

# Подводные оптоволоконные линии связи, Литературный обзор.

Укладка кабелей, конструкция и свойства кабелей, энергоснабжение  
линии, подводные оптические усилители

Copyright © НТО «ИРЭ-ПОЛЮС»

Обзор выполнил: С. Л. Денисов

**Оглавление:**

	Стр.
<b>Введение</b> _____	3
<b>Различные виды подводных оптоволоконных линий связи</b> _____	5
<b>Планирование, проработка и прокладка подводных волоконно-оптических линий связи</b> _____	8
<b>Энергетическое оборудование для подводной линии связи</b> _____	16
<b>Кабели для линий подводной оптоволоконной связи</b> _____	18
<b>Особенности конструкции подводных оптических усилителей</b> _____	30
<b>Список литературы</b> _____	33

## Введение

Сегодня связь играет важную роль в нашем мире. И если ранее для передачи информации использовались медные кабели и провода, то теперь наступило время оптических технологий и оптоволоконных кабелей. Оптические телекоммуникационные технологии способствовали значительному снижению стоимости передачи информации во всём мире.

Сейчас, совершая звонок по телефону на другой конец света (например, из Европы в Америку) или же загружая из интернета любимую мелодию, которая лежит на сайте где-нибудь в Австралии, мы даже не задумываемся, каким образом нам удаётся это сделать. А происходит это благодаря применению оптоволоконных кабелей. Для того чтобы соединить людей, сделать их ближе друг к другу или же к желаемому источнику информации, приходится соединять континенты. Для этого необходимо проложить подводную оптоволоконную линию связи.

Если прокладка кабеля по суше не вызывает значительных затруднений (кабели можно зарывать в траншеи, вести на линиях опоры, подобным ЛЭП), то прокладка кабеля на морском, а особенно на океанском дне приводит к многократному возрастанию проблем и, как следствие, стоимости всего проекта. Огромные глубины (более 8000 м), высочайшее давление, малая доступность, сложный подводный рельеф, налагают особые требования на конструкцию кабеля, оптических усилителей, соединительных муфт, разветвителей и прочего оборудования.

Также для укладки кабеля необходимо строительство специального корабля-кабелеукладчика, применение глубоководного оборудования, аппаратов для зарывания кабеля в грунт и других специальных агрегатов.

В инженерно-техническом плане, прокладка подводной линии связи является очень сложным и дорогостоящим мероприятием (стоимость проекта может превосходить 100 млн. долларов). Однако, благодаря высокой помехозащищённости, широкой полосе пропускания, низкому уровню шумов, экономичности, высокой защищённости от несанкционированного доступа и другим достоинствам все затраты окупаются.

Для сокращения сроков окупаемости линии, повышения надёжности и качества связи необходимо провести тщательное исследование морского дна, провести анализ воздействий, которые могут вызвать повреждения кабеля (учесть как человеческий, так и природный факторы), изучить информационные потоки, переносчиком которых будет данная подводная линия связи. Проведение такого анализа предваряет собой начало работ по прокладке подводного оптоволоконного кабеля.

После проведения анализа необходимо выбрать способы и сроки укладки кабеля, методы его защиты от внешних воздействий, а также разработать методику и оборудование для ремонта и восстановления кабеля/оптического усилителя/разветвителя в случае повреждения.

Резюмируя выше сказанное, нужно отметить, что прокладке подводной оптоволоконной линии связи предшествует тщательное планирование, изучение и анализ проводимых работ.

После этого начинаются работы по прокладке кабеля (на берегу, вывод кабеля с берега в море, прокладка кабеля в море) и строительство береговых терминальных станций.

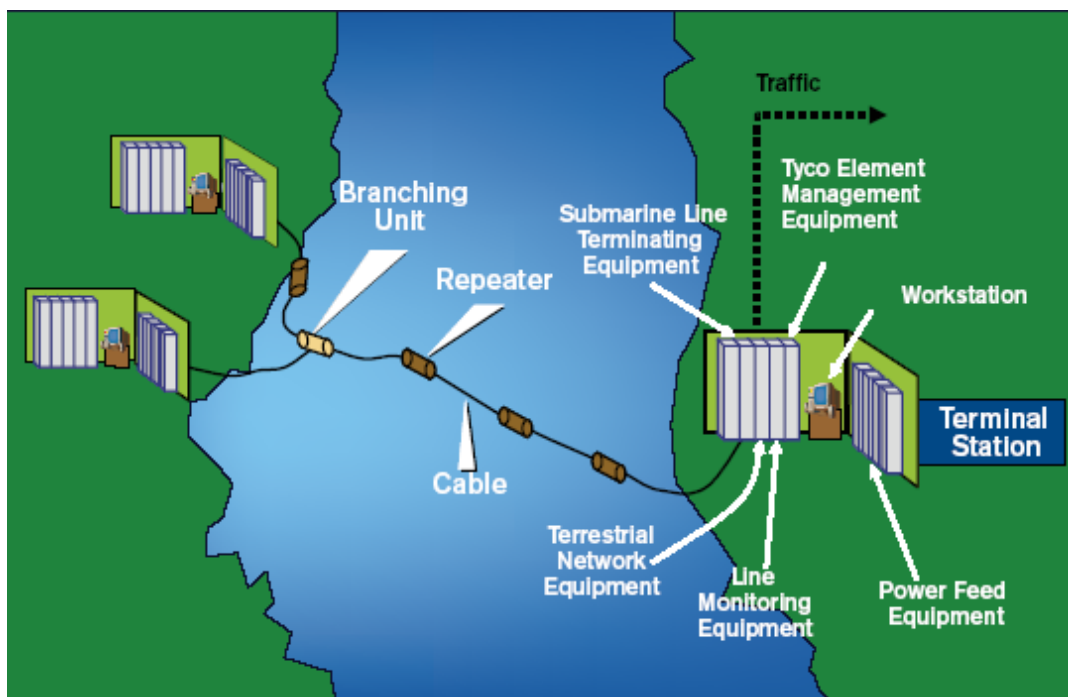


Рис. 1. Пример межконтинентальной оптоволоконной линии связи [1].

На рис. 1 представлен состав межконтинентальной оптоволоконной линии связи. Как правило, такая линия связи состоит из:

- ✓ Подводного оптоволоконного кабеля;
- ✓ Подводных оптических усилителей;
- ✓ Подводных разветвителей;
- ✓ Береговых станций энергоснабжения;
- ✓ Наземного сетевого оборудования;
- ✓ Системы контроля работоспособности подводной линии;
- ✓ Системы управления.

Ко всем агрегатам, располагающимся под водой, предъявляются повышенные требования по надёжности, качеству производства, ресурсу. Они многократно тестируются на предмет определения допустимых пределов эксплуатационных нагрузок и возможности противостоять внешним воздействиям.

Итак, прокладка подводной линия связи представляет собой сложную исследовательскую, инженерную и конструкторскую задачу, к решению которой привлекаются специалисты множества отраслей.

Данный обзор литературы не претендует на полноту освещения вопроса. Он посвящён обзору методов проведения работ по исследованию и проработке маршрута прокладки подводного оптоволоконного кабеля; свойствам и видам подводного оптоволоконного кабеля; береговым энергетическим станциям; оптическим усилителям.

В обзоре используются материалы статей, презентаций докладов, рекламных буклетов, оригинальных работ, а также материалы сети Internet.

### Различные виды подводных волоконно-оптических линий связи

Несмотря на всё разнообразие оптоволоконных линий связи их можно разделить на несколько типовых линий, каждая из которых характеризуется своими собственными характерными чертами.

Итак, подводные волоконно-оптические линии связи можно разделить на репитерные (с применением подводных оптических усилителей) и безрепитерные. Линии с применением оптических усилителей разделяются на магистральные трансокеанские (межконтинентальные) и прибрежные линии связи. Безрепитерные линии связи разделяются на прибрежные линии связи и линии связи между отдельными пунктами (между островами или между материком и островами, материком и буровыми станциями). Также существуют линии связи с применением удалённой оптической накачки.



Рис. 2. Магистральная трансокеанская волоконно-оптическая линия связи [2].

Для магистральных трансокеанских линий связи (рис.2) расстояние между терминальными станциями может составлять от 2000 до 13000 км. Число оптических усилителей на линии может составлять несколько сотен. Напряжение питания может составлять свыше 15 кВ.

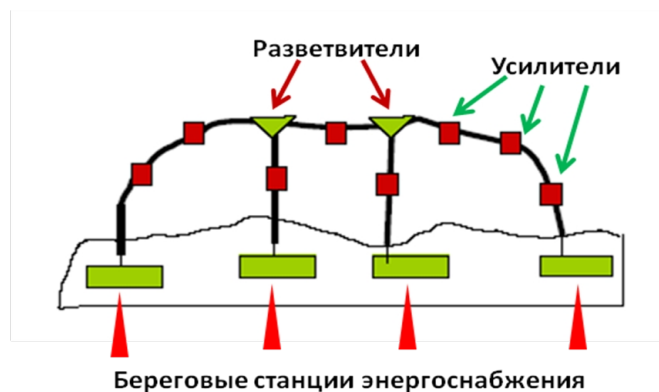


Рис. 3. Прибрежная волоконно-оптическая линия связи с применением разветвителей и оптических усилителей на линии [3].

Для прибрежных волоконно-оптических линий связи с применением подводных усилителей (рис.3) длина кабеля между береговыми станциями может составлять несколько сотен километров. Напряжение питания – порядка 5 кВ.

Для передачи информации на меньшие расстояния (до 200 км) используются безрепитерные линии связи с применением разветвителей (рис.4а). Для снижения стоимости применяются линии без использования подводных разветвителей (рис.4б). В таких линиях используется более дешёвый кабель и они не нуждаются в береговых станциях энергоснабжения (т.к. разветвителям требуется дистанционное управление), что значительно снижает стоимость линии. Управление трафиком в таких линиях осуществляется на береговых терминальных станциях.

Подобные линии связи часто применяются для соединения прибрежных населённых пунктов, а также в тех случаях, когда прокладка кабеля по суше является затруднительной в связи со сложным рельефом местности или возможным повреждением прибрежной экосистемы (например, сложный горный ландшафт или прибрежный природный заповедник).

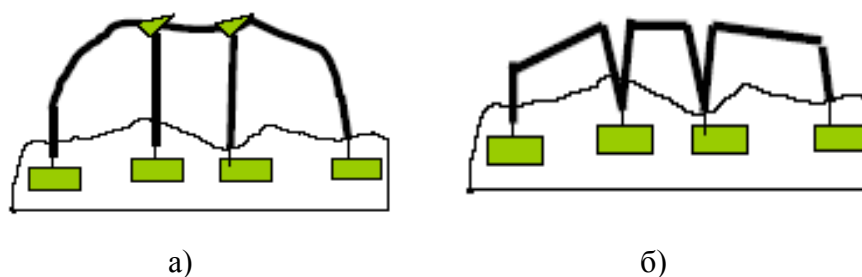


Рис. 4. Прибрежные волоконно-оптические линии связи без подводных оптических усилителей с применением разветвителей (слева) и без применения разветвителей (справа) [3].

Для связи между островами и буровыми платформами, а также для национальных сетей островных государств (например, Багамские острова, Индонезия), удалёнными друг от друга на расстояние до 400 км используются безрепитерные системы (рис.5), а также системы с удалённой рамановской накачкой.

В последнее время начали использоваться системы с удалённой оптической накачкой (ROPA – Remote Optically Pumped Amplifier), в которых в расположенном на дне кабеле устанавливается активное эрбиевое волокно длиной до 30 м, накачиваемое посредством рамановских усилителей (рис.6). В зависимости от скорости передачи данных длина такой линии может составлять 400 - 500 км.

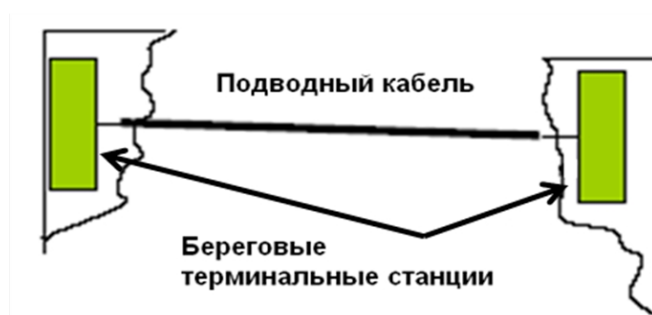


Рис. 5. Безрепитерная линия связи [3].



Рис. 6. Безрепитерная линия связи с применением ROPA (Remote Optically Pumped Amplifier) и удалённой рамановской накачки [3].

Итак, из всего вышеописанного видно, что общей характеристикой всех подводных оптоволоконных линий связи (как репитерных, так и без репитерных), является обязательное наличие подводного оптоволоконного кабеля и береговых терминальных станций.

Если в линии имеются подводные усилители и/или разветвители, то тогда на береговых терминальных станциях обязательно имеется оборудование для их энергоснабжения (PFE - Power Feeding Equipment).

## Планирование, проработка и прокладка подводных волоконно-оптических линий связи

### Планирование маршрута прокладки кабеля

При планировании маршрута прокладки кабеля для подводной оптоволоконной линии связи необходимо принимать во внимание различные факторы. Во-первых, маршрут должен быть экономически выгодным и безопасным, так как использование различных способов защиты кабеля приводит к увеличению стоимости проекта и увеличивает срок его окупаемости. Во-вторых, в случае прокладки кабеля между разными странами, необходимо получить разрешение на использование прибрежных вод той или иной страны. Так же необходимо получить все необходимые разрешения и лицензии на проведение кабелеукладочных работ [4].

Следующим этапом является исследование потенциальных рисков при укладке кабеля. Проводится предварительный анализ маршрута, исследуется морфология и геология морского дна (сейсмическая активность, подводный вулканизм, поля песочных волн (sandwave, барханы), выход скальных пород, подводные оползни и обвалы), океанография и метеорология (Рис.7).

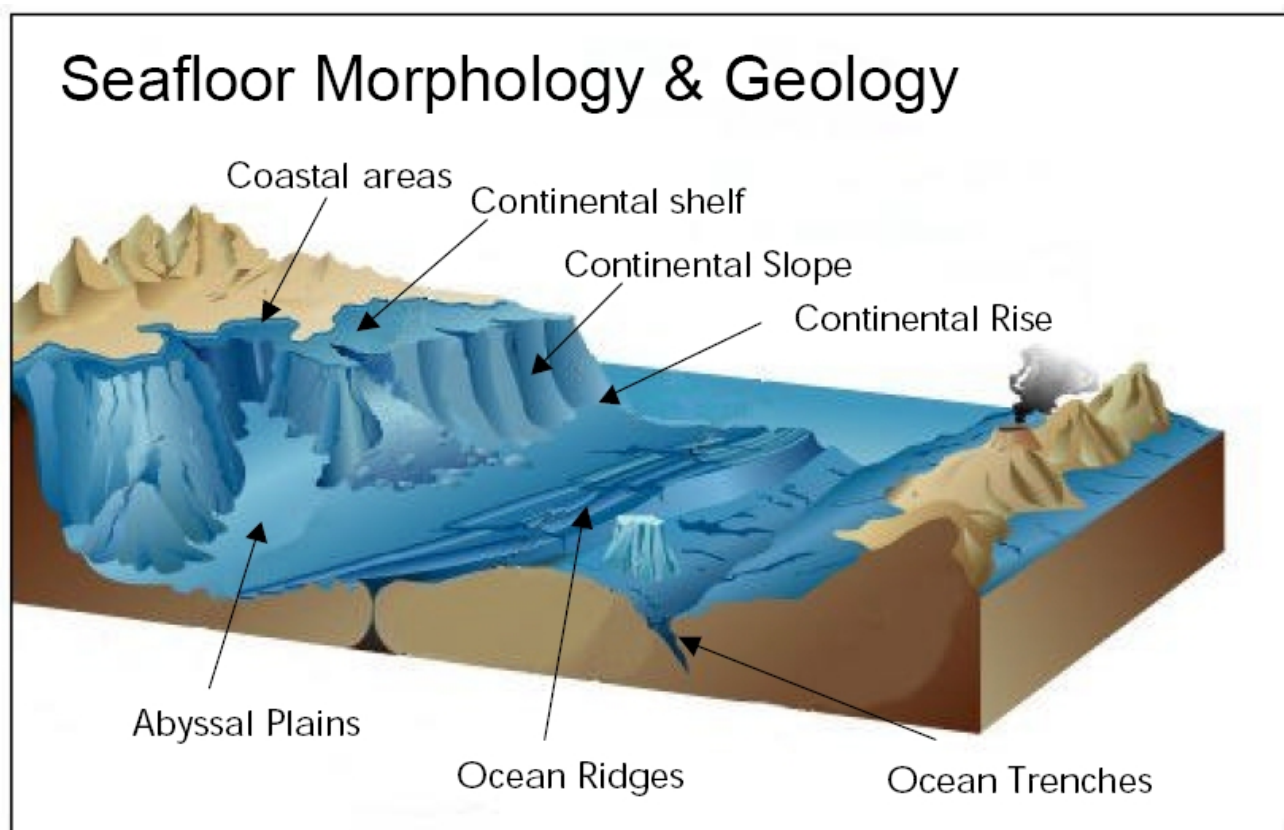


Рис. 7. Морфология и геология морского дна [4].

Метеорология важна при прокладке кабеля, особенно в высоких широтах и открытом океане, так как неблагоприятные погодные условия могут существенно задержать сроки прокладки кабеля.



Геологическое исследование маршрута прокладки кабеля должно определить топографию морского дна и дать информацию о морском грунте. Качество исследования грунта должно быть обеспечено образцами грунта и исследованиями донных отложений.

Также, может возникнуть необходимость проведения глубоководного бурения, с целью предоставления более полной информации о морском дне.

Исследование маршрута прокладки включает в себя геофизические (измерение глубины моря, сканирование поверхности дна гидролокатором бокового обзора (Рис.8), профилирование дна) и геотехнические (возможность и способы бурения) исследования. Также проводится определение плотности грунта.

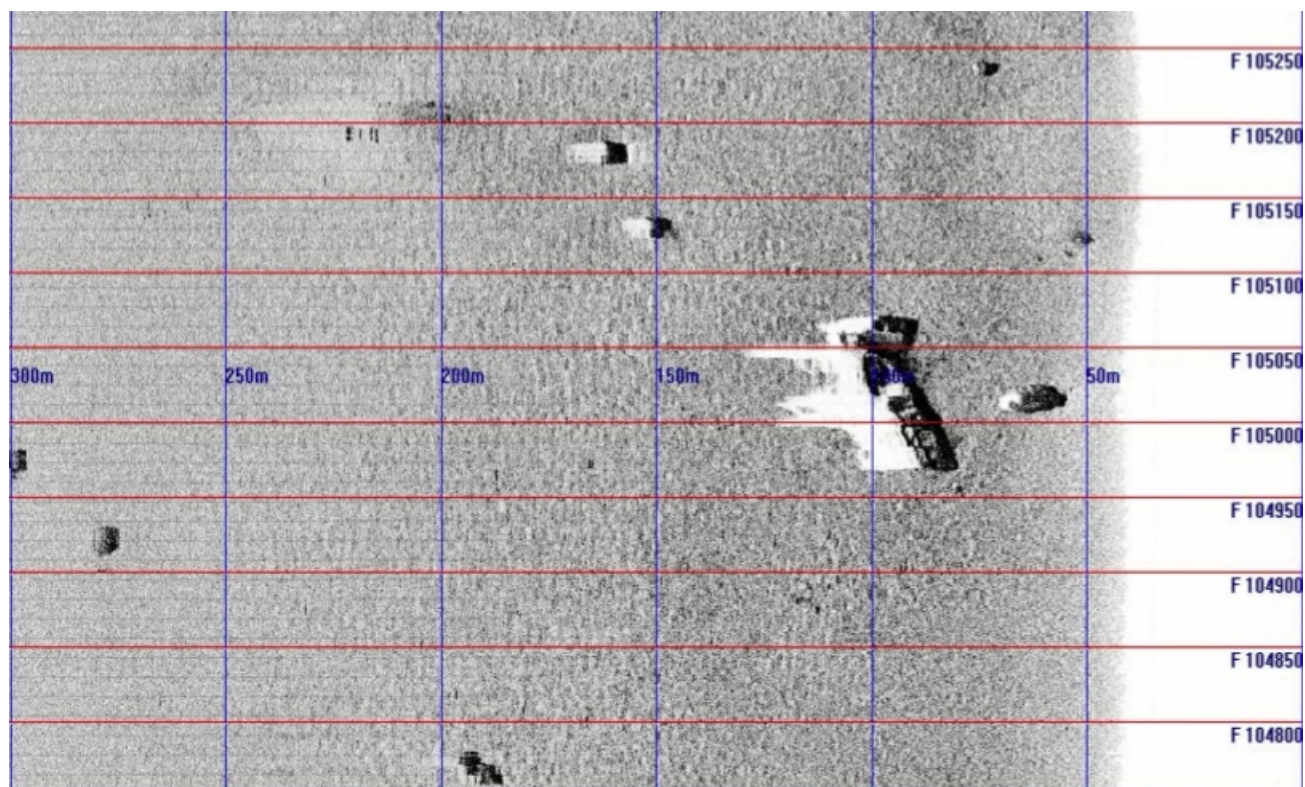


Рис. 8. Пример сканирования поверхности океана гидролокатором бокового обзора. На грунте, на расстоянии 100 м от предполагаемого маршрута прокладки кабеля, видны останки погибшего корабля и крупные валуны [5].

Для обеспечения стабильной работы кабеля в мелководных районах проводится определение средней зимней/летней температура морского дна в месте прокладки кабеля (на большой глубине температура дна в течение года остаётся приблизительно постоянной).

Особое внимание следует уделить возможным отклонениям от географического маршрута прокладки кабеля. Эти отклонения приводят к увеличению длины кабеля при рассчитанных географических расстояниях и проявляются при обходе волнообразных образований морского дна и при небольших отклонениях от реального (географического) маршрута прокладки кабеля.

Для относительно плоского дна степень отклонения принимается равной 0,35% для кабеля, укладываемого в траншею. Эта степень отклонения возрастает до 0,8% в областях, где кабель укладывается непосредственно на поверхность. Эти значения применимы для континентального шельфа, но на континентальном склоне и в центральной части океанского хребта или в районе впадин увеличивается. Также к увеличению длины кабеля наблюдается в местах со значительным градиентом морского дна [6].

При проведении работ в прибрежных областях необходимо принимать во внимание глубины, на которых может работать корабль-кабелеукладчик. Эти глубины обычно составляют 15-20 м [6, 7].

После анализа всех факторов, влияющих на возможность повреждения кабеля происходит выработка рекомендаций для безопасного маршрута прокладки и проводится выбор способов защиты кабеля от внешних воздействий.

Всего существует два основных способа защиты кабеля: бронирование и укладка кабеля в траншею, выкапываемую на дне.

Кратко рассмотрим каждый из видов этой защиты более подробно:

### 1. Бронирование кабеля.

Бронирование обеспечивает более низкий уровень защиты кабеля от внешних воздействий, но зато предоставляет высокий уровень доступности к кабелю (это особенно важно при проведении ремонтно-восстановительных работ).

Более подробно методы бронирования кабеля и их характеристики будут рассмотрены ниже.

### 2. Закапывание кабеля в траншею.

Закапывание кабеля обеспечивает высокий уровень защиты, но значительно снижает доступность к кабелю. Также закапывание кабеля приводит к снижению уровня защиты при движении донных отложений (подвижка грунта) [4, 8]. При прокладке кабеля с берега практикуется укладка кабеля в специальные трубы (см. ниже).

На континентальном шельфе наиболее надёжная защита может обеспечиваться посредством зарывания кабеля в траншею, глубина которой находится ниже проникновения какой-либо внешней опасности. Эффективность зарывания кабеля в траншею представлена на рис.4.

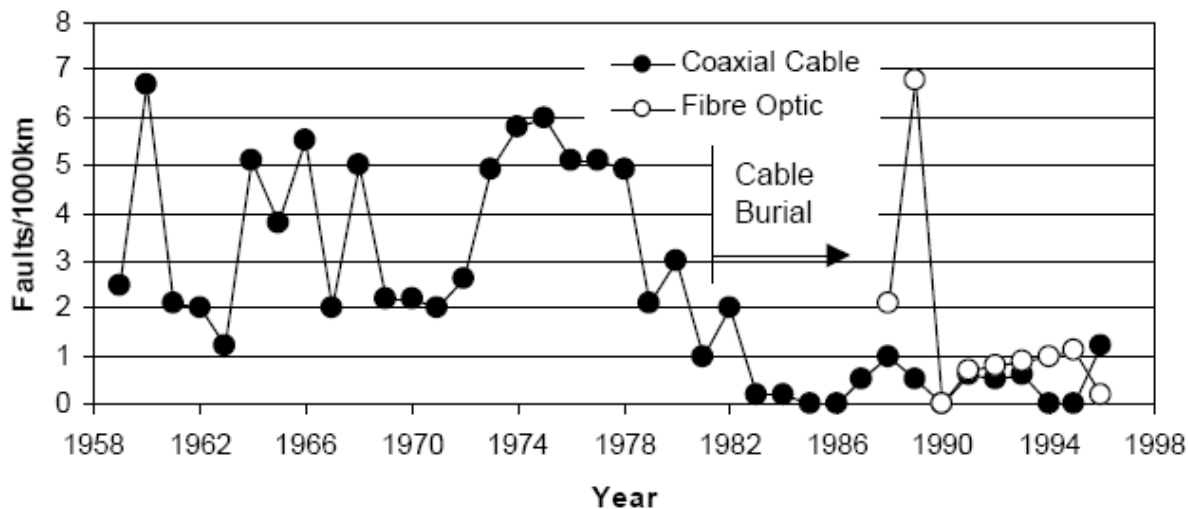


Рис. 9. Эффективность применения засыпания кабеля [6].

Рисунок 9 показывает значительное снижение поломок в кабельных системах после широкого распространения зарывания кабеля, которое началось активно применяться с 1980 года (пик поломок оптоволоконного кабеля в 1989 году связан с особой проблемой одной из кабельных систем, проложенных через поле песочных волн (барханы)).

Однако, несмотря на достоинства, зарывание кабеля также приводит к проведению дополнительных исследований морского дна с целью определения оптимальной глубины закладки кабеля, методов рытья траншеи, условий и состояния грунта.

По-возможности желательно разрабатывать маршрут прокладки кабеля таким образом, чтобы требовалась минимальная длина участков с применением бронированного кабеля и зарывания кабеля в траншею. Это связано с высокой стоимостью, как производства кабеля, так и укладки кабеля, а также возможностью последующих ремонтно-восстановительных работ.

Весьма важно сделать правильный выбор при определении места для береговой станции энергоснабжения и выбор маршрута прокладки кабеля от станции энергоснабжения до берега.

Бухта, где будет проводиться укладка кабеля с берега в море, должна обеспечивать возможность применения тяжёлой техники (в случае необходимости), иметь удобную топографию морского дна (необходимо избегать резких и пересечённых склонов, морское дно должно быть песочным, глинистым, илистым, но не скалистым). Также нужно принимать во внимание и метеоусловия. Необходимо учесть близость расположения других кабелей или трубопроводов, возможность пересечения с ними. Так же следует рассмотреть возможность параллельной укладки кабеля (параллельно уже существующему кабелю).

Особенно важно, чтобы корабль-кабелеукладчик мог легко подойти к берегу, потому что в противном случае придётся использовать буксиры и прочие вспомогательные средства, мало подготовленные для проведения работ по укладке подводного оптоволоконного кабеля.

При проведении работ на берегу необходимо получить разрешение владельца прибрежной зоны.

Параллельно с проработкой маршрута необходимо проведение разработки надёжных методов извлечения, ремонта и восстановления кабеля в случае поломки.

Прокладка кабеля в море производится посредством специального корабля-кабелеукладчика (Рис. 10).



Рис. 10. Пример корабля-кабелеукладчика [1].

Для систем с небольшим расстоянием между источником и приёмником (например, между Великобританией и материковой Европой) выгодно использовать кабели без оптических усилителей и без токоведущей жилы. Это связано с тем, что расстояние между источником и приёмником менее 350 км. В совокупности это (кабель без токоведущей жилы и отсутствие оптических усилителей) приводит к значительному снижению стоимости прокладки кабеля и как следствие его быстрой окупаемости [6].

Также, в случае поломки, учитывая глубины, на которых проложен такой кабель, возможно провести быстрый восстановительный ремонт с минимальными затратами на специальное оборудование.

## Прокладка подводного оптоволоконного кабеля в прибрежных районах

Методика прокладки кабеля в прибрежной части и вывода кабеля из моря на берег резко отличаются от методики укладки кабеля на глубине. При работе на мелководье и в прибрежной части возможно привлечение водолазов.

После водолазного обследования проводится расчистка дна морского участка трассы на протяжении выполняемых работ.

Во избежание повреждения пляжа бухты, на земной поверхности методом горизонтального бурения по направлению к морю пробуривается скважина (Рис.11). Более традиционные методы, такие как копание ям (канал, котлованов, траншей) и укладка труб или же техника непосредственного бурения в большинстве случаев менее предпочтительны, так как могут стать причиной повреждения окружающей среды или каких-либо разрушений.

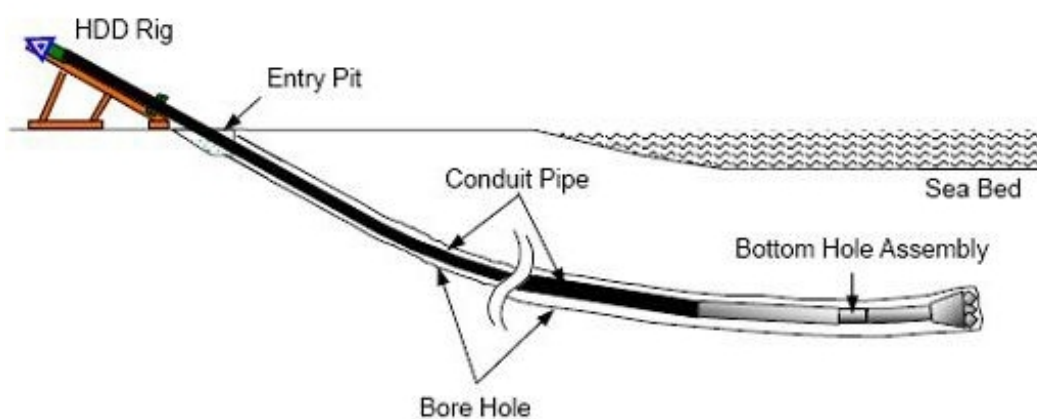


Рис. 11. Горизонтальное бурение [5].

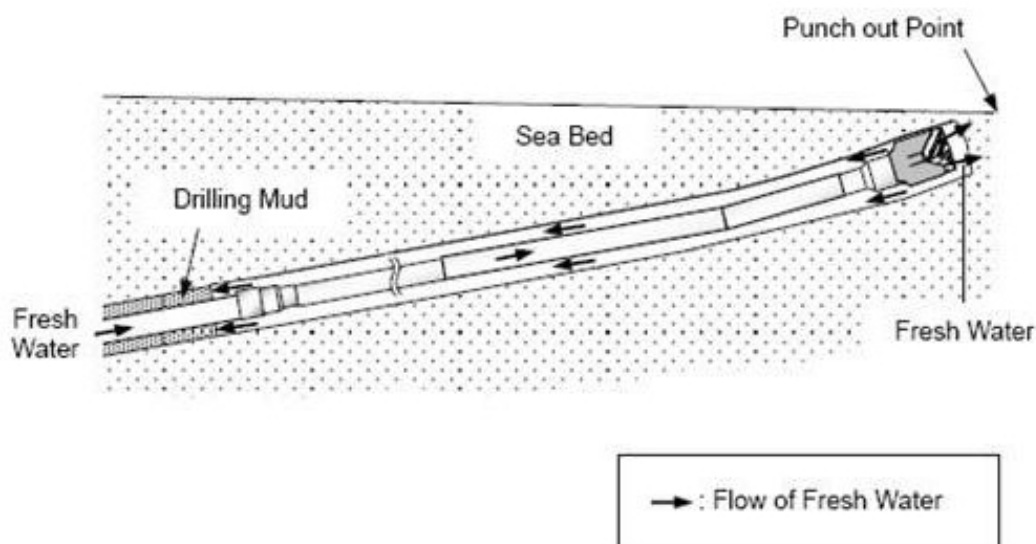


Рис. 12. Вытеснение буровой грязи (ила, тины) пресной водой [5].

Выходная точка скважины находится приблизительно на 15-20 метровой глубине, предоставляя кораблю-кабелеукладчику необходимую свободу для работы и маневрирования.



Откачка буровой грязи и очистка скважины осуществлялась посредством пресной воды (Рис.12).

Для повышения надежности и безопасности эксплуатации подводной волоконно-оптической линии связи, прокладка кабеля с берега в море осуществляется в защитных пластиковых трубах полиэтилена высокого давления (ПЭВД) диаметром 90 - 110 мм.

Траектория скважины горизонтального бурения нуждается в точном контроле для уверенности, что итоговая скважина будет представлять собой простую кривую в двух измерениях (то есть не будет содержать сложных, составных кривых).

В скважину затягиваются полиэтиленовые трубы, в которые уложены капроновые проводники. В результате проведения этих работ строится кабельный канал, который проходит на глубине до 20 метров в грунте и надежно защищен от волнового размыва берега.

С корабля-кабелеукладчика подаётся стальной трос и соединяется с капроновым проводником, уложенным в кабельном канале, к другому концу стального троса крепится кабель. С помощью троса кабель затягивается в защитную ПЭВД трубу. Конец кабеля, вытянутый на берег, укладывается на береговом креплении.

Работы по протаскиванию одного кабеля на берег сквозь защитную ПЭВД трубу могут занимать нескольких часов. После этого у выхода из кабельного канала на грунт опускается подводный буксируемый кабелеукладчик (плуг). Оптоволоконный кабель заправляется в кабельный канал кабелеукладчика и к плугу крепится буксирный трос корабля-кабелеукладчика. После чего начинается укладки кабеля с заглублением в грунт на глубину от 1 до 3 метров от окончания защитного ПЭВД кожуха до выхода из бухты. После укладки кабеля траншея зарывается.

В процессе прокладки постоянно контролируется величина заглубления кабеля в грунт, оптические и электрические параметры кабеля.

По завершении прокладки проводятся оптические и электрические измерения проложенных участков кабеля для подтверждения неизменности его свойств [5,7].

### **Прокладка подводного оптоволоконного кабеля в открытом море**

При укладке оптоволоконного кабеля используется специальная кабелеукладочная машина (рис.13), размещённая на корабле-кабелеукладчике. Эта машина с высокой точностью контролирует скорость укладки кабеля. Обычно она представляет собой линейную машину по укладке кабеля, которая включает в себя последовательность пар резиновых колёс, которые удерживают кабель, контролируют его натяжение и укладывают его с определённой скоростью. Также применяется гусеничная машина для укладки кабеля (Рис.14).

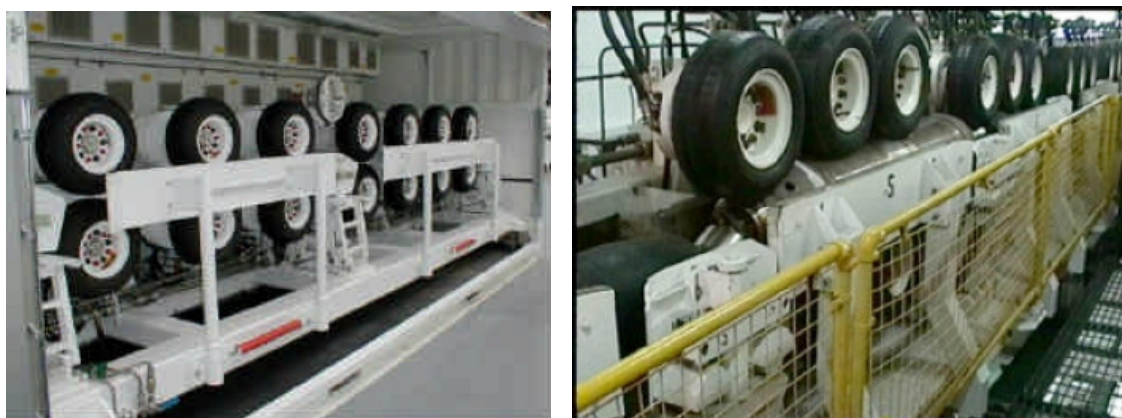


Рис. 13. Линейная колёсная машина по укладке кабеля [6, 9].



Рис. 14. Гусеничная машина по укладке кабеля (через машину пропускается блок оптического усилителя) [9].

В мелководных областях машина физически кладёт кабель на дно, в то время как в глубоководных районах кабель необходимо удерживать [6].

При укладке кабеля в глубоководных районах особенно важно принимать во внимание течения. Это связано с тем, что они не только могут серьёзно повлиять на местоположение корабля, но также они воздействуют на положение кабеля, когда он касается морского дна. Например, на глубоководных абиссальных плато кабель может укладываться на скорости более 8 узлов, причём точка касания кабеля будет находиться в нескольких километрах (рис.15) позади корабля-кабелеукладчика. Любые течения потенциально могут переносить кабель на некоторое расстояние в сторону. И это необходимо принимать во внимание [6].

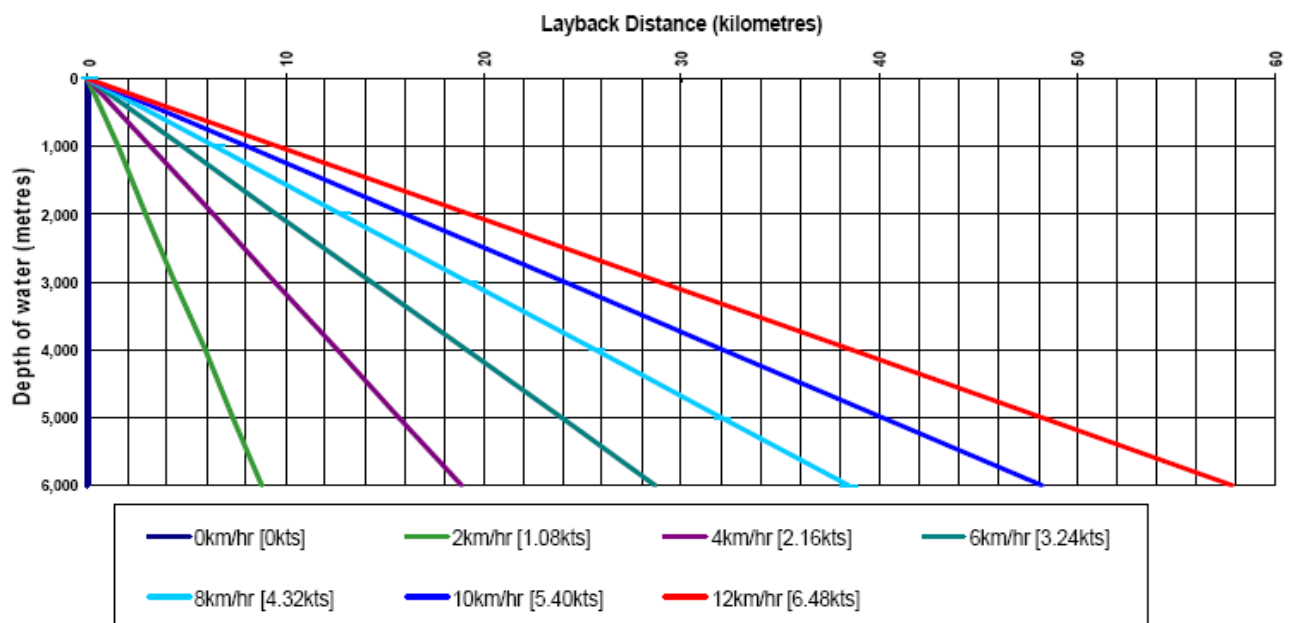


Рис. 15. Зависимость точки касания кабелем (LW-кабель) дна от глубины места (прямые соответствуют разным скоростям движения корабля-кабелеукладчика) [4].

Для решения этой проблемы существуют специальные методы и программы, позволяющие существенно повысить точность укладки кабеля.

Также при прокладке кабеля нужно избегать «срезания углов» и отклонения от выбранного маршрута прокладки. Иначе это может привести к укладке кабеля в область, исследование которой не проводилось. В свою очередь, эта область может представлять собой зону потенциального риска для кабеля. Также нужно особенно внимательно укладывать кабель в областях, где уже ранее проложены кабели (по возможности, надо избегать таких областей ещё на стадии предварительной проработки маршрута).

Наиболее экономичный способ укладки кабеля – укладка его непосредственно на морское дно. Однако при этом существуют внешние угрозы, которые могут привести к повреждению кабеля. Следовательно, оптимальным методом защиты кабеля будет зарывание кабеля в грунт. Это можно сделать, как и после укладки кабеля на грунт, так и во время укладки.

Оборудование, используемое для зарывания кабеля в грунт, разделяется на три категории (рис.16):

- ❖ Плуг для укладки кабеля;
- ❖ Оборудование для струйного постукладочного формирования траншеи;
- ❖ Трактор-кабелеукладчик (колёсный или гусеничный).

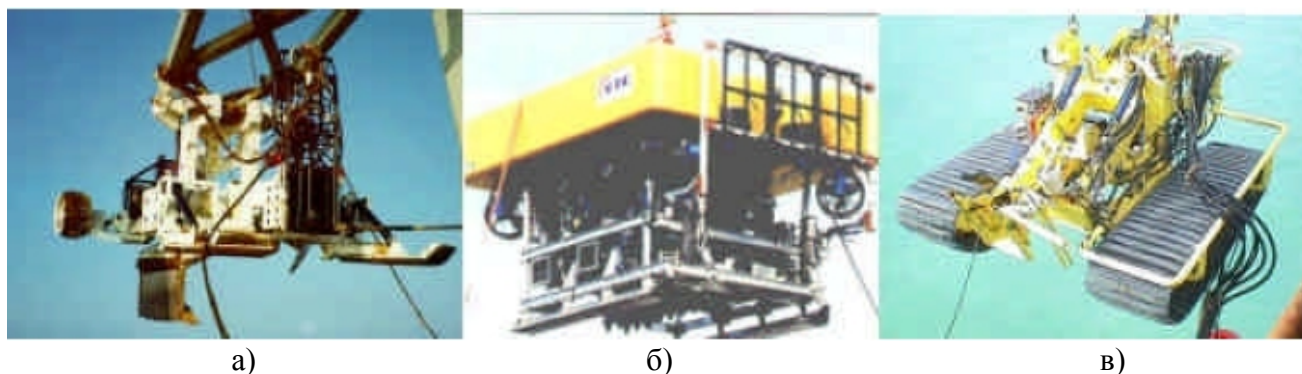


Рис. 16. Плуг для рытья траншея для кабеля (а), струйный формирователь траншеи (б), трактор-кабелеукладчик (в) [6].

Если зарывание кабеля невозможно, то применяются другие меры по защите кабеля: укрытие кабеля специальными плитами (покрытием) или засыпание кабеля камнями.

Типичная глубина траншеи для укладки кабеля составляет от 0,6 до 1,0 м.

Рытьё траншеи (вспашка) один из наиболее эффективных методов по зарыванию кабеля. Рабочая скорость составляет 1000 м/час (с возможностью увеличения или уменьшения скорости) в большинстве грунтов.

Оборудование для струйного постукладочного формирования траншеи посредством водяной струи используется там, где не может применяться плуг (область пересечения кабелей, прибрежные зоны, обрывистые районы). Обычно этот способ медленнее (от 200 до 1000 м/час); он ограничен применением в областях с мягким песочным грунтом или глинозёмом. Для формирования траншеи необходимой глубины может понадобиться не один проход, также этот метод зависит от природы материала для засыпки траншеи.

Трактор является наиболее медленным устройством из всех вышеперечисленных. Он используется для формирования траншеи в жёстких материалах, обычно в скалах и используется только в особых случаях.

Как было сказано выше, обычно глубина траншеи для укладки кабеля составляет от 0,6 до 1 м. Однако в некоторых местах требуется большая глубина — до 3 метров (мягкий глинозём или места для якорных стоянок кораблей) [1,3].



### Энергетическое оборудование для подводной линии связи

Оборудование для обеспечения электрической энергией усилителей подводной оптоволоконной линии связи располагается на специальных береговых терминальных станциях.

На каждой станции имеется источник высокого напряжения. На станции «А» плюс источника подключается к токоведущей жиле подводного кабеля, а минус идет на землю. На станции «Б» к жиле кабеля подсоединяется минус и соответственно плюс заземляется. Таким образом создаётся цепь постоянного электрического тока, в которой ток от станции «А» к станции «Б» идёт через подводный кабель, а от станции «Б» к станции «А» через землю (рис.17).

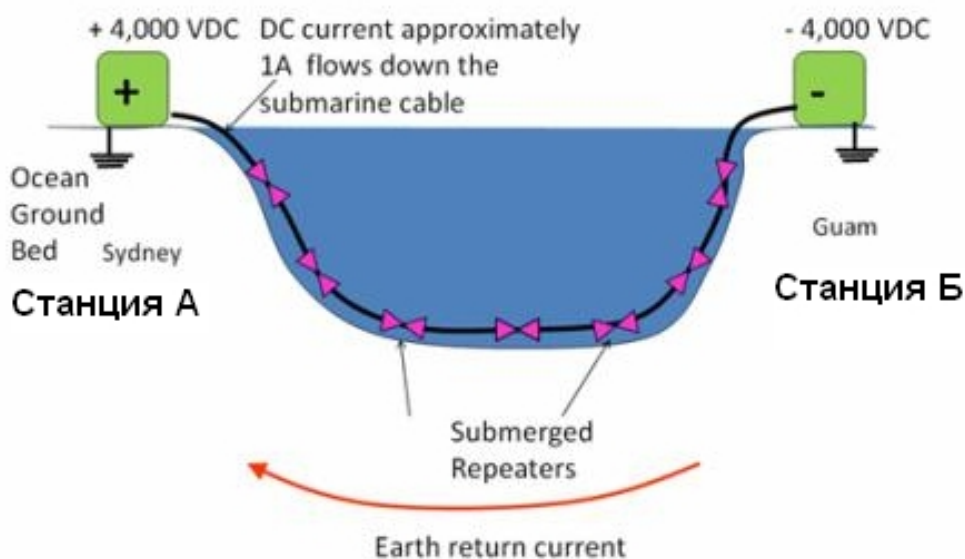


Рис. 17. Пример питания постоянным током подводной оптоволоконной линии связи РСС-1 Сидней – Гуам [5]

При прокладке кабеля РСС-1 Сидней – Гуам для снижения сопротивления земли в прибрежной зоне до уровня грунтовых вод были пробурены скважины, в которые устанавливались длинные прочные электроды, которые повышали проводимость земной поверхности [5].

Для питания подводных усилителей применяются высокий (свыше 10 кВ), средний (свыше 5 кВ) и низкий (менее 5 кВ) уровни постоянного выходного напряжения в зависимости от протяжённости оптоволоконной линии связи, мощности, потребляемой усилителями, и числа усилителей. Например, для трансокеанских расстояний (Trans-Pacific distances) используется постоянное напряжение вплоть до 12,5 кВ и токи до 1,6 А для питания четырёхволоконной оптической пары [1].

Напряжение и мощность источников питания рассчитываются исходя из параметров линии. Учитываются такие характеристики, как: длина линии, мощность, потребляемая в каждом узле (подводном усилителе), количество узлов, удельное сопротивление токоведущей жилы.

Постоянный ток для питания подводных оптических усилителей передаётся через оптоволоконный кабель, в котором располагается специальная токоведущая жила, выполненная из меди.

Системы энергоснабжения должны обладать высокой надёжностью и очень стабильным постоянным напряжением; на передающих станциях должны присутствовать системы локализации ошибок и неисправностей. Также системы энергоснабжения нуждаются в специальных системах контроля тока и напряжения (не хуже  $\pm 0,5\%$ ) для предотвращения скачков, которые могут вывести из строя подводный усилитель и, соответственно, всю линию. Необходимо предусмотреть резервирование системы.

Оборудование терминальной береговой станции должно размещаться в отапливаемых помещениях и быть независимым от метеоусловий.

### Кабели для линий подводной оптоволоконной связи

Подводные волоконно-оптические кабели предназначены для передачи оптических сигналов на значительные расстояния и осуществления связи через протяжённые водные преграды (моря — океаны). Они должны обладать высокой механической прочностью на разрыв и иметь надёжные влагостойкие покрытия. Для подводной связи также важно, чтобы оптическое волокно обладало малым затуханием и дисперсией, большой информационно-пропускной способностью.

### Внешние факторы, приводящие к повреждению подводных кабелей

При разработке маршрута прокладки подводного кабеля необходимо принимать во внимание различные внешние воздействия, которые могут привести к преждевременному выходу кабеля из строя. Из числа основных факторов следует выделить [4]:

- Рыбная ловля;
- Повреждения, наносимые якорями кораблей;
- Повреждения от воздействия жителей морской фауны;
- Дноуглубительные работы, установка труб и бурение;
- Геологическая активность (подводные землетрясения, оползни);
- Воздействия со стороны кораблей кабелеукладчиков;
- Провисание кабеля;
- Другие причины (Рис.18).

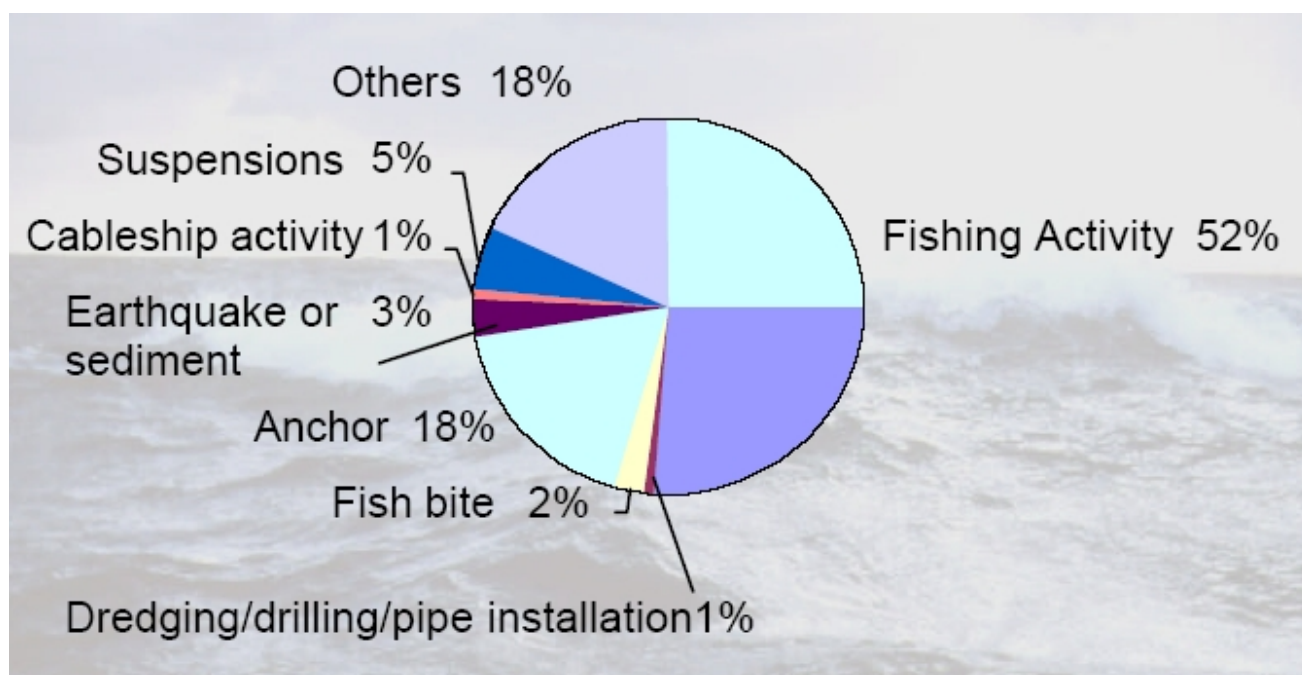


Рис. 18. Внешние причины, приводящие к повреждениям кабеля в Атлантическом океане [6].

Как видно из рисунка, более 75% повреждения подводных кабелей (в том числе и оптоволоконных) приходится на воздействие со стороны человека.

При разработке маршрута прокладки кабеля можно свести до минимума риски, связанные с геологической активностью. Однако для уменьшения количества повреждений,

связанных с воздействием человека, и увеличения резистивной способности применяют специально разработанные защищённые кабели. Защита кабелей обычно применяется в областях высокого риска.

Также используется зарывание кабеля в специальные траншеи глубиной 0,6-1 м, которые выкапывает кабелеукладчик при укладке кабеля на дне (см. выше).

### Конструкция оптических кабелей для подводной линии связи

Оптоволоконные кабели для подводных линий связи обычно состоят из оптического сердечника, токоведущей жилы и внешних покровов. В трубчатом сердечнике располагаются оптические волокна (от 4 до 12 штук), которые должны соответствовать рекомендациям G.665 МСЭ-Т и категории В4 МЭК 60793-2-50. Внешние покровы предназначены для защиты кабеля от внешних воздействий, а токоведущая жила необходима для обеспечения питания постоянным током подводных усилителей.

Существует несколько видов конструктивной защиты подводного кабеля от внешних воздействий, в соответствии с этим промышленностью предлагаются кабели различных типов [1, 6].

Тип кабеля	Характеристики	Глубина укладки, м
Лёгкий кабель (Light weight) LW	Глубоководный кабель для областей, где отсутствует риск значительных повреждений	< 8000
Защищённый лёгкий кабель (Light weight protected) LWP	Лёгкий кабель с защитой от механических повреждений. Подходит для областей с пересечённой местностью.	< 3500
Бронированный лёгкий кабель (Single armour light) SLA	Относительно лёгкий кабель для областей, где возможно зарывание кабеля в траншею и риск внешних повреждений минимален.	< 1500
Бронированный кабель Single armour (SA)	Для областей, где возможно ограниченное зарывание кабеля.	< 1500
Дважды бронированный кабель Double armour (DA)	Сильно защищённый кабель для применения в прибрежных областях и местах, где зарывание кабеля невозможно и большой риск повреждения кабеля тралами и сетями рыболовных судов.	< 500
Кабель для прокладки в скалах Rock armour (RA)	По свойствам схож с дважды бронированным кабелем, но с повышенным сопротивлением и более гибкий, предназначен для укладки на волнистом каменном дне и в областях с высокой рыболовной активностью.	< 200

Также существуют кабели для специальных приложений (SPA, Special Application), предназначенные для укладки на глубинах до 6,500 метров в областях с частично скальным дном и высокой вероятностью повреждения кабеля представителями морской фауны. На рис.

19 и 20 [6, 10] представлены фотографии наиболее типичных видов кабелей различного уровня защиты.



Cable Armouring (DA, SA, LWP, LW)

Рис. 19. Различные виды защиты оптоволоконных кабелей [6].



Рис. 20. Бронированный, облегчённый и дважды бронированный оптоволоконные кабели. В качестве внешней защитной оболочки используется повив из полипропиленовой пряжи [10].

Современная промышленность также выпускает и специальные типы кабелей для подводных оптоволоконных сетей без усилителей — в таких кабелях отсутствуют токопроводящие жилы, и они прокладываются на малые расстояния (рис.21) [11].

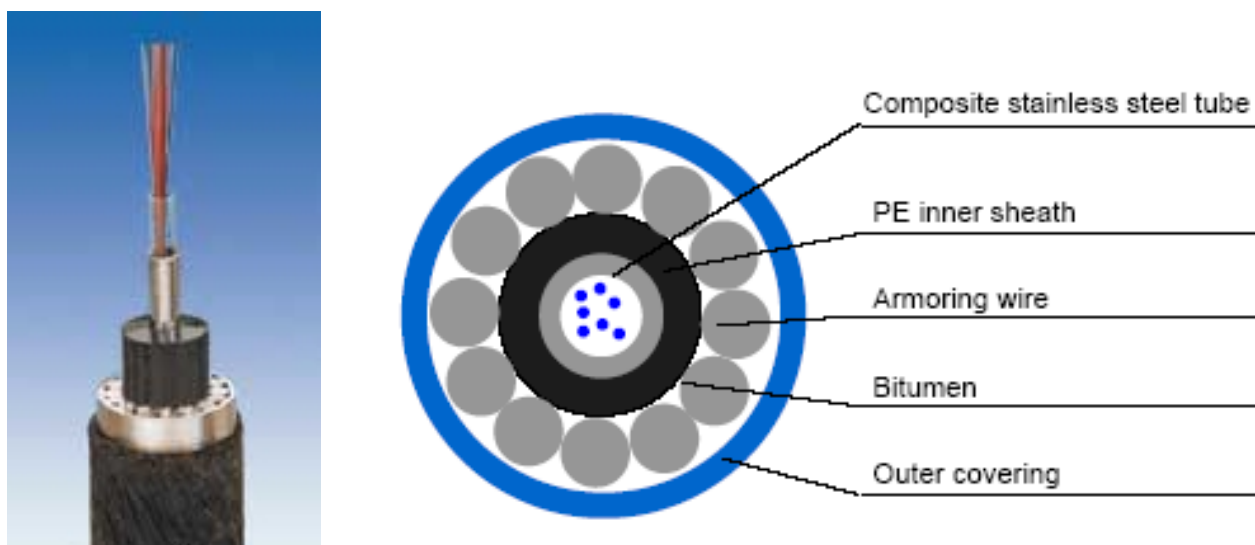


Рис. 21. Пример бронированного кабеля без токопроводящей жилы [11].

Бронированные кабели обычно включают в свою конструкцию: выполненную из нержавеющей стали металлическую трубки (трубчатый металлический сердечник), в которой находятся оптические волокна (пространство между волокнами заполняется гидрофобным компаундом), пластиковой оболочки, повива медных токопроводящих жил, меднополиэтиленовой оболочки, однослойного (в случае дважды бронированного кабеля двухслойного) повива круглых стальных оцинкованных (нержавеющая сталь) проволок, битумного покрытия и наружного повива из нитей светостабилизированной кручёной полипропиленовой пряжи (рис. 22, 23).

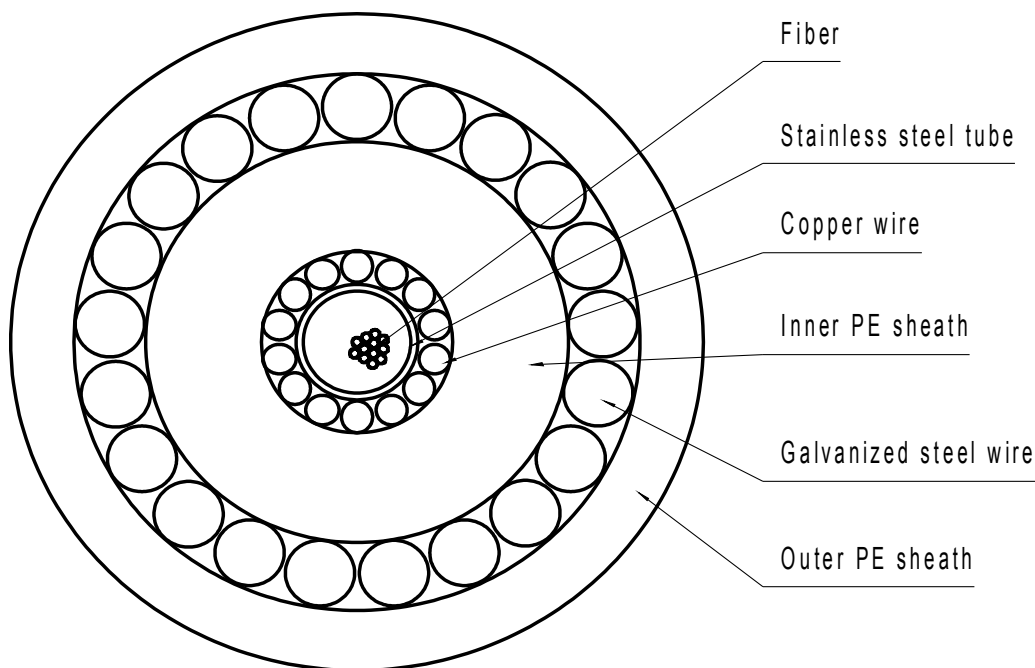


Рис. 22. Поперечный разрез бронированного оптоволоконного кабеля [11].



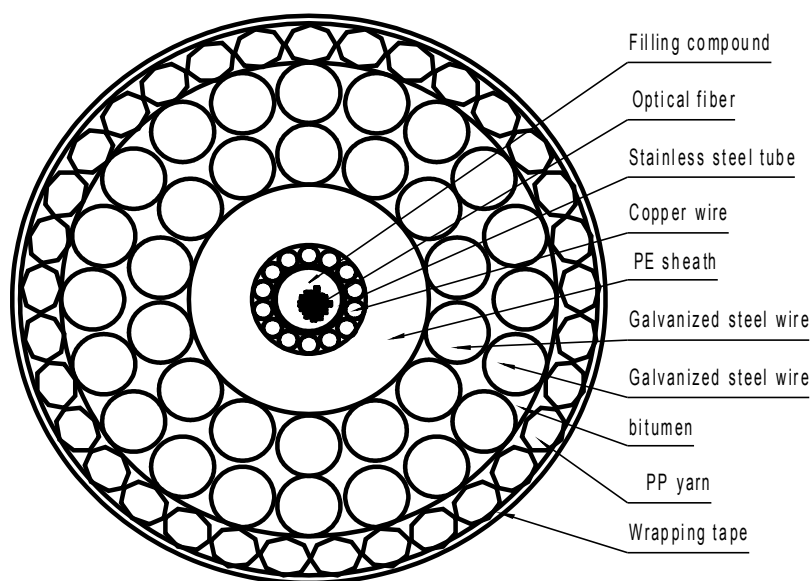


Рис. 23. Поперечный разрез дважды бронированного оптоволоконного кабеля [11].

Так как оптоволоконный кабель для подводной линии связи эксплуатируется в водной среде, то для него весьма актуальна защита от влаги.

Проблему защиты от влаги можно разделить на два независимых явления, связанных с наличием водорода, и приводящих к отказам системы.

Первое явление – чисто механическая зависимость прочности оптического волокна от количества влаги на его поверхности. Это могут быть как гидроксильные группы OH, так и просто вода  $H_2O$ . Таким образом, срок службы из-за проникновения влаги может быть уменьшен с расчетных до 7-10 лет. От присутствия влаги на поверхности волокна спасает полное заполнение гидрофобным компаундом [12].

Второе явление, заставляющее помнить о “водородной проблеме”, это явление роста оптического затухания волокна из-за поглощения атомами водорода. При этом, если кабель, волокна которого при укладке имели погонное затухание 0,19-0,22 дБ/км, не защищен от проникновения влаги и водорода, и эксплуатируется в условиях их постоянного воздействия, то после 3-5 лет эксплуатации затухание может вырасти на несколько десятых децибела.

Конкретные значения прироста и сроки его появления зависят от типа волокна и концентрации водорода, но важно отметить, что даже прирост 0,05 дБ на магистральной линии связи, приведет к необходимости реконструкции линии.

Применяемая защита от воздействия высокоактивного атомарного водорода возможна лишь с помощью оболочки выполненной из металлизированной фольги или алюмополиэтиленовой ленты, т.е. кристаллической решетки металла. Дело в том, что диффузия сквозь кристаллическую структуру атомов и молекул химических элементов пренебрежимо мала (Рис. 24). В глубоководных кабелях применяют специальную алюминиевую или медную трубку. Применение металлического слоя вызывало трудности на первых порах кабельного производства, связанные с тем, что полимеры, находящиеся внутри защитного металлического экрана, разлагаясь, выделяли водород, который не мог выйти наружу, и его концентрация с годами накапливалась и становилась выше критической, что приводило к росту затухания оптических волокон [12].

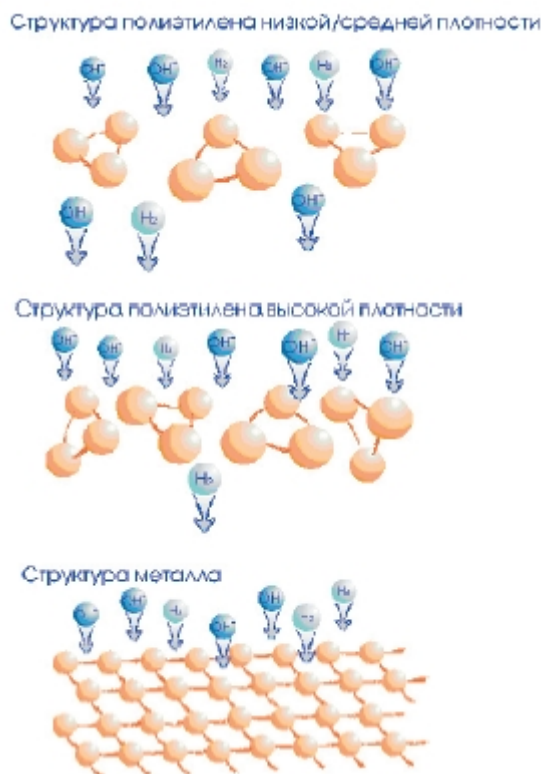


Рис. 24. Диффузия водородосодержащих соединений через защитную оболочку [12].

В последние годы производство компонентов было перестроено таким образом, чтобы химические элементы не разлагались в течение всего срока эксплуатации кабелей. Также элементы подвергаются принудительной дегидратации, что уменьшает число ионов воды и ведет к пониженному изначальному содержанию водорода. Однако такие химические материалы, как правило, дороже, требуют специальных технологий переработки и имеют меньший срок хранения [12].

При проникновении в оптический кабель вода будет растекаться по сердечнику, и воздействовать на стекло, уменьшая тем самым срок службы волокон. Повышающаяся в результате проникновения воды концентрация водорода приводит к увеличению затухания в волокнах. При замерзании вода способна повредить элементы кабелей и привести к нарушению связи.

Лучший способ избежать повреждений, вызываемых водой и повышенной влажностью, заключается в заполнении пространства между волокнами и оболочкой водонепроницаемым наполнителем, роль которого выполняет специальный компаунд.

Состав компаунда не должен оказывать влияния на характеристики остальных элементов сердечника. Компаунд предотвращает дальнейшее распространение в кабеле воды и тем самым ограничивает потенциальное увеличение повреждений. Компаунд должен иметь относительно малый коэффициент линейного расширения и соответствующую консистенцию, чтобы не вытекать из кабеля при прокладке [12].

Для защиты кабелей от внешних механических воздействий используется стальной повив. Проволока навивается поверх сердечника кабеля. Основное преимущество её применения состоит в том, что кабель, усиленный таким образом, может выдерживать большие поперечные и продольные нагрузки, так как сталь характеризуется лучшей механической устойчивостью, по сравнению с другими материалами. Круглая оцинкованная проволока используется для бронирования кабелей с трубчатым сердечником. В процессе



бронирования повив заполняется гидрофобным компаундом для предотвращения попадания воды в пустоты бронеповива. В основном броня обеспечивает стойкость оптоволоконного кабеля к такому внешнему механическому воздействию, как растяжение.

Чтобы удовлетворить требованиям на водонепроницаемость пустоты в бронеповиве заполняются гидрофобным компаундом. В качестве заполнителя бронеповива для уменьшения диффузии влаги на пути к оптическим волокнам применяют специальные компаунды с сорбентом по водороду. Срок службы сорбентов в данном случае не должен быть ниже срока службы оптических кабелей [12].

Защитные покровы должны предохранять сердечник оптического кабеля от:

- ✓ механических воздействий;
- ✓ тепловых воздействий;
- ✓ химических воздействий;
- ✓ воздействий влаги.

Для защиты оптического волокна от воздействия внешней среды и механических повреждений в процессе эксплуатации и прокладки оптический кабель и его сердечник защищаются наружной оболочкой.

В общем случае в конструкциях оптоволоконного кабеля используются различные варианты оболочек: полиэтиленовая, алюмополиэтиленовая, полипропиленовая, поливинилхлоридная, из безгалогенного материала, не распространяющего горение, полиамид, термопластический полиуретан, фторопласты.

Применяемые виды полимеров обладают различными термическими, механическими и электрическими свойствами. Прочность, стойкость к воздействию химикатов, влаги и воспламеняемость у них также различная.

Номинальная строительная длина кабеля может составлять от 5 до 25 км. Это связано с особенностями технологии и общим уровнем производства, а также зависит от расстояния, на которое прокладывается кабель.

Сложные условия эксплуатации, а также трудности, связанные с ремонтно-восстановительными работами, накладывают жёсткие условия на качество кабеля и сроки его бесперебойной работы.

### **Основные требования к различным свойствам кабеля**

Как правило, все вышеописанные методы защиты кабеля призваны обеспечить неизменность его оптических характеристик в течение эксплуатации. Но и сами эти методы должны удовлетворять определённым характеристикам и требованиям, чтобы защита оптических свойств кабеля имела максимально высокий уровень и надёжность.

Кабель для подводной оптоволоконной линии связи должен удовлетворять:

- ✓ требованиям к оптическим характеристикам;
- ✓ требованиям по стойкости к механическим воздействиям;
- ✓ требованиям по стойкости к климатическим и другим внешним воздействиям;
- ✓ требованиям к электрическим параметрам;
- ✓ требованиям по надёжности.

Оптические характеристики кабеля такие как: коэффициент затухания, коэффициент хроматической дисперсии, поляризационная модовая дисперсия, длина волны отсечки, кабельная длина волны отсечки должны слабо меняться на протяжении срока его службы.

Изменение этих параметров может привести к уменьшению скорости и объёму передаваемой информации, что, в свою очередь, может привести к снижению ресурса, дополнительным затратам на ремонт кабеля, малой прибыли и длительной окупаемости.

Высокие требования предъявляются к стойкости кабеля к механическим воздействиям. Кабель должен выдерживать длительные статические и кратковременные динамические растягивающие усилия; быть устойчивым к многократным сгибам и скручиваниям, и, что особенно важно, быть устойчивым по отношению к избыточному гидростатическому давлению, а также обладать продольной водонепроницаемостью.

Учитывая, что кабель может определённое время храниться на складе, затем доставляться на корабль-кабелеукладчик и потом устанавливаться на океанское (морское) дно на рабочую глубину, то кабель должен быть устойчив к смене температур при всех условиях эксплуатации. Таким образом, кабель должен быть устойчив к воздействию пониженной/повышенной температуры (диапазон изменения может составлять от  $-40^{\circ}\text{C}$  до  $+50^{\circ}\text{C}$ ) и устойчив к циклической смене температур.

Учитывая, что в большинстве случаев внутри кабеля проходит токопроводящая жила для питания подводных усилителей, то кабель должен обладать определёнными электрическими свойствами.

Суммарное электрическое сопротивление кабеля должно быть достаточно малым (0,5-1 Ом/км), учитывая значительные дистанции, на которые прокладываются подводные кабели.

Во избежание электрического пробоя кабеля должны соблюдаться условия высокого сопротивления между токопроводящей жилой и металлическими элементами бронепокрова (порядка 2 ГОм·км).

Изоляция цепи «токопроводящая жила – внешний электрод (грунт)» должна выдерживать высокое напряжение (до 20 кВ постоянного тока или 10 кВ переменного при частоте тока 50 Гц).

Срок службы кабеля, включая срок хранения, при соблюдении рекомендаций по прокладке монтажу и эксплуатации и при отсутствии на кабель воздействий, превышающих указанные в технических условиях, должен быть не менее 25-30 лет.

Срок сохраняемости кабеля при хранении в полевых условиях в ненарушенной или восстановленной таре изготовителя должен быть не менее 15 лет.

### **Тесты, проводимые для мониторинга надёжности и качества подводного кабеля**

При высоких требованиях к сроку службы и надёжности особое внимание уделяется качеству производства подводных кабелей. В связи с этим, в середине 90-х годов были разработаны Международные рекомендации ITU-T G.976 для тестирования подводных кабелей.

Здесь приводится краткий список тестов, используемых для проверки надёжности (здесь мы следуем работе [9]):

#### **➤ Тест на потери в кабеле, связанные с несовершенством производства**

Этот тест является квалификационным и предназначен для того, чтобы конструкция кабеля и процесс его производства не привели к появлению каких-либо неприемлемых потерь в кабеле.

#### **➤ Тест на температурную стабильность**

Этот тест демонстрирует, что потери в кабеле сохраняются в рамках допустимого значения при изменении температуры (обычно от  $-20^{\circ}\text{C}$  до  $+50^{\circ}\text{C}$ , но некоторые фирмы изменяют температурные лимиты [9] от  $-10^{\circ}\text{C}$  до  $+40^{\circ}\text{C}$ ).

➤ **Тест на сопротивляемость гидравлическому сжатию**

Тест демонстрирует, что кабель может противостоять гидравлическому давлению, имеющему место на глубине установки кабеля (например, на глубине 6,5 км давление составляет 65 МПа, а на глубине 8000 метров давление составляет уже свыше 80 МПа).

**Тесты на механические характеристики**

➤ **Тест на растяжение с закреплёнными концами,**

➤ **Тест на растяжение со свободными концами**

Предназначены для того, чтобы продемонстрировать, что сам кабель, а также стыки и соединения кабеля могут противостоять растяжениям и кручениям, происходящими при его установке и работе (для рабочего и кратковременного продольного растяжений, растяжение оптоволокна не более 0,15%, при этом оптические потери не должны превышать 0,05 дБ [11]).

➤ **Тест на механическую усталость**

Предназначен для того, чтобы продемонстрировать, что кабель может противостоять циклическим нагрузкам при подъёме кабеля во время проведения восстановительных работ.

➤ **Тест на способность выдерживать накручивание на стандартные шкивы корабля-укладчика**

Предназначен для того, чтобы продемонстрировать, что кабель могут успешно устанавливаться, извлекаться (например, для ремонта) и устанавливаться снова со стандартного шкива корабля-кабелеукладчика.

**Тесты на устойчивость при транспортировке**

➤ **Тест на сопротивляемость сдавливанию**

Предназначен для демонстрации способности кабеля противостоять сдавливанию при хранении на складе и специальных устройствах для хранения кабеля. (Давление в 40 кН/100 мм поддерживается в течении 3 минут в различных точках, находящихся на расстоянии 50 см друг от друга. Потери в волокне не должны превышать 0,05 дБ при проведении теста и после его окончания [11].)

➤ **Тест на сопротивляемость ударному воздействию**

Предназначен для демонстрации способности кабеля противостоять ударному и вибрационному воздействиям, имеющим место при погрузке, установке и извлечении кабеля. (Массы по 100 кг каждая сбрасываются с высоты 40 см в 5 точках, находящихся на расстоянии 50 см друг от друга. Потери в волокне не должны превышать 0,05 дБ при проведении теста и после его окончания [11].)

➤ **Тест на изгиб**

Предназначен для определения минимального радиуса сгиба кабеля, который тот может испытывать при транспортировке из производственных цехов и погрузке на корабль при нормальной эксплуатационной температуре [11].

**Тесты на надёжность**

➤ ***Тест на доступ воды***

Показывает, что кабель может противостоять доступу воды в случае внешних механических повреждений на максимальной глубине (так называемая продольная водонепроницаемость). Обычно эта величина составляет проникновение воды не более чем на 200 метров в течение 14 суток при давлении 5МПа [11].

➤ ***Коррозионный тест***

Тест предназначен для проверки коррозионных свойств материалов, используемых при производстве кабеля и их способности сопротивляться коррозии при длительном нахождении в морской воде.

➤ ***Тест на высокое напряжение (высоковольтный тест)***

Тест демонстрирует изоляционные свойства материалов, используемых при производстве кабеля, при подаче рабочего напряжения питания и его влияние на срок эксплуатации кабеля.

➤ ***Тест на изоляционные свойства***

Предназначен для демонстрации целостности высоковольтной изоляции по всей длине кабеля. (При постоянном напряжении 500 В между повивом стальной проволоки и землёй сопротивление должно быть менее 10 ГОм·км, при напряжении 5000 В между повивом стальной проволоки и землёй не должно быть пробоя в течении 3 минут [11].)

### **Эксплуатационные тесты**

➤ ***Тесты на межслойную адгезию в кабеле***

Тест предназначен для демонстрации приемлемого сцепления, существующего между полиэтиленовой изоляцией и медным проводником, когда имеют место множественные работы по укладке и извлечению кабеля.

➤ ***Тест на работу с канатным стопором***

Тест демонстрирует способность кабеля на безопасную работу с канатным стопором при извлечении кабеля для восстановительных работ.

➤ ***Тесты с установочным оборудованием***

Демонстрирует, что кабель может устанавливаться с использованием стандартного установочного механического оборудования (корабельная машина по установке кабеля). Такой тест может проводиться как в море, так и в доке.

Необходимо сделать важное замечание, что при проведении большинства из вышеописанных тестов производится мониторинг оптических свойств (затухания) кабеля. После проведения тестов также производится исследование оптических свойств кабеля, подвергнувшегося тестовым воздействиям.

Таким образом, определяются предельные нагрузки и воздействия, при которых оптические характеристики кабеля испытывают значительные изменения, которые могут привести к снижению срока службы кабеля или невозможности его применения вообще.

### **Герметичные стыковочные боксы (коробки) для кабелей и разветвители**

Так как строительная длина кабеля, как уже упоминалась, составляет от 5 км до 25 км, а расстояние между подводными усилителями оптических сигналов может достигать до 150 км,

то изготовление кабелей с подобной строительной длиной является весьма проблематичным или же требует новых технологических решений, что влечёт за собой дополнительные финансовые затраты.

Значительно дешевле и проще обеспечить герметичное соединение кабелей между собой посредством специальных стыковочных коробок (сплайс-боксов) (рис.25 и 26) [13].



Рис. 25. Внешний вид стыковочной коробки (сплайс-боксы) [13].



Рис. 26. Стыковочная коробка в разобранном виде [13].

Такие стыковочные коробки должны обеспечивать герметичное соединение кабелей, выдерживать значительные растягивающие нагрузки (до 200 кН и выше). Также они должны иметь небольшой размер, чтобы обеспечивать свободное прохождение через колёса корабельной кабелеукладочной машины.

Корпус стыковочной коробки должен оставаться герметичным на глубине укладки кабеля (т.е. вплоть до глубины 6000-8000 метров) и выдерживать внешнее гидростатическое давление до 60-80 мПа.

Важно отметить, что подобные сплайс-боксы должны обеспечивать удобный доступ в отсек, где располагаются кабели, чтобы можно было обеспечить сварку оптических волокон непосредственно на корабле с их последующей герметизацией и установкой на рабочую глубину, быть удобными при открывании и закрывании.

Обычно сплайс-боксы изготавливаются из нержавеющей стали. Также сплайс-боксы должны обеспечивать совместимость соединения кабелей различных типов (например, бронированный и дважды бронированный) и производителей.





Рис. 27. Разветвитель [1, 5].

Разветвители (рис.27) предназначены для пространственного разделения оптического сигнала по нескольким оптическим волокнам и объединения сигналов различных каналов в один сигнал, а также для разделения электропитания от разных источников питания (напряжения).

Конструкция корпусов разветвителей схожа с конструкцией сплайс-боксов, но имеет один вход и два выхода. Как правило, в подводных линиях связи используются двунаправленные разветвители.

К конструкции корпусов разветвителей предъявляются такие же требования по надёжности и качеству, что и к конструкции корпусов сплайс-боксов. Как правило, они выполняются из таких же материалов, что и сплайс-боксы и используют такие же узлы гермоввода и герметизации оптического волокна. Разветвители также должны обеспечивать совместимость соединения кабелей различных типов.

## Особенности конструкции подводных оптических усилителей

Подводные оптические усилители предназначены для усиления оптических сигналов, распространяющихся в подводном оптоволоконном кабеле.

Подводный оптический усилитель предназначен для работы на глубине моря до 8000 метров [14], он имеет встроенные средства контроля и управления, источник вторичного электропитания.

В подавляющем большинстве случаев в качестве усилителей используются EDFA-усилители оптических сигналов, диоды накачки которых могут работать как на длине волны 980 нм, так и/или на длине волны 1480 нм в зависимости от конструкции. Усилитель должен иметь низкий шум-фактор, чтобы минимально исказить усиливаемый сигнал. Расстояние между усилителями оптических сигналов составляет порядка 30 - 100 км (например, для транс-тихоокеанской линии связи потребовалось около 200 усилителей [14]).

Электропитание усилителя, как правило, осуществляется постоянным током от берегового устройства дистанционного питания с использованием токоведущей жилы подводного кабеля. Сила тока может варьироваться от 100 мА до 1 А [5].

Так как рабочая глубина установки усилителя может достигать 8000 метров, то его корпус должен быть герметичным и обладать высоким сопротивлением к коррозии при большом внешнем гидростатическом давлении. Срок службы усилителя составляет, как правило, 25 лет [14]. В случае поломки усилителя следует проводить его подъём с глубины и заменять на новый. Испорченный усилитель подлежит исследованию на берегу на предмет выявления поломки с целью последующего исключения подобных неисправностей при дальнейшей эксплуатации. На рис.28 и 29 представлен внешний вид оптического усилителя.



Рис. 28. Общий вид подводного оптического усилителя (производство Tyco Telecommunications) [5].



Рис. 29. Общий вид подводного оптического усилителя [15].

Размеры оптических усилителей сильно варьируются. Например, для транс-тихоокеанской линии связи длина усилителя составляла 6 метров. Обычно длина оптического усилителя составляет порядка 3 метров, чтобы разместить на борту корабля-кабелеукладчика максимальное число усилителей.

К конструкции усилителя предъявляются следующие основные требования [14]:

- ❖ Анतिकоррозийная стойкость;
- ❖ Стойкость к внешнему гидростатическому давлению;
- ❖ Герметичность узлов ввода оптоволоконна;
- ❖ Высокие электроизолирующие характеристики;
- ❖ Защита от перепадов напряжения и тока;
- ❖ Устойчивость к вибрационному и ударному воздействию;
- ❖ Высокую надёжность компонентов, входящих в конструкцию усилителя;
- ❖ Уверенную эксплуатацию в диапазоне рабочих температур.

Корпус усилителя выполняется из медно-бериллиевого сплава, обладающего высокими антикоррозийными и механическими свойствами в морской воде [14, 15]. Особенно жёсткие требования предъявляются герметизации корпуса усилителя, который подвергается внешнему гидростатическому давлению до 80 МПа.

Узлы гермоввода, герметизации и заделки оптоволоконна должны также выдерживать высокое давление (до 80 МПа), а также предотвращать повышение влажности внутри корпуса свыше 20% (для этого должна использоваться специальная система контроля) [14, 15].

Отсек, в котором располагается электронное оборудование усилителя, изолирован от внешнего металлического корпуса посредством специальной высоковольтной изоляции (например, полиэтиленовой), которая должна обеспечивать защиту от пробоя напряжением вплоть до  $\pm 15$ кВ [14, 15].

Для защиты подводного усилителя от внезапных перепадов высокого напряжения в цепи питания применяется специальная предохранительная цепь, состоящая из газонаполненного предохранителя, катушки, резисторов и зенеровских диодов. Расчёты показывают, что такая система обеспечивает защиту от перепадов напряжения и тока в пределах  $\pm 15$ кВ и  $\pm 200$ А [14, 15].

Устойчивость к вибрационным и ударным воздействиям обеспечивается с целью сохранения работоспособности системы при вибрационных и ударных воздействиях, возникающих при транспортировке и установке системы.

Конструкция подводного оптического усилителя должна сохранять работоспособность во всём диапазоне рабочих температур, которые могут изменяться от 0 до  $+35^{\circ}\text{C}$  (это температурный режим усилителя, уже уложенного на морское дно).

Установка подводного усилителя (см. рис.8, рис.9 и рис.28) производится со стандартной линейной кабелеукладочной машины с корабля кабелеукладчика.



Рис. 30. Установка подводного оптического усилителя в открытом море [14].



При производстве подводного усилителя для повышения его надёжности производится многократное тестирование составляющих компонентов. Проводится мониторинг того, как они могут противостоять излучению, высыханию, магнитным воздействиям, воздействию барометрического давления и водорода, растяжению волокна, а также внутренним коррозионным газам [14, 15].

Для блока питания усилителя, помимо защиты от пробоя и перепадов напряжения, необходимо обеспечить резервирование, гальваническую развязку входа и выхода, низкий уровень шума, защиту от перегрева, перегрузки, короткого замыкания. Также необходимо обеспечить высоковольтную изоляцию входных цепей для защиты от пробоя высоким напряжением между токопроводящей жилой и корпусом.

**Список литературы:**

1. [www.scig.net](http://www.scig.net)
2. Ivan P. Kaminow, Tingye Li. Optical Fiber Telecommunications IVB. Systems and Impairments. Academic Press 2002. pp. 154-197.
3. Adam Markow. Summary of Undersea Fiber Optic Network Technology and Systems. ([www.davidrossgroup.com](http://www.davidrossgroup.com)).
4. R. Rapp, M. Lawrence, D. Borwick, T. Kuwabara. Marine Survey & Cable Routing. Sub Optic 2004. Short Course.
5. [www.pipeinternational.com](http://www.pipeinternational.com) (блог строительства подводной оптоволоконной линии связи РРС-1 Сидней - Гуам).
6. P. G. Allan. Hydrographic information and submarine cable industry. Hydro, Norwich, March 2001.
7. Екимов А. Н., Филимонов С. И., Устинов С. Особенности строительства волоконно-оптической линии связи «Россия - Япония». Фотон-Экспресс, №4, 2008.
8. M. Jonkergouw. Industry Developments in Burial Assessment Surveying (BAS). Alcatel, Sub Optic 2001, Kyoto.
9. Maurice E. Kordahi, Seymour Shapiro, Gordon Lucas, Kelvin Moore. International Standards for Undersea Cable System Testing.
10. [www.naval-technologies.com](http://www.naval-technologies.com), [www.nsw.com](http://www.nsw.com) (NSW)
11. SOFC Submarine Power Cable ZHONGTIAN TECHNOLOGIES SUBMARINE CABLE CO., LTD. Catalogue.
12. В. А. Гуртов. Оптоэлектроника и волоконная оптика. Петрозаводск, ПетрГУ, 2005 г.
13. Tyko Flex. Optical Submarine Splice Closure. Tykoflex AB, TYRESÖ Sweden.
14. S. Harasawa, M. Sumitani, K. Ohta. Reliability Technology for Submarine Repeaters. FUJITSU Sci. Tech. J., 44,2 p. 148-155 (April 2008).
15. [www.nec.com](http://www.nec.com), Nec Submarine System.