

## О деградации самонесущих кабелей ADSS

На сегодняшний день для экономии средств при прокладке волоконно-оптических кабелей широко используются опоры высоковольтных линий электропередачи (ЛЭП), а также опоры контактной сети электрических железных дорог. Это относительно недорогой способ организации высокоскоростной линии передачи данных на базе существующей инфраструктуры. В России наиболее протяженная ВОЛС, проложенная вдоль железных дорог, принадлежит компании ТрансТелеКом (ТТК), входящей в пятерку ведущих российских операторов связи. ОАО "РЖД" владеет 99,99% акций данной компании. Протяженность волоконно-оптической линии связи компании ТТК составляет более 76 000 км. В свою очередь лидером подвеса ОК по опорам ЛЭП является "Федеральная сетевая компания Единой энергетической системы" (ПАО "ФСК ЕЭС"), которая имеет волоконно-оптическую линию связи, протяженностью более 57 700 км.

Одним из наиболее оптимальных способов построения ВОЛС является использование кабеля ОКГТ (кабель, встроенный в грозозащитный трос). Однако большинство ЛЭП 110 кВ и выше уже имеют грозозащитные тросы, а замена существующих тросов на ОКГТ значительно увеличивает стоимость строительства оптических линий связи. Кроме того, на некоторых линиях электропередачи применение грозозащитных тросов вообще не требуется. Альтернативным способом построения ВОЛС на базе существующих линий электропередач и железных дорог является использование полностью диэлектрических самонесущих кабелей (ADSS кабели). Стоит отметить, что строительство ВОЛС с помощью ADSS значительно дешевле, в сравнении с кабелями ОКГТ. Однако для такого рода ВОЛС имеются свои дополнительные проблемы – электротермическое разрушение оптического кабеля. В результате воздействия сильного электромагнитного поля на ОК возникают деградационные процессы, приводящие в первую очередь к разрушению внешней оболочки кабеля.

Длительность срока эксплуатации ADSS кабелей на силовых линиях будет зависеть от следующих факторов: коронных разрядов, сухополосных разрядов, длины пролета, стрелы провеса, растягивающей нагрузки кабеля, скорости ветра, стойкости оболочки к ультрафиолетовому излучению, от температуры, уровня загрязнения оболочки и др.



Рис. 1 Разрушение оболочки вследствие коронных разрядов

Данная тема знакома только узкому кругу связистов – тем, кто работает с ВОЛС, построенных на базе ЛЭП и опорам контактной сети ж/д. Этим людям, наверное, в первую очередь будут интересны результаты исследований воздействия сильного электромагнитного поля на оптический кабель. Однако такого рода статья, с используемыми в ней специфическими терминами, будет непонятной и, соответственно, неинтересной для большинства ранее не сталкивающихся с этой темой читателей. Поэтому здесь мы решили преследовать две цели: 1) рассмотреть общую теорию электротермического разрушения оптического кабеля (это может быть интересно для тех, кто желает расширить свой кругозор в области ВОЛС); 2) привести анализ результатов исследования воздействия на диэлектрические самонесущие кабели сильного электромагнитного поля в комбинации с ультрафиолетовым излучением, солевого тумана, дождя и механических напряжений (это может быть интересно, так сказать "людям в теме").

Если кому-то захочется более подробно изучить данную тему, в конце статьи приведена литература, используемая при написании данной статьи.

## Происхождение поверхностных токов и разрядов

Как показала практика, постоянное воздействие сильного электромагнитного поля на самонесущий

оптоволоконный кабель представляет собой некий вызов для используемых в кабеле материалов. Емкостная связь между силовыми проводами, кабелем ADSS и землей приводит к образованию разности потенциалов вдоль всей длины кабеля. На расстоянии порядка десятков метров длины кабеля разность потенциалов может достигать десятков киловольт.

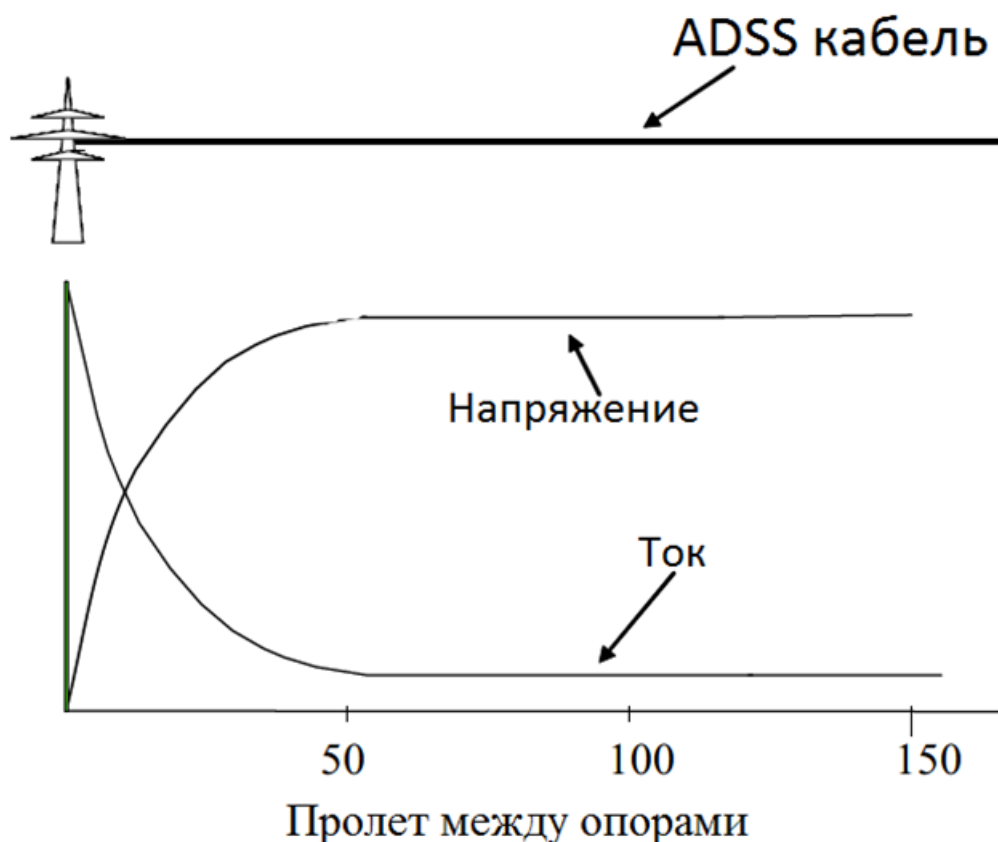


Рис. 2

В процессе длительного воздействия внешних переменных электромагнитных полей высокой напряженности происходит накопление зарядов как на оболочке ОК, так и на его внутренних элементах. При стекании таких зарядов к элементам с нулевым потенциалом (например, поддерживающим зажимам оптического кабеля (рис. 3), закрепленным к заземленным опорам) на внешней оболочке кабеля образуются поверхностные разряды. Если поверхность кабеля становится проводящей, то по всей длине кабеля начинается протекание токов. Результатом этих электрофизических процессов являются локальные термические разрушения поверхностного слоя на всей длине ОК, но в значительной степени в местах крепления кабеля подвесными зажимами, где проявляются большие переходные сопротивления при стекании тока на землю (рис. 4). В процессе исследований было установлено, что основной причиной обрыва кабеля на ЛЭП и контактных сетях ж/д являются именно коронные разряды, возникающие на промежутке кабеля и заземленного натяжного подвеса.

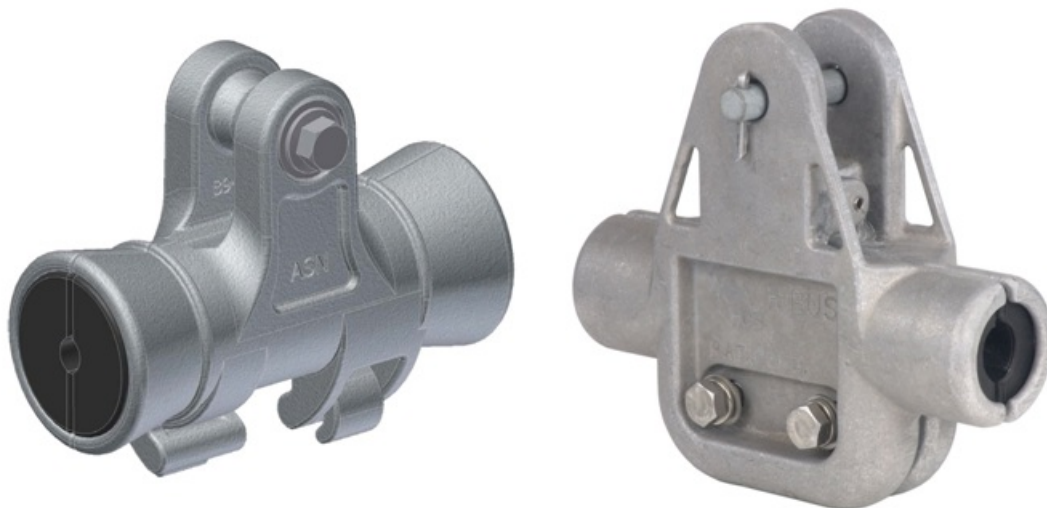


Рис.3 Поддерживающие зажимы ADSS кабеля

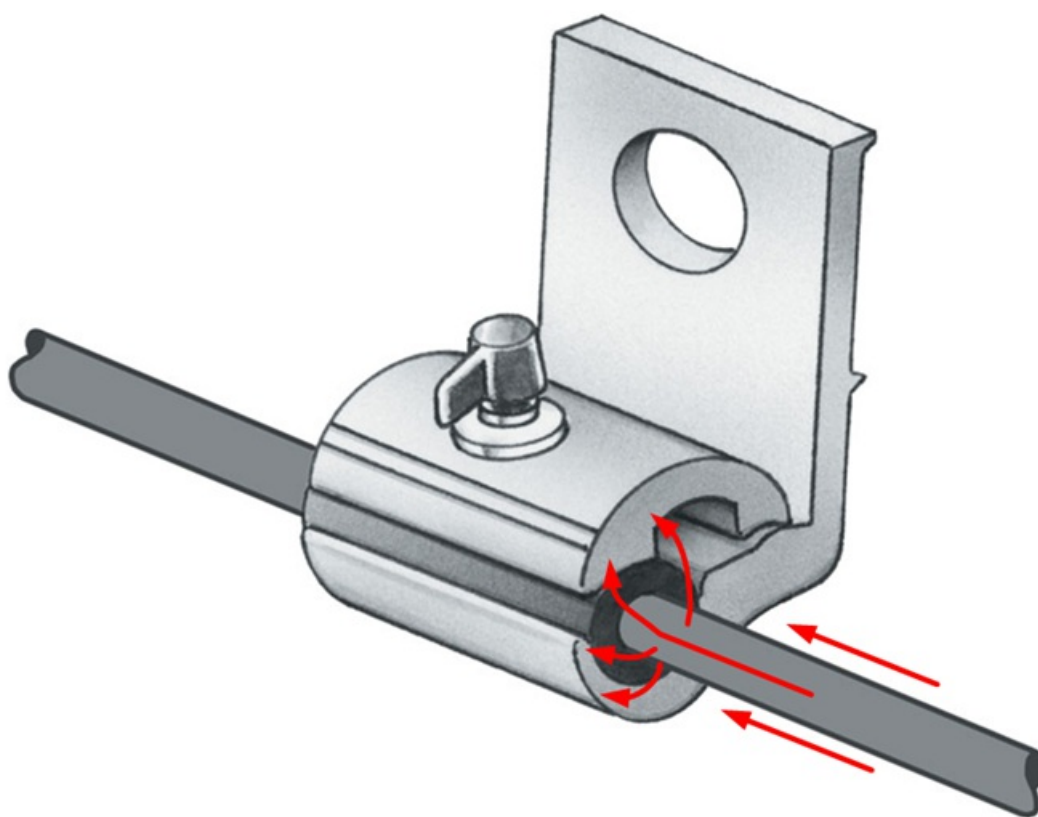


Рис. 4

Кроме того, разрушение кабеля происходит вследствие так называемого трекинг-эффекта. Дождевая вода, стекающая по поверхности кабеля, часто содержит растворённую грязь, различные токопроводящие частицы и т.д. которые оставляют следы на поверхности и образуют своеобразные грязевые токопроводящие дорожки, повторяя траектории стекающих капель. Такие дорожки называются треками. По мере накопления грязи на оболочке значение токов утечки начинает возрастать, что приводит к эффекту трекинга.

Также на поверхности кабеля может образоваться роса после прохладной ночи, которая увлажняет слой загрязнения на оболочке, превращая его в проводящий. При высыхании на поверхности кабеля может образоваться локальный сухой участок – сухая полоса. Эта сухая полоса имеет чрезвычайно высокое поверхностное сопротивление по сравнению с влажным слоем на остальных участках кабеля. В сухополосной области кабель будет обладать более высоким линейным импедансом, чем в других частях кабельной поверхности. Локальный высокий импеданс приводит к большому падению напряжения через короткий участок сухого кабеля. В результате возникает сухополосный разряд (рис. 5).

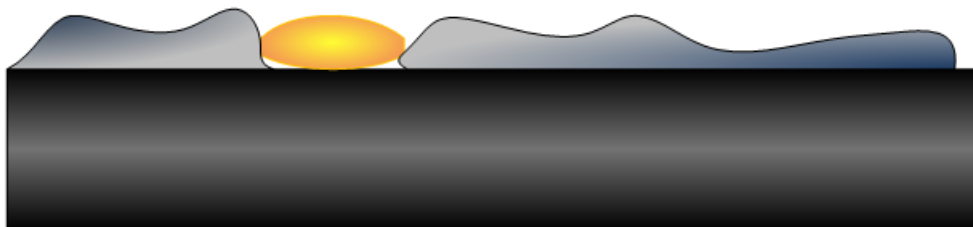


Рис. 5 Сухополосная дуга

Разряд, обладая высокой температурой, приводит к быстрому старению кабельной оболочки и как результат к ее разрушению. Если быть точнее, разряды, нагревая оболочку, способствуют возникновению в ней трещин, развивающихся в дальнейшем многочисленными циклами замораживания-размораживания, и таким образом приводят к разрушению конструкции кабеля.

На рис. 6 показан ход образования и развития трекинговых дорожек на поверхности кабелей при одновременном увеличении загрязнения и напряжения, приложенного к образцам.

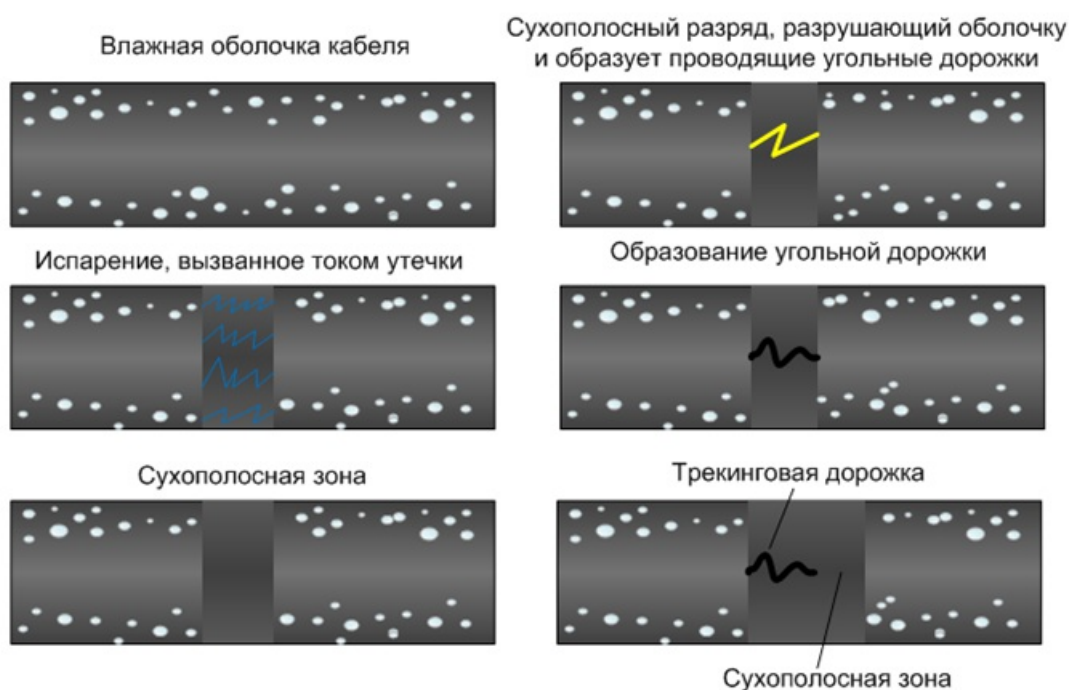


Рис. 6 К объяснению эффекта трекинга

Реальная картина разрушения оболочки вследствие эффекта трекинга показана на рис. 7.

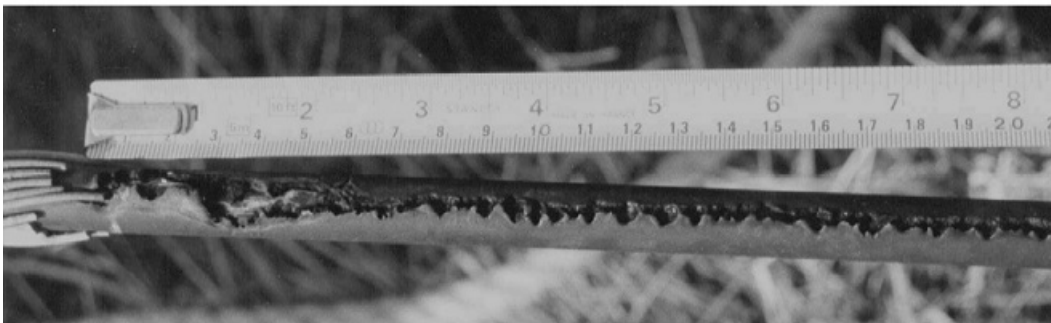


Рис. 7

На рис. 8 мы видим два типа деградации оболочки: рис. 8а, – образование продольного "желоба", который далее будет расширяться вдоль кабеля; рис. 8б – образование поперечных, кольцевых дефектов. Такого рода дефекты связаны с протеканием токов в несколько миллиампер.



а)



б)

Рис. 8 – Повреждения полиэтиленовой оболочки ADSS кабеля на линии 110 кВ

После приведенных разъяснений становится очевидно, что поверхностное сопротивление внешней полиэтиленовой оболочки ОК имеет большое практическое значение при эксплуатации волоконно-оптической линии связи вблизи силовых линий. Сопротивление оболочки ОК зависит от свойств самого диэлектрика, состояния его поверхности, а также в значительной степени от агрессивных внешних загрязняющих мелкодисперсных осадений, способствующих резкому снижению поверхностного сопротивления. Коронные разряды приобретают все более активный характер по мере уменьшения поверхностного сопротивления кабеля и степени его загрязненности. Если поверхность кабеля будет чистой и сухой, протекающие токи будут иметь очень малое значение (~ микроамперы). Однако если оболочка кабеля в процессе эксплуатации становится гидрофильной и загрязненной, сопротивление может уменьшиться до нескольких сотен кОм/м, и токи могут достигать значений в несколько миллиампер. Недавние исследования установили, что

полиэтиленовая оболочка является пригодной для использования при величине поверхностных токов менее 0,5 миллиампер. Такого рода ток является типичным, например, вблизи 150 кВ линии при нормальных условиях ее работы. Практики часто утверждают, что полиэтиленовая оболочка приемлема только на линиях с напряжением до 12 кВ. На более высоковольтных сетях должны использоваться специальные оболочки с высокой трекинг-эрозийной стойкостью. Здесь на самом деле многое будет зависеть от степени загрязненности и влажности оболочки, приводящих к более высокому току, нежели ожидалось.

Степень разрушения оболочки вследствие трекинг-эффекта зависит также от длины пролета. Образование сухополосных разрядов увеличивается с увеличением длины пролета. Таким образом, на ЛЭП более вероятно, что в первую очередь произойдет разрушение оболочки кабеля на самом длинном пролете.

Для исследования процесса разрушения оболочки ADSS кабеля проводятся лабораторные испытания на образцах кабелей, помещаемых в специальные камеры с повышенной влажностью, атмосферой солевого тумана или с повышенным ультрафиолетовым излучением.

## Исследование вопросов деградации ADSS кабеля в условиях воздействия поверхностных токов и ультрафиолетового излучения

Зарубежными учеными Al-Ammar, Karady, Tuominen [6] было проведено экспериментальное исследование влияния поверхностного тока на старение подвесных полностью диэлектрических кабелей. Приведем далее описание проделанного эксперимента, чтобы вы убедились во всей серьезности этого исследования.

Кабели с внешней полиэтиленовой оболочкой испытывались на устойчивость к различным воздействиям: ультрафиолетовой радиации, солевого тумана, дождя и механического напряжения. OK ADSS подвергались данным воздействиям в течение повторяющихся циклов, с целью имитации сезонных изменений климата.

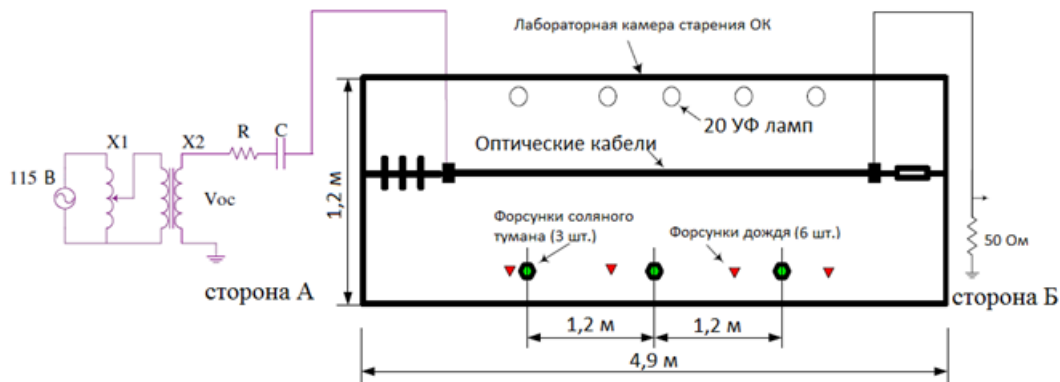


Рис 9. Схема экспериментальной установки

На рис. 9 представлена принципиальная схема экспериментальной установки. Главные компоненты установки: высоковольтный источник питания, специальная камера искусственного климата (в камере создавалась атмосфера солевого тумана, дождя, ультрафиолетового излучения), испытательные образцы оптических кабелей, RC-компоненты, система загрязнения (окружающей среды), система регулирования тока.

Источник питания состоит из автотрансформатора X1, управляющего первичным напряжением высоковольтного преобразователя X2 повышающего Voc до 115 кВ. Стены камеры, имеющей размеры 4.9x1.2x1.2 м, построены из винила. На верхней части камеры для наблюдения всего процесса было сделано окно.

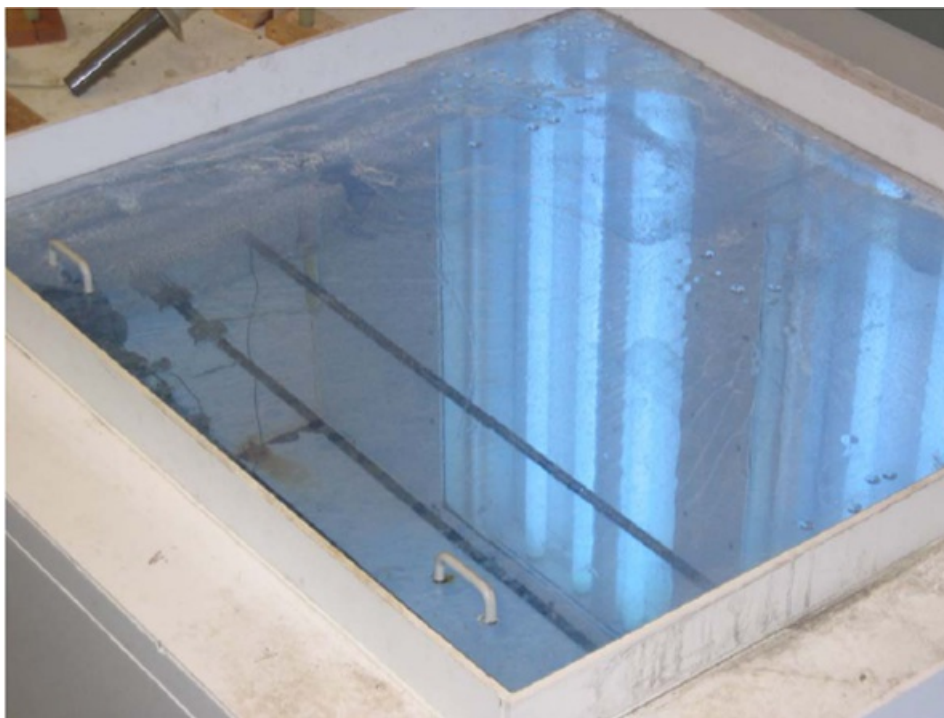


Рис. 10 – Фотография экспериментальной установки. Включены ультрафиолетовые лампы.

Пять групп ультрафиолетовых ламп, по четыре в каждой группе, были установлены на одной из стен камеры. С помощью специальных окон, не поглощающих ультрафиолетовый свет, лампы изолированы от систем имитации солевого тумана и влажной окружающей среды. Интенсивность излучения используемых ламп составляет около 2мВт на квадратный сантиметр поверхности кабелей, расположенных в центре камеры. Вытяжные вентиляторы около ламп поддерживают постоянную температуру.

Солевой туман – стандартизованный метод тестирования коррозионной стойкости различных защитных покрытий. В обычных условиях процесс коррозии довольно длительный. Этот метод позволяет провести ускоренные испытания стойкости покрытия. Имитация солевого тумана осуществлялась тремя форсунками (рис. 11), установленными на противоположной стене от ультрафиолетовых ламп. Для создания атмосферы солевого тумана потребовались 2 пластиковые емкости солёной воды общим объемом 1000 литров. Предыдущие исследования показали, что солёность воды выше 0.75% уже не влияет на результаты, поэтому солёность составляла 1%. Имитация дождя осуществлялась шестью водными форсунками (рис. 11), с углом распыления приблизительно 120 °.

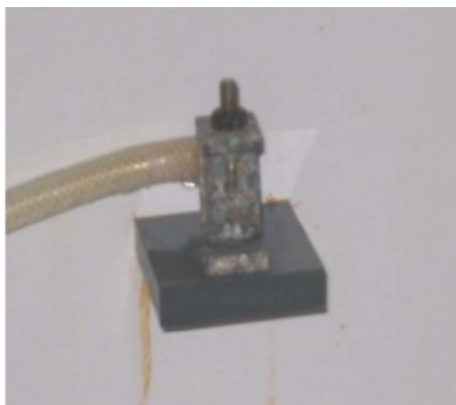


Рис 11. Слева: форсунка для распыления воды (дождь), справа: форсунка солевого тумана

Для имитации растягивающей нагрузки образец кабеля в камере подвешивался на полимерных изоляторах на стороне, где располагался источник высоковольтного напряжения (сторона А). На другой стороне Б (стороне заземления) была смонтирована система зажима кабеля с регулировкой силы растяжения, посредством стяжного винта и гайки (рис. 12).



Рис.12а Подвесные полимерные изоляторы на стороне А



Рис.12б Система натяжения на стороне Б

В качестве испытательных образцов выступали полностью диэлектрические оптические кабели

длиной 4.3 метра.

За 1 день проходили три восьмичасовых цикла работы различных систем (Таблица 1). Цикл начинается с включения на 2 часа УФ-ламп и системы солевого тумана. После получасового перерыва на 2 часа включается система дождя. Далее кабели сохнут на протяжении 30 минут. Заключительная стадия цикла – 3 часовая работа УФ ламп. При этом высокое напряжение прикладывается к образцам кабелей в течение всего цикла.

Таблица 2.

|               | 1-й час | 2-й час | 3-й час | 4-й час | 5-й час | 6-й час | 7-й час | 8-й час |
|---------------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|
| Дождь         |         |         |         |         |         |         |         |         |
| Соляной туман |         |         |         |         |         |         |         |         |
| УФ-излучение  |         |         |         |         |         |         |         |         |

С целью фиксации процесса разрушения/старения оболочек кабелей, регулярно выполнялось измерение их сопротивления.

Сначала в камере исследовались два кабеля: один находится под напряжением, а другой нет, но оба подвергаются воздействию УФ-излучения, солевого тумана, дождя и механических напряжений. Для кабеля под напряжением 25 кВ с помощью регулируемого контура RC имитировалось сильное загрязнение оболочки (при значениях сопротивления  $R=4.2$  МОм и емкости  $C=650$  пФ коэффициент загрязнения составляет  $P_i = 5$ ). Коэффициент загрязнения соответствует значению степени сопротивления оболочки ADSS кабеля на 1 м. Например сопротивление оболочки 10 в 8 степени Ом/м соответствует  $P_i = 8$ . Разрушение оболочки данного кабеля началось после 125 циклов. Через 125 циклов значение сопротивления уменьшилось до 10 в 6 степени Ом/м ( $P_i = 6$ ). Визуальный контроль кабеля и измерение силы тока позволяли судить о величине сухополосных разрядов. На рис. 13 приведена фотография повреждения ОК, которое произошло в середине отрезка кабеля – такое расплавление характерно для полиэтилена под действием электровольтовой дуги.



Рис. 13 Повреждения оболочки испытуемого ОК ADSS

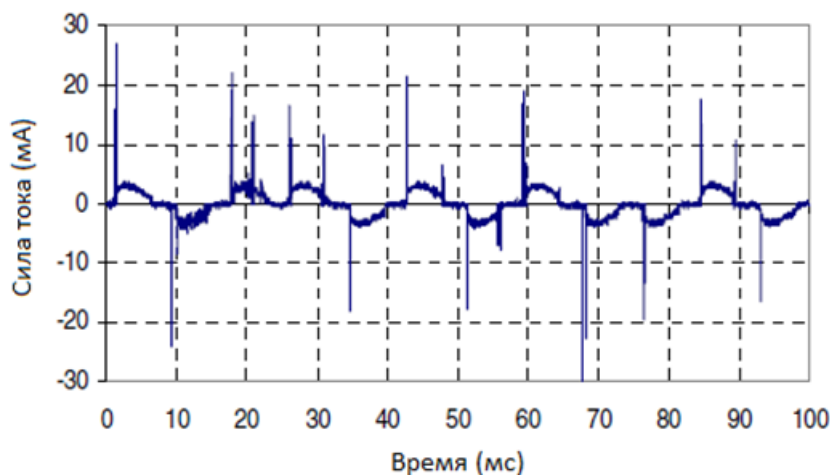


Рис.14 Сила тока на поверхности кабеля (скачки соответствуют возникновению разрядов)

Испорченный кабель заменили, и изменили коэффициент загрязнения на  $P_i = 7.0$  ( $R=42$  МОм и  $C=65$  пФ), для моделирования небольшого загрязнения оболочки кабеля. При таких параметрах кабель продержался без ощутимых разрушений оболочки 285 циклов. Считалось, что эксперимент можно завершать после 300 циклов, предполагая, что, если по истечении этого срока повреждение не произошло, то его уже и не будет. В результате, в точке 300 цикла можно сравнить целостность трех кабелей ADSS с полиэтиленовой оболочкой:

1. Кабель под напряжением, оболочка сильно загрязнена.
2. Кабель под напряжением, оболочка мало загрязнена.
3. Кабель не под напряжением.

Все кабели исследовались при одинаковых воздействиях УФ излучения, дождя и солевого тумана.

Рис. 15 наглядно демонстрирует результаты эксперимента. После 125 циклов на сильно загрязненном кабеле ток увеличился почти до 1 мА.

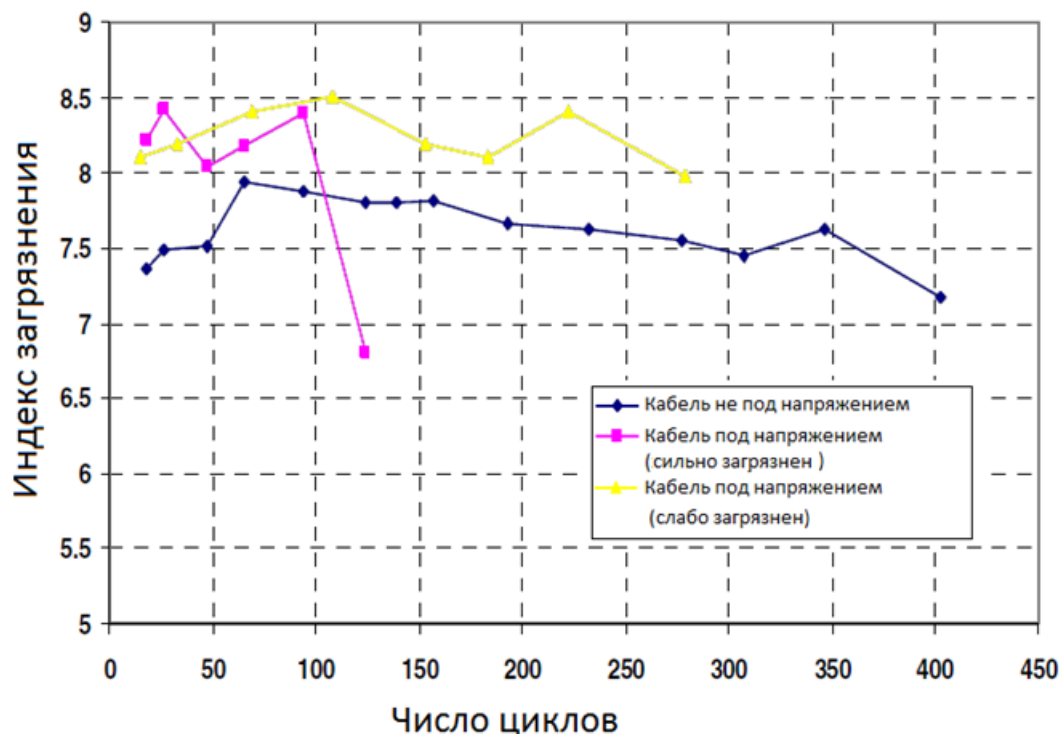


Рис. 15

Чрезвычайно трудно определить и проверить коэффициент ускоренного старения для любых тестов на ускоренное старение. Однако можно считать, что один месяц пребывания кабеля в используемой камере эквивалентен 17 месяцам (1.4 года) в полевых условиях. Таким образом, у кабеля с сильным загрязнением началось разрушение оболочки через 265.6 дней, а мало загрязненный кабель пережил 605.6 дней. Кабель ADSS без воздействия напряжения продержался 860.6 дней.

Несмотря на то, что поверхностный наведенный ток играет значительную роль при сильном

загрязнении оболочки оптического кабеля ADSS, еще нельзя точно утверждать, что электротермическая деградация всегда более разрушительна для оболочки, нежели воздействие других естественных факторов, включая ультрафиолетовую радиацию.

В следующий раз рассмотрим результаты анализа состояния ADSS кабеля, провисевшего на ЛЭП 132 кВ в течение 15 лет. Экспертам представилась возможность изучить поверхность кабеля после такой длительной эксплуатации.

1. Гороховский Е. В. Условия электропроводимости самонесущего волоконно-оптического кабеля. Экспериментальные данные // Журнал: Инженерный вестник Дона. Том: 27, №4, 2013.
2. В.А. Осипов, Г.Е. Соловьев, Е.В. Гороховский, А.А. Капкаев Проблемы электротермической деградации волоконно-оптических линий связи и перспективные направления их решения. // Журнал: Инженерный вестник Дона, № 1 (24), 2013.
3. Baozhuang Shi, George G. Karady "Experimental Studies of the Characteristics of Dry Band Arcing on ADSS Fiber Optic Cables" IEEE Transactions On Power Delivery, vol. 19, No. 4, 2004
4. А.С. Бочев, Г.Е. Соловьев, В.А. Осипов, О.В. Невретдинова. Влияние переменных электромагнитных полей высокой напряженности на интенсивность деградиационных процессов в структуре волоконно-оптических кабелей // Журнал: Вестник Ростовского государственного университета путей сообщения №2(34) 2009.
5. Е.А. Стороженко, А.С. Кляморов, Д.Е. Стороженко, К.С. Гукасов Снижение влияния электрического поля высоковольтных линий электропередачи на волоконно-оптические линии связи. // Журнал: Инженерный вестник Дона, № 2 (25), 2013.
6. Essam Al-Ammar, George G. Karady, Monty W. Tuominen "Impacts of the Induced Current on the Aging of the ADSS Fiber Optic Cables" Power Engineering Society General Meeting, 2006. IEEE
7. Essam Al-Ammar, George G. Karady, Monty W. Tuominen "Experimental Correlation of the Aging Process of the ADSS Fiber-Optic Cables in ASU's Environmental Chamber to Field Tests in Bandon, OR" IEEE Transactions On Power Delivery, vol. 23, No. 2, APRIL 2008.
8. Инструкция по предотвращению электротермической деградации ВОК, подвешенных на опорах контактной сети участков железных дорог ОАО "РЖД" с электротягой переменного тока, утвержденная распоряжением ОАО "РЖД" от 05 июня 2006 г.
9. Телетермины <http://nag.ru/articles/reviews/15503/teleterminyi.html>