с поперечной деформацией ω_η кабель-каната от повышения температуры,

$$K_{e\eta} = v_{e\eta} \omega_\eta \sin^2 \alpha,$$

где $v_{e\eta}$ — коэффициент влияния трения на продольную деформацию проволоки от поперечной температурной деформации ω_η слоя [5].

Выражения коэффициентов $v_{e\omega}$ и $v_{e\eta}$ аналогичны (3). Их влияние на жесткостные характеристики и напряженное состояние кабель-канатов на порядок меньше v_{e0} .

Результаты. Основной результат работы состоит в обосновании, что известная для канатов концепция учета межэлементного трения [6] в основном применима и для каротажных кабелей. Отличие связано с присущими каротажным кабелям гидростатическим и температурным воздействиями, для которых получены соответствующие коэффициенты трения.

Выводы. Установлено, что в кабель-канатах межэлементное трение проявляется при нагружениях, которые сопровождаются двумя и более деформациями.

Коэффициенты трения можно определять двумя путями. Первый — это электротензометрирование, при котором необходимо измерять (выделять) деформативную часть из общего перемещения элемента (проволоки) при нагружении кабель-каната. Этот путь требует весьма тонких опытов. Второй — на основе анализа агрегатных деформаций, жесткостных характеристик и несущей способности кабель-канатов.

Учет трения дает предпосылку существенного повышения точности прочностных и жесткостных расчетов кабель-канатов.

Литература

1. Глушко, М.Ф. Стальные подъемные канаты / М.Ф. Глушко. — Репр. изд. — Одесса: Астропринт, 2013. — 327 с.
2. Малиновский, В.А. Стальные канаты. Ч. 1: Некоторые вопросы технологии, расчета и проектирования / В.А. Малиновский. — Одесса: Астропринт, 2001. — 188 с.
3. Мамаев, Л.М. Исследование влияния оболочек покрытия на напряженное состояние кабелей управления / Л.М. Мамаев, А.М. Кабаков, А.И. Пабат // Вісн. СевНТУ. Серія: Механіка, енергетика, екологія. — 2012. — Вип. 133/2012. — С. 379 — 384.

4. Чаюн, И.М. Несущая способность подъемных канатов и лент: монография / И.М. Чаюн. — Одесса: Астропринт, 2003. — 233 с.
5. Непомнящий, А.В. Метод жесткостей в расчете каротажных кабелей / А.В. Непомнящий, И.М. Чаюн // Вісн. СевНТУ. Серія: Механіка, енергетика, екологія. — 2013. — Вип. 137/2013. — С. 62 — 67.
6. Чаюн, М.И. Концепция учета трения между элементами канату / М.И. Чаюн, И.М. Чаюн // Стальные канаты. — 2008. — Вып. 6. — С. 24 — 37.

References

1. Glushko, M.F. (2013). *Steel Lifting Ropes*. Odessa: Astroprint. (Original work published 1966)
2. Malinovsky, V.A. (2001). *Steel Ropes. Vol. 1, Some Questions about the Technology, Calculation and Design*. Odessa: Astroprint.
3. Mamaev, L.M, Kabakov, A.M. and Pabat, A.I. (2012). Study of the influence of shell cover for stress state of cable management. *Journal of the Sevastopol National Technical University: Mechanics, Power Engineering, Ecology*, 133, 379-384.
4. Chayun, I.M. (2003). *Load Carrying Capacity of Lifting Ropes and Tapes*. Odessa: Astroprint.
5. Nepomnyashchii, A.V. and Chayun, I.M. (2013). Method of calculation stiffness in the logging cable. *Journal of the Sevastopol National Technical University: Mechanics, Power Engineering, Ecology*, 137, 62-67.
6. Chayun, I.M. and Chayun, M.I. (2008). Concept of friction accounting between elements of rope. *Steel Ropes*, 6, 24-37.

АНОТАЦІЯ / АННОТАЦИЯ / ABSTRACT

О.В. Непомнящий, І.М. Чаюн. Врахування міжелементного тертя в деформованому стані кабель-канатів. Розроблено методику врахування тертя до енергетичного методу визначення жорсткісних характеристик кабель-канатів з метою підвищення точності їх механічної моделі деформування. Це досягнуто введенням в питомі деформації елементів, які представляють геометричні рівняння деформування, експериментальних коефіцієнтів, що враховують тертя. Запропоновано вирази питомих деформацій з коефіцієнтами тертя для основних схем навантаження кабель-канатів, а також каротажних кабелів, що є значимим вкладом у будівельну механіку витих дротяних виробів. Результати роботи мають практичне значення для підвищення точності й надійності міцнісних розрахунків і на цій основі принесуть економічний ефект.

Ключові слова: канат, кабель, тертя, деформація, міцність, жорсткість.

А.В. Непомнящий, І.М. Чаюн. Учет межэлементного трения в деформированном состоянии кабель-канатов. Разработана методика учета трения к энергетическому методу определения жесткостных характеристик кабель-канатов с целью повышения точности их механической модели деформирования. Это достигнуто введением в удельные деформации элементов, которые представляют геометрические уравнения деформирования, экспериментальных коэффициентов, учитывающих трение. Предложены выражения удельных деформаций с коэффициентами трения для основных схем нагружения кабель-канатов, а также каротажных кабелей, что является ценным вкладом в строительную механику витых проволочных изделий. Результаты работы имеют практическое значение для повышения точности, надежности прочностных расчетов и на этой основе принесут экономический эффект.

Ключевые слова: канат, кабель, трение, деформация, прочность, жесткость.

A.V. Nepomnyashchii, I.M. Chayun. Assessing the components' friction when conductor-and-support cables deformed state. Elaborated is a technique taking into account the friction at strain-energy method applied to conductor-and-support cable system stiffness properties assessment serving to increase the accuracy of their distorted state mechanical model. For that purpose those components' specific deformation has been identified with respective elements, which represent experimental factors taking into account the friction, introduced into geometrical deformation equations. The suggested specific deformations' expressions include friction factors for the basic loading diagram of the conductor-and-support cables and the hoist cables that represents a valuable contribution to structural mechanics of the twisted wire products. This research results have significant practical value due to increased accuracy and reliability of the strength calculations therefore serving to a real economic effect.

Keywords: rope, cable, friction, deformation, strength, rigidity.

Рецензент д-р техн. наук, проф. Одес. нац. политехн. ун-та Дашенко А.Ф.

Поступила в редакцию 27 мая 2014 г.