



ПРИЧИНЫ ВЫХОДА ИЗ СТРОЯ МУФТ КАБЕЛЕЙ С ИЗОЛЯЦИЕЙ ИЗ СШИТОГО ПОЛИЭТИЛЕНА НА СРЕДНЕЕ И ВЫСОКОЕ НАПРЯЖЕНИЕ

В статье проведен анализ современных литературных источников с научно-техническими данными относительно опыта установки, эксплуатации, испытания и исследования муфт кабелей с изоляцией из сшитого полиэтилена. Показаны и обобщены основные причины повреждения и выхода из строя кабельной арматуры среднего и высокого напряжения. Описаны методы диагностики кабельных линий и международная практика их испытаний. Приведены ведущие испытательные центры и мировые производители кабельных муфт.

К л ю ч е в ы е с л о в а: соединительные и концевые кабельные муфты, кабели на среднее и высокое напряжение, сшито-полиэтиленовая (СПЭ) изоляция, трекинг, частичные разряды, водные и электрические тринги, переходные процессы, перенапряжения, методы диагностики.

Введение. Важным и необходимым элементом любой кабельной линии является кабельная арматура, в том числе соединительные и концевые муфты (Рис. 1) [1]. На достаточно небольшой строительной длине кабельных линий может использоваться немалое количество муфт. К примеру, первая в Украине сверхвысоковольтная кабельная линия (на напряжение 330 кВ), действующая в Днепропетровске, имеет длину около 13 км и 14 соединительных муфт [2].

Соединительные муфты (Рис. 2, а) предназначены для соединения строительных длин кабеля с целью соблюдения непрерывности цепи, используются также для герметизации участков соединения и защиты кабелей от механических воздействий, могут изготавливаться со специальной броней, например, со стальной ленточной или проволочной броней [3].

Концевые муфты (Рис. 2, б) служат для присоединения кабелей к электроаппаратам наружной и внутренней установки или воздушным линиям электропередачи, а переходные муфты — для соединения кабелей с различным типом изоляции, например, кабелей с бумажной изоляцией с кабелями, имеющими пластмассовую изоляцию. Транспозиционные муфты используются для транспозиции (перекре-

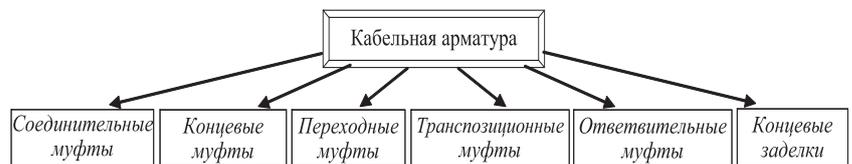


Рис. 1. Классификация кабельной арматуры по назначению.

стного соединения) экранов кабелей, вывода экрана или для одностороннего заземления экрана отдельных отрезков прокладываемого кабеля. С помощью ответвительной муфты осуществляется присоединение ответвительного кабеля к магистральной кабельной линии. Концевые заделки являются устройством, соединяющим кабели с электрическими аппаратами внутренней установки.

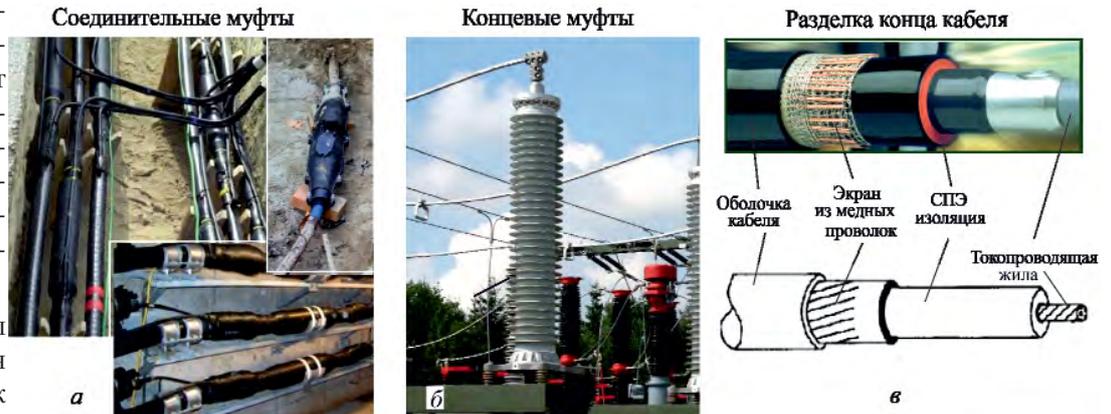


Рис. 2. Соединительные (а) и концевые (б) муфты [4, 5]; основные элементы кабеля с СПЭ изоляцией и разделка кабеля для установки муфты [4] (в).



Рис. 3. Причины аварий и повреждений кабельных линий различного класса напряжения [8, 9]. Диаграмма справа представляет статистику повреждений кабельных линий среднего напряжения в Северной Америке.

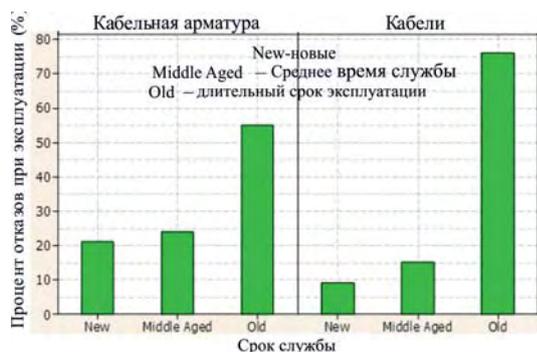


Рис. 4. Статистика отказов кабелей и кабельной арматуры в зависимости от времени эксплуатации [10].

В течение последних десятилетий установилась мировая тенденция использования в системах передачи и распределения электроэнергии кабелей с изоляцией из сшитого полиэтилена (СПЭ) [1, 6, 7]. Данный обзор представляет информацию для муфт таких кабелей.



Рис. 5. Образование трекинговых дорожек на поверхности концевых муфт [4].

Кабельные муфты являются наиболее слабым звеном кабельных линий. От их качества и надежности работы зависит надежность работы всей кабельной линии. Муфты имеют достаточно сложную конструкцию, содержат внутреннюю и внешнюю изоляцию, а также компоненты кабеля (разделка конца кабеля показана на Рис. 2, в). В свою очередь, надежность и эффективность работы кабельной арматуры во многом определяются ее конструкцией и технологией монтажа, используемыми изоляционными материалами и средствами выравнивания электрического поля.

Отметим, что перед монтажом муфты проводится разделка кабеля на его конце — с определенным сдвигом последовательно и послойно удаляются части элементов кабеля (Рис. 2, в). Размеры разделки строго регламентированы, зависят от сечения и марки кабеля, напряжения на линии, приводятся в справочниках и инструкциях по монтажу.

На Рис. 3 в соответствии с данными работ [8, 9] по состоянию на 2016 г. приведено распределение причин аварийных ситуаций и выходов из строя кабельных линий различного класса напряжения по повреждению их составляющих элементов. Как показано, для кабельных линий среднего напряжения значительное число аварий связано со сращиванием кабелей без использования специальных кабельных муфт. Такая технология применяется, например, в случаях, когда необходимо создать соединение кабелей в местах, доступ к которым после окончания работ будет невозможен или затруднен. Отметим, что согласно классификации МЭК к кабелям среднего напряжения относятся кабели от 6 до 36 кВ, высокого напряжения — от 36 до 161 кВ, сверхвысокого напряжения — от 161 до 500 кВ.

Согласно статистике выходят из строя 20% новых кабельных муфт [10] (Рис. 4). Вместе с тем, некачественность монтажа является причиной около 50% случаев отказов в работе кабельных линий, заводские дефекты приводят к аварийности в 15% случаев; остаются невыясненными причины примерно 20% всех случаев отказов [10].

Надежность кабельных линий и арматуры зависит не только от перечисленных факторов, но и многих других, в том числе от исполнения кабелей — использования одножильных или трехжильных кабелей.

В настоящее время в электрических сетях высокого напряжения (110–500 кВ) прокладываются одножильные силовые кабели с СПЭ изоляцией, а в сетях 6–35 кВ, кроме трехфазных кабелей с бумажно-масляной изо-

Рис. 6. Характерные дефекты силовых кабелей с СПЭ изоляцией (а) и соединительных кабельных муфт (б) [8, 9].



ляцией, используются как одно-, так и трехжильные кабели с СПЭ изоляцией.

Преимущества одножильных кабелей с СПЭ изоляцией состоят в следующем [11]:

- увеличение строительной длины и, соответственно, уменьшение числа муфт;
- расширенный ряд номинальных сечений, до 1000 мм² и более;
- меньшие вес, диаметр и радиус изгиба (при прокладке одной фазы);
- более простое производство и более высокая надежность;
- упрощение монтажных и ремонтных работ.

Высокая электрическая прочность кабельных муфт достигается надлежащим регулированием электрического поля в изоляции. Известны два основных способа выравнивания электрического поля (Рис. 7) [1, 5, 12]), которые применяются в современной кабельной арматуре на напряжении выше 1 кВ:

- рефракционный способ с использованием выравнивающих трубок и специально разработанных мастик; при этом материал трубок имеет достаточно высокую диэлектрическую проницаемость, на порядок превышающую диэлектрическую проницаемость основной изоляции; трубка усаживается на место среза основных элементов кабеля – экрана, полупроводящего покрытия изоляции и охватывает как экран, так и СПЭ изоляцию (Рис. 7, а сверху);

- геометрический способ (в основном для муфт кабелей на высокое и сверхвысокое напряжение и концевых муфт) с использованием дополнительных элементов специальной формы – так называемого стресс-конуса (Рис. 7, сверху справа), который накладывается на место среза экрана кабеля.

В зоне среза экрана происходит концентрация напряженности электрического поля и при достаточном его уровне могут возникнуть разрядные процессы, приводящие к разрушению изоляции. Часть металлического экрана кабеля удаляется как при концевой заделке кабеля, так и при соединении кабелей. Срез экрана приводит к изменению электрического поля в продольном сечении

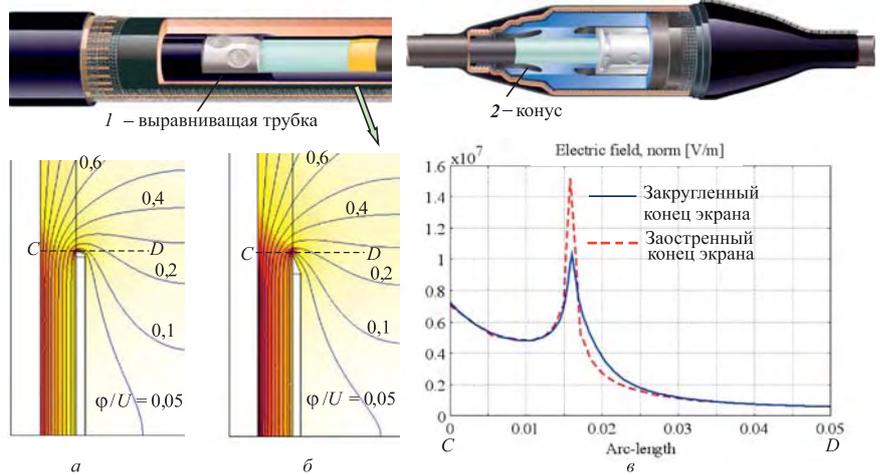


Рис. 7. Распределение электрического поля (в цвете) и изолинии электрического потенциала, соответствующие указанным значениям отношения ϕ/U (U – фазное напряжение), в области концевой разделки кабеля с трубкой выравнивания поля при закругленном (а) и заостренном конце экрана (б). Изменение электрического поля вдоль линии CD для двух рассчитанных случаев (в) [13]. Вверху показаны соединительные муфты с трубкой и конусом выравнивания поля [5, 12].



Рис. 8. Установка термоусаживаемых трубок (а); расположение трубки-регулятора холодной усадки (б) [14].

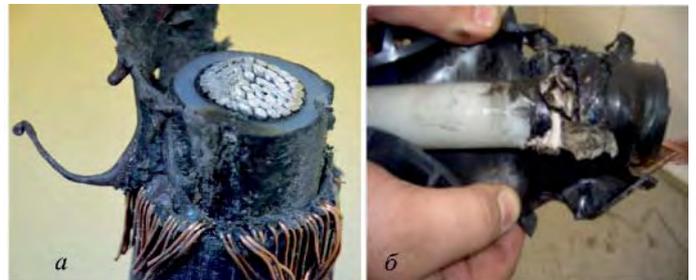


Рис. 9. Кабель на напряжение 10 кВ после удаления частей поврежденной муфты [20]; повреждение муфты и кабеля с СПЭ изоляцией [21].

кабеля. Место среза является областью резкого повышения плотности силовых линий поля (Рис. 7, а, б). В случае же непрерывного экрана кабеля по всей длине жилы, электрическое поле было бы однородным в продольном сечении и напряженность поля изменялась бы только в радиальном направлении.



Рис. 10. Эволюция распространения дефекта с последующим пробоем полиэтиленовой изоляции [17, 29] (а); разрушение силовых кабелей вследствие частичных разрядов [30, 31] (б).



Как показано в работе [13], форма среза экрана (Рис. 7), даже незначительные его неровности и надрезы способны приводить к усилению электрического поля в их окрестности, ослаблению и разрушению изоляции и, как следствие, к ее электрическому пробою.

Широкое распространение в качестве средств выравнивания поля в муфтах кабелей среднего напряжения получили термоусаживаемые трубки-регуляторы [1], изготавливаемые на основе полимеров со свойством изменять свои геометрические размеры и форму при нагреве (например, горячим воздухом или открытым пламенем), а при повторном нагреве возвращаться к первоначальной форме и размерам (Рис. 8, а). Такие трубки усаживаются на концевые кабельные разделки и принимают их форму.

Термоусаживаемая кабельная арматура используется, в частности, для [12]:

- соединения строительных длин кабелей с СПЭ изоляцией вновь сооружаемых кабельных линий;
- соединения кабелей с полимерной изоляцией с различной конструкцией экранов и металлических оболочек;
- прокладки в сложных условиях;
- испытания кабелей электрическим напряжением.

Термоусаживаемая арматура обеспечивает герметизацию и высокие изоляционные свойства, обладает высокой механической прочностью, стойкостью к воздействиям окружающей среды, ультрафиолетового излучения и различных химикатов. При этом широкий диапазон термоусаживаемости отдельных компонент позволяет использовать один типоразмер муфты для нескольких типов кабелей и сечений жил [12]. Система термоусаживаемых кабельных муфт и их образцы приведены, например, в [1].

Кроме термоусаживаемых элементов кабельной арматуры, для кабелей с СПЭ изоляцией на среднее напряжение могут применяться выравнивающие трубки холодной усадки [14, 15] (Рис. 8, б). При производстве муфт и трубок холодной усадки материал растягивается механическим способом и насаживается на удаляемый впоследствии пластиковый корд, который держит муфту в растянутом состоянии до усадки на кабель. Описание и подходы к созданию наиболее эффективных материалов для выравнивания электрического поля в муфтах холодной усадки разработаны в [15]. В качестве материалов для холодной усадки, как правило, используется этилен-пропиленовая резина или силикон. Муфты холодной усадки в большинстве случаев применяются в местах, где работы с открытым пламенем затруднены и опасны (например, из-за большого количества кабелей).

К основным причинам возникновения аварийных ситуаций и отказов в работе кабелей и кабельных муфт относятся [9, 16, 17]: причины, связанные с качеством материалов и изготовления, дефектами и загрязнениями в изоляции кабелей и муфт, дефектами монтажа муфт, дефектами их конструкции. Вместе с тем, в процессе эксплуатации появляются воздействия и явления, среди которых — проникновение влаги, изменение свойств материалов и естественное их старение в условиях окружающей среды, что также содействует аварийности как кабелей, так и муфт кабельных линий.

В [16] при анализе практики эксплуатации кабельных линий выявлено 600 отказов (или 15%) из исследованных 3937 по причине изменения свойств материалов в процессе эксплуатации кабельных муфт, отмечено также, что любые, даже незначительные неровности или надрезы в месте среза экрана приводят к разрушению изолирующей поверхности и пробою. В проведенном в [16] исследовании:

- дефекты монтажа муфт составили 25,3% (994 случая отказов из 3937),
- дефекты конструкции и изготовления — 2,3% (92 случая),
- влияние климатических и атмосферных условий — 3,3% (128 случаев),
- недостатки эксплуатации — на уровне 2,9% (113 отказов),
- нерасчетные режимы в электросети — 0,8% (31 отказ),
- недостатки проектирования — 0,1% (1 отказ).
- по причине посторонних воздействий произошло 19,3% отказов (760 случаев),
- не установлена причина отказов в 204 случаях (5% аварийных ситуаций).

Таким образом, наибольшее количество отказов кабельных линий зафиксировано по причине монтажа муфт, посторонних воздействий и изменения свойств материалов в процессе эксплуатации.

Основные причины разрушения изоляционной системы муфт, явление трекинга. В работе [16] приведены негативные факторы, влияющие на работоспособность кабельных муфт. Это воздействие влаги, вибрации, подвижки грунта и разрушение изоляции, в том числе за счет пустот и воздушных полостей в муфтах, внутренних трещин, сколов и разрывов, частичных разрядов (внутренней ионизации), загрязнения поверхности. Как подтверждается в [16], ухудшение поверхностных свойств изоляции препятствует дальнейшему использованию кабельных муфт, в том числе в силу развития трекинга или короны. Явление трекинга объясняется в [16] следующим образом. При наличии загрязнений на поверхности материала (пыль,



зола, растворенные соли и др.) во влажной атмосфере пленка, оседающая на поверхность влаги, имеет высокую электропроводность. Возникающий под действием напряжения значительный ток утечки распределяется неравномерно, в отдельных местах появляются большие плотности тока. Вследствие этого пленка влаги на поверхности материала в отдельных местах интенсивно испаряется, и так происходит разрыв проводящей пленки с образованием довольно мощной искры. После ее погасания появляется новая искра и т. д. Все это сопровождается локальным разрушением изоляции и появлением токопроводящих низкоомных путей или каналов (треков).

Трекинги – углеродные дорожки на поверхности изоляции образуются, главным образом, вследствие частичных разрядов при протекании по поверхности токов утечки, от которых и зависит интенсивность поверхностных разрядов. В соответствии с данными, приведенными в каталоге кабельной арматуры фирмы Raychem [4], на Рис. 5 отображен процесс образования трекинговых дорожек на поверхности муфт.

В дополнение к отмеченному выше относительно дефектов материалов муфт, в работе [18] путем компьютерного моделирования подтверждается опасность увеличения напряженности электрического поля в местах расположения неровностей и выступов на поверхности изоляции кабеля в муфте, а также впадин под трубкой-регулятором, заполненных воздухом. Показано также, что электрофизические свойства материала выравнивающей трубки и ее длина способны оказывать влияние на значение и характер распределения электрического поля в активной области муфты.

В статье [19] также подтверждается, что надежность муфт в значительной степени зависит от качества поверхности изоляции разделяемого кабеля. Для достижения гладкости поверхность обрабатывается наждачным полотном. При обработке частицы абразива могут проникать в диэлектрик. Неправильная форма частиц с заостренными краями, высокая диэлектрическая проницаемость и плохая совместимость с полиэтиленовым материалом изоляции способны приводить к пробоям муфт. Примеры таких частиц, обнаруженных в разрезанном кабеле с помощью метода видеомикроскопии, приведены в [19]. Отмечена также актуальность достижения высокого качества и бездефектности на микроуровне полиэтиленовой изоляции силовых кабелей для надежной работы кабельных линий.

Типичные микро- и макроскопические повреждения и эффекты силовых кабелей с СПЭ изоляцией и соединительных кабельных муфт показаны на Рис. 6. Среди них – пустоты в изоляции муфт, разрядные процессы на границах

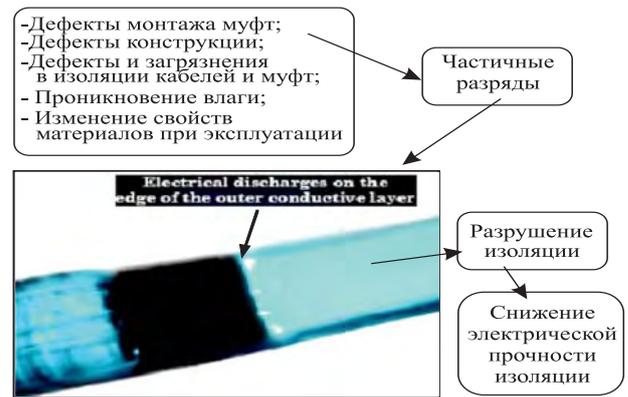


Рис. 11. Механизмы старения и деградации изоляционных материалов силовых кабелей и муфт. В центре – фото электрических разрядов на полупроводящем слое кабеля [26].

раздела материалов, в том числе трекинг на поверхности между изоляцией кабеля и изоляцией муфты, разрезы при удалении полупроводящего слоя по изоляции кабеля при его разделке, а также частичные разряды. Аналогичные дефекты и воздействия могут возникать в элементах, как соединительных, так и концевых муфт. Отметим, что повреждения силовых кабелей и их муфт связаны между собой (Рис. 9).

При названных причинах и недостатках материалов, используемых в конструкции муфт, одним из факторов влияния на снижение электрической прочности изоляции является возникновение частичных разрядов (ЧР) [22, 23]. Ряд механизмов старения и деградации изоляционных материалов силовых кабелей и муфт согласно работам [9, 16, 17, 22, 24, 25] отображен на Рис. 11. Здесь на вставке в центре показаны разряды на границе внешнего полупроводящего слоя кабеля [26].

Частичные разряды и распространение трингов в изоляции. Проблема частичных разрядов достаточно актуальна. ЧР относятся к основным причинам повреждения электротехнического оборудования, в том числе кабельных муфт [22, 24, 27, 28]. Объясняется это тем, что появление ЧР является начальной стадией развития большинства дефектов в изоляции, в том числе различных неоднородностей, в местах посторонних примесей и загрязнений, газовых полостей, растрескивания, расслоения изоляции, зон увлажнения (Рис. 6, а). Такие дефекты образуются в неоднородной структуре изоляции в результате нарушения процесса ее изготовления и при эксплуатации (под влиянием механических воздействий, деформации, вибрации, т. п.).

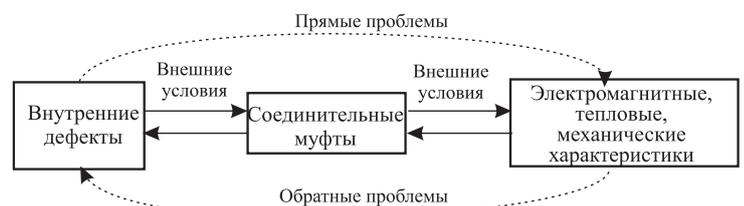


Рис. 12. Факторы, влияющие на надежность кабельных муфт [44].

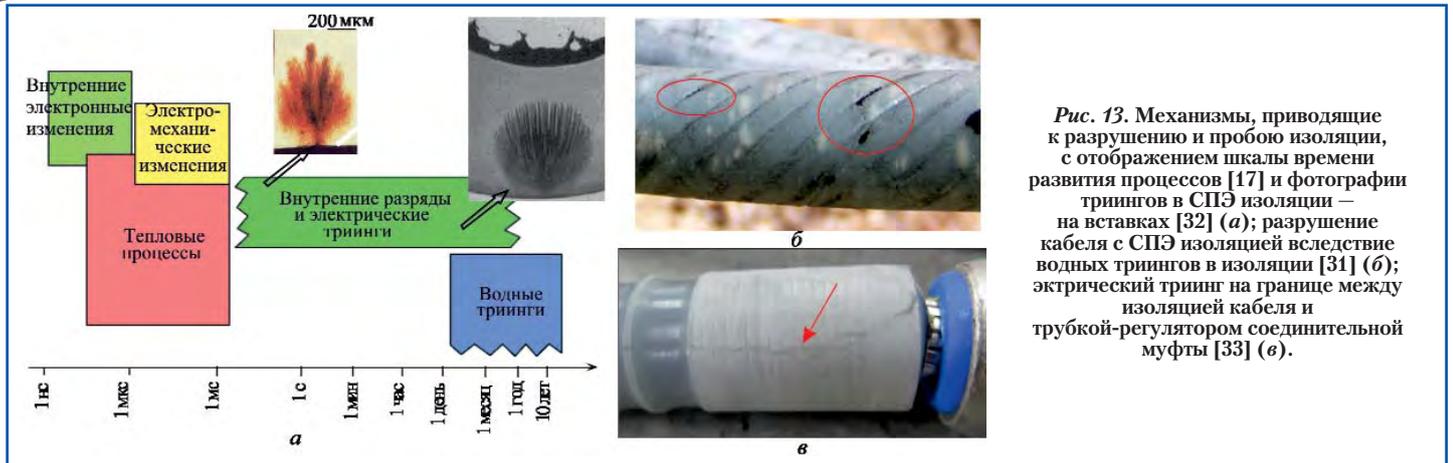


Рис. 13. Механизмы, приводящие к разрушению и пробой изоляции, с отображением шкалы времени развития процессов [17] и фотографии тринингов в СПЭ изоляции – на вставках [32] (а); разрушение кабеля с СПЭ изоляцией вследствие водных тринингов в изоляции [31] (б); электрический трининг на границе между изоляцией кабеля и трубкой-регулятором соединительной муфты [33] (в).

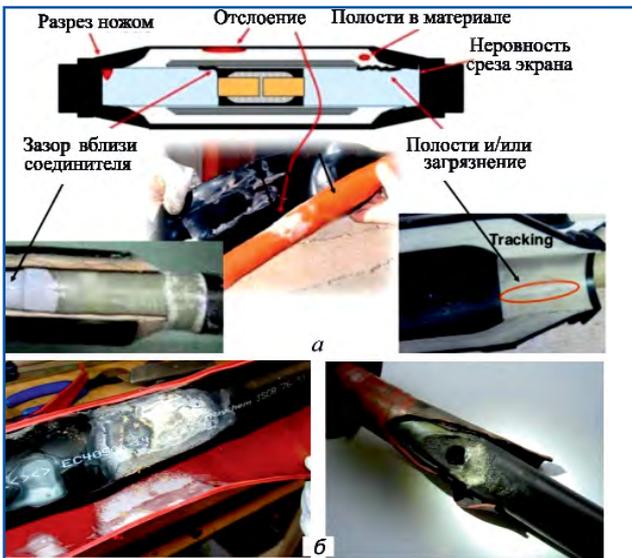


Рис. 14. Типичные дефекты соединительных муфт, которые приводят к частичным разрядам [38] (а); пробой кабелей вследствие частичных разрядов [39] (б).

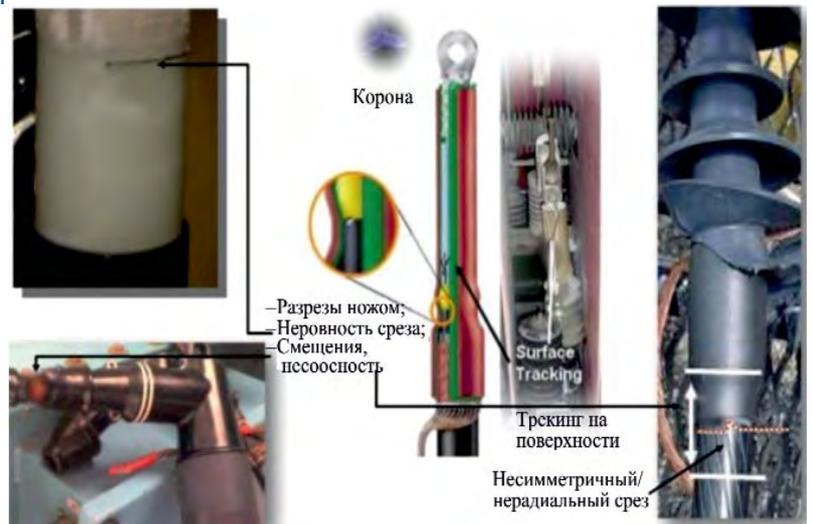


Рис. 15. Типичные дефекты концевых муфт, которые приводят к частичным разрядам [38].

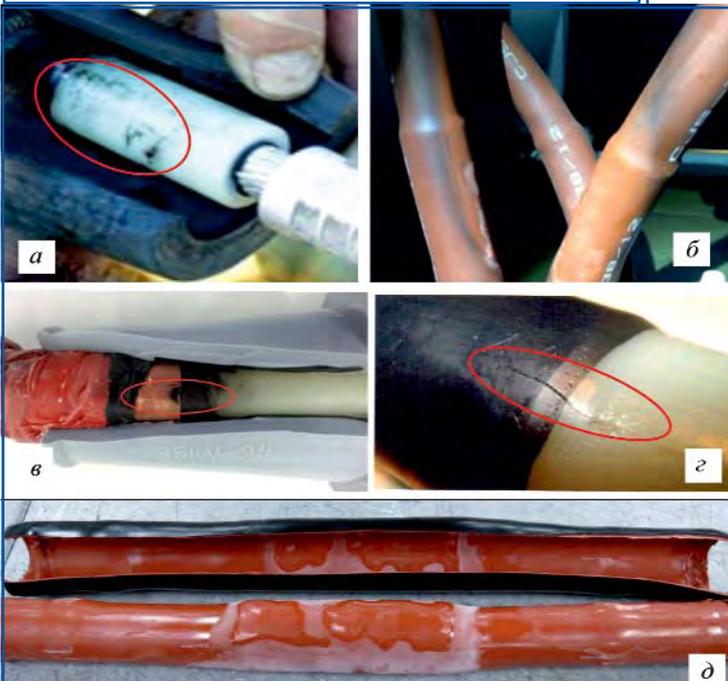


Рис. 16. Изменения и разрушения от частичных разрядов: силовых кабелей и кабельных муфт с полиэтиленовой изоляцией: развитие ЧР по загрязненной (опилками, грязью) поверхности основной изоляции [30, 40] (а); повреждение муфты ЧР из-за неправильной установки [40, 41] (б); разряды на медном экране кабеля в кабельной муфте напряжением 35 кВ [42] (в); дефект разделки кабеля на напряжение 36 кВ, послуживший причиной высокого уровня ЧР [43] (г); последствия разрядов из-за воздуха под трубкой [33] (д).

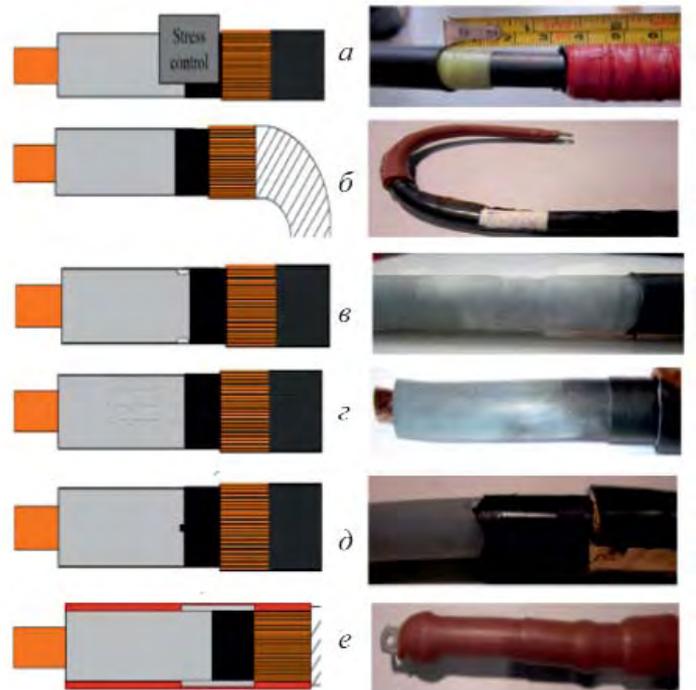


Рис. 17. Дефекты концевых кабельных муфт [45]: неправильное положение выравнивающей трубки (а); изгиб (б); загрязнения после шлифования изоляции (в); частицы на СПЭ изоляции (г); острый конец экрана (д); шероховатость поверхности изоляции (е).

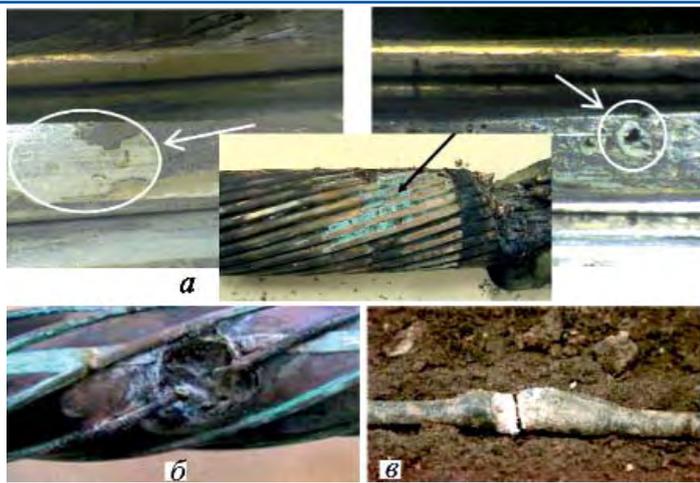


Рис. 18. Коррозія алюмінієвої токопровідної жили кабеля [10, 46] (а); розрив жилы [47] (б); виход из строя кабеля вследствие коррозии [48] (в).

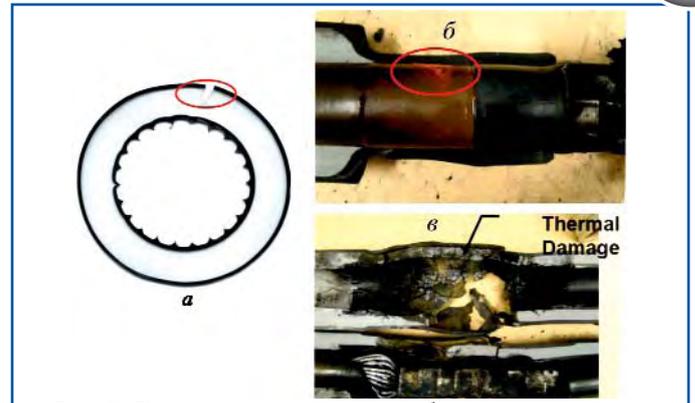


Рис. 19. Растрескивание изоляции кабеля из-за перегрева [31] (а); перегрев соединителя (б); термическое повреждение соединительной муфты (в) [10].

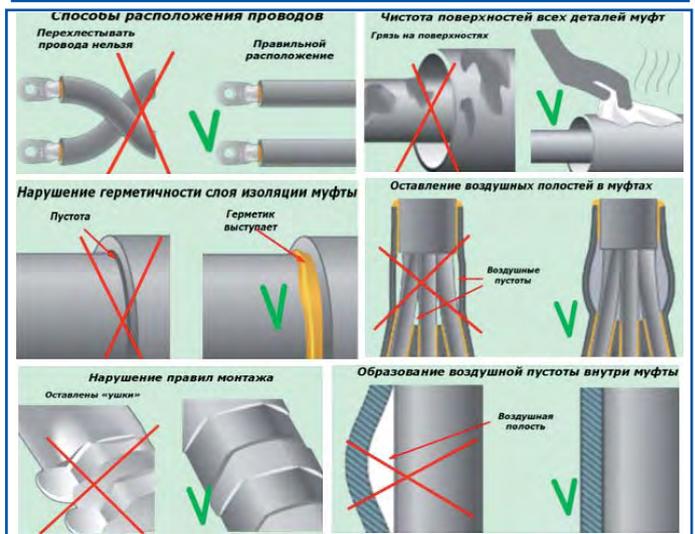


Рис. 21. Характерные ошибки при монтаже кабельных муфт [14].

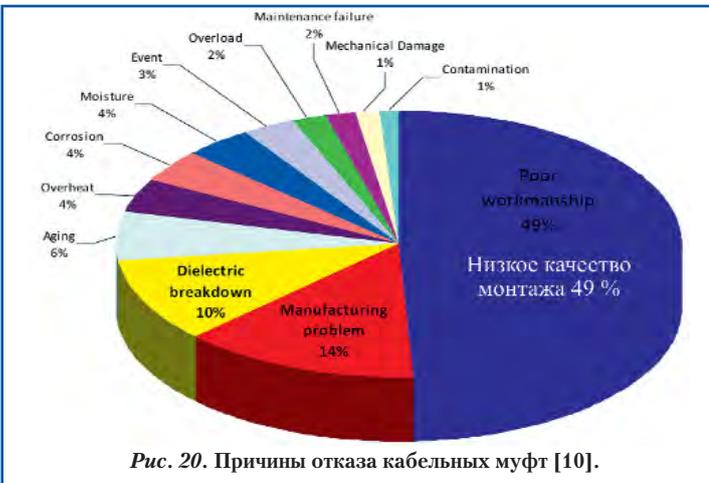


Рис. 20. Причины отказа кабельных муфт [10].



Рис. 22. Недостатки и повреждения муфт при монтаже: 1 – воздушные полости внутри муфты [33]; 2 – отшлифованная с полосами поверхность элементов [33]; 3 – укороченный полупроводящий слой по изоляции справа от соединителя [33]; 4 – впадины в изоляции кабеля [41]; 5 – дефект при разделке под муфту [40]; 6 – деформированная изоляция [10]; 7 – неправильное расположение регулирующего материала [38]; 8 – загрязнение поверхности [10]; 9 – повреждение шейки муфты из-за залом [40]; 10 – затягивание проволоки экрана под трубку [40]; 11 – разрезы на проводниках жилы [10]; 12 – залом наконечника при присоединении фаз кабеля [40].



Под действием ЧР начинается разрушение изоляции, размер дефектной области и интенсивность разрядов увеличиваются. Деградация изоляции ускоряется за счет термических процессов. Расширение дефектной области приводит к возрастанию напряженности поля в изоляционном промежутке и, когда зона с дефектом достигает больших размеров, становится возможным пробой изоляции. Развитие описанных процессов проиллюстрировано на Рис. 10, а на примере полиэтиленовой изоляции кабеля, в которой из полости образуется древовидная структура – водный триинг. Отметим, что процесс развития дефектов от зародышевой стадии до полного пробоя может длиться годами. К примеру, длительность, предпосылки образования и последствия распространения водных триингов в полиэтиленовой изоляции отображены на Рис. 13, а. Для водных триингов характерны три этапа [8, 9, 17]: возникновение, распространение и преобразование в электрические триинги (Рис. 13, а).

Частичные разряды возникают в неоднородной изоляции при определенных условиях [22], а именно во внешнем переменном поле в случае достижения некоторой критической величины напряженности электрического поля (или напряжения). При напряжении меньше такой критической величины разряды отсутствуют, и длительное воздействие напряжения не приводит к сокращению срока службы изоляции. Чем выше критическое напряжение, тем выше допустимое для изоляции длительно действующее рабочее напряжение.

Отметим, что для силовых кабелей с СПЭ изоляцией максимальные значения рабочей напряженности электрического поля зависят от уровня напряжения кабеля. Так, согласно [34] рабочие значения напряженности поля для кабелей среднего напряжения достигают до 4 кВ/мм, для кабелей высокого напряжения – до 6 кВ/мм, для кабелей сверхвысокого напряжения – до 12 кВ/мм.

ЧР опасны кумулятивным эффектом, выраженном в накоплении микроповреждений изоляции при каждом разряде, распространении дефектов и, как следствие, в возможном электрическом пробое всей изоляционной конструкции. К тому же, возникшие ЧР со временем могут перерасти в искровые и дуговые разряды, приводить не только к пробоям изоляции, но к аварийным ситуациям и выходу из строя кабельных муфт и кабельной линии в целом.

Таким образом, частичные разряды способны приводить к постепенному разрушению изоляции, возникновению электрического пробоя. С другой стороны, явление ЧР используется как средство диагностики состояния изоляции и контроля развития локальных дефектов в ее объеме. С целью диагностики изоляции проводится измерение уровня ЧР, определяются их параметры [35, 36] та-

кие, как кажущийся заряд, частота следования импульсов, частота повторения импульсов, фазный угол, время распространения импульса ЧР, средний ток, мощность ЧР, напряжение возникновения разрядов и др. Диагностические методы с использованием ЧР основаны на следующих фактах [28, 30]: 1) появление ЧР свидетельствует о наличии дефекта в изоляции и 2) разряды достигают обнаруживаемого уровня на самой ранней стадии развития дефекта.

Как правило, измерение ЧР проводится в процессе нормальной работы оборудования без вывода его из эксплуатации и кратковременного отключения и не оказывает разрушающего воздействия на изоляцию. Измерение ЧР при стендовых испытаниях силового оборудования является основным методом диагностики изоляции и проводится во всех высоковольтных лабораториях мира.

Основной задачей диагностики электротехнического оборудования по ЧР является продление срока его службы вплоть до полной выработки реального ресурса. Важно, что методы измерения ЧР позволяют выявлять дефекты изоляции на первых стадиях их возникновения, отслеживать их развитие, оценивать текущее состояние изоляции и возможность дальнейшей безопасной и эффективной эксплуатации.

Целями измерения ЧР в изоляции электротехнического оборудования, в том числе кабелей и кабельных муфт, являются:

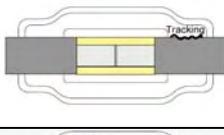
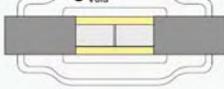
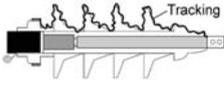
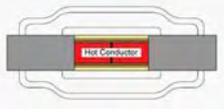
- уточнение состояния с определением признаков понижения электрической прочности изоляции (увлажнения, загрязнений и др.);
- нахождение участков с возможными повреждениями, мест с ухудшенным состоянием изоляции для их замены;
- определение опасности ЧР и необходимости ремонта или замены после длительной эксплуатации;
- оценка качества и технического состояния изоляции после замены;
- в целом диагностика технического состояния изоляции и прогнозирование ее остаточного ресурса.

Важно то, что методы диагностики и контроля состояния изоляции оборудования по характеристикам ЧР относятся к неразрушающим методам контроля. Они позволяют определять не только уровень ЧР (степень старения изоляции), но и места повреждения изоляции.

Полиэтиленовая изоляция подвержена электрическому старению и развитию ЧР вследствие наличия технологических дефектов, возникновения и распространения в них электрических и водных триингов [17, 22, 37]. Кроме того, дефекты в изоляции образуются при транспортировке, прокладке, монтаже кабелей из-за периодических деформаций (растяжений, изгибов) изоляционного материала.



Таблица 1. Основные механизмы старения и деградации кабельной арматуры [8, 9].

Тип повреждения	Процесс старения (в приведенной последовательности)	Вид арматуры	Типичные причины	Примеры
Загрязненная поверхность	Засорение, неподходящее давление на границах раздела, проникновение влаги, ЧР, пробой изоляции, ее деградация, снижение электрической прочности	Соединительные и концевые муфты	Проникновение влаги, некачественное изготовление	
Повреждения электрического характера	Полости и отслоения, ЧР, деградация изоляции, снижение ее электрической прочности	Соединительные и концевые муфты	Производственные дефекты, естественное старение, некачественное изготовление	
Повреждения внешнего электрического характера	Загрязнение и окисление, трекинг на поверхности, деградация изоляции, увеличение тангенса угла диэлектрических потерь, снижение электрической прочности	Концевые муфты	Загрязнение поверхности и ухудшение ее свойств, воздействие ультрафиолетового излучения	
Повреждения термического характера	Процесс до конца не исследован, результат – перегрев жил кабелей	Соединительные и концевые муфты	Некачественное изготовление, неправильность выбора для применения	

Наличие газа и воды в микропустотах в структуре полиэтилена объясняется проникновением водяного пара и летучих продуктов в материал изоляции в производственных процессах ее изготовления.

Частичные разряды имеют место в изоляционной структуре кабелей и кабельных муфт вследствие локальной неоднородности электрического поля в местах расположения дефектов и усиления напряженности электрического поля вблизи них. Напряженность поля внутри газовых включений или в окрестности инородных частиц в несколько раз выше, чем в материале изоляции, и может превышать электрическую прочность материала. Именно это обуславливает возникновение ЧР.

Типичные дефекты соединительных и концевых муфт, которые приводят к частичным разрядам показаны на Рис. 14, а и 15 [38]. Обнаруженные на практике различные повреждения кабелей и кабельных муфт вследствие частичных разрядов показаны на Рис. 14, б, 15, 16.

Механизмы старения и выхода из строя кабельной арматуры. Основные механизмы разрушения арматуры кабелей с СПЭ изоляцией на среднее напряжение приведены в табл. 1 [8, 9]. Как видно, дефекты, повреждения, некачественное изготовление муфт и подготовка концов кабелей для соединения и монтажа муфт – причины для пробоя и последующего их выхода из строя. Кроме того, согласно приведенной и реализованной в исследовании [44] схеме (Рис. 12), надежность кабельных муфт зависит не только от внутренних дефектов, внешних условий, но и от электромагнитных, тепловых и механических характеристик и процессов.

В работах [8, 9, 28, 41] представлены следующие характерные механизмы, связанные с изменением электрического поля и деградацией изоляционной системы силовых кабелей и кабельной арматуры:

1) *недостатки и дефекты изготовления* – пустоты, загрязнения, применение неподходящих материалов экранов, некачественное их наложение, выступы экранов, недостаточная обработка поверхностей элементов (Рис. 6, 17);

2) *неквалифицированная установка* – разрезы, неровности и загрязнения на поверхностях элементов муфт, надломы изоляции жил, недостатки и пропуски в наложении элементов, в их присоединении друг к другу, смещение и несоосность муфт (Рис. 6, 14, 15);

3) *дефекты прокладки и механические повреждения* – изгибы в местах поворота кабельной трассы, изломы, вмятины, перекрутка кабелей, механические напряжения в муфте при давлении на нее грунта, недостаточная или отсутствующая механическая защита, пробои и вмятины от неаккуратной раскопки на кабельных трассах; в [11] сообщается о большом количестве (до 60%) поврежденных кабелей с СПЭ изоляцией вследствие прямого механического воздействия – механических повреждений оболочки при прокладке или в процессе эксплуатации при работе землеройной техники без вызова представителей кабельных сетей;

4) *влажная окружающая среда* – содействует развитию водных триингов и коррозионных процессов за счет естественного проникновения воды через полимерные материалы, а также из-за просачивания воды при разгерметизации или разрушении оболочек; к примеру, проникновение влаги способно приводить к растрескиванию материалов [41], коррозии проводников жилы (Рис. 18), изменению свойств и структуры изоляционных материалов [46, 47]; кроме того, по опыту эксплуатации и ремонта силовых кабелей, описанного в [49], имели место случаи, когда по причине трещины в изоляции при изготовлении кабеля, при номинальных



Рис. 23. Повреждения муфт кабелей на высокое и сверхвысокое напряжение: 1 – скользящие разряды на поверхности конуса при попадании влаги в концевую муфту на напряжение 220 кВ [59]; 2 - следы перегрева соединительной муфты 110 кВ при ресурсных испытаниях [59]; 3 - трещина в месте изгиба токовывода концевой муфты [57]; 4 - отслоение изоляции от регулирующего электрода в соединительной муфте на напряжение 220 кВ [58]; 5 - электрический пробой изоляции концевой муфты из-за некачественной обработки поверхности изоляции кабеля [57].

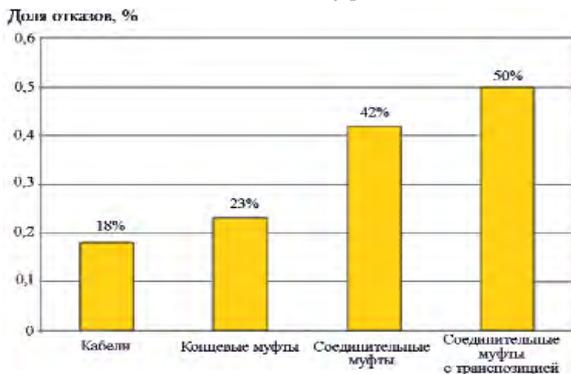


Рис. 24. Доля отказов кабелей и различных типов кабельной арматуры по данным испытаний в лаборатории КЕМА [68].

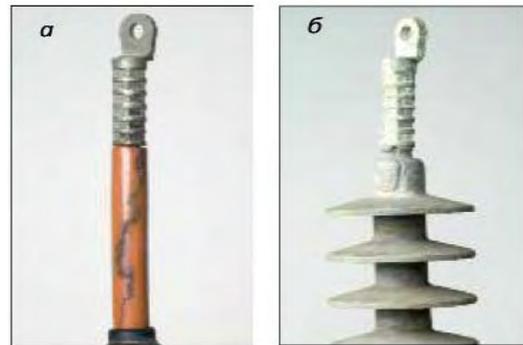


Рис. 25. Образцы с повреждением трекинговой дорожкой (а) и эрозией (б) [3].

нагрузках влага проникала на расстояние до 30 метров по длине кабеля;

5) изменение электрических режимов эксплуатации – систематические и длительные перегруз-

ки кабельных линий, изменения напряжения в системе, перенапряжения и их последствия, включая грозовые перенапряжения, переходные процессы, многократные отключения кабельных линий, что снижает электрическую прочность муфт и ресурс изоляции [50–54]; как сообщается в работе [51], большинство поврежденных муфт фиксируется в момент включения линий под напряжение или сразу после него;

6) температурные изменения, перегрев (Рис. 19); причины – неправильный выбор или некачественный монтаж муфт, превышение токовой нагрузки кабелей для данных внешних условий и рабочих режимов, перегрев и старение изоляции, изменения температуры окружающей среды и теплового сопротивления грунта для кабельных линий подземной прокладки, близость к другим кабельным линиям и источникам тепла, сезонные колебания температуры и влажности воздуха;



Рис. 26. Следы частичных разрядов в муфтах фирмы Raychem из-за некачественно выполненного монтажа [71].



Рис. 27. Неравномерная усадка термоусаживающего материала в соединительной муфте Raychem с образованием воздушных полостей, что привело к развитию ионизационного пробоя (а); характерное повреждение муфты после испытания (б); развитие ползущих разрядов (в) [72].



7) *агрессивность окружающей среды* – химически агрессивные вещества (доступ нефтехимических продуктов и удобрений, протекание трансформаторного масла), наводнения, близость к болотным, озерным и речным загрязненным водам.

Таким образом, для надежной эксплуатации кабельные муфты должны быть изготовлены из качественных, бездефектных (даже на микроуровне) материалов, быть профессионально установлены, обеспечивать стойкость к воздействию окружающей среды, иметь механическую и электрическую прочность, быть герметичными и влагостойкими.

Нарушение технологии монтажа кабельных муфт. Повреждение и выход из строя муфт традиционно объясняются некачественным монтажом. Это наиболее распространенная причина повреждения муфт в процессе их эксплуатации. Так, в работах [11, 40] приведены следующие данные статистического анализа причин повреждения кабелей и кабельной арматуры в России:

- нарушение технологии монтажа – 40%;
- внешние механические воздействия при монтаже и эксплуатации – 30%;
- применение кабельной арматуры, не соответствующей параметрам сетей, – 15%;
- нарушение технологии испытаний – 10%;
- дефекты кабеля – 5%.

В [10] представлена аналогичная статистика причин отказа муфт, эксплуатируемых на Западе (Рис. 20): недостатки монтажа – 49%; дефекты изготовления – 14%; пробой изоляции – 10%; старение материалов – 6 %; перегрев – 4%; коррозия – 4%; проникновение влаги – 4%; нарушения при обслуживании – 2%; перегрузки (превышение токовой нагрузочной способности) – 2%; механические повреждения – 1%; загрязнения – 1%.

Монтаж конечных и соединительных муфт – наиболее ответственная и сложная операция при строительстве кабельных линий. Монтаж часто выполняется в сложных полевых условиях и при различной погоде, поэтому недостатки его неизбежны.

Наиболее частые ошибки монтажа – неправильная и некачественная усадка термоусадочного материала, несоответствие применяемых кабельных муфт типам кабелей и сечениям жил, а также использование некачественного материала, в том числе с просроченным сроком годности. К примеру, как сообщается в [40], имеют место случаи отсутствия сертификатов происхождения материалов, что свидетельствует о низком качестве изделий; полимерные комплекующие, соединители и наконечники изготавливаются из отходов алюминия; термоусаживаемые трубки без сертификатов, не маркированы, не пластичны, требуют дополни-

тельного подогрева при монтаже; используются некачественные изолирующие и выравнивающие трубки, подмоточный материал для выравнивания электрического поля и клеевые составы без сертификатов происхождения. К тому же, в работе [49] сообщается о подделках под известные марки электротехнического оборудования, о недоброкачественности продукции по вине поставщика и из-за продолжительного времени хранения на складах.

Характерными ошибками монтажа кабельных муфт, описанными в [10, 14, 33, 38, 40], являются неправильное расположение проводов, загрязнение поверхностей деталей, нарушение герметичности, внутренние воздушные пустоты, неправильное положение элементов, в том числе трубки-регулятора по отношению к внешнему полупроводящему слою изоляции кабеля [55], разрезы, заломы, надрезы изоляции, неполная заливка мастикой и др. (Рис. 14, 15, 21, 22).

Таким образом, для безаварийной работы муфт необходимо также, чтобы они были изготовлены из качественных материалов и смонтированы по строгим правилам с соблюдением всех технологических операций, специалистами определенного опыта и знания особенностей строительно-монтажных работ для различных типов кабелей.

Высоковольтные кабельные муфты. В муфтах высоковольтных кабелей в качестве элемента регулирования поля используется, как правило, выравнивающий конус (стресс-конус). Основные конструктивные решения, например, для конечных муфт кабелей высокого и сверхвысокого напряжения согласно данным работы [9] представлены в табл. 2. Эластомеры как материалы для регулирования электрического поля обладают необходимыми как механическими свойствами (постоянными радиальным прижимным давлением на кабель и реакцией на изменение его температуры), так и электрическими характеристиками (в зависимости от напряжения кабеля) [15]. Силиконовый материал, используемый для изготовления изоляции и стресс-конуса современных кабельных муфт, имеет отличные эксплуатационные свойства [56]: по-

Таблица 2. Основные конструктивные решения для конечных муфт кабелей на высокое и сверхвысокое напряжение [9].

Поколение муфт	Конструктивные решения
I	Фарфоровые изоляторы; наполнение маслом; конденсаторный стресс-конус
II	Фарфоровые изоляторы; наполнение маслом; стресс-конус из синтетических эластомеров
III	Фарфоровые изоляторы; наполнение маслом; стресс-конус из эластомеров и силикона
IV	Композитные и фарфоровые изоляторы; наполнение маслом; стресс-конус из синтетических эластомеров и силикона
V	Композитные и фарфоровые изоляторы; безмасляное наполнение; стресс-конус из синтетических эластомеров и силикона



вышенную теплостойкость, устойчивость к воздействию воды и загрязнений, эластичность, главное — высокую электрическую прочность и стойкость к электрическому старению. Вместе с тем, как показано в работах [57—59] по результатам экспериментальных испытаний, арматура кабелей на высокое и сверхвысокое напряжение подвержена различного рода повреждениям.

К причинам повреждения высоковольтных кабельных муфт относятся: высокие значения напряженности электрического поля, попадание влаги в корпус, неправильное положение стресс-конуса относительно среза элементов кабеля (в частности, внешнего полупроводящего слоя изоляции [55, 60]), неровность поверхности изоляции муфты и шероховатость поверхности конуса [9, 59, 60]. Как отмечается в [53], неровности и микровыступы (даже высотой до 1—10 мкм) на поверхности конуса муфты способны приводить к значительному превышению напряженности электрического поля (более, чем в 100 раз на вершинах микровыступов) и возникновению разрядных процессов. Исследование распределения электрического поля в высоковольтной муфте, в том числе в зависимости от неровности поверхности конуса проведено в статье [61].

В работе [57] выполнено исследование отказов муфт высокого напряжения в процессе эксплуатации с точки зрения надежности конструкции и распределения напряженности электрического поля. Представлен наиболее вероятный сценарий развития пробоя, как появление скользящих разрядов на поверхности конуса из-за высокой продольной напряженности электрического поля, развитие электрического триинга на поверхности конуса и дальнейшее распространение триинга.

Авторами статьи [59] при проведении ресурсных и типовых испытаний названы такие причины пробоя и повреждения муфт: попадание влаги в негерметичный корпус муфты, из-за чего на поверхности конуса получают развитие скользящие разряды (Рис. 23); плохой контакт в соединителе муфты, приводящий к значительному перегреву изоляции (до температуры выше 120 °С). Отмечено, что именно неквалифицированный монтаж муфт нередко приводит к повреждениям изоляции и некачественным отслаивающимся контактными соединениям.

В работе [58] рассмотрены причины повреждений более 50 концевых и соединительных муфт по результатам проведенных в лабораториях ОАО "ВНИИКП" исследований элементов поврежденной арматуры с использованием методов инфракрасной спектроскопии и термического анализа. Выявлены три основные причины повреждения таких муфт:

- ошибки рабочего персонала, производящего монтаж муфт на кабельных линиях;

- недостатки конструкций муфт, приводящие к ограничению срока службы муфт;

- недоработки проектных решений по выбору и установке муфт для данных условий эксплуатации.

В частности, в [58] выявлено, что отказы муфт в основном связаны с некачественной обработкой изоляции кабеля при монтаже, когда на поверхности изоляции под выравнивающим конусом остаются повреждения (неровности, царапины или следы от ножа при снятии экрана). При этом образуются выступы и углубления, которые приводят к снижению давления изоляции конуса на поверхность изоляции кабеля. В микрополостях, сформированных при монтаже, возникают частичные разряды, которые приводят к образованию электрического триинга. Кроме того, нередко технологические дефекты, например, отслоение изоляции соединительных муфт, как показано на Рис. 23.

Электрические переходные процессы, перенапряжения, токовые перегрузки кабельных линий. Кроме традиционных причин отказов кабелей и муфт в кабельных линиях, связанных с неквалифицированным монтажом, дефектами изготовления и внешними условиями эксплуатации, в ряде работ, например в [50—52, 54, 62—64], называются причины, обусловленные электрическими особенностями работы кабельных линий. В [63, 64] — это превышение допустимой нагрузочной способности кабелей по току, что приводит к повышенному нагреву и, как следствие, к деградации изоляции и сокращению ресурса работы кабельной линии. В одном из практических случаев перед отказом соединительной муфты регистрировалось превышение длительно допустимой токовой нагрузки кабеля [64]. Для эффективной работы необходимо, чтобы токовая нагрузка соответствовала установленной нагрузке при вводе кабелей в эксплуатацию.

В [40] описывается ситуация, возникшая в Ленинградских кабельных сетях в 1999—2000 г.г., когда при протекании сквозных трёхфазных токов короткого замыкания (КЗ) повреждались две-три, а иногда и более концевых и соединительных муфт, смонтированных в разное время на одном кабеле и на транзитной цепочке кабельных линий.

В статье [50] сообщается, что почти все аварии происходят непосредственно в момент включения кабельной линии в сеть или сразу такого включения, а причины повреждения муфт объясняются снижением их электрической прочности в предположении следующих условий:

- большое количество коммутаций, каждая из которых расходует ресурс изоляции, (например, при отключении кабельных линий десятки и сотни раз в течение года с целью недопущения повышения напряжения 50 Гц; в случае плановых отключений для проведения ремонтных работ, в том чис-



ле для замены поврежденных муфт; на смешанных линиях с кабельными и воздушными участками это коммутации, связанные с грозовыми перенапряжениями на участке с воздушной линией электропередачи);

- для смешанных линий разряды молнии в воздушный участок, появление грозových перенапряжений и их переход на кабельный участок.

В статье [62] изложены результаты комплексных исследований работы кабельной линии 35 кВ для электропитания крупного металлургического завода, выполненной с использованием однофазных кабелей с СПЭ изоляцией. Выявлены основные причины повреждений и аварийности, среди которых – ошибки монтажа кабельной линии, нарушение теплового режима линии вследствие протекания сверхтоков в экранах кабелей, воздействие на изоляцию кабелей 35 кВ высокочастотных перенапряжений при коммутациях выключателей линии и трансформатора, высокий уровень частичных разрядов в изоляции двух концевых муфт. Решение в [62] для повышения надежности электрооборудования и предотвращения повреждений кабельной линии состояло в применении дополнительных ограничителей перенапряжения (ОПН) с целью ограничения коммутационных высокочастотных перенапряжений в сети 35 кВ.

В статье [51] при анализе обширной базы данных по повреждениям муфт на кабельных линиях Сочи, Алма-Аты, Москвы и ряде других городов, делается вывод, что большинство повреждений происходит в момент включения линии под напряжение (или сразу после него), при этом линия включается после ее очередного отключения на плановые работы (испытания, измерения). В [51] предлагается первоочередное внимание уделять именно процессам ввода кабельных линий в работу, сообщается, что при включении линий перенапряжения возникают гораздо чаще, чем при КЗ, и величина перенапряжений при КЗ не больше, чем при включении линии.

В работах [51, 52] изучаются причины аварий:

- городских кабельных линий на напряжение 110 кВ в Сочи;

- на кабельно-воздушных линиях 220 кВ во округ Алма-Аты в Казахстане, содержащих 96 однофазных соединительных муфт на кабельном участке протяженностью 19,13 км и 15 однофазных концевых муфт; меньше, чем за год эксплуатации здесь произошло 10 аварий, из которых 5 – на муфтах, 2 – на кабеле, 3 – на воздушной линии, при этом явные предпосылки к авариям, такие как большое количество грозových дней или большие грозových токи, отсутствовали;

- кабельной линии 330 кВ в Санкт-Петербурге, имеющей длину около 14 км и 72 однофазные муф-

ты, из них 18 кабельных муфт для осуществления транспозиции экранов и 33 соединительные муфты; за 7 месяцев эксплуатации на линии произошло 3 аварии с повреждением большого числа различных муфт по всей длине кабеля.

По результатам научно-исследовательской работы и согласованию с рядом ведущих специалистов, в [51] делается вывод о причинах аварий на сочинских и алма-атинских линиях – оказал влияние комплекс различных факторов, среди которых и перенапряжения на жиле, которые имели место в условиях

1) сниженной электрической прочности стресс-конусов муфт, деформированных давлением грунта,

2) большого числа коммутаций (более 200 раз в год),

3) отсутствия защитных силовых ОПН в местах перехода кабеля в воздушную линию.

Повреждения кабеля Санкт-Петербургской линии изучались специалистами испытательного центра КЕМА (Нидерланды). В их заключении говорится, что КЗ произошло вследствие вибрации грунта при работе тяжелой техники во время строительства автодороги недалеко от кабельной линии. Два повреждения транспозиционных муфт предположительно были связаны с низким качеством электромонтажных работ [51].

Большое количество повреждений транспозиционных муфт на кабельных линиях во всем мире объясняется в [51] прежде всего перенапряжениями на жилах кабелях, а не на экранах.

В предположении авторов статьи [52] причина аварий названных выше кабельных линий и подобных им заключается в высокочастотных перенапряжениях на изоляции экрана кабеля, которые вызываются однофазными КЗ.

Влияние КЗ в кабельных линиях на аварийность муфт в [51] поясняется примером: на линии в самом кабеле возникло КЗ, оболочка некоторых муфт на трассе прокладки кабельной линии подверглась перенапряжениям и получила повреждения, которые проявились не сразу, а после ремонта линии, непосредственно в момент включения ее под напряжение.

Полной ясности и достоверного объяснения причин отказа муфт на ряде кабельных линий нет, однако опыт наблюдения и исследования повреждений свидетельствует о достаточно большой степени вероятности воздействия на качество муфт переходных процессов и перенапряжений, возникающих при включении линий под напряжение и во время их эксплуатации.

Особенности диагностики кабельных линий. Муфты могут выходить из строя не только из-за



описанных выше причин и изношенности при длительной эксплуатации, но и повреждаться вследствие проведения испытаний методами разрушающего контроля (повышенным напряжением). Выбор приемлемого метода диагностики кабельных линий важен в связи с тем, что, к примеру, испытания линий с СПЭ изоляцией проводятся достаточно часто — перед вводом кабельной линии в эксплуатацию и после ее ремонтов, кроме того регулярно испытывается изоляция и оболочка кабелей с выводом линии из работы. Важно то, что применение неразрушающей диагностики содействует продлению срока службы кабельных линий путем уменьшения разрушающих воздействий.

Актуальным является применение неразрушающих, щадящих методов диагностики силовых кабельных линий в условиях эксплуатации, во время которых изоляция кабельной линии не подвергается интенсивной нагрузке, в отличие от испытаний постоянным напряжением [30]. Как показано в монографии [65], тестирование постоянным напряжением требует специальных условий, в частности, электрическая прочность изоляции экрана должна быть не менее 10 кВ (примерно 5 кВ на частоте 50 Гц).

В [20] относительно кабелей с СПЭ изоляцией отмечается тенденция замены испытаний повышенным напряжением на диагностику под рабочим напряжением без отключения кабельных линий от сети, что безопасно и имеет смысл особенно в первые годы их эксплуатации.

Испытание повышенным напряжением постоянного тока приводит к повреждению СПЭ изоляции, и если пробой не происходит при испытаниях, кабель может выйти из строя после них в течение короткого времени эксплуатации. Практика эксплуатации кабельных линий, описанная в [11], свидетельствует, что положительные результаты испытаний повышенным напряжением постоянного тока не гарантируют безаварийную работу кабельной линии в дальнейшем, при этом скрытые повреждения изоляции провоцируют, прежде всего, возникновение и распространение триингов. Поэтому для кабелей с СПЭ изоляцией испытание повышенным напряжением постоянного тока необходимо заменять неразрушающими методами диагностики, например, методом частичных разрядов для локализации поврежденных участков, либо испытанием переменным напряжением сверхнизкой частоты (0,1 Гц [20]), при котором измеряется тангенс угла диэлектрических потерь кабеля.

В работе [11] приведен ряд методов разрушающего контроля кабельных линий, среди которых испытание повышенным выпрямленным напряжением, повышенным напряжением промышленной частоты, повышенным напряжением сверхнизкой частоты и повышенным импульсным напряжением. К методам неразрушающего контроля относят-

ся измерение сопротивления изоляции, измерение емкости и диэлектрических потерь изоляции, измерение характеристик частичных разрядов, снятие эхограмм кабеля импульсным методом и метод возвратного напряжения [11].

Наиболее распространенным и эффективным методом диагностики кабельных линий является метод измерения и оценки параметров частичных разрядов для нахождения мест их концентрации, повышенного уровня и интенсивности, предотвращения возможного повреждения и аварийного отключения кабельной линии. Измерение ЧР требует чувствительного оборудования, для которого стандарт Международной электротехнической комиссии (МЭК) определяет уровень 10 пКл как минимальный. Более детально этот метод и его преимущества описаны выше в разделе "Частичные разряды и распространение триингов в изоляции".

Диагностика кабельных линий с СПЭ изоляцией проводится с применением на муфтах датчиков контроля частичных разрядов и системы непрерывного контроля температуры (путем тепловизионного обследования) [20]. Это связано с тем, что снижение электрической прочности изоляции при длительной эксплуатации или из-за некачественного монтажа соединительных и концевых муфт происходит вследствие воздействия ЧР и повышенных значений температуры.

Комплексное диагностическое обследование технического состояния кабельных линий, в том числе кабельной арматуры, как правило, включает визуальный осмотр линии, измерение сопротивления СПЭ изоляции, определение характеристик ЧР, диэлектрическую диагностику путем нахождения тангенса угла диэлектрических потерь и/или измерения тока утечки (релаксации), тепловизионный контроль контактных соединений. Диагностика кабельных линий проводится с учетом требований действующих стандартов (национальных и международных) перед вводом линии в эксплуатацию с целью выявления дефектов монтажа, в процессе эксплуатации под рабочим напряжением и после ремонтов (до включения в работу и после подачи напряжения на линию).

Испытательные центры. Международная практика испытаний кабелей и кабельных муфт.

Известные крупные испытательные центры по проведению ресурсных и типовых испытаний кабелей, кабельных линий, включая кабельные муфты, а также мощного высоковольтного электрооборудования:

- КЕМА — крупнейшая лаборатория по проведению испытаний и стандартизации (Нидерланды);
- CESI (Centre of Experimental Electrotechnology in Italy) — экспериментальный электротехнический центр (Италия);
- ИЕН (Institut für Elektroenergiesysteme und



Hochspannungstechnik) (Karlsruhe, Германия);

- Seba KMT (Германия) — один из лидеров в разработке метода испытаний напряжением сверхнизкой частоты, а также установок для проведения испытаний силовых кабельных линий в условиях эксплуатации [66];

- центр ПАО "Завод "Южкабель" (Украина) для испытания выпускаемой кабельной продукции всех классов напряжения (6–330 кВ) [67];

- высоковольтный испытательный центр ОАО "ВНИИКП" (Россия) [59].

Испытания кабелей и арматуры, как правило, проводятся в соответствии со стандартами МЭК. Вместе с тем многие государственные стандарты присоединены к стандартам CENELEC. Порядок проведения испытаний по стандарту CENELEC не намного отличается от порядка испытаний по соответствующему стандарту МЭК, но уровень воздействий выше. Например, испытание циклами нагрузки по CENELEC включает больше циклов, чем испытание по стандартам МЭК. Многие национальные стандарты содержат более жесткие требования по сравнению с европейскими, а европейские стандарты, в свою очередь, являются более требовательными, чем мировые, такие как стандарты МЭК. Все стандарты содержат требования как по электрическим характеристикам кабелей и материалов, так и по неэлектрическим. Кабельная арматура испытывается на соответствие требованиям лишь электрических свойств, например, на стойкость к токам нагрузки при эксплуатации. Согласно данным [68], испытания кабеля совместно с арматурой более эффективны, чем отдельная сертификация кабеля и арматуры.

В Табл. 3 приводятся современные стандарты для испытаний кабелей и кабельной арматуры с полимерной изоляцией [68].

Опыт проведения типовых испытаний кабелей и арматуры в лаборатории КЕМА показывает высокий уровень их отказов (Рис. 24). Согласно данным Рис. 24, интенсивность отказов кабелей составляет 18%, а кабельной арматуры, в особенности соединительных муфт, гораздо выше и может достигать до 50 %. Большой процент пробоев соединительных муфт объясняется высокими значениями напряженности электрического поля в выравнивающем конусе, что характерно для компактной конструкции муфт. Для концевых муфт компактная конструкция менее типична, что отражается на проценте отказов, сравнимом с процентом отказов кабелей [68]. Данные Рис. 24 согласуются с опытом эксплуатации кабельных линий и выводами, представленными в [51], относительно того, что причины аварий линий следует искать не в проблемах с концевыми муфтами, а более всего в муфтах транспортировки, проложенных в земле, или в соединительных муфтах.

Таблица 3. Стандарты для испытания кабелей и кабельной арматуры с полимерной изоляцией [68].

Стандарты	Напряжение		
	среднее (до 36 кВ)	высокое (36–170 кВ)	сверхвысокое (170–500 кВ)
МЭК	МЭК 60502–2 МЭК 60502–4	МЭК 60840	МЭК 62067
CENELEC	HD 620 HD 629.1	HD 632	МЭК 62067

тельных муфтах.

Производители кабельной арматуры. К ведущим мировым производителям кабельных муфт относятся фирмы: Tycos Electronics Raychem (Германия), DSG-Canusa (с производственными мощностями в Канаде, США, Великобритании, Германии и Польше), международный концерн 3M, немецкая фирма KRONE GmbH, швейцарские фирмы PFISTERER и BRUGG Cables, французская фирма NEXANS, концерн ABB.

В Украине ведущий производитель и поставщик кабельных муфт на среднее напряжение — ООО "Виклеон". Эта фирма является также официальным дистрибьютором компании Tycos Electronics Raychem в Украине, поставляет термоусаживаемые кабельные муфты для силовых кабельных линий на напряжение 0,4, 10–20, 35 кВ [69].

Немецкая фирма Raychem — наиболее известный в мире производитель кабельной арматуры на низкое (до 1 кВ), среднее (до 35 кВ), а также высокое напряжение [1, 3–5]. В соединительных муфтах на среднее напряжение используются материалы, способные быстро усаживаться простым наложением на разделанный кабель, применяются тонкостенные термоусаживаемые трубки. Нагревание трубки перед усадкой обеспечивает плотный охват кабеля [3]. Уменьшение длины или неправильное положение трубки приводит к разрядам на ее концах [1, 3]. В подтверждение такого практического опыта в статье [55] показана зависимость максимального значения напряженности электрического поля от длины срезанных при разделке полупроводящего покрытия кабеля и его металлического экрана. В целом, термоусаживаемая кабельная арматура фирмы Raychem включает в себя концевые муфты наружной и внутренней установки, соединительные и переходные муфты.

Кабельная арматура Raychem разрабатывается и проходит испытания в соответствии с мировыми стандартами: МЭК, CENELEC и IEEE [3, 5]. Фирма гарантирует стойкость к повреждениям и высокую надежность своей продукции. Вместе с тем, как и любая арматура, кабельные муфты Raychem могут быть подвержены старению, воздействиям окружающей среды (воздействию влаги, дождя, атмосферного солевого тумана, ультрафиолетового излучения, пыли, промышленному загрязнению, проводящим загрязнениям поверхности), а также режимным изменениям (например, увеличенному напря-



жению). Как отмечается в [3, 4], при загрязнении поверхности концевых муфт, и в особенности муфт наружной установки, во влажных условиях возрастают токи утечки. В определенных погодных условиях токи утечки приводят к образованию трекинговых дорожек на поверхности концевых муфт (это быстрый процесс повреждения поверхности), а также к возникновению эрозии (медленный процесс). Трекинговые дорожки заметны на поверхности муфты, а эрозия проникает вглубь материала (Рис. 25). Как объясняется в [1] и каталогах фирмы Raychem [3, 4], эти два разрушающие фактора способны приводить к выходу муфты из строя.

Как показано выше, одна из наиболее вероятных причин повреждения муфты – некачественное выполнение монтажа. Основное требование к монтажу кабельной арматуры Raychem состоит в том, что монтаж муфт этой фирмы должен осуществляться только с участием персонала компании или специалистами, имеющими именные сертификаты, выданные фирмой Raychem [70].

В [71] изложен многолетний опыт диагностики кабелей среднего и высокого напряжения с изоляцией из сшитого полиэтилена, в том числе муфт производства фирмы Raychem. Авторами работы [71] с использованием метода измерения ЧР, путем обнаружения повышенного уровня разрядов и увеличения их интенсивности на одной из кабельных линий выявлены две муфты с повреждениями. Одна из них "целая" на то время соединительная муфта на соседней фазе. Другая "дефектная" (из-за высокого уровня ЧР) муфта была вскрыта представителями фирмы Raychem и специалистами эксплуатирующей организации, обнаружены следы ЧР вследствие некачественно выполненного монтажа (Рис. 26). Как отмечено выше, частичные разряды приводят к пробоям и выходу из строя кабелей и муфт. Картина одного из таких случаев пробоя муфты фирмы Raychem вследствие ЧР приведена в [39] и на Рис. 14, б.

Характерные повреждения соединительных муфт Raychem, в том числе из-за ошибок монтажа, изучены и представлены в работе [72] (Рис. 27).

Заключение. Материал статьи, составленный на основе обзора последних литературных данных и результатов научных исследований относительно опыта эксплуатации, тестирования и изучения современных кабелей с СПЭ изоляцией и кабельной арматуры, позволяет сделать следующие выводы.

Надежность и эффективность работы кабельных линий, в том числе соединительных и концевых муфт в их составе, определяется комплексом факторов, среди которых конструкция и технология монтажа кабельной арматуры, качество материалов, условия эксплуатации и испытаний, эксплуатационные режимы, включая импульсные гро-

зовые и коммутационные перенапряжения, особенности электрических процессов и связанных с ними тепловых воздействий.

Ведущими специалистами и исследователями в области кабельной техники исчерпывающего и однозначного объяснения всех возможных причин большого числа повреждений муфт на линиях с кабелями, имеющими СПЭ изоляцию, не получено. Для каждой кабельной линии исследование причин аварий проводится отдельно с учетом специфических электрических, термических, механических характеристик, внешних условий и воздействий. В ряде случаев причины аварийности остаются не до конца выясненными.

Кабельные муфты – ответственный элемент кабельной линии. При их повреждении происходит короткое замыкание линии, что влияет не только на ее работоспособность, но и на надежность всей электрической сети. Поэтому дальнейшее изучение факторов влияния на качество муфт и их элементов, а также причин повреждения кабельной арматуры является важным для разработчиков, производителей, строительно-монтажных организаций и эксплуатирующих энергокомпаний.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Макаров Е.Ф.* Справочник по электрическим сетям 0,4–35 кВ и 110–1150 кВ / Под ред. И.Т. Горюнова, А.А. Любимова. – Т. 3. – М.: Папирус-Про, 2004. – 688 с.
2. *Лях В.В., Молчанов В.М., Сантоцкий В.Г., Квицинский А.А.* Кабельная линия напряжением 330 кВ: некоторые аспекты проектирования // Промэлектр. – 2009. – № 6. – С. 27–33.
3. *Кабельная арматура.* Каталог 2014. – Raychem. – 140 с.
4. *Кабельная арматура.* Каталог 2007/2008. – Energy Devision. Tyco Electronics Raychem GmbH. – 127 с.
5. *Высоковольтная кабельная арматура.* Каталог 2012. – Tyco Electronics Raychem GmbH, Ottobrunn / Munich, Germany. – 32 с.
6. *Electrical power cable engineering.* – Third Edition / Ed. by W.A. Thue. – CRC Press: 2011. – 460 p.
7. *Peschke E., von Olshausen R.* Cable systems for high and extra-high voltage: development, manufacture, testing, installation and operation of cables and their accessories. – Berlin: Publicis MCD Verlag, 1999. – 196 p.
8. *Hampton N.* Medium voltage cable system issues. Chapter 2. – University System of Georgia, Institute of Technology NEETRAC – National Electric Energy Testing, Research and Application Center. – Georgia Tech Research Corporation, February 2016. – 29 p.
9. *Hampton N.* HV and EHV cable system aging and testing issues. Chapter 3. – University System of Georgia, Institute of Technology NEETRAC – National Electric Energy Testing, Research and Application Center. – Georgia Tech Research Corporation, February 2016. – 19 p.
10. *Williams F.D.* Cable accessory failure analysis. – A Research Center in the School of Electrical and Computer Engineering at the Georgia Institute of Technology. – 2010. – 59 p.
11. *Невар Г.* Об эксплуатации кабелей с изоляцией из сшитого полиэтилена // Кабель-news. – 2011. – № 3. –



[http://www.ruscable.ru/article/Ob_ekspluatatsii_kabelej_s_izolyacii_iz_sshitogo/](http://www.ruscable.ru/article/Ob_ekspluatatsii_kabelej_s_izolyacii_iz_sshitogo)

12. *Руководящий* технический материал по сооружению, испытаниям и эксплуатации кабельных линий с использованием кабелей с изоляцией из сшитого полиэтилена на напряжение 64/110 кВ: [научно-методич. издание] / Под ред. А.К. Шидловского, В.М. Золотарева. — Харьков: Майдан, 2007. — 62 с.

13. *Кучерявая И.Н.* Электрическое поле в кабельных муфтах при различных способах его выравнивания и при наличии дефектов в элементах // Праці Ін-ту електродинаміки НАН України. Зб. наук. праць. Київ: ІЕД НАНУ, — 2016. — вип. 43. — С. 111–118.

14. *Соединительные* муфты для силовых кабелей. — <http://electricalschool.info/main/electromontag/1655-soedinitelnye-mufty-dlja-silovykh.html>

15. *Котов Р.В.* Распределение электрического поля в кабельных муфтах холодной усадки // Электро. — 2006. — № 5. — С. 40–44.

16. *Кабельные* муфты "Прогресс". Современные решения для кабельных сетей // Кабель-news. — 2009. — № 11. — С. 34–36.

17. *Dissado L.A., Fothergill J.C.* Electrical degradation and breakdown in polymers. — London: Peter Peregrinus Ltd. for IEE, 1992. — 601 p.

18. *Кучерявая И.Н.* Моделирование электрического поля в кабельной муфте с трубкой-регулятором // Технічна електродинаміка. — 2016. — № 6. — с. 3–9.

19. *Шувалов М.Ю., Ромашкин А.В., Овсиенко В.Л.* Анализ дефектов в изоляции силовых высоковольтных кабелей методами видеомикроскопии и микроэксперимента // Электричество. — 2000. — № 5. — С. 49–57.

20. *Дмитриев М.В.* Особенности применения кабелей с изоляцией из сшитого полиэтилена // Сети России. — 2015. — № 3 (30). — С. 62–65.

21. *Испытания* силовых кабелей с изоляцией из сшитого полиэтилена. — http://lab-electro.ru/ispytaniya_silovykh_kabelej_s_izolyacii_iz_sshitogo_polietilena

22. *Кучинский Г.С.* Частичные разряды в высоковольтных конструкциях. — Л.: Энергия, 1979. — 224 с.

23. *Шидловский А.К., Шерба А.А., Золотарев В.М., Подольцев А.Д., Кучерявая И.Н.* Кабели с полимерной изоляцией на сверхвысокие напряжения. — К.: Изд-во Ин-та электродинаміки НАН України, 2013. — 550 с.

24. *Кучерявая И.Н.* Особенности воздействия частичных разрядов на высоковольтную изоляцию // Гідроенергетика України. — 2013. — № 2. — С. 45–50.

25. *Образцов Ю.В.* Отечественные кабели среднего и высокого напряжения с изоляцией из сшитого полиэтилена для линий электропередач // Кабель-News. — 2009-2010. — № 12-1. — С. 45–49.

26. *Strobl R., Haverkamp W., Malin G., Fitzgerald F.* Evolution of stress control systems in medium voltage cable accessories // Proc. of Transmission and Distribution Conference and Exposition, IEEE/PES. — 2001. — Vol. 2. — P. 843–848.

27. *Кучинский Г.С., Назаров Н.И.* Силовые электрические конденсаторы — М.: Энергоатомиздат, 1992. — 320 с.

28. *Densley J.* Ageing mechanisms and diagnostics for power cable. An overview // IEEE Electrical Insulation Magazine. — 2001. — Vol. 17. — No. 1. — P. 14–22.

29. *Сви П.М.* Методы и средства диагностики оборудования высокого напряжения. — М.: Энергоатомиздат, 1992. — 239 с.

30. *Копченков Д.* Диагностика высоковольтных кабельных линий. Опыт внедрения // Кабель-news. — 2012. — № 3.

— http://www.ruscable.ru/article/Diagnostika_vysokovoltnyx_kabelnyx_linij_Opyt/

31. *Buchholz V.* Finding the root cause of power cable failures. — http://www.electricenergyonline.com/?page=show_article&article=186

32. *Werellius P., Tharning P., Eriksson R., Holmger B., Gafvert J.* Dielectric spectroscopy for diagnosis of water tree deterioration in XLPE cables // IEEE Trans. on Dielectrics and Electrical Insulation. — 2001. — Vol. 8. — P. 27–42.

33. *Kuusisto O.* The effects of installation-based defects in medium voltage cable joints // Thesis. Electrical Power Engineering. Helsinki Metropolia University of Applied Sciences — 2016. — 79 p.

34. *Umeda S., Ishii N., Horiguchi N., Maeda M., et al.* Underground power cable, distribution cable, overhead transmission line, industrial cable and their accessories // Furukawa Review. — 2007. — No. 32. — P. 2–20. — http://www.furukawa.co.jp/review/fr032/fr32_02.pdf

35. *Методы* высоковольтных испытаний. Измерение частичных разрядов: МЭК 60270. — Международный стандарт, введен 12.2000. — 55 с.

36. *Электрооборудование* и электроустановки. Метод измерения характеристик частичных разрядов: ГОСТ 20074-83 — СТ СЭВ 3689-82, введен 15.04.1983. — М.: Гос. ком. по стандартам. — 25 с.

37. *Boggs S., Densley J., Kuang J.* Mechanism for impulse conversion of water trees to electrical trees in XLPE // IEEE Trans. on Power Delivery. — 1998. — Vol. 13, Is. 2. — P. 310–315.

38. *Lanz B.* Assuring the reliability of critical power cable systems. — Power cable reliability & diagnostics. — <https://www.slideshare.net/michaeljmack/assuring-reliability-of-critical-power-cable-systems>

39. *Dodds C.* Partial discharge and electrical cable breakdown. — 2016. — <http://www.cablejoints.co.uk/blog/article/partial-discharge-pd-videos-blog>

40. *Невар Г.* Современная кабельная арматура для кабелей с СПЭ-изоляцией // Кабель-news. — 2011. — № 4. — http://www.ruscable.ru/article/Sovremennaya_kabelnaya_armatura_dlya_kabelej_s/

41. *Wester F.J.* Condition assessment of power cables using partial discharge diagnosis at damped AC voltage. — Rotterdam, The Netherlands: Optima Grafische Communicatie, 2004. — 207 p.

42. *Li N., Deng G., Kong B.* Defect morphological characteristic of cold-shrinkable cable terminal and its partial discharge analysis based on finite element method // Internat. Journal of Advanced Research in Electrical, Electronics and Instrumentation Engineering. — 2014. — Vol. 3. — Is. 1. — 8 p. http://www.ijareeie.com/upload/2014/january/1A_Defect.pdf

43. *Овсиенко В.Л.* Изолированные кабели. Материалы СИПРЭ // Энергия Единой Сети. — 2015. — №1(18). — С. 62–82. — http://www.cigre.ru/activity/session/session_2014-seminar/materials/%D0%A1%D1%82%D0%B0%D1%82%D1%8C%D1%8F%20B1.pdf

44. *Yang F., Liu K., Cheng P., Wang S., Wang X., Gao B., Fang Y., Xia R., Ullah I.* The coupling fields characteristics of cable joints and application in the evaluation of crimping process defects // Energies. — 2016. — Vol. 9, No. 932. — doi:10.3390/en9110932. — www.mdpi.com/journal/energies

45. *Suwanasri C., Suwanasri T., Fuangpian P.* Investigation on partial discharge of power cable termination defects using high frequency current transformer // ECTI Trans. on Electrical Engineering, Electronics and Communications. — 2014. — Vol.12, No.1. — P. 16–23.



46. Hvidsten S., Kvande S., Ryen A., Larsen P.B. Severe degradation of the conductor screen of service and laboratory aged medium voltage XLPE insulated cables // IEEE Trans. on Dielectrics and Electrical Insulation. — 2009. — Vol. 16, No. 1. — P. 155–161.
47. Mejia J.C.H. Characterization of real power cable defects by diagnostic measurements // Thesis for the Degree Doctor of Philosophy. — Georgia Institute of Technology December 2008, — 267 p.
48. Fletcher C., Mc Auliffe J., Perkel J. Validating and quantifying reliability improvements of new cable designs — a case study of 600 V self sealing cables // Internat. Conference on Insulated Power Cables, Jicable'15 — Versailles, 21–25 June, 2015. — р. 193–194. — http://www.jicable.org/2015/content/Programme/pdfCreator/72_C92_JICABLE15_0171.pdf
49. Боев А.А. Заводские дефекты и подделки нового электрооборудования. Выявление и борьба // Кабель-news. — 2009 — № 8. — http://www.ruscable.ru/article/Zavodskie_defekty_i_poddelki_novogo/
50. Дмитриев М.В. Проектирование и строительство кабельных линий 6–500 кВ. Актуальные проблемы // Новости Электротехники. — 2016. — № 4(100). — <http://www.news.elteh.ru/arh/2016/100/03.php>
51. Дмитриев М.В. Высоковольтные линии с однофазными кабелями. Защита от перенапряжений // Новости Электротехники. — 2016. — № 6(102). — С. 38–41. — <http://www.news.elteh.ru/arh/2016/102/08.php>
52. Бурлаков Е., Евдоким Г., Карпов А., Шатилов Д. Высоковольтные линии с однофазными кабелями. Переходные процессы и перенапряжения // Новости Электротехники. — 2016. — № 5(101). — <http://www.news.elteh.ru/arh/2016/101/07.php>
53. Гурин А.Г., Гонтарь Ю.Г. Разрушение поверхностного слоя диэлектрика в концевых кабельных муфтах под действием грозových перенапряжений // Вісник НТУ "ХПИ". — 2013. — № 59 (1032). — С. 53–60.
54. Гурин А.Г., Гонтарь Ю.Г. Разрушение увлажненного поверхностного слоя полимерной изоляции при грозových перенапряжениях // Вісник НТУ "ХПИ". — 2014. — № 24 (1067). — С. 33–39.
55. Kucheriava I.M. Electric field distribution in medium-voltage XLPE cable termination taking into account outer semiconducting layer // Технічна електродинаміка. — 2016. — № 3. — С. 12–17.
56. Пиллинг Ю., Хайм К-Д, Бэрш Р. Силикон для кабельной арматуры. Преимущества — в химических особенностях // Новости Электротехники. — 2004. — № 4 (28). — <http://www.news.elteh.ru/arh/2004/28/11.php>
57. Ветлугаев С.С. Исследование, разработка и усовершенствование конструкций переходных соединительных муфт для кабелей на напряжение 110–220 кВ // Дис. на соискание уч. степени канд. техн. наук. — ВНИИКП, М.: 2015. — 212 с.
58. Ветлугаев С.С., Крючков А.А., Макаров Л.Е., Образцов Ю.В., Фурсов П.В., Шувалов М.Ю. Комплексный подход к исследованию поврежденных муфт силовых кабелей высокого напряжения // Кабели и провода. — 2017. — № 1 (382). — С. 8–14.
59. Гук Д.А., Каменский М.К., Макаров Л.Е., Образцов Ю.В., Овсиенко В.Л., Шувалов М.Ю. Новый высоковольтный испытательный центр ОАО "ВНИИКП". Опыт испытаний и исследований силовых кабелей, арматуры и материалов для их производства // Кабели и провода. — 2014. — № 5(348). — С. 35–42.
60. Chen C., Liu G., Lu G., Jin W. Influence of cable terminal stress cone install incorrectly // Proc. of IEEE 9-th Internat. Conference on the Properties and Applications of Dielectric Materials, ICPADM 2009. — 19–23 July 2009. — P. 63–65.
61. Kucheriava I.M. Numerical study of electric field distribution in high-voltage cable termination with stress control cone // Технічна електродинаміка. — 2017. — No. 1. — P. 17–22.
62. Ильиных М.В., Сарин Л.И., Ширковец А.И. Анализ поврежденных кабеля с изоляцией из сшитого полиэтилена в сети 35 кВ металлургического завода. Повышение надежности и эффективности эксплуатации электрических станций и энергетических систем. — М.: Издат. дом МЭИ. — 2010. — Т. 2. — С. 101–103. — <http://www.combienergy.ru/stat/1177-Analiz-povrejdeniy-kabelya-s-izolyaciey-iz-sshitogo>
63. Dong X., Yuan Y., Gao Z. Analysis of cable failure modes and cable joint failure detection via sheath circulating current // Electrical Insulation Conference. — 2014. — Philadelphia, Pennsylvania, USA, 8–11 June 2014. — P. 294–298.
64. Report on failure of 220 kV and above voltage class substation equipment / Central Electricity Authority, Ministry of Power, India New Delhi. — March, 2016. — 89 p.
65. Дмитриев М.В. Заземление экранов однофазных силовых кабелей 6–500 кВ. — СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2010. — 154 с.
66. Методы испытания и диагностики кабельных линий с изоляцией из сшитого полиэтилена // Новости Электротехники. — 2009. — № 1(55). — 2009. — С. 2–3.
67. Золотарев В.М., Антонец Ю.А., Золотарев В.В., Белянин Р.В., Науменко А.А. Выбор основных требований к электрическим испытаниям отечественных образцов кабелей с изоляцией из сшитого полиэтилена // Вісник НТУ "ХПИ". — 2014. — № 21(1064). — С. 31–35.
68. Верхувен Б. Международная практика испытаний кабелей // Кабели и провода. — 2006. — № 1 (296). — С. 10–14.
69. Муфты ООО "Виклеон" — <http://www.vikleon.com.ua/produkcija/mufty-vikleon.html>
70. Высоковольтная кабельная арматура. Каталог 2010/2011 — Energy Devison. Tycso Electronics Raychem GmbH, Germany. — 32 с.
71. Кучеренко В., Курюмов Г., Поротиков Д., Захаров М. Диагностика кабельных линий классов напряжения 35–110 кВ // Кабель-news. — 2011. — № 6. — С. 41–45. — http://www.ruscable.ru/article/Diagnostika_kabelnyx_linij_klassov_napryazheniya/

