



СИЛОВЫЕ КАБЕЛИ НА НАПРЯЖЕНИЕ 10–500 кВ:

ИСТОРИЯ РАЗВИТИЯ И ПЕРСПЕКТИВЫ

Силовые кабели предназначены для передачи и распределения электрической энергии. Эти кабели занимают первое место в структуре выпуска всех типов кабельных изделий (рис. 1) [1] как по потреблению меди, так и по стоимостной оценке выпуска. В 2005 году силовые кабели и провода составляли 60,8 % мирового объема производства кабелей и проводов. При этом по сравнению с 2001 годом доля объема потребления кабелей и проводов энергетического назначения в мире выросла на 19 %, что свидетельствует о преимущественном развитии этого сектора кабельной промышленности. В России

и других странах СНГ также продолжался рост производства как низковольтных силовых кабелей и проводов, так и силовых кабелей на напряжение 1 кВ и выше. Достаточно отметить, что в 2005 году по сравнению с 2004 годом производство низковольтных кабелей выросло на 24 %, а кабелей на напряжение 1 кВ и выше – на 9 %. Этот рост связан прежде всего с развитием жилищного, коммунального и промышленного строительства. Естественно, что темпы роста производства кабелей среднего напряжения (10–35 кВ) ниже, однако интенсивное увеличение спроса на эту продукцию в будущем особенно в России очевидно.

Ниже рассмотрены основные акценты развития производства в странах СНГ силовых кабелей среднего и высокого напряжения, обеспечение высокого качества и надежности которых требует соблюдения и усовершенствования технологии производства, непрерывной работы по повышению характеристик применяемых изоляционных материалов. Для этой группы необходимо также постоянное проведение научно-исследовательских и опытно-конструкторских работ.

Силовые кабели среднего напряжения

В послевоенный период кабельная промышленность поставляла заказчикам традиционные в то время силовые кабели на напряжение 6, 10, 20 и 35 кВ с пропитанной бумажной изоляцией в свинцовых и алюминиевых оболочках. Производственные возможности кабельных заводов периода 50–60-х годов не удовлетворяли растущим потребностям народного хозяйства СССР в этих кабелях, применяемых для нужд электрификации при сооружении городских распределительных сетей, строящихся предприятий и других промышленных объектов.

С вводом в эксплуатацию двух гигантов кабельной подотрасли – заводов «Камкабель» (1960 г.)



и «Иркутсккабель» (1965 г.) выпуск силовых кабелей был повышен в несколько раз и обеспечено полное удовлетворение нужд народного хозяйства. Помимо количественного роста выпуска кабелей среднего напряжения введение в эксплуатацию новых производств сопровождалось качественным совершенствованием технологии изготовления кабелей в части применения современного высокопроизводительного технологического оборудования и использования новых материалов (многослойные бумаги, пропиточные составы, легированные свинцовые сплавы, пластмассовые защитные покрытия и т.д.). Проекты новых производств разрабатывались и осуществлялись проектными и научными подразделениями ВНИИ кабельной промышленности (ныне ОАО «ВНИИКП»).

Технический уровень отечественных кабелей с пропитанной бумажной изоляцией рассматриваемого периода соответствовал уровню кабелей мировых производителей. Однако уже в 70-е годы в промышленно развитых странах Америки, Европы и в Японии наметилась тенденция перехода в кабелях среднего напряжения от пропитанной бумажной изоляции к полиэтиленовой. Переход на новый тип изоляции сопровождался серьезными «болезнями роста», когда первые кабели с полиэтиленовой изоляцией в США после нескольких лет эксплуатации массово выходили из строя по причине низкой триингстойкости полиэтилена (ПЭ) и несовершенства конструкций кабелей в части влагозащиты. Эти обстоятельства стимулировали во всем мире, в том числе в СССР, проведение научных исследований, связанных с механизмом образования и роста водных триингов, разработкой триингстойких материалов, оптимальных конструкций кабелей и исследованиями ресурсных характеристик.

Проблемы, касающиеся обеспечения надежности кабелей с изоляцией из сшитого ПЭ, были успеш-

но решены в мире в конце прошлого столетия, и все промышленно развитые страны производят и потребляют в настоящее время кабели среднего напряжения только с этим видом изоляции. В России по ряду экономических и политических причин условия для организации производства кабелей с изоляцией из сшитого ПЭ сложились сравнительно недавно, хотя необходимые исследования были проведены своевременно. Предпосылками для этого явились следующие обстоятельства:

- выработка ресурса значительной части старых кабелей, проработавших в распределительных сетях 40 и более лет и имеющих недопустимо высокие показатели удельной повреждаемости (число отказов на 100 км линий в год), особенно кабелей в алюминиевых оболочках из-за их низкой коррозионной стойкости [2];

- наличие инвестиций для организации нового производства на предприятиях кабельной подотрасли, работающих в условиях рыночной экономики в период после экономического спада.

В 2003–2005 годах организованы новые производства кабелей среднего напряжения с изоляцией из сшитого ПЭ с непосредственным участием ОАО «ВНИИКП» на шести российских заводах: ОАО «Камкабель» (10 кВ), ЗАО «Кавказкабель» (10 кВ), ОАО «Иркутсккабель» (10–35 кВ), ОАО «Электрокабель» Кольчугинский завод» (10–35 кВ), ОАО «Севкабель» (10 кВ) и ОАО «Сарансккабель» (10–35 кВ). Аналогичное производство организовано в Украине на харьковском заводе «Южкабель». Производственные мощности этих заводов позволяют заменить на рынках продаж около 40 % кабелей с пропитанной бумажной изоляцией. В последние годы рынок кабелей среднего напряжения в России интенсивно развивается. С учетом имеющихся инвестиционных возможностей у российских предприятий следует отметить, что в ближайшие 5–10 лет кабели с пропитанной бумажной изоляцией практически полностью будут заменены на кабели с изоляцией из сшитого ПЭ.

Особенностями вновь созданных в России и Украине производств кабелей среднего напряжения с изоляцией из сшитого ПЭ являются следующие важные факторы:

- применение нового технологического оборудования с учетом последних достижений мировых производителей в этой области, что ставит отечественных производителей в преимущественное положение перед рядом зарубежных;

- изготовление герметизированных конструкций кабелей (рис. 2) с использованием изоляционных и электропроводящих композиций последнего поколения, рассчитанных на высокие сроки службы;

- производство кабелей в соответствии с требованиями стандартов IEC и CENELEC с подтверждением надежности кабелей при двухгодичных испытаниях во влажной среде (воде).

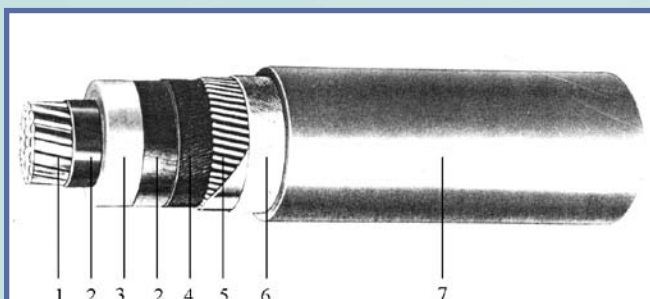
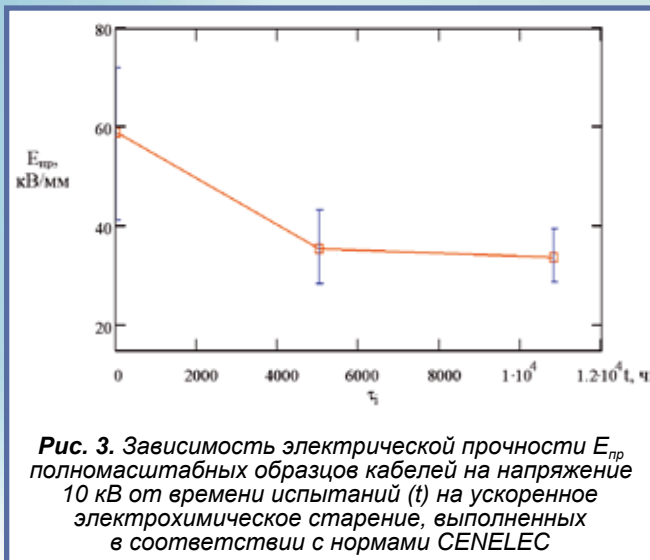


Рис. 2. Базовая конструкция кабеля марки АПвПв $1 \times 240/35 \text{ мм}^2$ – 10 кВ:

- 1 – алюминиевая токопроводящая жила сечением $1 \times 240 \text{ мм}^2$;
- 2 – электропроводящие экструдированные экраны;
- 3 – изоляция из сшитого полиэтилена толщиной 3,4 мм;
- 4 – электропроводящие влагонабухающие ленты;
- 5 – экран из медных проволок сечением 35 мм^2 (сечение экрана по условиям токов короткого замыкания);
- 6 – разделительная обмотка алюмополимерной лентой;
- 7 – наружная оболочка из полиэтилена.



На рис. 3 приведены обобщенные данные по электрической прочности отечественных кабелей за период влажного старения при трехкратном номинальном напряжении в течение 10 800 ч. Промежуточные результаты испытаний позволяют надеяться на их успешное завершение по истечении 17 500 ч (нормированное значение пробивной напряженности $E_{пр.норм.} \geq 18$ кВ/мм).

Основным фактором, определяющим качество и надежность кабеля среднего (как, впрочем, и высокого) напряжения с пластмассовой изоляцией, является уровень дефектности его электроизоляционной системы. Наиболее характерные дефекты при этом – газовые полости и инородные включения в изоляции, выступы экранов. Примеры характерных дефектов показаны на рис. 4. Источниками дефектов в общем случае являются: инородные примеси, попавшие в изоляционную или электропроводящую композицию при их производстве, при нарушении условий их транспортирования и хранения; недостатки технологического процесса и культуры производства при переработке материалов в изделия.

Все указанные дефекты являются центрами зарождения водных и/или электрических триингов и при достаточно больших размерах и концентрации резко снижают электрическую прочность кабелей как в состоянии поставки, так и в процессе эксплуатации; в последнем случае дефекты провоцируют ускоренное старение изоляции.

Эффективным средством контроля и подтверждения качества кабелей с пластмассовой изоляцией как на стадии освоения производства, так и в условиях серийного производства являются периодический отбор образцов и испытания их на пробой на переменном или импульсном напряжении. Опыт, накопленный к настоящему времени как в ОАО «ВНИИКП», так и ряде крупных зарубежных производителей, показывает, что уровень электрической прочности, оп-

ределяемой при таких испытаниях, хорошо коррелирует с уровнем дефектности изделий [3].

Следует более подробно рассмотреть механизм возникновения и развития водных триингов в изоляции кабелей среднего напряжения и их влияния на ресурс кабелей. Этот механизм аналогичен и для полимерной изоляции кабелей высокого напряжения.

Водные триинги – своеобразные локализованные структуры, которые зарождаются на дефектах изоляционной системы, таких как инородные включения в изоляции и экранах, выступы экранов в изоляцию, газовые полости. Триинги растут в результате совместного действия электрического поля и воды, диффундирующей в кабель из окружающей среды.

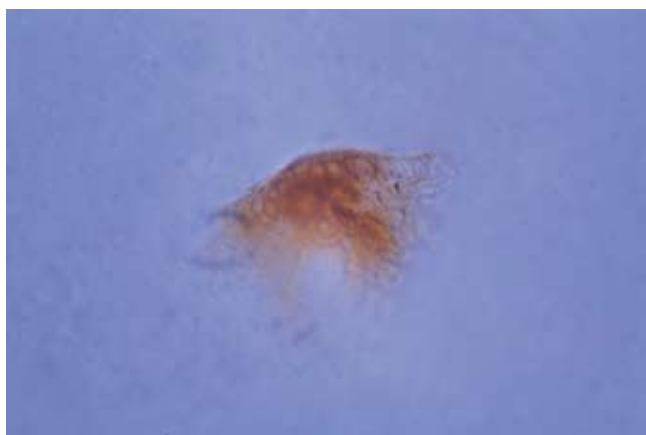
В зависимости от местоположения триингообразующего дефекта различают два вида водных триингов: типа «бант» (триинги зарождаются на дефектах в толще изоляционного слоя) и типа «веер» (триинги зарождаются на границе электропроводящего экрана и изоляции).

По мере того как размеры и количество триингов, а также степень разложения полимера в триингах увеличиваются, возрастает вероятность отказа кабеля. При достижении перечисленными показателями некоторых критических значений в водных триингах зарождаются триинги электрические. Последние представляют собой каналы неполного пробоя, в которых развиваются частичные разряды. Электрические триинги растут весьма интенсивно и за короткое время выводят изоляцию из строя.

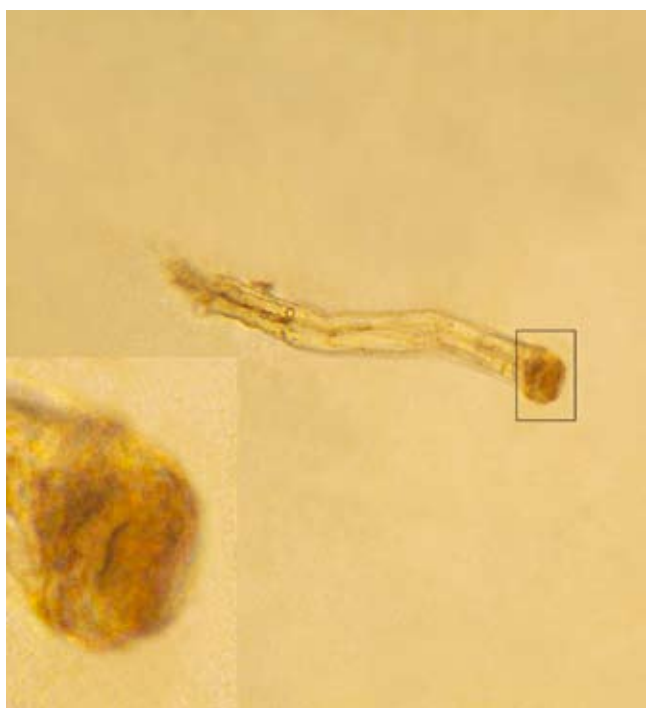
Мировой опыт показывает, что кабели, изготовленные из недостаточно совершенных материалов, с использованием несовершенной технологии и конструкция которых не содержит элементов влагозащиты, выходят из строя по причине развития водных триингов достаточно быстро: их фактический ресурс составляет всего лишь 8–15 лет вместо требуемых 30–40.

Обычно для обнаружения водных триингов используют окрашивание срезов изоляции; наибольшее распространение получила методика, рекомендованная СИГРЭ. В ОАО «ВНИИКП» разработаны собственные методики обнаружения водных триингов, применяющие как оригинальные приемы окрашивания, так и способы визуализации, не требующие химической обработки. Преимущество этой техники состоит в том, что она позволяет получить новую информацию о физическом строении, электрических свойствах и химическом составе триингов. Химический состав триингов анализируется с помощью метода микроспектрального анализа.

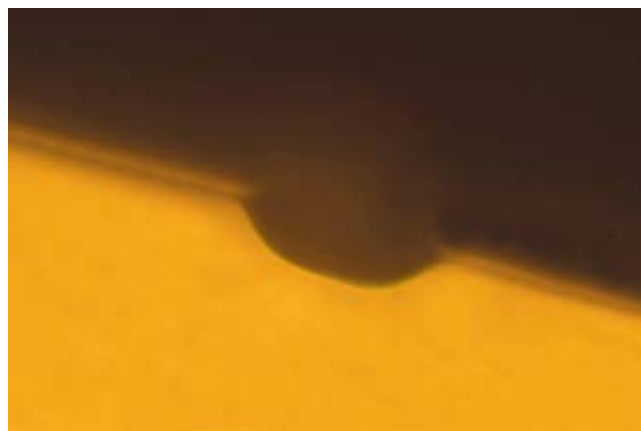
Прогнозирование ресурса кабелей, подверженных развитию водных триингов, можно осуществить на основе математического моделирования данного процесса старения. Модель, используемая в настоящее время, представляет собой систему из двух дифференциальных уравнений:



а) частица термически модифицированного ПЭ, сформировавшаяся в «мертвой зоне» экструдера



б) волокно хлопка, идентифицированное по характерному сплюсненному каналу, расположенному в центральной части волокна (см. врезку)



в) выступ электропроводящего экрана в изоляцию



г) крупная (1 мм) газовая полость в изоляции. Интерференционные полосы, окружающие полость, свидетельствуют о значительных механических напряжениях в материале

$$\left. \begin{aligned} \frac{dl}{dt} &= \kappa \cdot \frac{1}{l} - \mu_1 \cdot \kappa \cdot l + \mu_1 \cdot \kappa \cdot \chi \cdot OD \cdot l \\ \frac{d(l \cdot OD)}{dt} &= \frac{\mu_2 \cdot \kappa}{\chi} \cdot l - \mu_2 \cdot \kappa \cdot OD \cdot l \end{aligned} \right\}, \quad (1)$$

где l – относительная длина триинга, определяемая в долях от толщины изоляции; OD – оптическая плотность триинга, являющаяся мерой электрохимической деградации полимера; t – время; $\kappa, \chi, \mu_1, \mu_2$ – коэффициенты.

Сопоставление результатов численного интегрирования (1) с данными измерений, выполненных как на модельных образцах, состаренных в лаборатор-

ных условиях, так и на полномасштабных образцах, состаренных в ходе промышленной эксплуатации, показывает, что (1) удовлетворительно моделирует электрохимическое старение кабелей. В настоящее время эта модель применяется для решения задачи прогноза остаточного ресурса действующих кабельных линий в тех случаях, когда имеется доступ к образцам изделий для оценки их текущего состояния путем лабораторного исследования.

Силовые кабели высокого напряжения

К силовым кабелям высокого напряжения относятся кабели на напряжение 110–500 кВ, среди ко-

Данные по КЛ 500 кВ для вывода мощности с ГЭС

Наименование ГЭС	Период ввода КЛ в эксплуатацию	Количество кабеля МВДТ-500 1 Ч 625 мм ² , км	Отработанный ресурс кабеля и арматуры, годы
Усть-Илимская	1975–1976	~ 19	~ 30
Токтогульская	1975–1976	14,4	~ 30
Нижнекамская	1979–1981	8,4	26

торых основными являются кабели переменного напряжения. Уже в 50-е годы была намечена широкая программа строительства гидроэлектростанций на Волге и сибирских реках. Строительство ГЭС потребовало впервые в СССР создания маслонаполненных кабелей (МНК) на напряжение 220 кВ для передачи мощностей до 250 МВ·А. В этот же период резко повысилась потребность в кабелях высокого напряжения 110–220 кВ для глубоких вводов мощностей в крупных промышленных городах СССР. ВНИИКП явился непосредственным участником оказания помощи ГДР в подъеме энергетики, для чего в 60-е и 70-е годы была разработана и поставлена серия кабелей на напряжение 220 и 380 кВ на многие объекты республики.

Дальнейшее строительство крупных ГЭС потребовало разработки кабелей и арматуры на сверхвысокое напряжение 500 кВ. Впервые в мире кабель на такое напряжение был создан силами ВНИИКП и поставлен на опытно-промышленную эксплуатацию на Волгоградской ГЭС в 1964 году. Маслонаполненные кабельные линии (КЛ) на напряжение 500 кВ были введены в промышленную эксплуатацию в 1975–1981 годах. Место установки КЛ 500 кВ, период ввода в эксплуатацию и отработанный к настоящему времени ресурс приведены в табл. 1.

В период приработки в течение первых 600 часов эксплуатации имели место отказы кабелей на Усть-Илимской и Токтогульской ГЭС. В результате тщательного анализа отказов, выполненного специалистами разработчиков и изготовителей кабелей

совместно с заказчиками и монтажным персоналом, были разработаны и осуществлены оперативные меры по ужесточению технологии и контролю качества как при монтаже КЛ, так и при изготовлении кабеля. Отработанный к настоящему времени ресурс КЛ 500 кВ 26–30 лет без случаев отказов свидетельствует о высокой надежности в эксплуатации кабелей и арматуры.

В целом же время эксплуатации маслонаполненных кабелей, проложенных на различных объектах (в основном на территории РФ), превышает нормированные сроки службы. Данные табл. 2 дают представление о фактических наибольших сроках эксплуатации кабелей и арматуры на классы напряжений от 110 до 380 кВ.

Высокие сроки эксплуатации МНК в энергосистемах поставили актуальную задачу прогнозирования срока службы и определения остаточного ресурса длительно эксплуатируемых кабелей. Исследования по этой проблеме активно выполнялись ВНИИКП начиная с 1982 года. Вкратце результаты этих исследований сводятся к следующему.

Изоляция маслонаполненных кабелей низкого и высокого давления на напряжение 110–500 кВ работает под постоянным избыточным давлением в переходных и установившихся тепловых режимах, и температурные изменения объема в изоляции компенсируются за счет системы подпитки маслом. При изготовлении кабелей бумажная изоляция и пропиточные масла подвергаются тщательной термовакуумной обработке. Эти обстоятельства препятствуют

Таблица 2

Данные по эксплуатации МНК

Номинальное напряжение, кВ	Давление	Сечение токопроводящей жилы, мм ²	Максимальная рабочая напряженность электрического поля, кВ/мм	Наибольшее время эксплуатации по состоянию на 2006 г., лет
110	НД	150–625	6,0–8,5	63
110	ВД	270–500	7,5–8,0	52
150	НД	350–625	10,0	29
220	НД	350–625	8,5–9,5	41
220	ВД	550–1200	9,5	50
330	ВД	550	11,5	41
380	ВД	550	13,0	36

Примечание: НД – низкое избыточное давление (0,0245–0,294 МПа);
ВД – высокое избыточное давление (1,08–1,57 МПа).

возникновению разрушающих частичных разрядов при напряженностях электрического поля до 30 МВ/м в кабелях низкого давления и примерно до 40 МВ/м в кабелях высокого давления. Старение изоляции до указанных значений напряженности определяют процессы термической деструкции за счет тепловых потерь от тока нагрузки в металлических элементах кабеля и диэлектрических потерь в объеме изоляции. Разработана и экспериментально подтверждена модель старения электрической изоляции маслонаполненных кабелей в следующем виде:

$$\tau = \frac{\tau_0 \exp\left[-\gamma(\Theta - aI_0^2 \operatorname{tg} \delta_0)\right]}{\ln \frac{\operatorname{tg} \delta_{kp}}{\operatorname{tg} \delta_0}} \int_{\operatorname{tg} \delta_0}^{\operatorname{tg} \delta_{kp}} \frac{\exp(-\gamma a I_0^2 x)}{x} dx, (2)$$

где τ_0 – постоянная старения, характеризующая ресурс изоляции, приведенный к 0 °С; γ – температурная постоянная скорости старения, 1/°С; Θ – допустимая температура изоляции в начальный период, °С; $\operatorname{tg} \delta_0$, $\operatorname{tg} \delta_{kp}$ – соответственно начальное и критическое значение тангенса угла диэлектрических потерь изоляции; a – параметр, характеризующий конструктивные данные кабеля и термическое сопротивление при теплоотводе диэлектрических потерь.

Первый множитель в модели (2) характеризует процесс старения изоляции под действием тепловыделений от токовых потерь; интегральная показательная функция описывает динамику процесса старения под действием диэлектрических потерь. Необходимо отметить, что последние оказывают определяющее влияние на ресурс кабеля. Начальное значение $\operatorname{tg} \delta_0$ изоляции кабеля выступает в качестве основного контрольного параметра, от которого зависит ресурс кабеля на стадии его изготовления.

На основе модели старения МНК составлены обоснованные методики ускоренных ресурсных испытаний кабелей и определены допустимые рабочие напряженности в зависимости от заданного ресурса. Модель старения (2) обобщается на случаи изменяющихся во времени токов нагрузки кабеля и температуры среды. На основе модели старения разработана и апробирована на ряде КЛ методика определения остаточного ресурса.

Однако в настоящее время мировая кабельная промышленность полностью перешла на производство кабелей с изоляцией из сшитого ПЭ взамен маслонаполненных. Производство кабелей высокого напряжения (110 кВ) в СССР было организовано в 1984 году, то есть на 10–15 лет раньше по сравнению с кабелями среднего напряжения с тем же видом изоляции. Это обстоятельство имело немаловажное значение, так как накопленный опыт по исследованиям факторов качества высоковольтных кабелей был использован в технологии производства кабелей среднего напряжения. Конструкции кабелей имели сплошную алюминиевую жилу, электропроводящий

экран по жиле, так называемый эмиссионный слой из полимерной композиции с повышенной диэлектрической проницаемостью, изоляцию из сшитого полиэтилена, электропроводящий экран по изоляции, экран из медной гофрированной ленты, одну или две наружные полиэтиленовые оболочки.

Всего было выпущено около 700 км таких кабелей на Опытном заводе ВНИИКП (впоследствии ОАО «Экспокабель») и на заводе «Москабель» (ныне ОАО «Москабельмет»).

Однако в тех случаях, когда на заводах нарушалась технология производства или условия эксплуатации были особо неблагоприятными, происходили отказы, связанные с развитием водных триингов. Следует отметить, что в 80-е годы в конструкциях кабелей не предусматривалась внешняя влагозащита (это соответствовало представлениям тех лет о надежности кабелей с экструдированной изоляцией: основные опасения вызывали водные триинги, развивающиеся со стороны внутреннего экрана).

Пример крупного водного триинга, выросшего в кабеле на напряжение 110 кВ после 15 лет эксплуатации, показан на рис. 5.

С другой стороны, необходимо отметить, что в тех случаях, когда кабели эксплуатируются в более благоприятных условиях и имеют удовлетворительное качество, отказов не наблюдается. Поскольку фактическая наработка таких кабелей составляет уже около 20 лет (при назначенном ресурсе 25 лет), успешный опыт эксплуатации позволяет сделать вывод о возможности производства и успешного применения кабелей на напряжение 110 кВ со сравнительно высокой рабочей напряженностью электрического поля порядка 7–8 кВ/мм.

К середине 90-х годов производство кабелей на напряжение 110 кВ в ОАО «Экспокабель» было прекращено. С 1996 года производство таких кабелей осуществляется на фирме «АББ-Москабель». В настоящее время еще ряд российских кабельных заводов прорабатывает вопросы, связанные с выпус-



Рис. 5. Водный триинг в изоляции кабеля на напряжение 110 кВ после 15 лет эксплуатации. Фото получено в свете собственной люминесценции

ком кабелей на напряжение 110 кВ. В подготовке соответствующих производств, осуществляемой при непосредственном участии ОАО «ВНИИКП», учтен положительный опыт последнего десятилетия лучших мировых производителей кабелей высокого напряжения в части обеспечения высокого качества и надежности, особое внимание уделяется тщательному выбору поставщиков материалов и самих материалов, обеспечению минимальной дефектности изоляционной системы и кабеля в целом, а также применению конструктивных мер, исключающих попадание влаги в изоляцию.

Кабели на напряжение 110 и 220 кВ планируются к освоению в конце 2007 года в ОАО «Камкабель» (последнее закупило для их изготовления специализированную технологическую линию). Что касается кабелей на напряжение 500 кВ, то их сравнительно

невысокую потребность целесообразно удовлетворить за счет закупок у мировых производителей этих кабелей, накопивших значительный опыт поставок. В РФ первые кабели на напряжение 500 кВ с изоляцией из сшитого ПЭ смонтированы в 2004–2005 годах для вывода мощности с четырех блоков Бурейской ГЭС двумя цепями длиной по 900 м каждая.

ЛИТЕРАТУРА



1. Мещанов Г.И. Динамика производства кабелей связи в мире и странах СНГ // Кабели и провода. 2006. № 2 (297). С. 14–17.
2. Свистунов А.С. Направление работ по развитию кабельной сети Москвы // Кабели и провода. 2001. № 3 (268). С. 18–21.
3. Образцов Ю.В., Фрик А.А., Слизов А.А. Силовые кабели среднего напряжения с изоляцией из сшитого полиэтилена. Факторы качества // Кабели и провода. 2005. № 1 (290). С. 9–13.

ВНИМАНИЮ

руководителей российских предприятий и организаций
Ассоциации «Электрокабель»

В соответствии с распоряжением Правительства Российской Федерации от 6 марта 2003 года № 291-р в Российской Федерации проводится

VI Всероссийский конкурс

«Российская организация высокой социальной эффективности»

Конкурсы проводятся с 2000 года в целях привлечения внимания к решению социальных вопросов и демонстрации на примере лучших организаций (победителей и лауреатов) высокой эффективности социальной работы, широкого распространения и поощрения положительного опыта в данной сфере. Конкурс позволяет выявить лучшие социальные проекты предприятий и организаций. В предыдущие годы победителями становились кабельные заводы.

В состоявшемся в 2005 году V Всероссийском конкурсе приняли участие 870 организаций всех форм собственности из 78 регионов страны, представляющих 42 отрасли.

Конкурс проводится по пяти основным и тринадцати дополнительным номинациям.

Организаторы конкурса: Минэкономразвития России, Минздравсоцразвития России с участием федеральных и региональных органов исполнительной власти, общероссийских объединений работодателей и профсоюзов.

В конкурсе могут принять участие организации, зарегистрированные в Российской Федерации, независимо от форм собственности и отраслевой принадлежности.

Подведение итогов конкурса запланировано на 4 квартал 2006 года.

Для участия в конкурсе необходимо до 15 июня 2006 года направить пакет конкурсной документации в адрес конкурсной комиссии по подготовке и проведению конкурса.

Адрес комиссии: 105203, Москва, ул.15-я Парковая, д. 8.

Тел./факс: (495) 463–9590, 464–3333, 461–6689

E-mail: info@roskonkurs.ru