

УДК 677.72.0012

Мамаев Л.М.¹, к.т.н.; Ракша С.В.², д.т.н.; Солод В.Ю.¹, к.т.н.

¹Дніпровський державний технічний університет

²Дніпропетровський національний університет залізничного транспорту імені академіка В.Лазаряна

К РАСЧЕТУ БРОНИРОВАННЫХ КАБЕЛЕЙ ПОВЫШЕННОЙ РАБОТОСПОСОБНОСТИ

Разработана теория расчета бронированных кабелей повышенной работоспособности и надежности в эксплуатации. Получены формулы, которые могут быть использованы при конструировании бронированных кабелей.

Розроблена теорія розрахунку броньованих кабелів з підвищеною працездатністю та надійністю в експлуатації. Одержані формули, які можуть бути використані при конструюванні броньованих кабелів.

Es wurde die Berechnungstheorie für gepanzerten Kabeln mit hochwertiger Qualität und Sicherheit im Betrieb entwickelt. Es gibt Formeln, die wir für das Erzeugen der gepanzerten Kabeln gebrauchen können.

Постановка проблемы. Существующий в настоящее время метод статического расчета канатов и кабелей по коэффициенту запаса прочности не учитывает всей сложности их конструкции и действительной картины возникающих в них напряжений. Неполноценность расчета канатов и кабелей по условному статическому коэффициенту прочности давно побудила инженерную мысль к разработке более совершенной теории. Такая теория необходима как для правильного выбора типа каната или кабеля, так и для дальнейшего совершенствования их конструкций.

Работа канатов и кабелей при температурных воздействиях требует специфического подхода к вопросам конструирования, расчета, эксплуатации. Особенно существенно влияние температуры на прочность и долговечность конструкции сказывается на биметаллических витых системах: антенные, витые провода высоковольтных линий электропередач, каротажные кабели и т.д.

При циклическом нагреве происходит снижение прочности кабеля и его срока службы. Актуальным остается также изучение напряженного состояния каната или кабеля, покрытого шланговой оболочкой при изгибе на огибающих роликах и барабанах.

Целью настоящей работы является исследование напряжений

© Мамаев Л.М., Ракша С.В., Солод В.Ю.

в конструкциях канатов и кабелей с учетом температурного фактора, вопросы рационального конструирования.

Бронированные каротажные кабели работают на растяжение свободно подвешенным грузом. Особенность работы подобных кабелей заключается в том, что под действием механической нагрузки и изменения температуры они испытывают кручение. В результате значительно возрастает их конструктивное удлинение, происходит резкое перераспределение нагрузки между отдельными элементами кабеля. Величина нагрузки на винтовой элемент при этом полностью зависит от геометрического положения его в поперечном сечении кабеля. Особенно перенапряженными оказываются токоведущие жилы, расположенные в центре кабеля. Поэтому узловым вопросом с точки зрения механической прочности и надежности в работе бронированного кабеля является обеспечение нераскручиваемости его под действием растягивающего усилия и изменения температуры.

При свободной подвеске груза деформации кабеля определяются по формулам [2]:

$$\left. \begin{aligned} \varepsilon = \varepsilon_1 + \varepsilon_2^t &= \frac{B}{\Delta} T + \frac{B\lambda - C\gamma}{\Delta} t(x); \\ \theta = \theta_1 + \theta_1^t &= -\frac{C}{\Delta} T + \frac{A\gamma - C\lambda}{\Delta} t(x), \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

где ε, θ – продольная и поперечная деформации кабеля; $\varepsilon_1, \varepsilon_2^t$ – продольные деформации от механической и температурной нагрузок; θ_1, θ_1^t – поперечные деформации от механической и температурной нагрузок; A, B, C – агрегатные коэффициенты механической жесткости; λ, γ – агрегатные коэффициенты температурной жесткости; T – осевое усилие; $t(x)$ – температура нагрева каната;

$$\Delta = AB - C^2.$$

Очевидно, что кабель будет свободным от кручения, если выполняется условие

$$C = 0; \quad \gamma = 0. \quad (2)$$

В этом случае $\theta = 0$ и кабель испытывает минимальное удлинение, равное удлинению при чистом растяжении.

Расчеты показывают, что при определении коэффициентов C и γ с достаточной степенью точности можно пользоваться только первыми слагаемыми, зависящими от продольной жесткости кабеля [2]:

$$\left. \begin{aligned} C &= \sum E_i F_i \cos^2 \alpha_i \sin \alpha_i; \\ \gamma &= \sum E_i F_i r_i (v_i - \xi_i \sin^2 \alpha_i) \sin^2 \alpha_i, \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

где $E_i F_i$ – жесткость проволоки при растяжении; r_i – радиус свивки проволоки; α_i – угол свивки проволоки; V_i – коэффициент линейного расширения материала проволоки; ξ_i – коэффициент, который характеризует изменение радиуса свивки проволоки при нагреве.

В этих уравнениях синус угла свивки входит в нечетной степени, поэтому изменяя направление повивов элементов кабеля и варьируя параметрами свивки токоведущих жил и проволок брони (радиусы свивки, углы свивки и модули упругости), можно получить значение коэффициентов C и γ необходимого знака и в итоге прийти к равенствам

$$C = \sum C_i = 0; \quad \gamma = \sum \gamma_i = 0. \quad (4)$$

Параметры токоведущих жил и диаметр сердечника кабеля, как правило, предопределяются условиями эксплуатации, характером исследования, требованиями электрических, теплофизических, механических свойств и т.д. Поэтому при построении уравновешенной некрутящейся конструкции бронированного кабеля можно считать параметры токоведущих жил и диаметр сердечника заведомо известными величинами. Поверх сердечника накладывается внутренний слой брони с параметрами: r_i , α_i , δ_i , n_i . Тогда внутренняя часть кабеля, включая токоведущие жилы и первый слой брони, имеет значение коэффициентов C_B и γ_B . Неизвестными величинами являются параметры внешнего слоя брони r_2 , α_2 , δ_2 , n_2 , а также значения коэффициентов C_n и γ_i для наружного слоя брони. Для нахождения этих величин используем условие уравновешенности кабеля:

$$C_B = C_i; \quad \gamma_B = \gamma_i. \quad (5)$$

Принимая во внимание, что площадь сечения проволоки $F = \frac{\pi \delta^2}{4}$, условие уравновешенности кабеля можно записать в виде:

$$n_2 \delta_2^2 r_2 \sin \alpha_2 \cos^2 \alpha_2 = \frac{4C_B}{\pi E}; \quad (6)$$

$$n_2 \delta_2^2 r_2 (V_2 - \xi_2 \sin^2 \alpha_2) = \frac{4\gamma_B}{\pi E}. \quad (7)$$

Полученные уравнения содержат четыре неизвестных. Дополнительные условия дают геометрические уравнения, учитывающие плотность укладки проволок в слое в процессе свивки:

$$\frac{n_2 \delta_2}{\cos \alpha_2} = 2\pi r_2; \quad r_2 = r'_B + \frac{\delta_2}{2}, \quad (8)$$

где r'_B – внешний радиус внутреннего слоя брони.

Совместное решение уравнений (6...8) позволяет определить искомые параметры элементов бронированного кабеля, которые обеспечивают полную его уравновешенность от кручения под действием растягивающей нагрузки и изменения температуры.

Для примера определим параметры внешнего слоя брони стандартного термостойкого бронированного кабеля КОБДФ-6, которые обеспечили бы его полную уравновешенность от кручения.

Данные к расчету: кабель имеет одну токоведущую медную жилу конструкции 1+6; диаметр проволоки $\delta_{жс} = 0,35$ мм; угол свивки $\alpha_{жс} = 19^\circ$, средний радиус свивки $r_{жс} = 0,35$ мм, радиус сердечника $r_c = 2,125$ мм; материал изоляции – фторопласт – 40 Ш. Внутренний слой брони содержит 14 стальных проволок; диаметр проволок $\delta_1 = 1,1$ мм; угол свивки $\alpha_1 = 22^\circ 50'$; средний радиус свивки $r_1 = 2,675$ мм. Модули упругости: для стали $E_{ст} = 2,1 \cdot 10^5$ МПа; для меди $E_m = 1,3 \cdot 10^5$ МПа. Коэффициенты температурного линейного расширения для стали $\nu_{ст} = 12 \cdot 10^{-6}$ 1/град; для меди $\nu_m = 17 \cdot 10^{-6}$ 1/град; для фторопласта $\nu_\phi = 90 \cdot 10^{-6}$ 1/град.

Значение коэффициентов C_B и γ_B для внутренней составляющей кабеля, включая первый повив брони:

$$C_B = 21,8 \cdot 10^2 \text{ Нм}; \quad \gamma_B = 98,5 \cdot 10^{-4} \text{ Нм/}^\circ\text{С}.$$

В результате получены следующие параметры внешнего слоя брони, обеспечивающие уравновешенность кабеля от кручения: $r_2 = 3,83$ мм; $\alpha_2 = 39^\circ$; $\delta_2 = 0,6$ мм; $n_2 = 28$.

Из расчета видно, что выполнение условия уравновешенности бронированного кабеля приводит к тому, что проволоки в наружном слое брони получаются тоньше, чем во внутреннем слое.

Однако, применение бронированных кабелей, имеющих утоненные стальные проволоки в наружном слое брони, вполне оправдывается только в тех случаях, когда кабель не подвержен поверхностному истиранию.

Применение подобных кабелей, например, в качестве каротажных для разведки буровых скважин оказывается нецелесообразным, так как такой кабель в процессе эксплуатации испытывает большой абразивный износ вследствие трения о стенки скважины. При этом утоненные проволоки внешнего слоя быстро истираются, рвутся и кабель преждевременно выходит из строя. Поэтому в бронированных кабелях, предназначенных для работы в условиях абразивного износа, игнорируя частично его

уравновешенностью от кручения, идут на применение утолщенных проволок. Это увеличивает износостойкость кабеля, но приводит к некоторому раскручиванию его под нагрузкой и перенапряжению токоведущих жил.

В связи с этим необходимо произвести оценку степени неуравновешенности конструкции кабеля и определить допускаемые пределы, в которых не происходит существенных изменений его силовых характеристик. Введем для этого понятие относительной неуравновешенности конструкции кабеля от действия механической нагрузки ψ_C и изменения температуры ψ_γ :

$$\psi_C = \frac{\Delta C}{C_m}, \quad \psi_\gamma = \frac{\Delta \gamma}{\gamma_m}, \quad (9)$$

где ΔC и $\Delta \gamma$ – неуравновешенная часть крутящего момента соответственно от механической нагрузки и изменения температуры; C_m и γ_m – максимально возможное значение этих коэффициентов в пределах данной конструкции.

В каждом конкретном случае пределы ψ_C и ψ_γ могут быть различными, зависящими от величины механической нагрузки, интервала температур, а также структурной неоднородности кабеля. Анализ бронированных кабелей в соответствии с условиями (9) позволяет выбрать пределы, в которых определенная степень неуравновешенности от кручения не приводит к значительному перераспределению напряжений в их элементах.

В конструировании бронированных кабелей представляет интерес такое построение токоведущих элементов жилы, при котором они не испытывают осевых деформаций удлинения под нагрузкой. Для получения жил, устойчивых к деформациям кабеля под нагрузкой, необходимо, чтобы максимально возможная упругая деформация брони не вызывала остаточных деформаций в токоведущих элементах жилы.

Относительное удлинение элементов кабеля (токоведущих жил, проволок брони) при растяжении определяется по формуле [3]

$$\varepsilon_S = \varepsilon (\cos^2 \alpha \pm \sin \alpha \cos \alpha). \quad (10)$$

Знак плюс в этой формуле выбирается в том случае, когда слой жилы закручивается, знак минус, когда слой жилы раскручивается. Если кабель сделать крутящимся под действием свободно подвешенного груза, то соответствующим выбором направления свивки токоведущих жил можно заставить их также раскручиваться. Путем соответствующего подбора величин членов, входящих в формулу (10), можно достичь такого положения, когда ε_S становится равным нулю и жила не получает осевой деформации. Это приводит к

следующему уравнению для выбора основных параметров свивки токоведущих жил

$$r_{\text{ж}} \operatorname{tg} \alpha_{\text{ж}} = \frac{\varepsilon}{\theta}. \quad (11)$$

Отношение агрегатных деформаций кабеля $\frac{\varepsilon}{\theta}$ определяется в основном конструкцией брони и будет для данного кабеля величиной постоянной, очень слабо зависящей от нагрузки. Поэтому условие нерастяжимости токоведущих жил ($\varepsilon_s = 0$) практически будет сохраняться во всем диапазоне рабочих нагрузок. При более точных расчетах, если отношение $\frac{\varepsilon}{\theta}$ в силу возможной нелинейности деформаций будет изменяться с изменением нагрузки, величину отношения $\frac{\varepsilon}{\theta}$ и зависящие от этого параметры токоведущих жил подбирают для наиболее вероятных величин нагрузок.

Формула (11) имеет смысл при конструировании кабелей не только со спиральной двухслойной броней, но и для кабелей, свитых из бронированных токоведущих жил. При свободной подвеске груза отношение агрегатных деформаций можно представить в виде

$$\frac{\varepsilon}{\theta} = -\frac{B}{C} = \text{const}. \quad (12)$$

Проверим, насколько удовлетворяется условие (11) для токоведущих жил кабеля КОБДФ-6 из предыдущего примера. Отношение агрегатных коэффициентов $\frac{B}{C}$ для данного кабеля равно 3,46.

Учитывая, что

$$\operatorname{tg} \alpha_{\text{ж}} = \frac{2\pi r_{\text{ж}}}{h},$$

получим уравнение для выбора параметров токоведущих жил кабеля в виде

$$r_{\text{ж}}^2 = 0,55h.$$

Для центральной медной проволоки жилы условие нерастяжимости явно не выполняется. При заданном радиусе свивки слоя жилы, навитого на центральную проволоку, выполнение условия нерастяжимости достигается при $h = 0,22$ мм. Однако, это практически не осуществимо ввиду малых шагов свивки проволок жилы ($h < \delta_{\text{ж}}$).

При заданных параметрах брони кабеля условие (11) можно выполнить за счет увеличения радиуса жилы. Но это в свою очередь приводит к изменению толщины изоляционной оболочки, что необходимо увязывать с требованиями электрических и теплофизических характеристик кабеля.

Экспериментальная проверка влияния температуры на деформации кабеля осуществлялась путем нагрева образцов бронированного кабеля КОБДФ-1 длиной один метр в специальной электронагревательной установке при одновременном его растяжении свободно подвешенным грузом весом 590 Н. Температура нагрева образцов кабеля в процессе испытания поддерживалась постоянной по длине и изменялась в интервале 20 – 140°C, что не приводило к структурным превращениям материала изоляционной оболочки.

По данным опытов и расчета по приведенным формулам построены графики зависимости удлинения U и кручения кабеля V от температуры нагрева (рис.). Сплошной линией обозначены данные опыта, пунктирной – расчетные данные. При температуре нагрева близкой 100°C наблюдается полное совпадение температурных деформаций, полученных расчетным и экспериментальным путем. Дальнейший нагрев сопровождается постепенным ростом температурных деформаций по сравнению с расчетными зависимостями. Это явление можно объяснить влиянием температуры нагрева на физические характеристики материала проволок (E ; ν), что не учтено в расчете.

Агрегатные коэффициенты механической жесткости A , B и C проведены в работах М.Ф.Глушко [1].

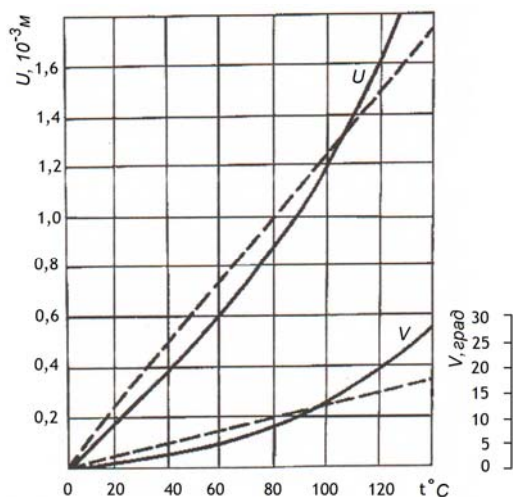


Рис. Графики зависимости удлинения и кручения кабеля от температуры нагрева

Проведенные опыты по изменению температурных деформаций кабеля и удовлетворительное совпадение полученных результатов с расчетом является убедительной проверкой агрегатных коэффициентов температурной жесткости λ и γ , а также подтверждением математической модели.

Выводы. Полученные теоретические зависимости имеют важное значение для практики конструирования бронированных кабелей, поскольку дают возможность значительно улучшить работу всех их элементов и, следовательно, повысить стабильность и надежность кабеля и процессе эксплуатации.

ЛИТЕРАТУРА

1. Глушко М.Ф. Стальные подъемные канаты, Киев, "Техніка", 1966.
2. 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, С. 157 – 161.
3. Мамаев Л.М. Расчет кабель-канатов с учетом температурного воздействия, Сб. "Стальные канаты", № 6, Київ, "Техніка", 1969, С. 49 – 58.
4. Мамаев Л.М., Михайлусь А.С., Самойленко Д.С. Геометрические уравнения деформации каната с учетом температурного фактора, Сб. научных трудов Керченского морского технологического университета, № 6, Керчь, 2006, С. 33 – 34.
5. Мамаев Л.М., Шитиков Д.А., Самойленко Д.С. Исследование напряжений в кабель-канатах и тросах с учетом зависимости физических констант материала проволок от температуры нагрева, "Математичне моделювання", Науковий журнал. № 14, Дніпродзержинськ, 2005, С. 30 – 32.