

САМОНЕСУЩИЕ ОПТИЧЕСКИЕ КАБЕЛИ С ВЫНЕСЕННЫМ СИЛОВЫМ ЭЛЕМЕНТОМ И ОПТИЧЕСКОЙ ЧАСТЬЮ В ВИДЕ ТРУБКИ:

недостатки конструкции

Д.Инденбаум, директор по производству
С.Сироткин, главный технолог
ООО "Оптен-Кабель"
sirotkin@opten.spb.ru

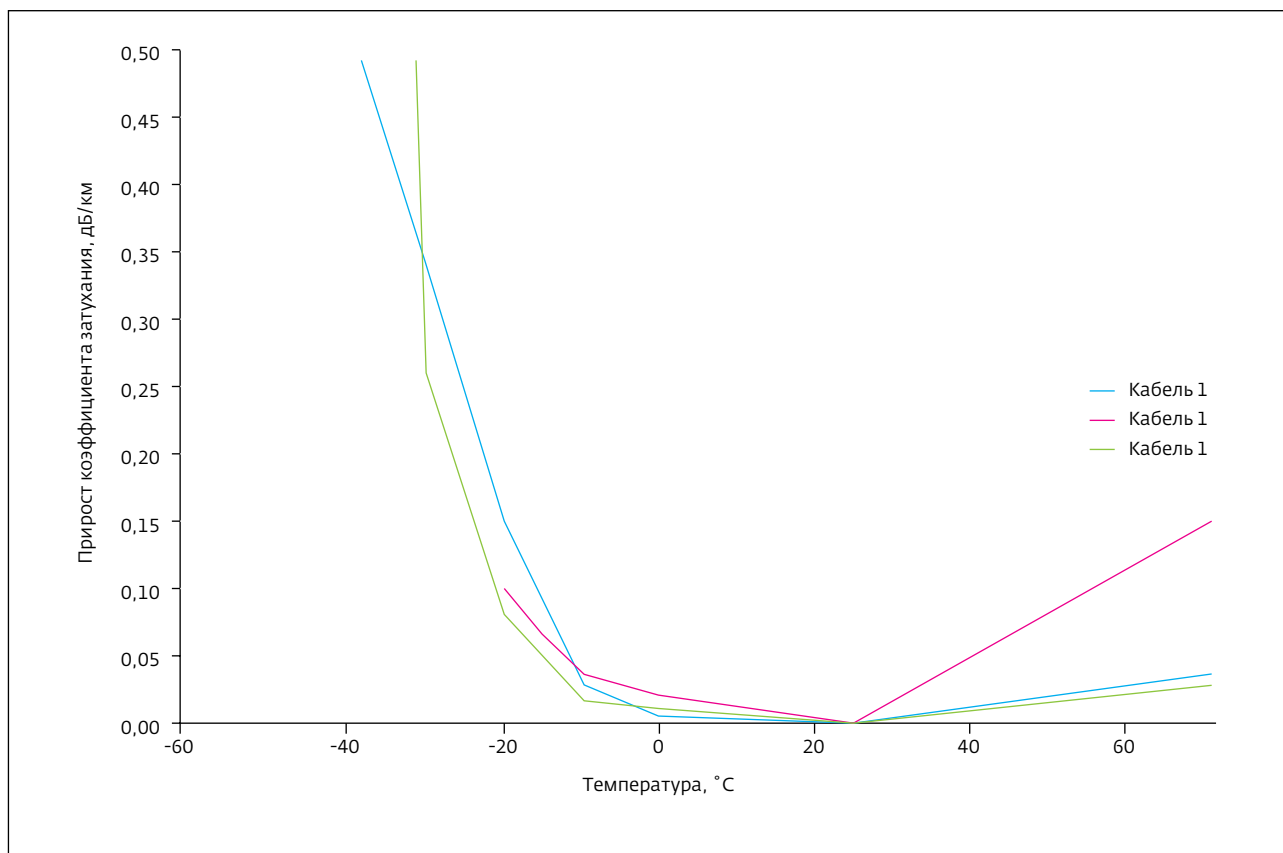
Авторы проводят сравнение двух конструкций оптических кабелей с вынесенным силовым элементом – с оптической частью в виде одной трубки с оптическими волокнами либо в виде повива нескольких оптических модулей вокруг стеклопластикового стержня. В статье приведены результаты испытаний первой конструкции, сделаны выводы о возможностях и ограничениях ее применения.

КАБЕЛИ ДЛЯ ВОЗДУШНОЙ ПРОКЛАДКИ С ВЫНЕСЕННЫМ СИЛОВЫМ ЭЛЕМЕНТОМ

При строительстве городских оптических сетей, когда нет свободного места в кабельной канализации, кабели приходится прокладывать воздушным путем. При подвеске по опорам ЛЭП используются диэлектрические самонесущие оптические кабели с усилением из высоко-модульных пряжей или повива брони, состоящей из стеклопластиковых стержней. При всех своих достоинствах такие кабели обладают и недостатками – это высокая цена и необходимость использования специальной арматуры. Для прокладки в черте города, по столбам освещения или подвеске между зданиями, диэлектрические самонесущие кабели обычно могут быть заменены на кабели со стальным тросом в качестве вынесенного силового

элемента (так называемые кабели в форме "восьмерки"). Оптическая часть "восьмерки" выполняется либо в виде одной трубки с оптическими волокнами (так называемый оптический модуль, ОМ), либо в виде повива нескольких ОМ вокруг стеклопластикового стержня.

При воздушной прокладке самыми значимыми воздействиями на кабель можно считать нагрузку при растяжении (от собственного веса и от гололедной и ветровой нагрузок) и воздействие отрицательной температуры. Поведение кабелей с оптическими сердечниками в виде скрутки ОМ под различными нагрузками изучено достаточно хорошо. Так, при определенном растяжении таких кабелей прирост коэффициента затухания начинает превышать допустимый уровень 0,05 дБ/км. При дальнейшем повышении нагрузки оптическое волокно (ОВ) удли-



Зависимость изменения коэффициента затухания кабеля от температуры

няется больше допустимого значения. Поэтому критической максимально допустимой растягивающей нагрузкой является нагрузка, при которой происходит увеличение затухания.

Кабели с оптическим сердечником в виде монотрубки при растяжении ведут себя иначе. Испытание на стойкость к растягивающей нагрузке показало, что в кабелях такого типа растяжение оптического волокна происходит практически одновременно с растяжением кабеля в целом. При этом коэффициент затухания оптического волокна в кабеле не растет. Следовательно, при расчете максимально допустимой растягивающей нагрузки нужно ориентироваться на увеличение удлинения оптического волокна, а не на рост оптического затухания. Прироста коэффициента затухания в кабелях такого типа не будет вплоть до их обрыва.

При воздействии пониженной температуры (в пределах диапазона рабочих температур) происходит температурное сжатие кабеля. Причем это сжатие тем больше, чем больше коэффициент линейного теплового расширения (КЛТР) кабеля. Так как КЛТР оптического волокна примерно на два порядка меньше КЛТР кабеля, то при сокращении линейных размеров кабеля длина ОВ остается неизменной. Оптическое волокно теряет устойчивость и занимает новое положение внутри ОМ. Причем наиболее вероятным положением, с точки зрения минимума потенциальной энергии, является кривая в форме разнонаправленной геликоиды (разнонаправленной спирали). В результате этого ОВ приобретает микро- и макроизгибы, влекущие увеличение затухания.

Помимо образования критических изгибов волокна внутри кабеля при воздействии пониженной температу-

ры наблюдается и эффект перемещения пучка ОВ вдоль сердечника, состоящего из одной трубки. Так, при воздействии растягивающих нагрузок оптические волокна вытягиваются из защитных муфт. При недостаточном запасе свободного хода волокна в муфте это приводит к обрыву волокон. При воздействии пониженной температуры такое перемещение пучка приводит к вытягиванию ОВ из кабеля в муфту. При этом велика вероятность увеличения затухания в ОВ, находящегося в муфте. Кабели со скрученной структурой оптического сердечника лишены данного недостатка, а все перемещения пучка волокон при таких нагрузках ограничены наличием свободного хода волокна внутри спирально уложенных модулей. Практика эксплуатации оптического кабеля с вынесенным силовым элементом и монотрубкой в ОАО "Сибирь-Телеком" выявила недопустимое увеличение коэффициента затухания при понижении температуры до -20°C .

РЕЗУЛЬТАТЫ ИСПЫТАНИЙ ОПТИЧЕСКИХ КАБЕЛЕЙ СОПТИЧЕСКОЙ ЧАСТЬЮ В ВИДЕ ТРУБКИ

Рассмотрим более подробно результаты испытаний оптических кабелей с вынесенным силовым элементом и оптической частью в виде трубки на воздействия растягивающей нагрузки и отрицательной температуры. Для испытания на стойкость к растягивающей нагрузке был взят образец кабеля с расчетной максимально допустимой растягивающей нагрузкой 6,0 кН. При данной нагрузке относительное удлинение кабелей составило 0,39%, а относительное удлинение оптических волокон — 0,29%. Это свидетельствует о наличии избыточной длины волокна 0,1%. После вытягивания избыточной длины в процессе растяжения кабеля начинается растяжение

Таблица 1. Максимально допустимая нагрузка кабеля различного диаметра при максимальном удлинении 0,3%

Диаметр стального троса, мм	Максимальная нагрузка кабеля, кН
2,4	1,9
2,8	2,4
3,4	3,6
3,7	4,3

Таблица 2. Максимально допустимая нагрузка кабеля различного диаметра при максимальном удлинении 0,39%

Диаметр стального троса, мм	Максимальная нагрузка кабеля, кН
2,4	2,5
2,8	3,1
3,4	4,7
3,7	5,6

оптического волокна. При этом прирост затухания в ОВ не наблюдался.

Необходимо оценить, насколько критичным, с точки зрения увеличения вероятности обрыва волокна, является полученное удлинение. На поверхности ОВ всегда присутствуют микроскопические дефекты, образованные в процессе его изготовления. Прочность волокна зависит от количества и размеров этих дефектов. Наличие атомов водорода в кристаллической решетке стекла ОВ под воздействием растягивающего усилия со временем приводит к росту размеров микродефекта. При достижении некоторого порога глубины дефекта вероятность разрушения волокна приближается к 100%. Для отбраковки волокна с критическими размерами дефектов на заводах-изготовителях ОВ проводится его перемотка с натяжением (так называемый proof-test). Обычно относительное удлинение волокна при proof-тесте составляет 1%. Согласно данным фирмы Corning, такую перемотку выдерживают только волокна с глубиной дефекта менее 1 мкм.

Срок жизни оптического волокна рассчитывается по формуле:

$$t_r = \left\{ \left(1 - \frac{\ln(1-F_r)}{L \cdot N_p} \right)^{\frac{n-2}{m}} - 1 \right\} \cdot t_p \cdot \left(\frac{\sigma_p}{\sigma_r} \right)^n,$$

где t_r – предполагаемый срок жизни волокна; t_p – время нагружения при proof-тесте; m – коэффициент распределения Вейбулла; n – коэффициент статической усталости волокна; N_p – число обрывов волокна на 1 км в процессе испытаний; L – суммарная длина ОВ на линии (или нескольких линиях); для которой рассчитывается вероятность обрыва; F_r – вероятность обрыва волокна; σ_p – удлинение волокна во время proof-теста (обычно 1%); σ_r – удлинение волокна при эксплуатации кабеля.

По расчетам фирмы Corning, допустимое относительное удлинение оптического волокна, находящегося

под действием растягивающей нагрузки в течение 40 лет, составляет 0,2%. Отметим, что этот расчет выполнен для суммарной длины оптического волокна $L = 10^6$ км. Тогда, с учетом имеющейся избыточной длины оптического волокна в кабеле, максимальное допустимое относительное удлинение кабеля составит 0,30%. Очевидно, что при таком допустимом удлинении кабеля максимально допустимая нагрузка 4–6 кН возможна при использовании троса большого диаметра (табл.1).

Теоретически, увеличение допустимого удлинения кабеля невозможно без введения дополнительных ограничений. Так, время воздействия длительно допустимой растягивающей нагрузки составляет не более 1000 ч, время действия ежедневной нагрузки постоянно в течение срока службы кабеля. Срок службы кабеля ограничен гарантийным сроком пять лет. Суммарная длина волокна в кабеле данного типа, выпущенном заводом в течение гарантийного срока, не более 60 тыс. км (12 тыс. км в год). При этих ограничениях допустимое относительное удлинение волокна составит 0,29%. С учетом избытка волокна в кабеле допустимое удлинение кабеля при растяжении составит 0,39%. Соответственно увеличится и максимальная допустимая растягивающая нагрузка кабеля (табл.2).

Анализ кабелей с вынесенным силовым элементом и оптической частью в виде трубки, представленных на рынке, позволяет сделать вывод о том, что применяемый в них стальной трос не обеспечивает заявленную максимально допустимую нагрузку. Например, кабели нескольких производителей при заявленной нагрузке 6,0 и 9,0 кН содержат стальные тросы диаметром 2,8 и 3,4 мм, соответственно. Как видно из табл.2, при такой растягивающей нагрузке относительное удлинение кабеля будет превышено почти в два раза, что приведет к значительному росту вероятности обрыва волокна.

В качестве образцов для испытаний кабелей на стойкость к воздействию пониженной температуры рабочего диапазона температур были использованы кабели рассматриваемой конструкции трех производителей. После проведения испытаний стало очевидно, что прирост коэффициента затухания сверх допустимого уровня 0,05 дБ/км происходит уже при температуре от -15 до -20°C (см. рисунок). Тогда, как согласно Правилам применения оптических кабелей связи, пассивных оптических устройств и устройств для сварки оптических волокон [1], минимальная допустимая температура для кабелей воздушной прокладки составляет -60°C. Отметим также, что при возврате к положительной температуре в некоторых кабелях коэффициенты затухания не приняли первоначального значения.

Причина роста затухания кабеля при воздействии низкой температуры – образование микро- и макроизгибов ОВ под воздействием продольной сжимающей силы (так называемая температурная усадка). Одним из способов уменьшения кривизны волокна при подобном воздействии на кабель может стать снижение КЛТР кабеля и увеличение внутреннего диаметра оптического модуля для более свободного положения пучка волокон.

КЛТР кабеля рассчитывается по формуле [2]:

$$КЛТР = \frac{\sum КЛТР_i \cdot E_i \cdot S_i}{\sum E_i \cdot S_i},$$

где $КЛТР_i$ – коэффициент линейного теплового расширения элемента кабеля; E_i – модуль упругости элемента кабеля; S_i – площадь поперечного сечения элемента кабеля.

Для уменьшения КЛТР кабеля необходимо максимально сократить содержание в нем полимерных материалов (например уменьшить толщину наружной оболочки кабеля) и максимально увеличить содержание металлических элементов (увеличить диаметр вынесенного силового элемента). Расчеты показывают, что при одновременном уменьшении толщины наружной оболочки с 1,4 до 1,0 мм и увеличении диаметра стального троса с 2,4 до 3,7 мм КЛТР кабеля уменьшится на 36%. При этом следует отметить, что при снижении толщины оболочки даже до 0,6 мм и увеличении диаметра троса до 3,7 мм КЛТР кабеля составит $1,46 \cdot 10^{-5} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$, что обеспечит стойкость кабеля лишь до -26°C (табл.3). Из табл. 4 видно, что уже температуру -40°C следует считать принципиально недостижимой для кабелей такого типа, так как для выполнения этого условия кабель должен иметь КЛТР ниже, чем у стали [3].

С другой стороны, увеличение внутреннего отверстия оптического модуля приведет к уменьшению силы трения пучка волокон вдоль внутренней поверхности модуля. Следовательно, величина вытягивания или втягивания пучка ОВ при циклическом температурном воздействии станет больше. Это негативно скажется на увеличении затухания в ОВ, уложенного в муфтах, и может привести к его обрыву. Кроме того, увеличение внутреннего отверстия модуля повлечет и увеличение наружного диаметра кабеля, который будет приближаться уже к наружному диаметру конструкции со скрученным типом сердечника. При этом теряется главное преимущество кабелей с оптическим сердечником в виде монотрубки – низкая парусность при ветровых нагрузках и меньшая масса образуемой гололедной "муфты".

Выводы

Растяжение оптического волокна не приводит к росту затухания кабеля, но существенно влияет на его надежность. Поэтому при испытаниях на стойкость к растягивающей нагрузке кабелей с оптическим сердечником из одной трубки необходимо производить контроль удлинения оптического волокна.

Увеличение допустимого удлинения волокна при сохранении прежней вероятности обрыва возможно лишь при введении дополнительных ограничений, таких как уменьшение срока службы кабеля и суммарной длины волокна, уложенного в кабели на линии.

Как мы показали, стойкость кабеля в форме "восьмерки" с оптической частью из монотрубки к воздействию пониженной температуры -40°C принципиально недости-

Таблица 3. **Связь допустимого температурного перепада и КЛТР кабеля. Начальная температура при стандартных условиях -25°C**

Допустимая минимальная температура, $^\circ\text{C}$	КЛТР кабеля, $\times 10^{-5} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$
-20	$\leq 1,67$
-30	$\leq 1,36$
-40	$\leq 1,15$
-60	$\leq 8,82$

Таблица 4. **Коэффициент линейного температурного расширения различных материалов**

Материал	КЛТР, $\times 10^{-5} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$
Полиэтилен	20
ПВХ	7
Поликарбонат	5
Сталь	1,3

жима без существенного увеличения внутреннего отверстия ОМ. Однако при таком изменении конструкции кабеля увеличится эффект вытягивания и втягивания пучка оптических волокон из/в кабель при циклическом воздействии температур. Увеличение внутреннего диаметра монотрубки приведет к росту наружного габарита кабеля и потере его эксплуатационного преимущества перед кабелями с сердечником скрученного типа.

ЛИТЕРАТУРА

1. Правила применения оптических кабелей связи, пассивных оптических устройств и устройств для сварки оптических волокон. Утверждены Приказом Министерства информационных технологий и связи Российской Федерации от 19 апреля 2006 г. № 47.
2. **A.Grooten, E.Bresser, A.Berkers.** Practical Experience with Metal-Free Self-Supporting Aerial Optical Fibre Cable in High Voltage Networks. – IWCS Proceedings, 1987.
3. **Крыжановский В.К., Бурлов В.В., Паниматченко А.Д., Крыжановская Ю.В.** Технические свойства полимерных материалов: Учеб.-справ. пособие. 2-е изд., испр. и доп. – СПб.: Профессия, 2005.