

УДК 621.373.826

## ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ЛИНИИ ОПТИЧЕСКОГО КАБЕЛЯ С МЕТАЛЛИЧЕСКИМИ ПОКРОВАМИ ФИРМЫ SIEMENS В МНОГОЛЕТНЕМЕРЗЛЫХ ГРУНТАХ

А. М. Калягин, к.т.н., a.makarovich@mail.ru

Н. М. Кауров, ведущий инженер Сибирского ф-ла «Ростелеком»

**Ключевые слова:** оптический кабель, конус, муфта, котлован, тупиковый, грунт, мерзлый.

**Введение.** В [1] приведены результаты исследования волоконно-оптического кабеля (ВОК) в защитной пластмассовой трубе (ЗПТ) в многолетнемерзлых грунтах. Основные проблемы при строительстве и эксплуатации ВОК в ЗПТ возникают в соединениях строительных длин. При этом соединительные муфты размещают в смотровых устройствах (кабельных колодцах) с помощью специальных мер защиты от воздействия сил морозного пучения. Применение железобетонных колодцев из-за их больших габаритов и веса, особенно в болотистых грунтах и на склонах, нецелесообразно.

Указанные проблемы обусловили создание таких конструкций кабеля и муфты, которые обеспечивали бы высокую разрывную прочность как кабеля, так и конусов муфтовых соединений. Подобные конструкции были созданы фирмой Siemens в рамках проекта Q (от слова Quality), в котором предусматривался творческий союз специалистов России (СОМЭС, ЦНИИС, «Ростелеком») и Германии (фирма Siemens).

Опытные образцы кабелей и муфт были переданы ТЦМС-12 ОАО «Ростелеком» для линейных испытаний в многолетнемерзлых грунтах.

**Конструкция кабеля.** Для испытаний были представлены конструкции ВОК в двух вариантах. На рис. 1: 1 — внешняя пластмассовая оболочка; 2 — броня, диаметр проволоки 2,6 мм; 3 — броня, диаметр проволоки 1,8 мм; 4 — первый слой центральной пластмассовой трубки; 5 — второй слой центральной пластмассовой трубки; 6 — центральная металлическая трубка; 7 — ОВ (24 шт.); 8 — гидрофобный наполнитель.

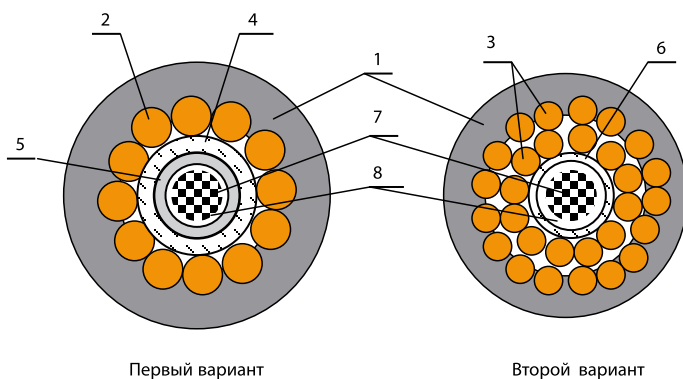


Рис. 1

**Первый вариант** представляет собой центральную двухслойную пластмассовую трубку «Maxibuendel» диаметром 8 мм, в которой свободно располагаются 24 ОВ (loose tube). Силовой элемент — броневой покров, состоящий из 12 стальных проволок. Наружный диаметр по броне — 13,4 мм. Внешний диаметр кабеля — 20 мм. Стойкость к растягивающим усилиям — 90 кН.

**Второй вариант** представляет собой центральную стальную трубку диаметром 5,1 мм со свободно расположенными 24 ОВ (loose tube). Силовой элемент — броневой покров, состоящий из двух слоев стальных проволок диаметром 1,8 мм. Наружный диаметр по броне — 12,2 мм. Внешний диаметр кабеля — 19 мм. Стойкость к растягивающим усилиям — 100 кН.

Для монтажа ОК, предназначенного для прокладки в многолетнемерзлых грунтах, использовалась специальная стальная муфта тупиковой конструкции (рис. 2), обеспечивающая ввод в нее кабелей с высокой прочностью стыка «кабель — муфта» к воздействию растягивающих нагрузок. Муфта состоит из кожуха и основания с патрубками для ввода кабелей. При этом стальные проволоки внутри основания отгибаются на 90°; основание заливается компаундом «Protolin 51». Такая конструкция обеспечивает механическую прочность стыка «кабель — муфта» не хуже допустимой прочности кабеля.



Рис. 2

К корпусу муфты подключается провод, используемый в качестве измерительного провода или провода заземления. Кожух и основание муфты соединяются между собой с помощью резьбового соединения (рис. 3). Для герметизации муфты предусматриваются кольцевые резиновые прокладки, смазанные смазкой «Moukote». На стык основания и кожуха муфты накладываются два слоя ленты — герметика «Coroplast». Корпус изолируется от грунта специальными изолирующими накладками на торцах муфты и термоусаживаемыми трубками.



Рис. 3

**Строительство экспериментальной линии.** При выборе участка под испытательный полигон ориентировались на признаки, присущие грунтам, в которых наблюдаются мерзлотно-грунтовые процессы. Такой участок был найден в районе г. Сковородино Амурской области на трассе быв-

шей кабельной линии КМ-19д. Там в процессе эксплуатации симметричного кабеля наблюдались повреждения из-за воздействия сил морозного пучения и грозовых разрядов. Грунт представляет собой: сверху — почвенно-растительный слой толщиной 0,2 м, далее — обломочный материал коренных пород с суглинком. Трасса кабеля заболочена. Таким образом, на выбранном участке имели место многолетнемерзлые породы, высокая влажность сезоннооттаивающего слоя, проявление сил морозного пучения.

В октябре — декабре 1997 г. был проложен ВОК производства фирмы Siemens (первый и второй варианты). На рис. 4: 1 — необслуживаемый усилительный пункт (НУП); 2 — первый вариант ОК фирмы Siemens с броневым покровом из 12 стальных проволок; 3 — соединительная муфта тупиковой конструкции; 4 — ОК первого типа фирмы NEC; 5 — второй вариант ОК фирмы Siemens с двухслойным броневым покровом из 30 стальных проволок.

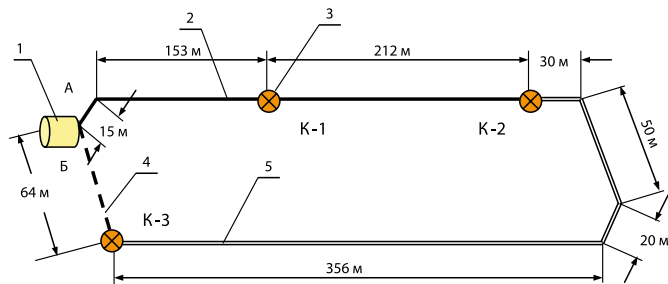


Рис. 4

Поскольку в процессе прокладки кабеля не хватило, пришлось от НУП до третьей муфты сделать вставку кабеля первого типа фирмы NEC. С этим типом кабеля никакие исследования не проводились.

В июне — июле 1998 г. был произведен монтаж трех стальных муфт тупиковой конструкции. В каждом котловане в качестве запаса предусматривались три витка кабеля. На рис. 5: 1 — тупиковая муфта; 2 — резервные витки кабеля (по три витка); 3 — пучиномеры; 4 — котлован.

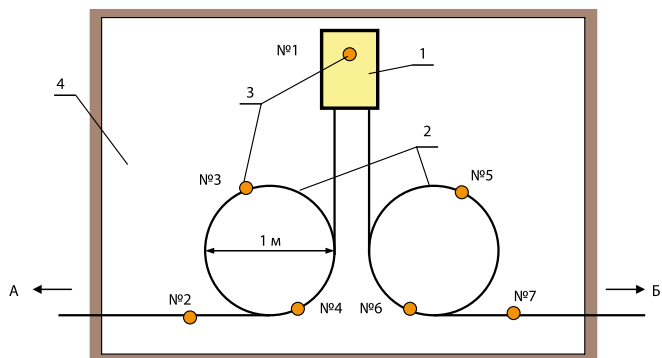


Рис. 5

Перемещения пучиномеров фиксировались относительно промежуточных реперов, установленных на расстоянии 5 м от каждого котлована; промежуточные реперы фиксировались относительно контейнера НУП, выполняющего роль основного репера. В качестве реперов использовались металлические трубы диаметром 100 мм с приваренными в основании крестовинами из металлических уголков. Для предотвращения примерзания грунта к металлическим стенкам реперов и избежания воздействия касательных сил морозного пучения к реперам были применены следующие меры:

- реперы на всей длине, подлежащей закопке, и плюс 0,5 м выше уровня дневной поверхности, покрывали слоем консистентной смазки (ЦИАТИМ-201);
- поверх слоя смазки на трубы наматывали два слоя полиэтиленовой ленты.

Перемещения пучиномеров измеряли нивелиром и гидравлическим спиртовым уровнем.

**Влияние мерзлотно-грунтовых процессов на линейные сооружения подземных кабелей связи.** Чтобы понять, почему на экспериментальной линии применялись муфты тупиковой конструкции, рассмотрим влияние мерзлотно-грунтовых процессов на элементы подземных линейно-кабельных сооружений (ЛКС).

При вскрытии котлованов на действующих кабельных линиях было неоднократно замечено, что вокруг поврежденной кабельной муфты (сверху и снизу) образованы пустоты, т. е. муфта находится как бы в подвешенном состоянии. Но при этом один из конусов муфты имеет кольцевой разрыв размером несколько миллиметров. Порою разрыв достигал 10—15 мм. Для выяснения этого явления были проведены опыты с кабелями и муфтами в климат-термокамерах типа КТК-3000. При разрезе мерзлого грунта были обнаружены пустоты, аналогичные наблюдаемым на действующих кабельных трассах. Всестороннее детальное изучение происходящего явления позволило дать ему следующее объяснение.

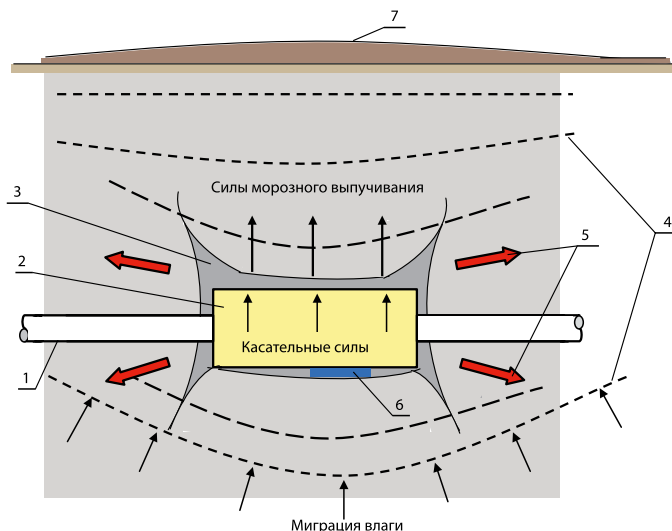


Рис. 6

Обратимся к рис. 6, где 1 — кабель; 2 — муфта; 3 — пустоты; 4 — фронт промерзания грунта; 5 — направления морозобойных сил; 6 — движение влаги к муфте; 7 — возможная деформация поверхности пучинистого грунта за счет увеличения его объема. При промерзании пучинистых грунтов обычно происходит увеличение их объема из-за воздействия внутренних сил при переходе поровой воды в лед. Если при этом будут существовать какие-нибудь внешние ограничения, препятствующие увеличению объема пучащегося грунта, то непременно разовьются напряжения. В зависимости от направления их действия по отношению к подземным конструкциям эти напряжения можно разделить на нормальные  $\sigma_{\text{пуч}}$  и касательные  $\tau_{\text{пуч}}$  составляющие силы морозного пучения [2]. За счет них возможна деформация поверхности грунта.

При понижении наружной температуры фронт промерзания грунта, имеющий практически горизонтальную структуру, перемещается в направлении муфты. Так как металлическая муфта имеет высокую теплопроводность, то вблизи

муфты фронт промерзания изгибается в ее сторону, и грунт смерзается с поверхностью муфты, т. е. образуется адгезия грунта с муфтой. Этот процесс усиливается еще и потому, что в процессе промерзания происходит миграция влаги к фронту промерзания. При этом запас влаги в подстилающих слоях, например, в многолетнемерзлых грунтах, является основным фактором, обуславливающим процесс миграции воды к фронту промерзания. Кроме того, высокий уровень грунтовых вод обеспечивает подток влаги во время ее миграции зимой, т. е. миграция воды происходит не только в замерзающих почво-грунтах, но и в мерзлых грунтах (под влиянием температурного градиента) [3]. Известно, что все это способствует пучению грунта.

Как показано в [2], нормальные силы морозного пучения могут действовать не только в вертикальном, но и в горизонтальном направлении, оказывая влияние на заглубленные в грунт конструкции. Это объясняется двумя факторами:

- увеличением объема грунта при его пучении. Грунт увеличивается в объеме, и в общем случае давление может развиваться как в вертикальном, так и горизонтальном направлениях;

- изгибом фронта промерзания грунта. Действительно, при воздействии нормальных сил морозного пучения в области конусов муфты, последняя будет перемещаться вверх, в результате происходит отрыв муфты от нижележащего грунта и внизу образуется свободное пространство — пустота. При этом на муфтовое соединение начинают воздействовать растягивающие усилия.

Между тем, свободно перемещаться вместе с мерзлым грунтом муфта не может, так как удерживается с обеих сторон входящими кабелями. В какой-то момент замерзший слой грунта будет проскальзывать по боковой поверхности муфты, создавая дополнительное давление на вышележащие слои грунта, которые перемещаются вверх, увлекая за собой муфту (за счет адгезии с верхней поверхностью муфты). Наконец, из-за механического сопротивления кабеля муфта прекратит свое перемещение вверх. В этот момент происходит отрыв муфты от вышележащего грунта и сверху образуется свободное пространство — пустота. В результате муфта сверху и снизу теряет механический контакт с мерзлым грунтом.

Миграция влаги к вышележащим слоям грунта приводит к обезвоживанию грунтов вокруг муфты, в результате происходит растрескивание грунта, т. е. появляются своеобразные морозобойные трещины, которые стремятся растянуть кабель влево и вправо от муфты из-за адгезии мерзлого грунта с кабелем. Происходит разрыв одного из конусов муфты. Таким образом, для того, чтобы предотвратить разрыв конусов, необходимо ввести кабели в муфту с одной стороны, т. е. для соединения двух строительных длин — использовать муфты тупиковой конструкции.

Опыты в КТК-3000 показали также результат миграции влаги к фронту промерзания: в пустом пространстве под муфтой зафиксирован процесс льдообразования в виде тонких ледяных иголок от грунта в сторону муфты (рис. 6, позиция б).

Впервые муфта тупиковой конструкции была испытана в многолетнемерзлых грунтах на магистрали симметричного кабеля КМ-19а, где прокладывался грозостойкий кабель МКГСАСтпШп 4×4×1,2, изготовленный на кабельном заводе «Москабель». Для повышения надежности муфтовых соединений в ТЦМС-12 была разработана свинцовая муфта тупиковой конструкции. Наблюдения показали, что на конусах таких муфт из-за большой разницы влияния сил морозного пучения на кабель и муфты происходила разгерметизация. Таким образом, кабель МКГСАСтпШп 4×4×1,2 обладает вы-

сокой грозостойкостью, но низкой разрывной прочностью. Поэтому он мало пригоден для прокладки в многолетнемерзлых грунтах.

Учитывая этот опыт, была испытана вышеупомянутая муфта тупиковой конструкции фирмы Siemens, которая обладала разрывной прочностью конусов муфты не хуже, чем у кабеля.

**Результаты исследований.** Поскольку в многолетнемерзлых грунтах главная проблема для подземных кабелей связана с обеспечением их механической прочностью, основное внимание было направлено на изучение перемещений муфтовых соединений, а также отдельных участков кабеля.

Измерения проводились только в 1999 и в 2000 гг., хотя экспериментальные кабели и муфты пролежали с июля 1998 г. до сентября 2004 г., т. е. шесть климатических сезонов. Как показала обработка результатов измерений, собранный статистический материал (в сочетании с ранее проведенными исследованиями поведения медножильных кабелей и ОК в защитной полиэтиленовой трубе в многолетнемерзлых грунтах) позволяет сделать достаточно оптимистические выводы.

Контроль оптических параметров экспериментальной кабельной линии показал, что вертикальные перемещения муфт и прилегающих к ним участков кабеля, как и в [1], не оказывали заметного влияния на оптические характеристики ОК.

Рассмотрим результаты измерений в первом котловане в 1999 г. (рис. 7) и в 2000 г. (рис. 8). На рисунках номера рядов соответствуют номерам пучиномеров, показанных на рис. 5.



Рис. 7

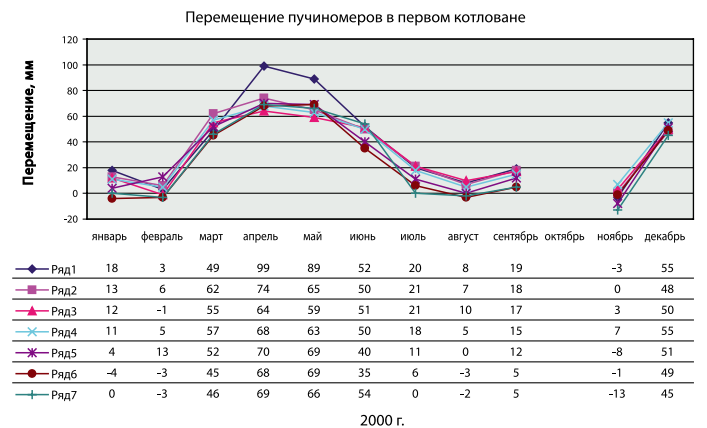


Рис. 8

График рис. 7 показывает, что перемещения пучиномеров представляют собой случайные события, характерные для

первого года эксплуатации. Как и следовало ожидать, муфта преимущественно имеет большую величину выпучивания, чем участки кабеля. Разница перемещений достигает в ноябре и декабре около 20 мм. Однако, как видно из графика, в первом приближении между всеми событиями существует вполне определенная зависимость.

В 2000 г. в апреле (рис. 8) муфта поднялась выше кабеля примерно на 30 мм. Здесь, как и в предыдущем опыте, между всеми случайными величинами также просматривается определенная зависимость. Во втором и третьем котлованах также наблюдались относительные перемещения муфт и участков кабелей.

Во втором котловане в 1999 г. муфта почти во всех экспериментах перемещалась на меньшую величину, чем участки кабеля. Наибольшее отставание составляло около 15 мм. Объясняется это тем, что муфта во втором котловане в течение 1999 г. опускалась вниз за счет постепенного уплотнения грунта под ней.

В январе и феврале 2000 г. муфта продолжала опускаться вниз, а в марте и апреле произошло интенсивное выпучивание всех линейных сооружений и особенно муфты. Причем, муфта переместилась вверх на большее расстояние, чем участки кабеля (примерно на 20 мм). Из этого следует, что в котловане грунт постепенно уплотняется и начинают проявляться закономерности, присущие мерзлотно-грунтовым процессам в пучинистых грунтах.

В третьем котловане в 1999 г. муфта почти во всех экспериментах перемещалась на большую величину, чем участки кабеля. Однако в июне произошло уплотнение грунта, вследствие чего муфта и участки кабеля резко переместились вниз. В 2000 г., как и в 1999 г., муфта почти во всех экспериментах перемещалась на большую величину, чем участки кабеля. Как отмечалось выше, в первом приближении между случайными величинами перемещений муфт и участков кабеля просматривалась вполне определенная зависимость. Для того чтобы установить степень зависимости величин перемещений между муфтой и участками кабеля определялись коэффициенты корреляций, характеризующие степень тесноты зависимости случайных величин [2]. Так, коэффициент корреляции

$$r_{xy} = \frac{K_{xy}}{\sigma_x \sigma_y}, \quad (1)$$

где  $\sigma_x$  и  $\sigma_y$  — средние квадратические отклонения величин  $X$  и  $Y$ ;  $K_{xy}$  — корреляционный момент случайных величин  $X$  и  $Y$ .

Среднее квадратическое отклонение

$$\sigma = \sqrt{D}, \quad (2)$$

где  $D$  — дисперсия случайных величин  $X$  и  $Y$ .

Если дан ряд значений  $x_1, x_2 \dots x_n$  с неизвестным математическим ожиданием  $m$  и дисперсией  $D$ , то для определения этих параметров следует пользоваться приближенными значениями (оценками):

$$\left. \begin{aligned} \tilde{m} &= \frac{\sum_{i=1}^n x_i}{n}; \\ \tilde{D} &= \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \tilde{m})^2}{n-1}. \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

При этом корреляционный момент

$$\tilde{K}_{xy} = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \tilde{m}_x)(y_i - \tilde{m}_y)}{n-1}. \quad (4)$$

Таблица 1

№ котлована	Период наблюдений	Коэффициент корреляции, $r_{xy}$	Численное значение $r_{xy}$	
1	1999 г.	$r_{12}$	0,937	
		$r_{13}$	0,971	
		$r_{14}$	0,914	
		$r_{15}$	0,925	
		$r_{16}$	0,675	
		$r_{17}$	0,861	
		$r_{12}$	0,960	
	2000 г.	$r_{13}$	0,945	
		$r_{14}$	0,949	
		$r_{15}$	0,961	
		$r_{16}$	0,968	
		$r_{17}$	0,964	
		1999 г.	$r_{12}$	0,988
			$r_{13}$	0,846
	$r_{14}$		0,934	
	$r_{15}$		0,893	
	$r_{16}$		0,890	
$r_{17}$	0,905			
2000 г.	$r_{12}$		0,987	
	$r_{13}$	0,989		
	$r_{14}$	0,983		
	$r_{15}$	0,959		
	$r_{16}$	0,938		
	$r_{17}$	0,974		
	1999 г.	$r_{12}$	0,707	
$r_{13}$		0,649		
$r_{14}$		0,653		
$r_{15}$		0,643		
$r_{16}$		0,831		
$r_{17}$		0,932		
2000 г.		$r_{12}$	0,802	
	$r_{13}$	0,880		
	$r_{14}$	0,813		
	$r_{15}$	0,919		
	$r_{16}$	0,709		
		$r_{17}$	0,920	

Результаты расчетов сведены в табл. 1, из которой видно, что величины перемещений муфт и участков кабеля в каждом котловане в 1999 г. и 2000 г. находятся в тесной зависимости, приближающейся к функциональной.

Анализ табл. 1 показывает, что для событий, имевших место в 2000 г., в первом котловане  $r_{xy}$  выше, чем в 1999 г. Объясняется это уплотнением разрыхленного грунта в первый год после строительства. Уплотнение оказало серьезное влияние

Таблица 2

Дата измерения	1999 г.											2000 г.										
	03	04	05	06	07	08	09	10	11	12	01	02	03	04	05	06	07	08	09	10	11	12
Изоляция, МОм	∞	200	75	15	40	50	10	—	10	—	50	50	50	50	20	50	50	50	50	—	50	80

на закономерности перемещений подземных объектов под влиянием мерзлотно-грунтовых процессов.

Во втором и третьем котлованах  $r_{xy}$  для событий, имевших место в 2000 г., также выше, чем в 1999 г. Некоторые случаи отклонений от общей закономерности связаны с продолжающимся уплотнением грунта. В последующие годы, когда уплотнение грунта закончится, можно ожидать, что  $r_{xy}$  будут приближаться к единице, т. е. будет иметь место почти функциональная зависимость.

При раскопке котлована в сентябре 2004 г. было обнаружено, что грунт на всю глубину прокладки кабеля полностью оттаял, а муфта, уложенная на 10—15 см ниже кабеля, за шесть лет осталась лежать на том же уровне (ниже кабеля), хотя, как было показано выше, разница перемещений муфты и участков кабеля достигала 30 мм. Из этого следует, что остаточное перемещение данной тупиковой муфты относительно отдельных участков кабеля имеет весьма малые значения.

Подводя итоги, можно сказать, что на данном полигоне результаты измерений перемещений муфт и участков кабеля достаточно надежно характеризуют процессы влияния сил морозного пучения на подземный кабель.

Измерения изоляции верхних металлических покрытий смонтированных ЛКС относительно земли показали, что сопротивление в первоначальный момент устремлялось к бесконечности (табл. 2). Затем сопротивление изоляции резко уменьшилось и в некоторые моменты доходило до 10 МОм.

При демонтаже муфты была обнаружена влага под термоусаживаемыми трубками на муфте и патрубках. Произошло это потому, что трубки были посажены без подклеивающего слоя. После разъединения кожуха и основания на cassette были обнаружены капли воды, поскольку ни лента герметик «Coroplast», ни резиновые кольцевые прокладки не обеспечивают надежной герметизации. Поэтому стык между кожухом и основанием должен оплавляться мягким припоем. Лабораторные испытания показали, что эта операция выполняется достаточно легко с помощью припоя ПОС-60 и универсального флюса для пайки алюминия, нержавеющей стали, никеля, меди и других металлов. Но предварительно необходимо на кожухе и на основании муфты снять фаски.

**Заключение.** Линейные испытания ВОК с металлическим покровом фирмы Siemens в многолетнемерзлых грунтах позволяют сделать следующие выводы.

1. После прокладки кабеля случайные величины перемещений элементов подземных ЛКС с первых лет эксплуатации характеризуются достаточно высоким коэффициентом корреляции. В последующие годы, по мере уплотнения структуры грунта, нарушенной в процессе прокладки кабеля, степень тесноты линейной зависимости повышается.

2. Вследствие больших поперечных размеров муфт, значительно превышающих поперечные размеры кабеля, на муфты, уложенные в котловане, действуют силы выпучивания намного большие, чем на кабель. Но это не представляет опасности для подземных элементов испытываемых ЛКС в пучинистых грунтах, поскольку разрывная прочность конусов муфты не хуже, чем кабеля.

3. Все рассматриваемые элементы ЛКС практически возвращаются на прежние уровни, зафиксированные в начальный

момент. Объясняется это жесткой конструкцией металлического покрова.

4. При монтаже кабелей в многолетнемерзлых грунтах следует применять только муфты тупиковой конструкции, обладающие разрывной прочностью стыка «кабель — муфта» не хуже разрывной прочности кабеля.

5. Для обеспечения герметичности муфты стык между кожухом и основанием должен оплавляться мягким припоем.

6. Испытуемые муфты тупиковой конструкции, а также кабели первого и второго вариантов могут применяться при строительстве оптических кабельных линий связи в районах распространения многолетнемерзлых грунтов, что обуславливает актуальность организации в России производства кабелей и муфт таких конструкций.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. **Калягин А. М.** Исследования линии оптического кабеля, проложенного в защитной пластмассовой трубе в многолетнемерзлых грунтах // *Электросвязь*. — 2006. — № 12. — С. 11—15.
2. **Далматов Б. И., Ласточкин В. С.** Устройство газопроводов в пучинистых грунтах. — Л.: Недра, 1978.
3. **Цитович Н. А.** Механика мерзлых грунтов. — М.: Высшая школа, 1973.
4. **Вентцель Е. С.** Теория вероятностей. — М.: Наука, 1969.

*Получено после доработки 25.02.09*