

# ВОПРОСЫ КОНСТРУИРОВАНИЯ ОПТИЧЕСКИХ КАБЕЛЕЙ для применения в терабитных системах передачи

**М. Боев**, д.т.н., профессор НИУ "МЭИ",  
**Э. Ким**, генеральный директор ОАО "Еврокабель-1",  
**А. Микилев**, к.ф-м.н, ведущий научный сотрудник  
ОАО ВНИИКП // a.mikilev@vniikp.ru

УДК.621.315.21, DOI: 10.22184/2070-8963.2022.108.8.52.56

Рассмотрены вопросы конструирования, промышленного производства, методик и задач исследования оптических кабелей с оптическим волокном со сверхнизким затуханием и большой эффективной площадью.

## ВВЕДЕНИЕ

Общая скорость передачи информации (емкость) для современных волоконно-оптических систем передачи (ВОСП) достигла и уже во многих случаях превысила порог свыше 1 Тбит/с на одно волокно. Такая скорость стала возможной благодаря технологии плотного мультиплексирования с разделением по длине волны, известной как DWDM (Dense Wavelength Division Multiplexing), развитию когерентных систем, использованию сложных форматов модуляции, методов коррекции ошибок и другим многочисленным усовершенствованиям оборудования связи. Увеличению пропускной способности способствовала также разработка новых поколений оптических волокон (ОВ), таких как ОВ со сверхнизким затуханием типа ULL (Ultra Low Loss) и ОВ с большой эффективной площадью – ULA (Ultra Large Area).

О характеристиках и преимуществах ОВ типа ULL подробно говорилось в [1, 2]. В настоящей статье

речь пойдет о характеристиках оптического кабеля (ОК), при изготовлении которого применены подобные ОВ. Экспериментальный образец ОК разработан предприятием "Еврокабель-1" с учетом технических требований, специфичных для применения кабеля на территории России.

Одним из основных требований к ОК, предназначенному для работы терабитных ВОСП, помимо высокой пропускной способности, должно, по нашему мнению, быть требование особо высокой надежности. При этом следует обеспечить такие показатели, как безотказность и долговечность в условиях воздействия различных факторов окружающей среды: температуры, механических нагрузок и др.

## ОСОБЕННОСТИ КОНСТРУКЦИИ ОК, ИСПОЛЪЗУЕМЫХ В ВОСП МАГИСТРАЛЬНОЙ СЕТИ

Сегодня магистральные сети пока еще по большей части строят с использованием ОВ,

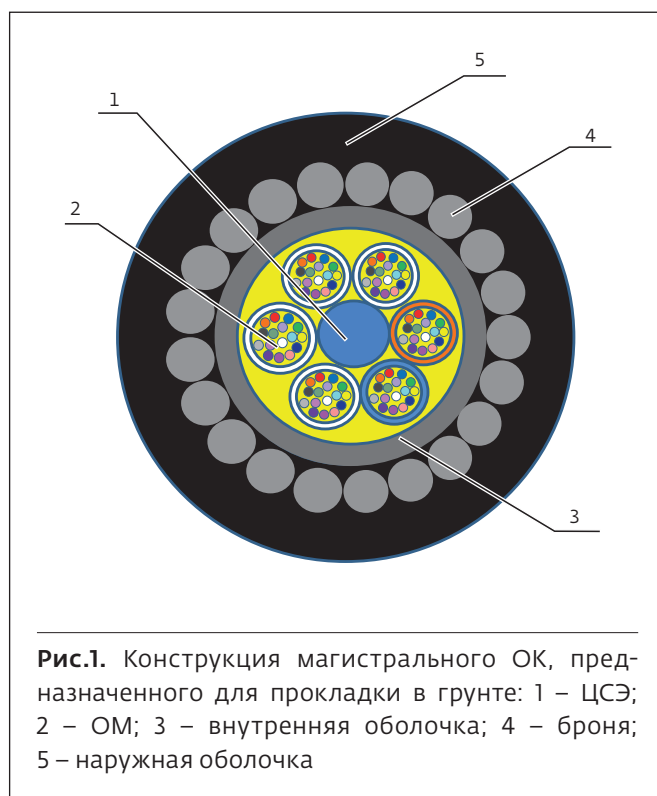
соответствующего рекомендации Сектора стандартизации Международного союза электросвязи (МСЭ-T) G.652.D, а в последнее время также G.652.D/G.657.A1. В дальнейшем будем считать такие волокна соответствующими стандартной спецификации. Среди передаточных характеристик ОВ для магистральных линий существенным является требование малого прироста километрического затухания передаваемого сигнала (дБ/км) при изготовлении ОК.

При передаче сигналов на длине волны 1550 нм в магистральных линиях стараются использовать ОВ с пониженным коэффициентом затухания – около 0,18 дБ/км [3]. Однако после 2010 года у операторов ВОСП повысился интерес к ОВ категории G.654 с еще более низким затуханием с одновременным ростом требований к конструкции ОК.

Сегодня различные изготовители предлагают ОВ со сверхнизким затуханием – менее 0,17 дБ/км на длине волны 1550 нм, причем такое волокно может соответствовать рекомендации G.652 и/или G.654. Волокна, соответствующие только рекомендации G.654, имеют увеличенный диаметр модового поля (ДМП), обычно более 11 мкм на длине волны 1550 нм, и параметр "эффективной площади сердцевины", как правило, более 110 кв. мкм.

Одним из актуальных вопросов при конструировании ОК с применением ОВ ULL со сверхнизким затуханием, таких как, например, волокно типа SMF-28 ULL, и, особенно, типа ULA является обеспечение надежной работы кабелей при внешних воздействиях. Такие воздействия возникают при прокладке кабелей и в дальнейшем в условиях эксплуатации. К ним относятся, в частности, колебания температуры от низких до высоких значений, различные виды механических воздействий.

В связи с необходимостью определять с гарантией малый прирост затухания важной задачей является усовершенствование методов измерения коэффициента затухания ОВ как в исходном состоянии, так и после переработки в составе ОК. Измерение затухания должно производиться на длине волны не только 1550, но и 1625 нм. Также желательно осуществить более подробное изучение таких свойств ОВ рассматриваемых типов, как, например, исследование "свариваемости" и совместимости с ОВ других типов. С точки зрения оптимизации производства ОК важным является также определение чувствительности ОВ к возможной



**Рис.1.** Конструкция магистрального ОК, предназначенного для прокладки в грунте: 1 – ЦСЭ; 2 – ОМ; 3 – внутренняя оболочка; 4 – броня; 5 – наружная оболочка

неравномерности распределения "избыточной" длины вдоль физической длины кабеля, обусловленной технологическими причинами. Интересным является исследование состояния ОВ в кабеле с применением бриллиантового рефлектометра (BOTDR), что позволяет дать оценку физическому состоянию волокна и прогнозировать срок службы ОК.

### Конструкция опытного образца кабеля

По условиям прокладки ОК, используемые на сетях связи России, подразделяют на несколько типов. Для непосредственной прокладки в грунт широко применяют ОК, конструкция которых содержит броню из стальных проволок [4–8]. В случае использования волокна типа ULL/ULA, по нашему мнению, целесообразна именно подобная конструкция, описываемая далее, которая имеет наибольшие шансы на практическое применение.

Поскольку полагаем, что ОВ типа ULL/ULA по сравнению с другими ОВ потенциально более чувствительны к внешним воздействиям (натяжение, изгибы, высокая и низкая температура и пр.), такое волокно требует большей защиты. Наличие металлической брони обеспечивает большую стабильность геометрической конструкции ОК при значительных механических

нагрузках и при температурных воздействиях. Очевидно, что внедрение волокна рассматриваемых типов в реальную практику строительства ВОЛС потребует в дальнейшем набора более обширной статистики и наработки опыта конструирования, исследования и применения ОК с волокном ULL/ULA в лабораторных, производственных и полевых условиях. Для работы с терабитными системами передачи был разработан экспериментальный ОК, описанный ниже.

На рис.1 показан разрез кабеля марки ОГД-6×16У-7, который был сконструирован и произведен специалистами ООО "Еврокабель-1" в 2021 году.

Кабель содержит центральный силовой элемент (ЦСЭ), который выполнен из стеклопластикового прутка, наружную и внутреннюю оболочку из полиэтилена высокого давления. Между оболочками наложена броня из стальных оцинкованных проволок. Кабель содержит шесть оптических модулей (ОМ) из полибутилентерефталата, в каждом модуле содержится по 16 ОВ. Межмодульное пространство, а также пространство в области проволок брони заполнено гидрофобным компаундом.

## Основные результаты испытаний

Согласно техническим условиям строительная длина ОК должна быть не менее 1000 м, а длина на барабане № 12 составляет около 4 км. Для экспериментальных исследований был изготовлен образец длиной около 3 км. Несмотря на некоторые экспериментальные сложности по точному определению коэффициента затухания ОК более короткой длины, мы оценили погрешность наших измерений (использовались различные оптические рефлектометры OTDR) ориентировочно не хуже  $\pm 0,002$  дБ/км на длине волны 1550 нм.

В данном экспериментальном образце в разных ОМ содержались различные ОВ, спецификации согласно МСЭ-T и типы которых, а также некоторые исходные параметры, указаны в табл.1. Там же приведены параметры ОВ, измеренные на длине волны 1550 нм, а именно: диаметр модового поля (ДМП), длина волны отсечки (ДВО) и коэффициент затухания (КЗ). Учитывая, что каждый ОМ содержит по 16 ОВ, в таблице приведены минимальное (мин.), среднее (средн.) и максимальное (макс.) из значений затухания ОВ в каждом ОМ. Параметр  $\Delta$ ср. Представляет собой усредненные

**Таблица 1.** Основные характеристики ОВ в исходном состоянии и в кабеле

№ ОМ	Число и тип ОВ	Исходные параметры ОВ			КЗ сигнала в ОВ в кабеле			
		ДМП, мкм	ДВО, нм	КЗ, дБ/км	Мин.	Средн.	Макс.	$\Delta$ ср
1	16 x G.652.D Стандартное	10,5	$\leq 1260$	0,182	0,182	0,183	0,185	0,001
2	16 x G.652.B ULL	10,5	$\leq 1260$	0,156	0,156	0,163	0,178	0,007
3	16 x G.654.E ULL/ULA	12,4	$\leq 1520$	0,168	0,166	0,171	0,175	0,003
4	16 x G.654.E ULL/ULA	12,3	$\leq 1530$	0,153	0,152	0,154	0,160	0,001
5	16x G.654.B ULA	12,4	$\leq 1530$	0,182	0,180	0,183	0,187	0,001
6	16x G.654.B ULA	12,4	$\leq 1530$	0,182	0,179	0,183	0,188	0,001

по каждому модулю разности КЗ в изготовленном ОК по сравнению с КЗ исходного ОВ на катушке (до окрашивания).

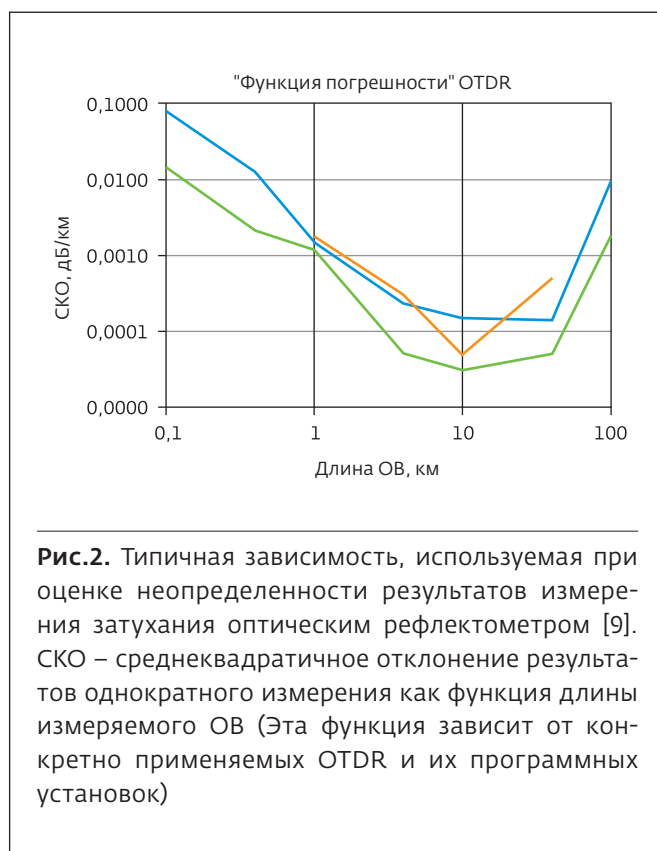
Измерение сверхмалых затуханий, особенно при коротких длинах исследуемого ОК, безусловно, требует хотя бы ориентировочной оценки погрешности (неопределенности) результатов измерений. Анализ результатов, приведенных в таблице, показывает, что среднее квадратичное отклонение (СКО) результатов измерения коэффициента затухания ориентировочно находится на уровне  $\pm 0,0005$  дБ/км. Данная функция "погрешности" проиллюстрирована графиком на рис.2, подробности можно найти в работе [9].

С учетом этой оценки и использованного метода обработки промежуточных результатов можно сделать вывод, что неопределенность результатов измерения коэффициента затухания в нашем случае составила около  $\pm 0,002$  дБ/км. Допускаем, что эта оценка несколько оптимистична и подлежит более доказательному и подробному обоснованию. Во всяком случае, к соответствующей точности следует стремиться при измерениях коэффициента затухания ОК на строительных длинах 4 км.

На наш взгляд, наибольший интерес представляют результаты измерения затухания в модулях, пронумерованных в таблице как 1, 2 и 3, так как в них используются именно те ОВ, которые сегодня коммерчески доступны на отечественном рынке. В среднем прирост коэффициента затухания (параметр  $\Delta_{\text{ср}}$  в таблице) в ОК по сравнению с исходным (неокрашенным) ОВ составил для этих модулей, соответственно 0,001/0,007/0,003 дБ/км.

Полученные результаты по измерению коэффициента затухания близки к выводам работы [10]: для волокна G.654, вследствие потенциально большей вероятности прироста затухания на микро- и макроизгибах, затухание в ОК должно иметь тенденцию к некоторому увеличению после изготовления и прокладки ОК по сравнению с исходным ОВ. Однако, в худшем случае, этот прирост не должен превышать исходное затухание волокна более чем на 0,01 дБ/км.

С учетом экономического фактора пока что был разработан и исследован только один экспериментальный образец кабеля с волокном ULL и/или ULA. Полученные результаты, очевидно, требуют статистического подтверждения при массовом производстве ОК подобного типа. В дальнейшем предполагается подробное исследование кабеля представленной конструкции на стойкость к различным воздействующим факторам (механические воздействия, низкие



**Рис.2.** Типичная зависимость, используемая при оценке неопределенности результатов измерения затухания оптическим рефлектометром [9]. СКО – среднее квадратичное отклонение результатов однократного измерения как функция длины измеряемого ОВ (Эта функция зависит от конкретно применяемых OTDR и их программных установок)

температуры и др.), характеризующим надежность ОК. Исследования по другим параметрам ОК авторами продолжаются.

Заметим, что наименьшее затухание в кабеле (0,16 дБ/км) отмечено у ОВ марки TeraWave Scuba производства компании OFS (ОМ № 4 в таблице). Однако, с учетом фактора стоимости и доступности в нынешней ситуации подобного ОВ, более реальным и перспективным считаем применение ОВ, подобного TeraWave ULL, с затуханием не более 0,17 дБ/км с номинальным диаметром модового поля 12,4 мкм (допуск  $\pm 0,5$  мкм). Это волокно находится в ОМ № 3.

Как показывают расчетные оценки и результаты экспериментов, сверхнизкое затухание и большая эффективная площадь, сочетаясь в одном ОВ одновременно, могут заметно улучшить эффективность ВОСП новых поколений. В [11] обращается внимание на так называемый "показатель эффективности" FOM (Figure of Merit):

$$\text{FOM (dB)} = \frac{2}{3} \left( 10 \log \left[ \frac{A_{\text{eff}} n n_{2,\text{ref}}}{A_{\text{eff,ref}} n n_2} \right] - \left[ \alpha \left( \frac{\text{dB}}{\text{km}} \right) \right] - [\alpha_{\text{ref}} (\text{dB} / \text{km}) \cdot L] - \frac{1}{3} \left( 10 \log \left[ \frac{L_{\text{eff}}}{L_{\text{eff,ref}}} \right] \right),$$

где  $\alpha$  – коэффициент затухания,  
 $n_2$  – нелинейный показатель преломления,  
 $L$  – длина пролета,  
 $L_{\text{eff}}$  – эффективная длина пролета,  
 $A_{\text{eff}}$  – эффективная площадь волокна ULL/ULA.

Индекс  $ref$  относится к соответствующим параметрам для стандартного ОВ типа G.652.D, принимаемого в качестве основы для сравнения (reference).

### Перспективы применения ОК со сверхнизким затуханием

Ранее, в [1] приводились аргументы в пользу применения новых типов ОВ и рассматривались возможные технические сложности, с этим связанные. С учетом нашего опыта конструирования и исследования описанного выше ОК с волокном G.654, который считаем еще пока достаточно ограниченным, можно сделать следующие выводы.

Возможно конструирование ОК со средним превышением коэффициента затухания не более 0,003 дБ/км в кабеле по сравнению с исходным ОВ. Например, при использовании ОВ марки TeraWave ULL производства OFS коэффициент затухания в ОК в нашем случае не превышал среднестатистически  $(0,171 \pm 0,002)$  дБ/км на длине волны 1550 нм. Однако с целью обеспечения достаточного уровня надежности результатов при сдаче-приемке кабеля предлагаем принимать величину допустимого порога превышения затухания в ОК по сравнению с исходным на уровне не более 0,01 дБ/км для любого индивидуального ОВ, но не более 0,005 дБ/км в среднем по всем волокнам в кабеле. Методы измерений и испытаний ОК с волокном ULL/ULA, скорее всего, могут потребовать "адаптации" и усовершенствования по сравнению с существующими методами, используемыми для стандартных ОВ.

Предстоит также более точно определить коэффициент затухания в ОК на длине 1625 нм. Предварительные оценки показывают, что он не превышает  $(0,18 \pm 0,01)$  дБ/км для всех волокон в модуле № 3 описанного выше ОК.

Авторы выражают признательность коллективу ООО "Еврокабель-1" (г. Щелково Московской обл.) за большую техническую и организационную помощь при выполнении настоящей работы.

### ЛИТЕРАТУРА

1. Микилев А., Павлычев М. Оптические волокна класса ULL: характеристики и вопросы применения // ПЕРВАЯ МИЛЯ. 2021. № 8. С. 18–25.
2. Микилев А. ОВ для наземных ВОСП со сверхнизким затуханием и увеличенной эффективной площадью // ПЕРВАЯ МИЛЯ. 2017. № 3. С. 14–18.
3. Микилев А. Оптические волокна стандартной группы: эволюция и перспективы // ПЕРВАЯ МИЛЯ. 2015. № 6. С. 34–39.
4. Боев М.А., Йе Чжо Мин // Особенности определения механических параметров оптического кабеля, прокладываемого в земле // Вестник МЭИ. 2018. № 1. С. 41–46.
5. Боев М.А., Йе Чжо Мин // Стойкость к механическому усилию оптических кабелей, прокладываемых в земле // Кабели и провода. 2017. № 3 (364). С. 22–25.
6. Боев М.А., Йе Чжо Мин // Обеспечение требований к механическим параметрам оптических кабелей, предназначенных для прокладки в земле в тропическом климате // Кабели и провода. 2017. № 6 (368). С. 16–19.
7. Bоеv M.A. et al. Design of Optical Cables Intended for Laying Inside Buildings and Zone Communication // 2020 Systems of Signals Generating and Processing in the Field of on Board Communications. Moscow: MTUCI, 2020. PP. 1–4.
8. Ко Н.М. et al. Comparison of Mechanical Parameters of Self-Supporting Suspended Optical Cables with Power Elements from Different Materials // 2020 International Youth Conference on Radio Electronics, Electrical and Power Engineering (REEPE). Moscow, 2020. PP. 1–5.
9. Микилев А.И. Некоторые актуальные задачи рефлектометрии при измерениях ОВ // ПЕРВАЯ МИЛЯ. 2017. № 8. С. 36–41.
10. Zhang L. et al. Single-Mode Fiber with Ultra-Low-Loss and Large-Effective-Area. NTI News, 2015-12-04 [Электронный ресурс]. URL: [www.nti.news/Tech/7.html](http://www.nti.news/Tech/7.html). (дата обращения: 02.11.2022).
11. Downie John D. et al. Towards Superior Transmission Performance in Submarine Systems: Leveraging Ultra Low Attenuation and Large Effective Area // Journal of Light-wave Technology. 2016. No 1. PP. 114–119.



21-я Международная выставка  
кабельно-проводниковой  
продукции

14–16 марта 2023

Москва, ЦВК «Экспоцентр»



Забронируйте  
стенд

Присоединяйтесь к лидерам  
российского рынка кабельно-  
проводниковой продукции

Организаторы



Международная  
Выставочная  
Компания



ОАО «ВНИИКТ»



АССОЦИАЦИЯ  
ЭЛЕКТРОКАБЕЛЬ

Генеральный  
информационный  
партнер

**RusCable.Ru**  
Энергетика. Электротехника. Связь.  
Перевод структурных элементов ОКМ 311 М ВСТ-2001