***С.С. Ветлугаев**, канд. техн. наук, научный сотрудник;*
***А.А. Крючков**, канд. хим. наук, ведущий научный сотрудник;*
***Л.Е. Макаров**, канд. техн. наук, заведующий лабораторией;*
***Ю.В. Образцов**, канд. техн. наук, главный научный сотрудник;*
***П.В. Фурсов**, канд. техн. наук, ведущий научный сотрудник;*
***М.Ю. Шувалов**, д-р техн. наук, директор научного направления – заведующий отделением;*
ОАО «ВНИИКП»

Комплексный подход к исследованию повреждений муфт силовых кабелей высокого напряжения

Аннотация. Рассматриваются причины повреждений более 50 концевых и соединительных муфт по результатам проведенных в лабораториях ОАО «ВНИИКП» исследований элементов поврежденной арматуры. Проведена последовательная разборка муфт в лабораториях института с фотофиксацией. Определены физико-механические свойства эластомерных элементов муфт. Рассчитана напряженность электрического поля в различных конструкциях высоковольтной кабельной арматуры. Для исследования изоляционных материалов муфт применялись методы инфракрасной спектрометрии и термического анализа. Результаты исследования представлены сгруппированными по трем основным причинам повреждений: ошибки монтажного персонала, производящего монтаж муфт на КЛ; недостатки конструкций муфт, приводящие к ограничению срока службы муфт и недоработки проектных решений по выбору и установки муфт для данных условий эксплуатации на КЛ.

Ключевые слова: кабельная линия, концевые, соединительные муфты, эластомерные элементы, монтаж, выравнивающий конус, электрический пробой изоляции.

Abstract. The failures of more than 50 pieces of HV cable terminations and joints are analyzed and discussed according to the results of conducted studies of the failed accessories elements in the JSC «VNIIKP» laboratories. The disassembly of cable accessories with taking photo was carried out in laboratory of JSC “VNIIKP”. The physical and mechanical properties of the elastomeric elements of the joints were determined. Electric field was calculated in various designs of high voltage cable accessories. Methods of infrared spectrophotometry and thermal analysis were used for the study of joints and terminations insulating materials. The presented results are grouped according to three reasons of failures: errors of assembling staff, arising during installation of the accessories on cable system; disadvantages of design, leading to restriction of the service life of accessories and drawbacks of accessories choice for the particular operating conditions.

Keywords: ???

Материал поступил в редакцию 30.01.2017
Ветлугаев С.С. E-mail: s.vetlugaev@vniikp.ru

ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время в электрических сетях РФ эксплуатируются концевые и соединительные муфты одиннадцати ведущих европейских и азиатских фирм-производителей арматуры для кабельных линий (КЛ) с изоляцией из сшитого полиэтилена на напряжение до 500 кВ.

Несмотря на качественное изготовление муфт для кабелей высокого напряжения, которое подтверждается положительными результатами приемосдаточных испытаний всех выпускаемых муфт, их отдельные экземпляры в процессе эксплуатации выходят из строя. Причинами повреждений муфт могут являться недостатки их конструкций, попадание внешних загрязнений в разрядный промежуток и некачественный монтаж. Международная организация СИГРЭ в разные годы проводила опросы энергосистем по ситуации с повреждением кабелей и муфт. По результатам опроса 73 организаций из 23 стран, эксплуатирующих КЛ с изоляцией из сшитого полиэтилена на напряжение 69–220 кВ [1], среднегодовая повреждаемость кабеля на 100 км линии составляла 0,085, среднегодовое количество повреждений соединительных муфт на 100 шт. было 0,007, а концевых муфт на 100 шт. – 0,011. При незначительной стоимости муфт – до 10 % стоимости КЛ, ликвидация последствий выхода из строя КЛ по причине повреждения муфт может приводить к серьезным финансовым потерям, связанным с отключением потребителей, дополнительными раскопками и перемонтажом муфт.

ОАО «ВНИИКП» проведены исследования более 50 муфт высокого напряжения (110–220 кВ), демонтированных из КЛ в энергосистемах по причине электрического пробоя изоляции. Все отказы муфт произошли в период приработки (0,5–5 лет эксплуатации). Комплексный подход к исследованию муфт предусматривает выполнение следующих этапов работ:

1) ознакомление с инструкцией по монтажу муфт с целью проверки соблюдения ее требований при выполнении отдельных операций;

2) последовательная разборка муфт в лабораториях института с фотофиксацией всех этапов разборки;

3) определение геометрических размеров электродов и изоляции по срезам из эластомерных элементов муфт, расчет напряженностей электрического поля в кабельной арматуре в системе ELCUT 5;

4) отбор проб электроизоляционной жидкости из концевых муфт, проверка электроизоляционных свойств жидкости и вырезание образцов материала из эластомерных элементов муфт;

5) по мере необходимости – исследования образцов материала муфт методами термоанализа, ИК-спектрометрии, световой микроскопии;

6) анализ фотографий, полученных при разборке муфт;

***Рис. 1**. Картина электрического пробоя изоляции выравнивающего конуса концевой муфты, связанного с некачественной обработкой поверхности изоляции кабеля*

7) определение механических и других свойств эластомерных и других материалов муфт на основании испытаний «лопаток», вырезанных из материала в соответствии с ГОСТ Р МЭК 60811-1-1–98;

8) определение возможных причин пробоя по результатам работы по этапам 1÷7.

Ниже представлены результаты исследований концевых и соединительных муфт.

КОНЦЕВЫЕ МУФТЫ

В обзорах СИГРЭ отмечена большая повреждаемость концевых муфт в сравнении с соединительными (различие более чем на 50 %). В обследованных во ВНИИКП повреждениях арматуры большая доля (до 70 %) также приходилась на концевые муфты. Все рассматриваемые случаи повреждений концевых муфт связаны с нарушениями положений монтажных инструкций, попаданием воды в разрядный промежуток муфты и недостатками конструкций.

Нарушения монтажных инструкций в основном связаны с некачественной обработкой изоляции кабеля при монтаже, когда на поверхности изоляции кабеля под выравнивающим конусом остаются повреждения (неровности, царапины или следы от остановки ножа для снятия экрана). При этом образуются выступы и углубления, которые приводят к снижению давления изоляции выравнивающего конуса на поверхность изоляции кабеля. В микрополостях, сформированных при монтаже, возникают частичные разряды (ЧР), которые приводят к образованию электрического триинга, прорастающего с поверхности изоляции до жилы кабеля, и пробою изоляции кабеля и выравнивающего конуса с выходом на регулирующий электрод (рис. 1).

Процесс развития электрического пробоя при этом может продолжаться длительное время: от нескольких месяцев до трёх лет [2]. Длительность развития электрического пробоя зависит от скорости миграции кремнийорганической смазки, заполняющей микрополости на поверхности изоляции кабеля под выравнивающим конусом.

При попадании загрязнений или влаги в заполняющую муфту электроизоляционную жидкость электрический пробой, как правило, развивается по поверхности выравнивающего конуса. Вода попадает в полость концевой муфты по причине отсутствия герметичности, что может быть связано как с недостатками конструкции, так и с нарушениями требований монтажной инструкции или неоднозначностью трактовки

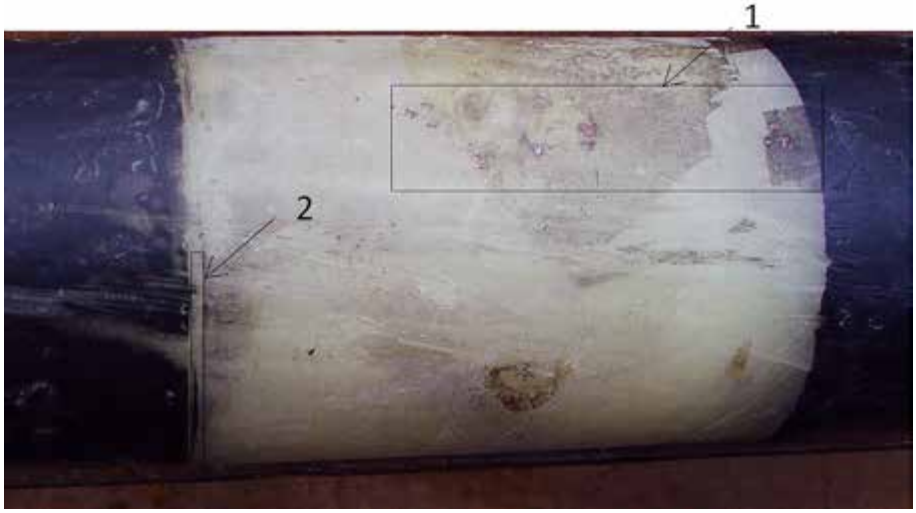


***Рис. 2**. Состояние поверхности кабеля в зоне установки выравнивающего конуса после электрического пробоя (1 – следы медной сетки экрана; 2 – область скользящих разрядов)*

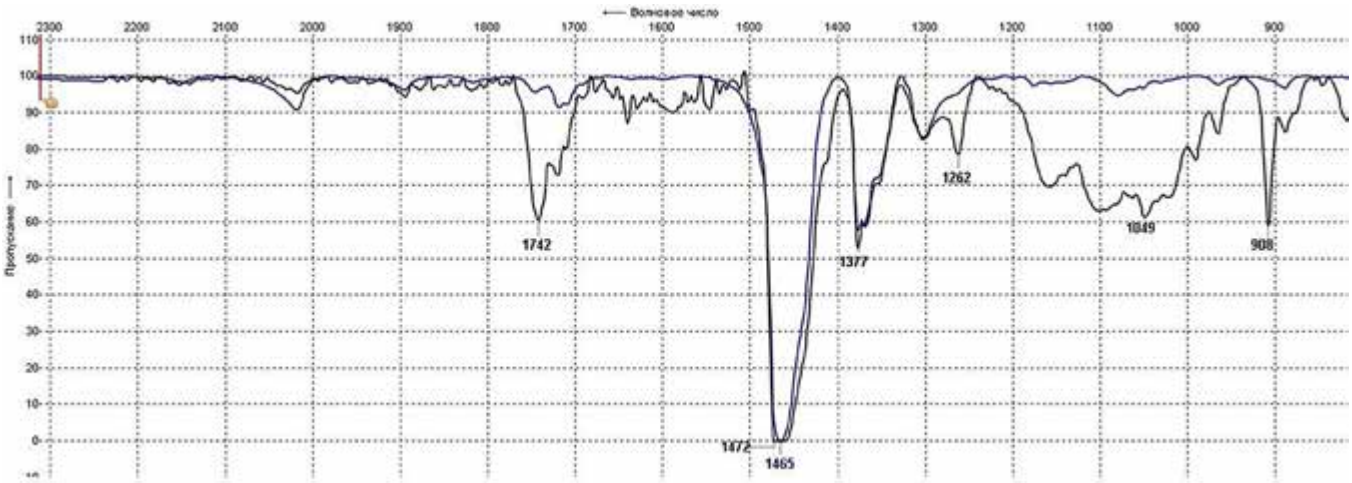


Рис. 3. *ИК спектры изоляции в области 2 на рис.2: черная линия – поверхностный слой, фиолетовая линия – слой на расстоянии 1 мм вглубь от поверхности. (ИК фурье-спектрометр Инфралюм ФТ-801 с приставкой МНПВО, разрешение 4 см$^{-1}$)*

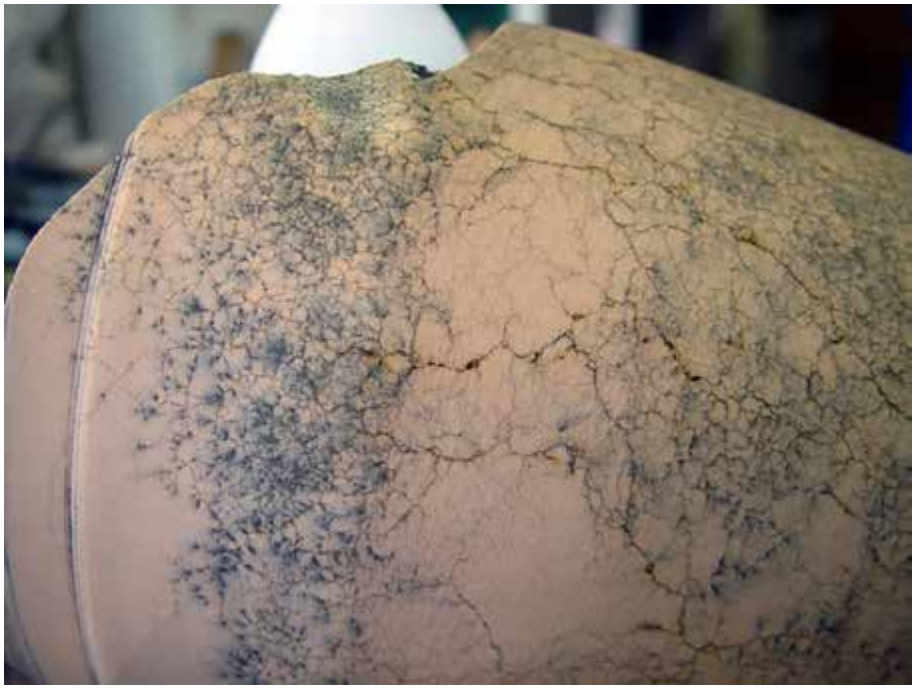


Рис. 4. *Картина электрического пробоя изоляции выравнивающего конуса концевой муфты, связанного с попаданием воды в изоляционную жидкость, заполняющую муфту*

её пунктов в части подготовки масла для заполнения муфты. Эмульгированная вода или ~~лёд~~ скапливаются в местах наибольшей напряженности электрического поля – на поверхности выравнивающего конуса. Из-за высокой продольной напряжённости поля в области окончания электропроводящего электрода на поверхности конуса и изоляции кабеля в загрязненном/увлажненном масле возникают скользящие разряды. Интенсивные скользящие разряды на поверхности ~~изоляции кабеля (рис. 2)~~ приводят к нагреву и разложению масла и увеличению тока в канале разряда, что способствует дальнейшему развитию канала.

Факт увеличения температуры в поверхностных слоях изоляции кабеля из-за критических скользящих разрядов в области, отмеченной цифрой 2 на рис. 2, косвенно подтверждается данными ИК спектроскопии. Спектры поверхностных слоев изоляции в этой области характеризуются заметно большей интенсивностью полосы поглощения карбонильной группы $\nu(C{=}O) = 1742$ см$^{-1}$ (рис. 3), что можно объяснить окислением полиэтилена.

Ещё одной особенностью ИК спектров поверхностных слоев изоляции является наличие полос поглощения при 908 и 965 см$^{-1}$, относящихся к винильным группам: известно, что винильные группы в полиэтилене образуются при температуре выше 300 ºС [3]. Результаты проведённых исследований позволяют заключить, что поверхностные слои изоляции (на глубину менее 1 мм) подвергались кратковременному, возможно менее 1 с, тепловому воздействию, эффективная температура которого значительно превышала 300 ºС.

В представленном на рис. 4 случае электрический пробой изоляции муфты связан с попаданием воды в электроизоляционную жидкость. Ещё в трёх случаях попадания воды в концевую муфту наблюдалась подобная картина развития электрического разряда по поверхности выравнивающего конуса, которая характеризуется разветвленностью следов разряда.

При наличии воды в электроизоляционной жидкости не всегда удаётся стандартными методами определить её электрические характеристики ($E_{пр}$, tgδ) из-за значительных токов утечки. Содержание влаги для муфты с выравнивающим конусом, показанным на рис.4, оценивалось методами термического анализа (ТГА, ДСК) (рис. 5, 6)*. Согласно данным анализа содержание влаги в масле пробитой муфты составило 1,0 %.

Вода в электроизоляционной жидкости может быть в трёх физических состояниях: а) растворённом; б) в виде коллоидного раствора (эмульсии); в) в виде макровключений произвольного размера. Вода в жидком диэлектрике может переходить из одного состояния в другое при изменении температуры: при понижении температуры растворимость

* Авторы выражают благодарность сотруднику ОАО «ВНИИКП» Степановой Т.А. за проведённые работы по измерению влагосодержания электроизоляционных жидкостей.

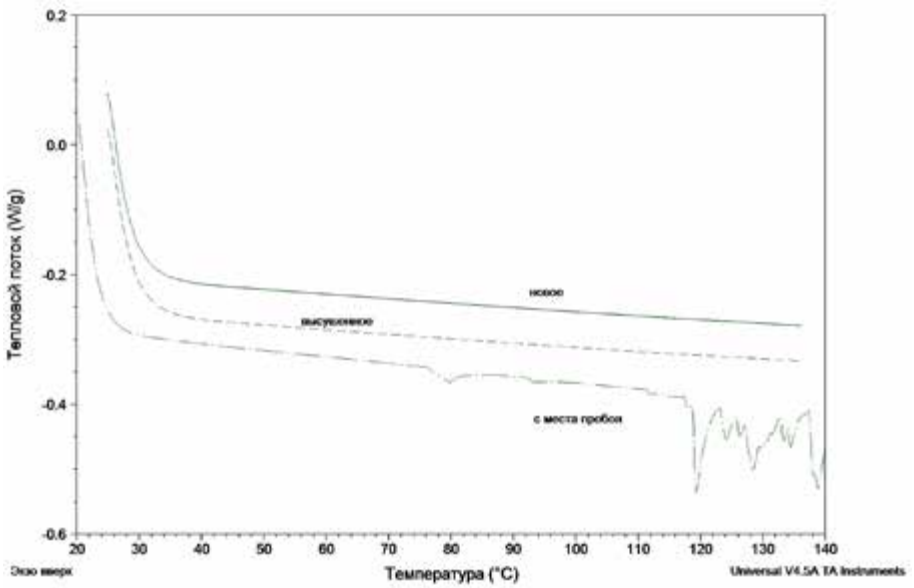


Рис. 5. *ДСК термограмма, иллюстрирующая наличие влаги в изоляционной жидкости поврежденной муфты (эндотермические пики при температуре 120 °С)*

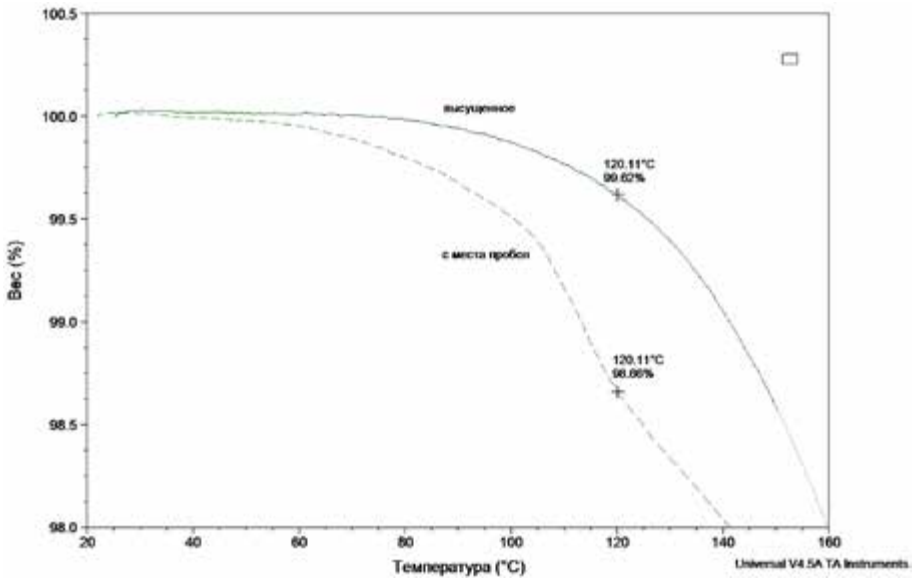


Рис. 6. *Кривая ТГА для расчета количества влаги в изоляционной жидкости пробитой муфты*

снижается, устойчивость коллоидного раствора утрачивается и эмульгированная вода выделяется в виде макроскопической фазы, которая при дальнейшем понижении температуры может образовывать кристаллы льда. Поэтому большинство подобных случаев электрического пробоя изоляции концевых муфт произошли в холодное время года. Для исключения попадания влаги в полость концевых муфт авторами было предложено внести изменения в инструкцию по монтажу муфт, касающиеся режима термической обработки заполняющей жидкости, а также отбора проб жидкости из муфт.

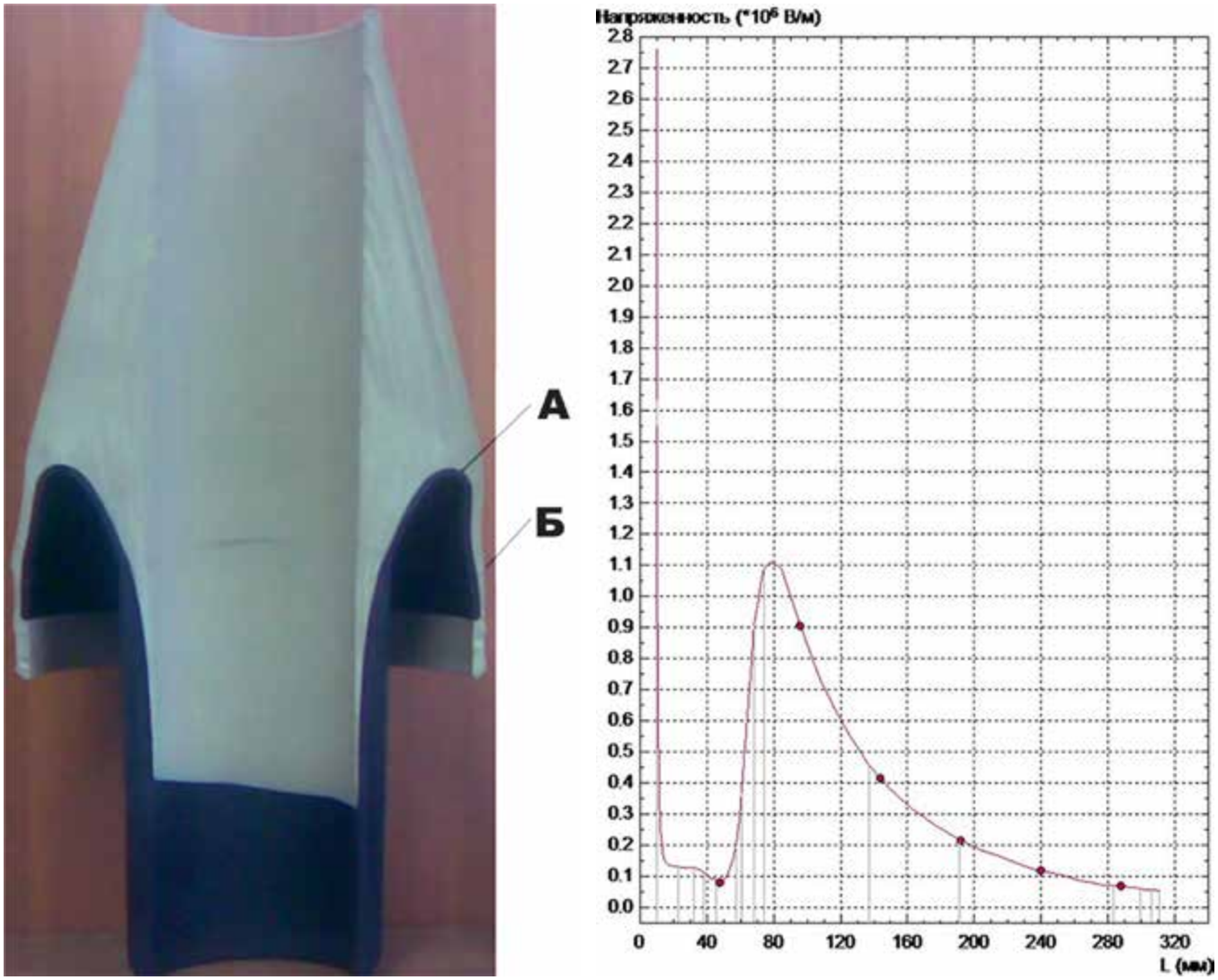
Примером неудачного технического решения, принятого в концевой муфте, можно считать использование металлических хомутов для закрепления выравнивающего конуса внутри муфты, которые устанавливаются в зоне Б (рис. 7а). При этом, как показывают результаты расчета продольной напряженности электрического поля, напряженность в области Б (рис. 7в) возрастает более чем в 2,5 раза в сравнении с максимальной напряженностью в точке А на выравнивающем конусе. Такое увеличение напряженности электрического поля является критическим для разрядного промежутка концевой муфты, а в случае появления влаги и загрязнений в масле приводит к электрическому пробою изоляции муфты.

СОЕДИНИТЕЛЬНЫЕ МУФТЫ

Во всех исследуемых во ВНИИКП повреждениях соединительных муфт электрический пробой изоляции муфт связан с ошибками и нарушениями монтажных инструкций, заводскими дефектами в изоляции муфт (один случай), а также недоработками технических решений, связанных с применением защитных кожухов муфт.

Основной изоляционный элемент современных соединительных муфт кабелей высокого напряжения отливается из жидкой кремнийорганической резины типа LSR или резины комнатной вулканизации типа RTV и проходит приемосдаточные испытания в заводских условиях. Монтаж эластомерных элементов муфт проводят в полевых условиях на подготовленных в соответствии с монтажной инструкцией концах соединяемых кабелей. Эластомерный элемент устанавливают с натягом на кабель; при этом электрическая прочность границы «эластомерный элемент – изоляция кабеля» определяется давлением этого элемента на изоляцию кабеля. При проведении экспертизы причин повреждения соединительных муфт были выявлены следующие нарушения монтажных инструкций: недостаточное выпрямление концов кабеля, некачественная обработка поверхности изоляции кабеля и отсутствие герметизации кожуха соединительной муфты. Установка эластомерного элемента на изогнутом участке кабеля, или изгиб кабеля после укладки муфты приводит к снижению давления эластомерного элемента муфты на изоляцию кабеля на внутренней поверхности изогнутого участка. Соответственно, снижение давления уменьшает электрическую прочность границы «эластомерный элемент – изоляция кабеля». В результате развития скользящих разрядов на этой границе происходит электрический пробой изоляции, как правило, с полным перекрытием промежутка между электродами, как показано на рис. 8.

Дефекты из-за некачественной обработки поверхности изоляции кабеля и/или попадания влаги на поверхность раздела при монтаже или эксплуатации муфты из-за плохой герметизации кожуха соединительной муфты также снижают электрическую прочность границы раздела. Если такие дефекты находятся в области края регулирующего



а *в*

Рис. 7. *Выравнивающий конус концевой муфты на напряжение 220 кВ (а) и результаты расчета распределения продольной напряженности электрического поля с учетом закрепления конуса металлическим хомутом в области Б (в)*

электрода муфты (рис. 9), где продольная составляющая напряженности электрического поля на поверхности изоляции кабеля является максимальной, то снижение электрической прочности поверхности раздела «изоляция кабеля – изолятор муфты», приводит к возникновению ЧР и образованию электрического триинга в изоляции кабеля. Прорастание электрического триинга сквозь изоляцию кабеля приводит к пробою изоляции муфты и замыканию дуги на регулирующий электрод.

Технологический дефект, выявленный при исследованиях изоляции соединительных муфт, связан с отслоением изоляции (обозначено стрелкой на рис. 10) от регулирующего электрода в соединительной муфте на напряжение 220 кВ. В практике производства соединительных муфт подготовка электродов под заливку электроизоляционной композицией (механическая обработка и тщательный осмотр) занимает значительную часть времени. Но в приведенном случае, по-видимому, был допущен пропуск необработанного места, и, как следствие, адгезия материалов при заливке электроизоляционной композиции отсутствовала.

Принятая в ОАО «ВНИИКП» практика проведения исследований эластомерных элементов муфт предусматривает определение механической прочности при разрыве «лопаток», содержащих границу раздела «электропроводящая резина – электроизоляционная резина» (рис. 11). Лопатки для оценки адгезии вырезают из эластомерных элементов на границе перехода двух резин. Накопленная информация по испытаниям «лопаток» используется при комплексной оценке качества эластомерных элементов муфт.

В каталогах зарубежных фирм предусматривается применение полимерных (термоусаживаемых), а также металлических и стеклопластиковых кожухов соединительных муфт в зависимости от условий прокладки. При проведении исследований поврежденных соединительных муфт кабелей высокого напряжения эксперты ОАО «ВНИИКП» столкнулись с ситуацией ошибочных технических решений, связанных с использованием различных защитных кожухов. Так, в жестких условиях каменистого грунта соединительные муфты устанавливают без дополнительного защитного кожуха. Из-за отсутствия соответствующей внешней защиты внешнее давление от грунта, плиты и т.д. передается на изолятор муфты, что приводит к ослаблению его давления на поверхность изоляции кабеля в направлении, перпендикулярном направлению приложения внешнего усилия,

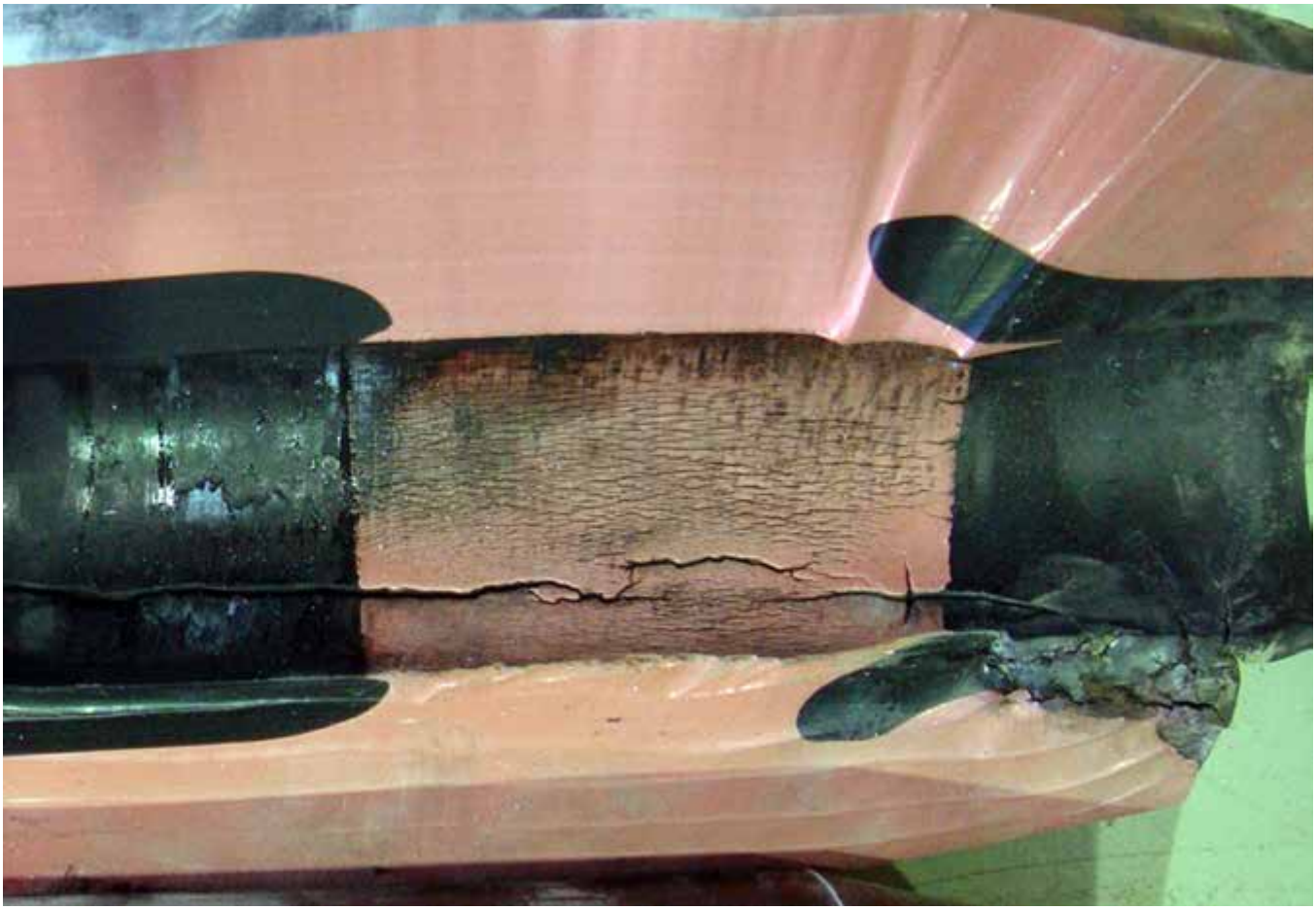


Рис. 8. *Следы электрической дуги на внутренней поверхности эластомерного элемента при электрическом пробое соединительной муфты на напряжение 110 кВ (трещины образовались в результате воздействия высокой температуры при горении дуги)*

Рис. 9. *Электрический пробой изоляции у края регулирующего электрода (обозначен 1) в соединительной муфте на напряжение 110 кВ*

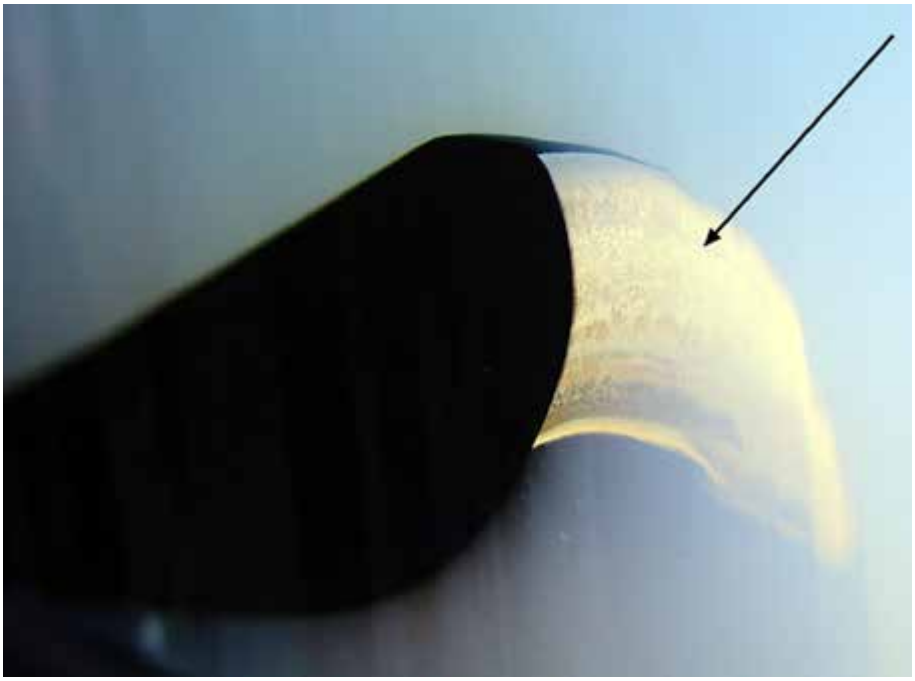


Рис. 10. *Отслоение изоляции от регулирующего электрода в соединительной муфте на напряжение 220 кВ (показано стрелкой)*

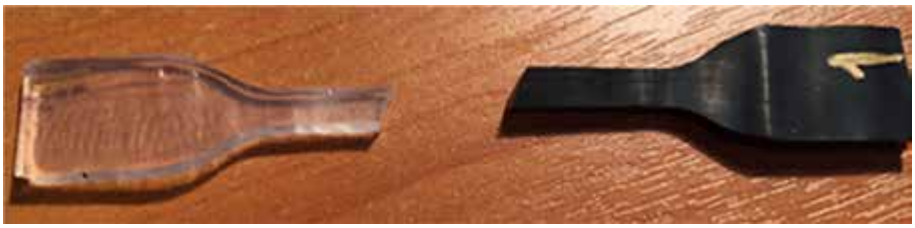


Рис. 11*. Испытанный образец в виде лопатки, содержащей границу раздела «электропроводящая резина – электроизоляционная резина»*

и как следствие – к развитию пробоя по границе раздела «эластомерный элемент – изоляция кабеля».

Для исключения подобных ошибок ОАО «ВНИИКП» были внесены дополнения в первую редакцию разрабатываемого АО «Институт «ЭНЕРГОСЕТЬПРОЕКТ» национального стандарта «Кабельные линии напряжением от 6 до 500 кВ. Требования к техническому проектированию», учитывающие различные исполнения соединительных муфт.

ВЫВОДЫ

Результаты проведенных комплексных исследований показывают, что для увеличения надежности работы концевых и соединительных муфт кабелей высокого напряжения необходимо:

1) повышать квалификацию монтажного персонала, проводить периодическую переаттестацию персонала и обеспечивать шеф-надзор за монтажными работами;

2) предусмотреть отбор проб электроизоляционного масла из концевых муфт, накапливать и анализировать информацию о показателях масла;

3) совершенствовать качество технической документации на муфты и, в первую очередь монтажных инструкций, с целью сделать их более четкими и однозначными для понимания.

ЛИТЕРАТУРА

1. Update of service experience of HV underground and submarine cable systems // Technical Brochure 379 CIGRE. – WG B1.10, april 2009. – 85 p.

2. *Van Maanen, C.Plet, Van Der Wielen, S.Meijer, F. de Wild, F.Steennis.* Failures in underground power cables-return of experience. – Jicable 15. – Versailles, 21–25 june, 2015. – 265–269 p.

3. *Мадорский С.* Термическое разложение полимеров. – М.: Мир, 1967. – 328 с.

ПОДПИСАТЬСЯ НА ЖУРНАЛ «КАБЕЛИ И ПРОВОДА» МОЖНО В РЕДАКЦИИ

Стоимость подписки на I полугодие 2017 года (3 номера), в рублях:

- для членов Ассоциации «Электрокабель» – 1275 руб.,
- для учебных заведений и студентов – 480 руб.,
- для остальных подписчиков России и стран СНГ – 1380 руб.,
- для подписчиков зарубежных стран – 33 у.е.

НДС не облагается по ст. 145 НК РФ

По вопросам подписки обращайтесь
к Алле Евгеньевне Тимофеевой
Тел./факс: (495) 918–1627
E-mail: kp@vniikp.ru, alla_timofeeva_60@mail.ru

Реквизиты для оплаты в рублях:

ИНН 7722159427
КПП 772201001
р/с: 40702810238120102932
в Московском банке
ПАО «Сбербанк», г. Москва
к/с: 30101810400000000225
БИК 044525225

Подписной индекс в каталогах агентств «Роспечать» и «Урал-Пресс» – **79943**