

К. т. н. О. В. БОНДАРЕНКО, к. т. н. Д. В. ИОРГАЧЕВ,  
Л. Л. МУРАДЬЯН

Украина, г. Одесса, ОАО «Одескабель»

По материалам доклада на МНПК  
«Современные информационные и  
электронные технологии»  
(«СИЭТ-2000»). –  
23–26 мая 2000 г., Одесса

## ВЫБОР КОНСТРУКЦИИ САМОНЕСУЩЕГО ОПТИЧЕСКОГО КАБЕЛЯ ПО РАСТЯГИВАЮЩИМ НАГРУЗКАМ

*Изложена инженерная методика выбора конструкции подвешенного оптического кабеля по величине растягивающих усилий кабеля и оптического волокна.*

Выбор конструкции самонесущих оптических кабелей (СОК) влияет на прочность и надежность воздушной линии связи. При расчете конструкции таких кабелей должна быть обеспечена стабильность оптических параметров в течение всего срока эксплуатации в заданном диапазоне климатических зон и механических нагрузок.

В задачу расчета конструкции самонесущих оптических кабелей входит обеспечение заданных механических напряжений в компонентах кабеля при обеспечении предельно допустимой растягивающей нагрузки на оптическое волокно. В результате расчета определяются наиболее выгодные конструктивные решения, при которых необходимые оптические параметры и механическая прочность СОК обеспечиваются при наименьшей материалоемкости кабеля.

Приведенные в данной статье особенности методики расчета механической прочности и конструкции СОК демонстрируются на кабеле со свободной укладкой оптического волокна (ОВ) в трубке оптического модуля (рис. 1). При этом принимаются следующие допущения:

- подвеска проводов на опорах выполняется на одной высоте;
- ползучесть арамидных нитей и деформация других несущих элементов кабеля незначительны;
- конструкция кабеля состоит из двух однородных слоев с положительным и отрицательным значениями температурного коэффициента линейного расширения.

Алгоритм расчета конструкции СОК представлен на рис. 2.

В процессе эксплуатации нагрузка на СОК зависит, в первую очередь, от метеорологических условий, в которых работает линия. За расчетные климатические условия принимаются такие, при которых создаются наиболее неблагоприятные, но возможные для данного района сочетания нагрузок на СОК, подвешенный на опорах воздушной линии.

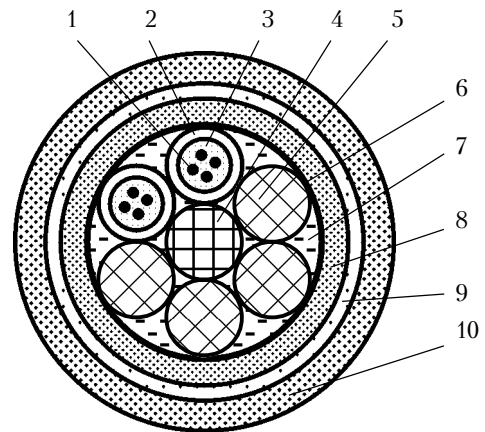


Рис. 1. Конструкция самонесущего оптического кабеля  
1 – оптическое волокно; 2 – трубка оптического модуля;  
3 – тиксотропный гидрофобный наполнитель; 4 – центральный силовой элемент (ЦСЭ); 5 – заполняющий элемент; 6 – скрепляющая обмотка; 7 – гидрофобный наполнитель; 8 – промежуточная оболочка; 9 – арамидные нити; 10 – защитный шланг

Как известно, механическая нагрузка на СОК создается его собственным весом, весом осевших на него осадков в виде гололеда или изморози, а также давлением ветра на кабель. Поэтому расчет СОК на механическую нагрузку, которая определяется собственным весом кабеля, стрелой провеса, длиной пролета воздушной линии, ветровой и гололедной нагрузкой, проводят, как уже отмечалось, исходя из предельно допустимой нагрузки на волокно. Кратковременная максимально допустимая нагрузка на СОК, согласно [1, с. 220, 222], может повторяться с периодом один раз в 5, 10 или 15 лет в зависимости от условий подвески СОК. Время воздействия этой нагрузки на СОК достигает от одних до нескольких суток.

Таким образом, кабель под воздействием всех динамических и статических нагрузок в процессе всего срока эксплуатации не должен удлиняться более чем на величину

$$\epsilon_{\text{МК}} = \epsilon_{\text{К}} + \epsilon_{\text{ДОВ}}, \quad (1)$$

где  $\epsilon_{\text{МК}}$  – максимально допустимое удлинение СОК;  
 $\epsilon_{\text{К}}$  – допустимое удлинение СОК, при котором ОВ не подвергается механическому напряжению;  
 $\epsilon_{\text{ДОВ}}$  – допустимое удлинение ОВ.



Рис. 2. Алгоритм расчета конструкции СОК

Известно, что ОВ в полый оболочке могут свободно перемещаться внутри трубки оптического модуля (ОМ). В ненагруженном состоянии они располагаются в центре ОМ, и их зазор  $\Delta R$  (по отношению к защитной оболочке) определяется с учетом внутреннего диаметра  $d_i$  трубки ОМ и наружного диаметра  $d_f$  световода (рис. 3). В случае многосветоводного модуля за наружный диаметр  $d_f$  следует принять диаметр воображаемой окружности, охватывающей световоды как можно плотнее.

Согласно [2, с. 114], относительное изменение длины  $\Delta L/L$  волоконно-оптического кабеля, т. е. допустимое удлинение  $\epsilon_k$  или сжатие  $\epsilon_{тк}$  кабеля (сжатие, обусловленное температурой) с повивной скруткой радиусом  $R$  и шагом  $S$ , равно

$$\epsilon = -1 + \sqrt{1 + \frac{4\pi^2 R^2}{S^2} \left( 2 \frac{\Delta R}{R} + \frac{\Delta R^2}{R} \right)}, \quad (2)$$

где знак «плюс» в выражении в скобках используется для случая сжатия кабеля  $\epsilon_{тк}$ , а для случая удлинения кабеля  $\epsilon_k$  – знак «минус».

Это уравнение может привести к выводу, что уменьшение шага скрутки  $S$  вызовет существенное увеличение допустимого удлинения или сжатия ка-

беля. Но при этом необходимо учитывать допустимый радиус кривизны световода, который различен для одно- и многомодовых ОВ.

Для обеспечения прочности и заданных характеристик затухания волоконного световода очень важно, чтобы он не был скручен чрезмерно. Мерой оптимума является минимальный допустимый радиус кривизны  $\rho$ . Этот радиус представляет собой радиус винтообразной линии за счет спиральной скрутки свиваемых элементов СОК –

$$\rho = R \left\{ 1 + \left( \frac{S}{2\pi R} \right)^2 \right\} \quad (3)$$

и для стандартного волоконного световода обычно равен 65 мм.

Если заданы радиусы кривизны  $\rho$  и радиус скрутки  $R$ , то шаг скрутки равен

$$S = 2\pi R \sqrt{\frac{\rho}{R} - 1}. \quad (4)$$

Таким образом, по выражению (2) можно с достаточной для практики точностью определить  $\epsilon_k$ .

Выбрав максимально допустимую нагрузку (МДН) на ОВ, т. е. максимально допустимое удлинение (МДУ) волокна, разработчик проводит расчет кабеля на допустимую нагрузку, которая ограничивается максимально допустимым удлинением кабеля. Правильный выбор МДН на ОВ позволяет обеспечить как оптическое затухание, так и его целостность в течение всего срока службы кабеля.

В [3] принято допущение, что при экстремальных нагрузках на СОК значение  $\epsilon_{д.ов}$  может приниматься равным до 30% от удлинения ОВ при отбраковочном тесте на растяжение.

По данным рекламных материалов фирмы «Corning», непрерывная максимально допустимая нагрузка на ОВ в течение 40 лет вызывает удлинение волокна до 0,2%, при котором отсутствует приращение коэффициента затухания ОВ.

По данным рекламных материалов фирмы «Corning», непрерывная максимально допустимая нагрузка на ОВ в течение 40 лет вызывает удлинение волокна до 0,2%, при котором отсутствует приращение коэффициента затухания ОВ.

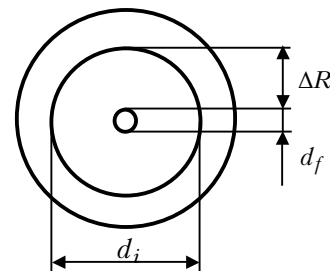


Рис. 3. Оптическое волокно в полый оболочке

Выберем кратковременную максимально допустимую растягивающую нагрузку на СОК  $\epsilon_{\text{МК}}$  исходя из вычисленного значения  $\epsilon_{\text{К}}$  по заданной первоначальной модели кабеля и принятого значения  $\epsilon_{\text{ДОВ}}$ , равного 0,2%. Принятое значение  $\epsilon_{\text{ДОВ}}$  позволит обеспечить срок службы кабеля с достаточным запасом длительной прочности ОВ.

Расчет механической прочности СОК ведется методом последовательных приближений. По предварительно заданной модели конструкции кабеля определяются растягивающее усилие и удлинение, а затем корректируются модель и размеры элементов конструкции (тип стеклопластикового стержня, число и тип арамидных нитей и т. д.).

За выбранную модель СОК принимается конструкция, при которой расчетное удлинение кабеля ( $\epsilon_{\text{РК}}$ ) (при соответствующем ему растягивающем усилии  $F_{\text{РК}}$ ) будет равно максимально допустимому удлинению  $\epsilon_{\text{МК}}$ , т. е.  $\epsilon_{\text{РК}} = \epsilon_{\text{МК}}$ .

Расчетные значения  $\epsilon_{\text{РК}}$  и  $F_{\text{РК}}$  принятой модели СОК могут быть определены из выражений вида

$$\epsilon_{\text{РК}} = \sigma_{\text{МФ}} / E_{\text{Ф}}; \quad (5)$$

$$F_{\text{РК}} = \sigma_{\text{МФ}} S, \quad (6)$$

где  $\sigma_{\text{МФ}}$  – максимально допустимое условное, фиктивное напряжение в СОК;

$S$  – площадь поперечного сечения несущих элементов СОК;

$E_{\text{Ф}}$  – фиктивный модуль упругости СОК, равный

$$E_{\text{Ф}} = \left[ \sum_{i=1}^m S_i E_i \right] / \sum_{i=1}^m S_i \quad (7)$$

В выражении  $E_{\text{Ф}}$  составляющие  $E_i$  и  $S_i$  – соответственно модуль Юнга и площадь поперечного сечения  $i$ -го несущего элемента СОК.

Особенности расчета СОК обуславливаются, в первую очередь, наличием в кабеле элементов из различных материалов с различными значениями температурного коэффициента линейного расширения (ТКЛР). ТКЛР несущих элементов СОК, кроме периферийных силовых элементов в виде арамидных нитей, свиваемых вокруг модулей кабеля, имеет положительные значения. ТКЛР арамидных нитей имеет отрицательное значение. Следовательно, при изменении температуры удлинение СОК не равно удлинению составляющих его элементов, и по этой причине в элементах возникают разные напряжения.

Обозначим ТКЛР кабеля через  $\alpha_0$ . Этот коэффициент будет определяться из условия равновесия, при котором усилия во всех арамидных нитях практически будут компенсироваться усилиями в остальных несущих элементах СОК.

При этом, следуя [4, с. 105; 5, с. 433],  $\alpha_0$  можно представить в виде

$$\alpha_0 = \frac{\alpha_a E_a S_a + \sum_{i=1}^{m-1} \alpha_i E_i S_i}{E_a S_a + \sum_{i=1}^{m-1} E_i S_i}, \quad (8)$$

где  $\alpha_a$  и  $\alpha_i$  – ТКЛР арамидных нитей и остальных несущих  $i$ -х элементов СОК, соответственно;  $E_a, S_a, E_i, S_i$  – модуль Юнга и площадь поперечного сечения арамидных нитей (слоя нитей) и остальных несущих  $i$ -х элементов СОК, соответственно.

Исходя из выражения (8) положим, что условно СОК состоит из двух составных частей. ТКЛР первой части имеет отрицательное значение, а ТКЛР многоэлементной второй – положительное. Тогда напряжение в двух составных частях СОК различно и распределяется пропорционально модулям упругости соответствующих материалов. Поэтому для упрощения расчета будем пользоваться фиктивным напряжением, отнесенным ко всему кабелю.

Допустимое фиктивное напряжение СОК по допусковому напряжению первой части может быть записано как

$$\sigma_{\text{Ф}} = \left\{ \sigma_1 (\alpha_1 - \alpha_0) \Delta t E_1 \right\} \frac{E_{\text{Ф}}}{E_1}, \quad (9)$$

где  $\sigma_1$  – напряжение армирующих нитей при комнатной температуре;

$\alpha_1$  – ТКЛР армирующих нитей при комнатной температуре;

$\Delta t$  – перепад температуры, °С;

$E_1$  – модуль Юнга армирующих нитей при комнатной температуре;

$E_{\text{Ф}} - 1/\beta_{\text{Ф}}$  – модуль упругости, кгс/мм<sup>2</sup>;

$\beta_{\text{Ф}}$  – коэффициент упругого удлинения кабеля.

Для определения  $\sigma_{\text{МФ}}$  в СОК, когда известно исходное напряжение  $\sigma_{\text{Ф}}$  в кабеле, можно использовать следующее широко известное [4, с. 429; 5, с. 44] соотношение в виде кубического уравнения, используемого в воздушных линиях передачи для однородных проводов:

$$\sigma_x - \frac{L^2 \gamma_x^2 E_{\text{Ф}}}{24 \sigma_x^2} = \sigma_{\text{Ф}} - \frac{L^2 \gamma_{\text{Ф}}^2 E_{\text{Ф}}}{24 \sigma_{\text{Ф}}^2} - \alpha_0 E_{\text{Ф}} (t_x - t), \quad (10)$$

где  $\sigma_x, \gamma_x, t_x$  – напряжение в кабеле, удельная нагрузка и температура для рассматриваемых условий;

$\sigma_{\text{Ф}}, \gamma_{\text{Ф}}, t$  – то же для известных условий работы кабеля;

$L$  – длина пролета воздушной линии.

При изменении температуры кабеля меняется его длина, что приводит к изменению стрелы провеса кабеля и к изменению напряжения в кабеле.

При расчете стрелы провеса провода воздушной линии связи [4, с. 430] на базе заданной температуры исходят из того, что напряжение в стальном проводе равно 16,5 кгс/мм<sup>2</sup> при минимальной расчетной температуре провода  $t = -40^\circ\text{C}$ . В сильно гололедных районах наибольшее напряжение возникает при гололеде с ветром. В этом случае исходным напряжением будет  $\sigma_x$ , которое не должно превышать 25 кгс/мм<sup>2</sup>.

В данной задаче напряжение в СОК при температурах  $-5^\circ\text{C}$  и  $-40^\circ\text{C}$  не известно. Кроме того,  $E_{\text{Ф}}$  зависит от принятой конструкции кабеля. Следовательно, задача сводится к определению ряда значе-

ний  $\sigma_x$ ,  $Y_x$ ,  $\epsilon_x$  и  $F_x$  в интервале температур от +60°C до -40°C с учетом наиболее невыгодных климатических условий. При этом имеется в виду, что при наивысшей и наименьшей температурах скорость ветра равна нулю.

По результатам сравнения максимального значения  $\epsilon_x$  со значением  $\epsilon_{рк}$  выбирается модель конструкции СОК. Равенство  $\epsilon_{мх}$  и  $\epsilon_{рк}$  позволяет остановиться на модели кабеля с соответствующими данными по числу и типу арамидных нитей, типу стеклопластикового ЦСЭ, толщине оболочки, геометрическим размерам элементов кабеля. Величины растягивающих усилий при разрыве кабеля, инсталляции и максимальных нагрузках в процессе его эксплуатации также можно определить по данным  $\epsilon_x$  из ряда его значений.

В качестве известных условий работы СОК прием условия инсталляции кабеля, изложенные в [6]. Это позволит при температуре окружающей среды ( $t$ ), равной 27°C, и стреле провеса ( $f$ ), равной 1% от длины пролета воздушной линии, определить исходное значение  $\epsilon_\phi$  по выражению вида

$$\sigma_\phi = \frac{L^2 Y_1}{8f}, \quad (11)$$

где  $Y_1$  — удельная нагрузка от собственного веса СОК, кгс/м·мм<sup>2</sup>.

Последнее выражение справедливо с достаточной для инженерных расчетов точностью при подвеске кабеля на одинаковых высотах.

Удельная нагрузка от собственного веса СОК при заданной температуре инсталляции может быть определена из выражения

$$Y_1 = \frac{P}{S} n, \quad (12)$$

где  $P$  — вес одного метра кабеля, кг;  
 $S$  — площадь поперечного сечения кабеля, мм<sup>2</sup>;  
 $n$  — коэффициент перегрузки,  $n=1,1$ .

Удельные нагрузки от веса льда при гололеде ( $Y_2$ ), от давления ветра при отсутствии гололеда ( $Y_4$ ) и различные их сочетания с удельной нагрузкой от собственного веса СОК ( $Y_3$ ,  $Y_5$ ,  $Y_6$ ,  $Y_7$ ) определяются для расчетов  $\sigma_x$  в различных климатических условиях, т. е. при заданной температуре  $t_x$ , из [4, с. 429; 5, с. 44].

Данная методика расчета конструкции СОК была апробирована в условиях ОАО «Одескабель» на примере кабеля, предназначенного для эксплуатации в климатических условиях Азербайджана с длиной пролета между опорами, равной 50 м.

Модель конструкции кабеля определялась методом последовательных приближений, затем выбиралась такая конструкция кабеля, которая обеспечивала  $\epsilon_k=0,7\%$ . При этом диаметр стеклопластикового центрального силового элемента фирмы NEPTCO FITECH принимался равным 2,7 мм, конструкция

кабеля была выбрана 6-элементной с числом ОВ, равным четырем. Диаметр оптического модуля принимался равным 2,5 мм при толщине трубки 0,4 мм.

В качестве армирующей защиты кабеля применялись нити TWARON, тип 1055 8050 дтекс и тип 1052 8050 дтекс. Толщина оболочки  $\Delta_{об}$  и защитного шланга  $\Delta_{ш}$  принималась постоянной ( $\Delta_{об}=1,0$  мм,  $\Delta_{ш}=1,5$  мм).

Значения  $Y_1$  для различного числа арамидных нитей определялись при температуре инсталляции  $t_{и}$  и стреле провеса  $f=0,01L$ . По значениям  $Y_{1x}$  определялись значения  $\sigma_x$  в диапазоне температур от -40°C до +60°C при соответствующих сочетаниях ветровых и гололедных нагрузок для Азербайджана.

Результаты расчета конструкции СОК показали, что при указанном удлинении кабеля в его рассчитанной модели необходимо применить 14 нитей TWARON тип 1055 8050 дтекс и тип 1052 8050 дтекс. При этом кратковременное растягивающее усилие кабеля составляло 7,4 кН, а разрывное усилие — 22,2 кН.

По этой конструкции СОК типа ОКЛ были изготовлены опытные образцы длиной 870 м и, согласно рекомендации IEC 60794-1-2, метод Е1, экспериментально определены растягивающие усилия кабеля и оптического волокна.

Сопоставление максимально допустимого растягивающего усилия расчетной модели СОК (7,5 кН) с максимально допустимым растягивающим усилием опытного образца (8,0 кН) позволяет сделать вывод о достаточной для инженерной практики совместимости полученных результатов.

\*\*\*

Разработанная методика расчета конструкции самонесущих оптических кабелей по величине растягивающих усилий, воздействующих на кабель при экстремальных условиях эксплуатации, может быть рекомендована для конструирования подвесных оптических кабелей в различных климатических районах.

#### ИСПОЛЬЗОВАННЫЕ ИСТОЧНИКИ

1. Правила устройства электроустановок. — М. : Энергия, 1996.
2. Мальке Г., Гессинг П. Волоконно-оптические кабели: Основы проектирования кабелей, планирование систем. — Новосибирск : Издатель, 1997.
3. Klopper S., Menze B., Schulte I. LWL-Luftkabel: Selbsttragendes, metallfreies LWL-Luftkabel für kurze und lange Spannweiten. — Dresden : ABB Energiebau GmbH, 1995. — S. 13–18.
4. Гроднев И. И., Курбатов Н. Д. Линейные сооружения связи. — М. : Госиздат лит. по вопросам связи и радио, 1963.
5. Справочник по проектированию линии электропередачи. Вяземский М. Б., Ишкин В. Х., Крюков К. П. и др. — М. : Энергия, 1980.
6. Generic specification for fiber optic outside plant cable. — AT&T, Network cable systems, 1992.