

МАТЕМАТИЧНІ МОДЕЛІ ТА АЛГОРИТМИ



К расчету уравновешенных бронированных кабелей

МАМАЕВ Л.М.

Днепродзержинский государственный технический университет

Рассмотрен расчет и конструирование уравновешенных бронированных кабелей.

Розглянуто розрахунок і конструювання урівняних броньованих кабелів.

Calculation of and designing of the counterbalanced reserved cables is considered.

Введение. В решении проблемы создания термостойких бронированных кабелей немаловажную роль играет получение конструкций уравновешенных от кручения под действие растяжения от механических нагрузок и изменения температуры.

Бронированные кабели, состоящие из изолированных токоведущих жил и двойной или многослойной стальной проволоочной брони скрутки повивов, применяются для передачи электрических сигналов и одновременно выполняют функции грузонесущего органа.

Многие бронированные кабели, например, каротажные для осуществления комплекса промыслово-геодезических работ в нефтяных и газовых скважинах, морские глубоководные кабели связи и другие эксплуатируются в условиях значительных растягивающих нагрузок и температурного воздействия.

В ряде случаев бронированные кабели могут работать при температуре 250-400⁰C [1]. Элементы бронированных кабелей (токоведущие жилы, проволоки брони) в отличие от стальных канатов состоят из материалов с различными механическими свойствами и разными коэффициентами температурного расширения.

Постановка задачи. Бронированные каротажные кабели, предназначенные для геофизической разведки глубоких буровых скважин, например, работают на растяжении свободно подвешенным грузом. Кабель может свободно раскручиваться под действием груза. Раскручивание кабеля приводит к разгрузке одних и перегрузке других проволок. Особенно перенапряженными оказываются токоведущие жилы, располагаемые в центре кабеля. Во избежание раскручивания такого кабеля его изготавливают уравновешенным путем применения брони из двух слоев проволок, свитых в разные стороны. Имеются специальные методы расчета такой брони. Однако, как показывают исследования, раскручивание кабеля наблюдается не только под действием механической нагрузки, но и под действием изменений температуры, т.е. под действием температурных напряжений.

Процесс свивки элементов бронированного кабеля, как и стальных канатов, представляет изгиб проволок по винтовым линиям, сопровождающийся кручением. Поэтому в геометрическом отношении бронированные кабели эквиваленты стальным канатам.

Решение задачи. Построение уравновешенных конструкций стальных канатов в настоящее время производят по известной формуле, определяющей крутящий момент в канате [2]

$$M = C\varepsilon,$$

где ε - относительное удлинение каната или кабеля.

Коэффициент жесткости

$$C = \sum E_i F_i r_i \cos^2 \alpha_i \sin \alpha_i,$$

где E_i - модуль нормальной упругости элементов каната; F_i - площадь поперечного сечения проволоки; r_i, α_i - радиус и угол свивки проволоки.

Уравновешенность конструкции стального каната или кабеля достигается такими конструктивными мероприятиями, при которых коэффициент C получается равным нулю.

Стальной канат состоит из однородных проволок, поэтому изменение температуры не вызывает его кручения.

В отличие от стальных канатов элементы бронированных кабелей (токоведущие жилы, проволоки брони) состоят из материалов с различными механическими свойствами и разными коэффициентами температурного линейного расширения. Поэтому под действием растягивающего усилия и изменения температуры в винтовых элементах бронированного кабеля возникают крутящие моменты относительно оси кабеля, которые вызывают его раскручивание.

Это приводит к неравномерному распределению напряжений между элементами кабеля, снижению его прочности и появлению ряда дефектов, обусловленных несоответствием упругих свойств токоведущих жил и кабеля в целом.

Конструкции бронированных кабелей, уравновешенных от кручения под действием только механической нагрузки, известны [3]. В данном случае нераскручиваемость кабеля под нагрузкой достигается подбором диаметров проволок (или прядей) и шагов свивки в отдельных слоях брони таким образом, чтобы результирующий крутящий момент, возникающий в кабеле, был равен нулю.

М.Ф. Глушко и Э.А. Шахназарян предложили производить построение уравновешенных от кручения бронированных кабелей по аналогии с построением уравновешенных конструкций стальных проволочных канатов [4] Диаметры проволок брони выбираются по формуле:

$$d_2 = d_1 \frac{d + 2d_1}{d},$$

где d_1 - диаметр проволоки внутреннего повива брони; d_2 - диаметр проволоки внешнего повива брони; d - диаметр кабеля под броней.

Для предотвращения от раскручивания бронированных кабелей, в частности морских кабелей связи, Фердинанд Гафф, Георг Вернер и Эрик Лорк рекомендуют покрывать верхний слой джутовой обмоткой [5].

Гейнц Хорч с целью ликвидации крутящего момента в глубоководных бронированных кабелях предлагает проволоки внутреннего слоя брони подкручивать в процессе свивки с большим обратным кручением, а проволоки наружного слоя с меньшим обратным кручением [6] Однако, все существующие конструкции бронированных кабелей имеют тот недостаток, что они не учитывают совместного действия растяжения от механической нагрузки и изменения температуры, что не позволяет полностью ликвидировать крутящий момент, возникающий в бронированном кабеле при эксплуатации. Проведенные исследования показали, что витые конструкции, состоящие из проволок разного материала, например, биметаллические троса высоковольтных линий электропередач, при изменении температуры испытывают кручение, что снижает их прочность [7]

Отличительной особенностью уравновешенного бронированного кабеля заключается в том, что параметры токоведущих жил и проволок брони (радиусы свивки, углы свивки и модули упругости) выбираются таким образом, что крутящий момент в поперечном сечении кабеля под действием растягивающей нагрузки и изменения температуры взаимно уравновешивается между элементами кабеля и не приводит к его кручению. В таком бронированном кабеле достигается равномерное распределение напряжений между его элементами, повышается эксплуатационная надежность и долговечность. Согласно наших исследований крутящий момент в кабеле под действием удлинения ε и изменения температуры выражается так

$$M = C\varepsilon + \gamma \Delta t,$$

где C - прежний коэффициент; Δt - приращение температуры.

$$\gamma = \sum E_i F_i r_i (v_i - \varphi_i \sin^2 \alpha_i) \cos \alpha_i,$$

где v_i - коэффициент температурного линейного расширения материала проволок; φ_i - коэффициент температурного изменения радиуса свивки слоя проволок.

Полная уравновешенность от кручения бронированного кабеля под действием растягивающей нагрузки и изменения температуры достигается выполнением условия

$$C = 0; \quad \gamma = 0$$

путем соответствующего подбора параметров свивки токоведущих жил и проволок брони (радиусов свивки, углов свивки и модулей упругости).

Величины C и γ содержат синус угла свивки в нечетной степени, поэтому, изменяя направления повивов элементов кабеля и варьируя параметрами свивки токоведущих жил и проволок брони, можно практически получить значения коэффициентов C и γ необходимого знака в рассматриваемом слое и в итоге придти к равенствам

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

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 известными величинами. Поверх сердечника накладывается внутренний слой брони с параметрами: средний радиус свивки r_1 , угол свивки α_1 , диаметр проволоки δ_1 , количество проволок в слое n_1 .

Тогда внутренняя часть кабеля, включая токоведущие жилы и первый повив брони, имеет значение коэффициентов C_e и γ_e .

Неизвестными величинами являются параметры внешнего повива проволок брони: средний радиус свивки r_2 , угол свивки α_2 , диаметр проволок δ_2 , количество проволок в слое n_2 , а также значения коэффициентов C_n и γ_n для наружного повива брони.

Для нахождения этих величин необходимо использовать условия уравновешенности кабеля

$$C_e = C_n; \quad \gamma_e = \gamma_n$$

и геометрические уравнения, учитывающие плотность свивки проволок в повивах брони

$$\frac{n_2 \delta_2}{\cos \alpha_2} = 2\pi r_2; \quad r_2 = r_a^1 + \frac{\delta_2}{2},$$

где r_2' - внешний радиус внутреннего слоя брони.

Решение уравнений позволяет получить такие параметры элементов бронированного кабеля, которые обеспечивают полную его уравновешенность от кручения под действием растягивающей нагрузки и изменения температуры.

Рассмотрим на примере методику расчета бронированных кабелей, уравновешенных от кручения.

Пусть, например, кабель имеет одну токоведущую медную жилу, состоящую из центральной проволоки и шести скрученных вокруг неё проволок диаметром 0,35 мм, с углом скрутки 19^0 и средним радиусом 0,35 мм. Диаметр сердечника равен 4,25 мм. Внутренний слой брони содержит 14 стальных проволок диаметром 1,1 мм, скрученных вокруг сердечника с углом скрутки $22^0 50'$ и средним радиусом 2,675 мм.

Принимаются модули упругости:

$$\text{для стали } E_{cm} = 2 \cdot 10^4 \frac{\text{кг}}{\text{мм}^2};$$

$$\text{для меди } E_m = 1,3 \cdot 10^4 \frac{\text{кг}}{\text{мм}}.$$

Коэффициенты температурного линейного расширения:

$$\text{для стали } v_{cm} = 12 \cdot 10^{-6} \frac{1}{\text{град}};$$

для меди $\nu_m = 17 \cdot 10^{-6} \frac{1}{град}$.

В результате расчета получены значения коэффициентов C_θ и γ_θ для внутренней части кабеля включая первый повив брони:

$$C_\theta = 22,2 \cdot 10^4 \text{ кг} \cdot \text{мм};$$

$$\gamma_\theta = -100,7 \cdot 10^{-2} \frac{\text{кг} \cdot \text{мм}}{^\circ \text{C}}.$$

Для нахождения искомым параметров внешнего повива брони (радиуса свивки, угла свивки, диаметра проволок и количества проволок) необходимо решить систему из четырех уравнений. В результате получены следующие параметры внешнего повива брони, обеспечивающие уравновешенность от кручения бронированного кабеля под действием растяжения от механической нагрузки и изменения температуры: средний радиус свивки 3,53 мм; угол свивки 39 °; диаметр проволок 0,61 мм; количество проволок 28, 285.

Количество проволок в повиве должно быть целым числом, поэтому округляем количество проволок во внешнем повиве брони до 28, обеспечивая таким образом технологические зазоры между проволоками. Приведенной методике расчета следует придерживаться при конструировании типовых бронированных кабелей, работающих в условиях растягивающих нагрузок и изменения температуры.

Выводы

1. Структурная неоднородность бронированных кабелей является причиной возникновения в его винтовых элементах при изменении температуры крутящих моментов, которые наряду с эффектом от действия растягивающего усилия, приводит к кручению кабеля, снижая его прочность.

2. При раскручивании несоответствие упругих свойств токоведущих жил и кабеля в целом может привести к возникновению ряда дефектов, например, появлению местных деформаций токоведущих жил с последующими изломами и разрушениями, что снижает долговечность кабеля.
3. Недостатком всех существующих конструкций бронированных кабелей заключается в том, что они не учитывают совместного действия растяжения от механической нагрузки и изменения температуры, что не позволяет полностью ликвидировать крутящий момент, возникающий в бронированном кабеле в процессе эксплуатации.
4. В бронированном кабеле новой конструкции путем математического расчета параметры токоведущей жилы и проволок брони (радиусы свивки, углы свивки и модули упругости) подобраны таким образом, что крутящие моменты в поперечном сечении кабеля под действием растягивающего усилия и изменения температуры взаимно уравновешиваются.

ЛИТЕРАТУРА

1. Горбенко Л.А., Каротажные кабели и их эксплуатация. Москва, 1967.
2. Глушко М.Ф. Стальные подъемные канаты, Киев, 1966.
3. Патент США, № 2, 604, 509 по классу 174.108
4. Глушко М.Ф., Шахназарян Э.Д. Механический расчет каротажных кабелей с учетом поперечной податливости изоляции. Сб. «Прикладная геофизика, вып. 39, Москва, 1964 .
5. Патент ФРГ № 912464 по классу 21 с, 750.
6. Патент ФРГ № 849436 по классу 21 с, 750.
7. Глушко М.Ф., Волоконский В.Ф., Мамаев Л.М. Расчет канатов и биметаллических тросов линии электропередач с учетом температурного воздействия. Сб. «Стальные канаты», вып. 5, Киев, 1968 .

пост. 30.12.2009