



**Д.А. Гук**, заведующий ВИЦ;

**М.К. Каменский**, канд. техн. наук, заместитель заведующего отделением;

**Д.В. Колосков**, научный сотрудник;

**В.Л. Овсиенко**, канд. техн. наук, заместитель заведующего отделением;

**М.Ю. Шувалов**, д-р техн. наук, заведующий отделением – директор научного направления;

ОАО «ВНИИКП»

## СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК И СТОЙКОСТИ К ЭЛЕКТРОХИМИЧЕСКОМУ СТАРЕНИЮ ИЗОЛЯЦИОННЫХ СИСТЕМ КАБЕЛЕЙ СРЕДНЕГО НАПРЯЖЕНИЯ НА ОСНОВЕ ЭТИЛЕНПРОПИЛЕНОВОЙ РЕЗИНЫ И СШИТОГО ПОЛИЭТИЛЕНА

**Аннотация.** Последовательно сравниваются электрические свойства этиленпропиленовой резины (ЭПР) и сшитого полиэтилена (СПЭ). В качестве объектов исследования используются «чашки Роговского» – лабораторные образцы, воспроизводящие изоляционную систему кабелей, и полномасштабные образцы кабелей. Показано, что электрическая прочность ЭПР в исходном состоянии в 1,5 раза ниже, чем прочность СПЭ и контролируется теми же технологическими микродефектами – выступами электропроводящих экранов в изоляцию, инородными включениями. Электрическому пробое ЭПР, как и СПЭ, предшествует развитие электрического триинга. Показано, что тангенс угла диэлектрических потерь ( $\tan\delta$ ) кабелей среднего напряжения, изолированных ЭПР, значительно превышает  $\tan\delta$  СПЭ и сильнее зависит от температуры, что приводит к тепловым пробоям при испытаниях. Описано три приема обнаружения водных триингов в ЭПР, а также методы микроспектрального анализа, позволяющие измерить степень электрохимической деградации внутри триингов, разработанные авторами. В заключение отмечено, что кабели среднего напряжения, изолированные ЭПР, найдут достойное место на российском кабельном рынке при подтверждении всесторонними испытаниями высокого качества и надежности.

**Ключевые слова:** этиленпропиленовая резина, сшитый полиэтилен, электрическая прочность, микроскопические дефекты, диэлектрические потери, водный триинг.

**Abstract.** The electrical properties of EPR and XLPE insulations are compared step by step. Rogowski cups as well as full-scale MV cable samples are used as test objects. The EPR dielectric strength appeared to be 1.5 times lower than that of XLPE. It is limited by the same microscopic defects: semicon screen protrusions into insulation, foreign particles. Electrical breakdown of EPR is preceded by electrical treeing. Dielectric losses of EPR are considerably higher and cause thermal breakdown during electrical tests. Three methods are described for water tree disclosure together with the methods of microspectral analysis, which permit to measure the degree of electrochemical degradation inside water trees, developed by the authors.

It is concluded that EPR-insulated MV cables can occupy a worthy place in Russian cable market provided their quality and reliability are confirmed by all necessary tests.

**Key words:** ethylene-propylene rubber, cross linked polyethylene, dielectric strength, microscopic defects, dielectric losses, water treeing.

Материал поступил в редакцию 23.10.2017  
Шувалов М.Ю. E-mail: shuvalov@vniikp.ru

В мире накоплен большой и в целом положительный опыт производства и применения кабелей среднего напряжения (СН) с изоляцией из этиленпропиленовой резины (ЭПР), хотя объём международного рынка этих изделий за последние годы заметно сократился вследствие постепенного замещения ЭПР на сшитый полиэтилен (СПЭ).

В то же время сейчас в кабельной промышленности РФ наблюдается растущий интерес к данной продукции: целый

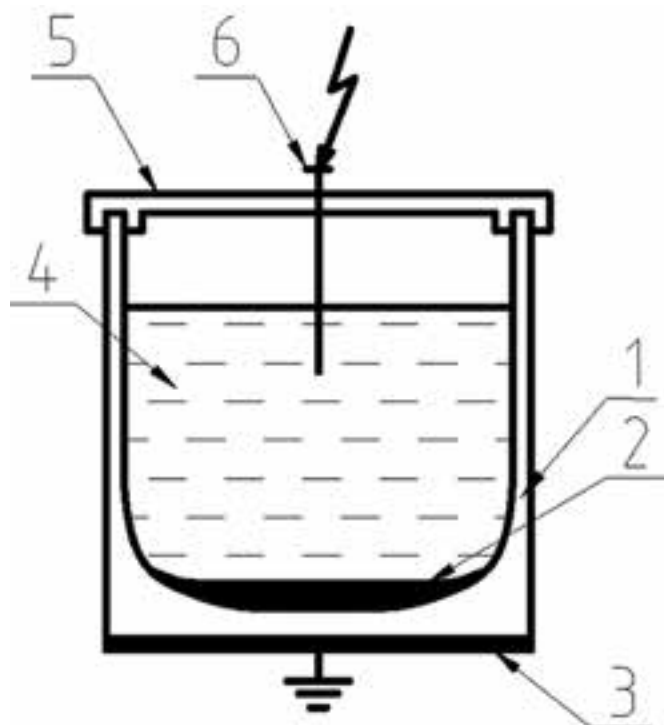
ряд предприятий начинает её выпуск. Этот процесс сам по себе не может вызывать возражений, но он зачастую сопровождается некомпетентной и/или недобросовестной рекламой. Так, если верить [1], ЭПР практически по всем показателям превосходит СПЭ, что иллюстрируется табл. 1.

Мы оставляем за собой право своевременно, в том числе в последующих публикациях, высказаться по всем пунктам табл. 1. Здесь же отметим, что допустимая температура

Таблица 1

### Сравнительные характеристики кабелей с изоляцией из сшитого полиэтилена и этиленпропиленовой резины по [1]

Характеристики	СПЭ	ЭПР
Температура жилы при работе в номинальном режиме, °С	90	90 (до 105)
Температуры жилы при перегрузке, °С	105–110	105–110 (до 140)
Нераспространение горения	Удовлетворительное (в оболочках типа «нг»)	Хорошее
Водный триинг (древовидные трещины в структуре изоляции при попадании воды на её поверхность)	Средняя устойчивость	Хорошая устойчивость
Применение в сетях с изолированной нейтралью (триингостойкость) – стойкость к разрушению при КЗ	Плохая	Хорошая
Применение во взрывоопасных зонах	Нет (п. 7.3.102 ПУЭ)	Да



**Рис. 1а.** «Чашка Роговского» – рекомендованный СИГРЭ объект для испытания электроизоляционных систем на стойкость к электрохимическому старению.

- 1 – «чашка» из диэлектрика, выполненная по профилю электрода Роговского;
- 2 – верхний электропроводящий экран;
- 3 – нижний электропроводящий экран;
- 4 – электролит;
- 5 – крышка из диэлектрика;
- 6 – высоковольтный электрод



**Рис. 1б.** Образцы для испытания на ускоренное старение («чашки Роговского»), выполненные из ЭПР (слева) и СПЭ

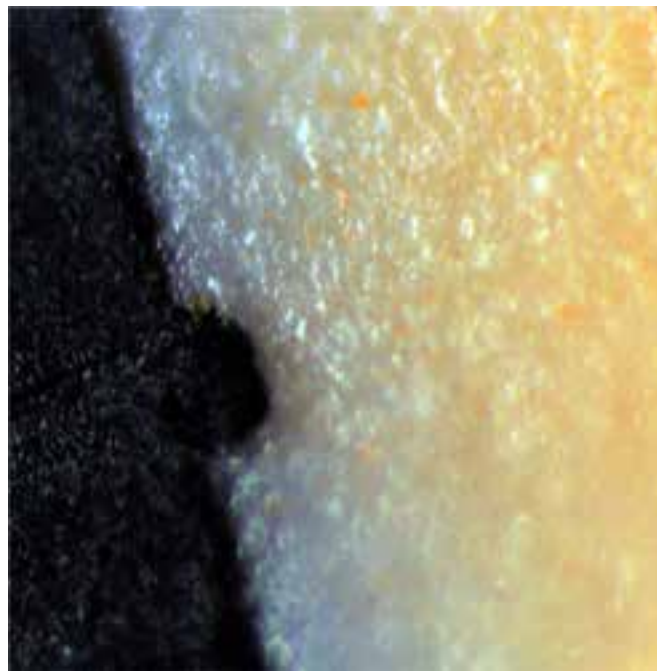
жилы при перегрузках для СПЭ составляет не 105–110 °С, а 130 °С [2], а водные триинги (ВТ) – не трещины, а системы заполненных водой микрополостей, стенки которых состоят из химически изменённого, окисленного полимера (СПЭ, ЭПР).

Полное сопоставление двух типов диэлектриков – вопрос весьма обширный; здесь мы кратко остановимся на электрических характеристиках изоляционной системы на основе ЭПР, а также на её триингостойкости, прибегая к результатам собственных испытаний, выполняемых с применением как полномасштабных образцов кабелей СН, так и лабораторных испытательных объектов – «чашек Роговского» (рис. 1 а и б).

Важный показатель – это электрическая прочность на переменном напряжении в исходном состоянии. Результаты, полученные при испытаниях во ВНИИКП, сведены в табл. 2.

Существенным является вопрос о тех факторах, которые ограничивают электрическую прочность изоляции кабелей СН. Применительно к кабелям, изолированным СПЭ, важнейшим из таких факторов являются микроскопические дефекты технологического происхождения – выступы электропроводящих экранов в изоляцию, инородные включения, значительно реже – полости в изоляции.

Анализ образцов кабелей СН, изолированных ЭПР, выполненный во ВНИИКП, показывает, что для этих изделий характерны те же самые микродефекты (рис. 2 а, б, в), что и для кабелей, изолированных СПЭ. При этом сам механизм развития электрического пробоя для кабелей, изолированных как СПЭ, так и ЭПР, аналогичен: собственно пробую



**Рис. 2а.** Выступ экрана по изоляции высотой 70 мкм

Таблица 2

**Сравнительные показатели электрической прочности изоляции кабелей из сшитого полиэтилена (СПЭ) и этиленпропиленовой резины (ЭПР)**

Показатели	СПЭ	ЭПР
Электрическая прочность «чашек Роговского» (параметр масштаба распределения Вейбулла)	> 100 кВ/мм	75–80 кВ/мм
Требования ГОСТ Р 55025–2012 [2] ( $n \cdot U_0^*$ )	не менее $25 \cdot U_0$	–
Фактическое значение пробивного напряжения для кабелей на номинальное напряжение 10 кВ	$\geq 180$ кВ	120–132 кВ
Фактическое значение электрической прочности кабелей на напряжение 10 кВ	$\geq 65$ –75 кВ/мм	39–43 кВ/мм

\*  $U_0$  – номинальное фазное напряжение

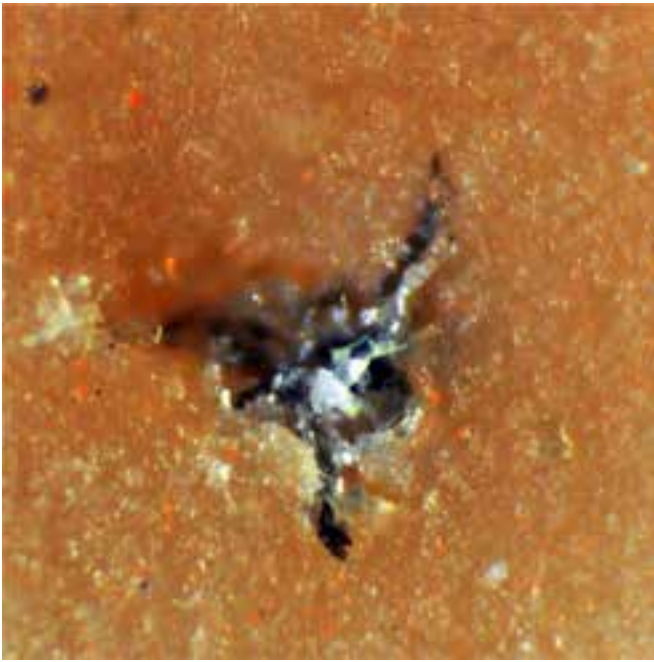


Рис. 2б. Включение неправильной формы размером 214 мкм



Рис. 3а. Электрический триинг, зародившийся на включении термически модифицированного полиэтилена в СПЭ

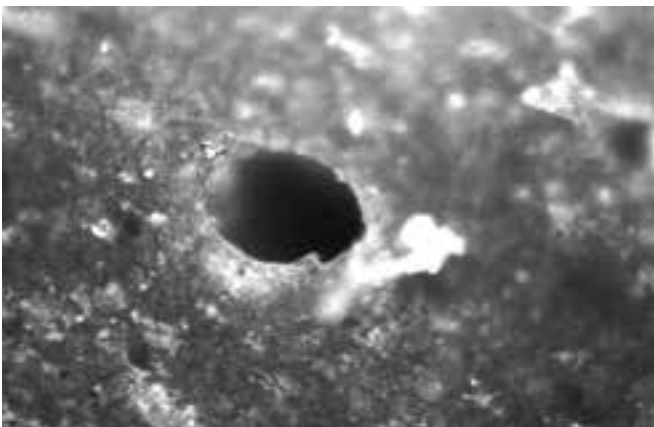


Рис. 2в. Полость в ЭПР

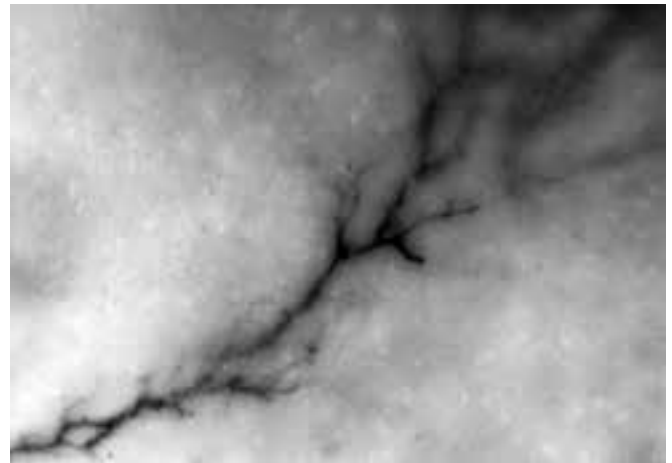


Рис. 3б. Электрический триинг в ЭПР

предшествует развитие электрических триингов – ветвящихся каналов неполного пробоя, которые зарождаются на вышеуказанных дефектах и относительно весьма быстро прорастают через весь слой диэлектрика, причём их рост сопровождается интенсивными частичными разрядами. Примеры электрических триингов в СПЭ и ЭПР показаны на рис. 3 а, б, в.

Следующая важная характеристика кабелей – тангенс угла диэлектрических потерь ( $\tan\delta$ ); его зависимости от температуры для изоляции из ЭПР и СПЭ показаны на рис. 4.

Высокие значения  $\tan\delta$  ЭПР и сильная температурная зависимость этого параметра позволяют предположить, что для кабелей, изолированных данным диэлектриком, может быть характерна также тепловая форма пробоя.

Это предположение подтверждается на практике: в процессе испытаний, проводимых с целью определения электрической прочности кабелей, мы неоднократно наблюдали прогрессирующий разогрев испытываемых изделий вплоть до момента пробоя.

Важнейшим показателем изоляции кабелей СН является, как известно, стойкость к электрохимическому старению.

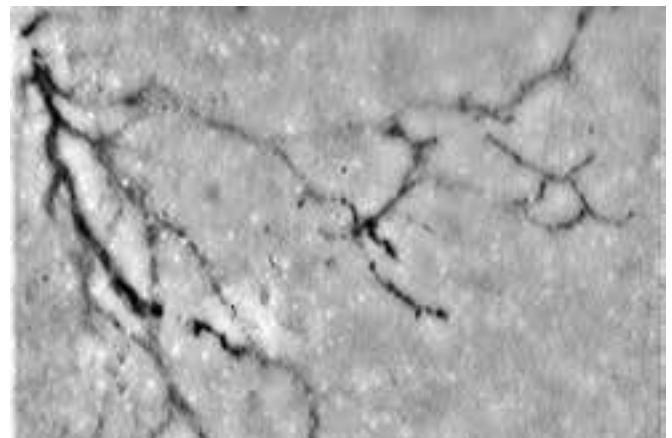


Рис. 3в. Электрический триинг в ЭПР

Не располагая пока результатами двухгодичных испытаний кабелей, изолированных ЭПР, мы приведём здесь данные, полученные на «чашках Роговского» для одной из композиций СПЭ, применяемой российскими заводами для

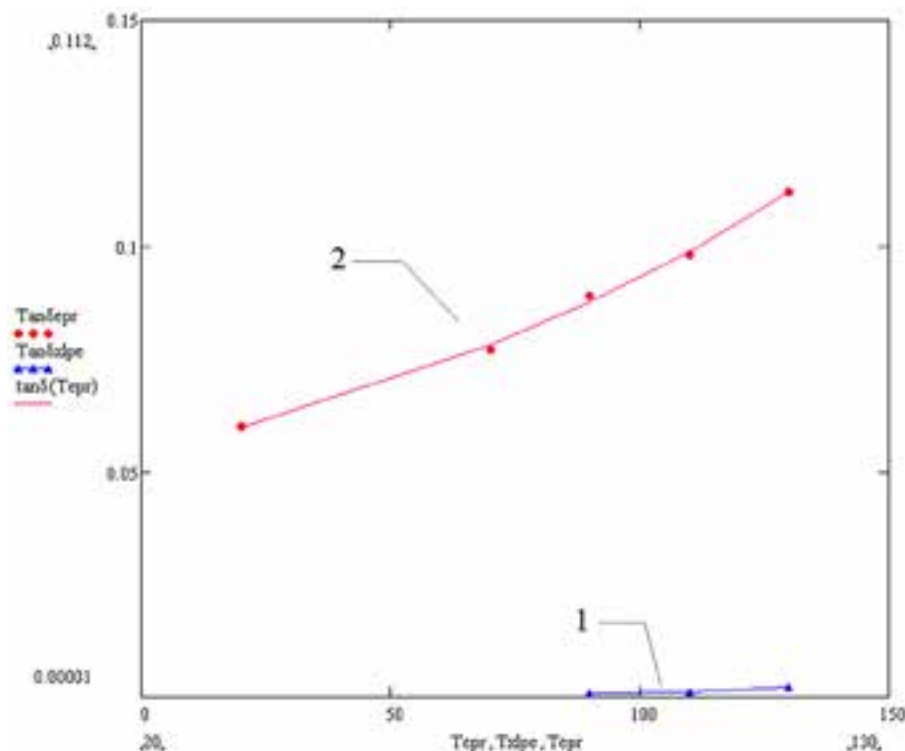


Рис. 4. Зависимость тангенса угла диэлектрических потерь от температуры для образцов кабелей, изолированных СПЭ (1) и ЭПР (2)

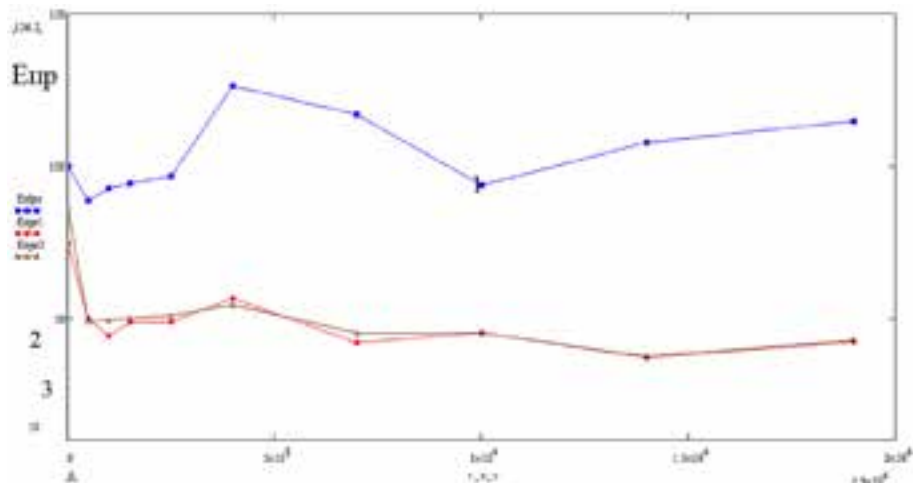


Рис. 5. Зависимость электрической прочности ( $E_{пр}$ , кВ/мм) чашек Роговского от длительности электрохимического старения ( $t$ , ч) триингостойкого сшитого полиэтилена (1) и двух типов ЭПР (2, 3). Условия испытаний: напряжённость электрического поля – 8 кВ/мм, температура – 20 °С

превышает 2 года; результаты, как видим, не в пользу ЭПР.

Здесь уместно привести сравнение требований, предъявляемых соответствующей нормативной документацией Евросоюза к остаточной электрической прочности, которой должны обладать кабели с ЭПР- и СПЭ-изоляцией по окончании двухгодичных испытаний на ускоренное электрохимическое старение (табл. 3).

Не менее интересны, разумеется, зарубежные данные, полученные на основе промышленной эксплуатации.

В [4] сообщается следующее: по истечении 17 лет работы крупный торговый центр в г. Бирмингеме (США) подвергся реконструкции, в процессе которой для испытаний и исследований стали доступны полномасштабные образцы кабелей на напряжение 35 кВ, изолированные как СПЭ, так и ЭПР. В процессе эксплуатации кабели контактировали с водой. Эти изделия были испытаны с целью определения их электрической прочности, результаты испытаний показаны на рис. 6. Как видно из приведённых графиков, электрическая прочность кабелей, изолированных СПЭ (определяемая как параметр масштаба распределения Вейбулла) в 1,5 раза превышает прочность кабелей, изолированных ЭПР. Этот результат вполне согласуется с данными, приведёнными в табл. 2 и на рис. 5 (собственные данные авторов настоящей статьи), а также в табл. 3 (требования нормативной документации Евросоюза к электрической прочности кабелей после двухгодичных испытаний).

Один из фактов, относящихся к механизму электрохимического старения ЭПР-изоляции, который нередко оспаривался (и оспаривается), – это возможность развития ВТ в данном типе материала. Действительно, увидеть ВТ в ЭПР затруднительно по двум причинам: во-первых, материал этот наполненный и, как следствие, непрозрачный; во-вторых, существует большое разнообразие рецептов

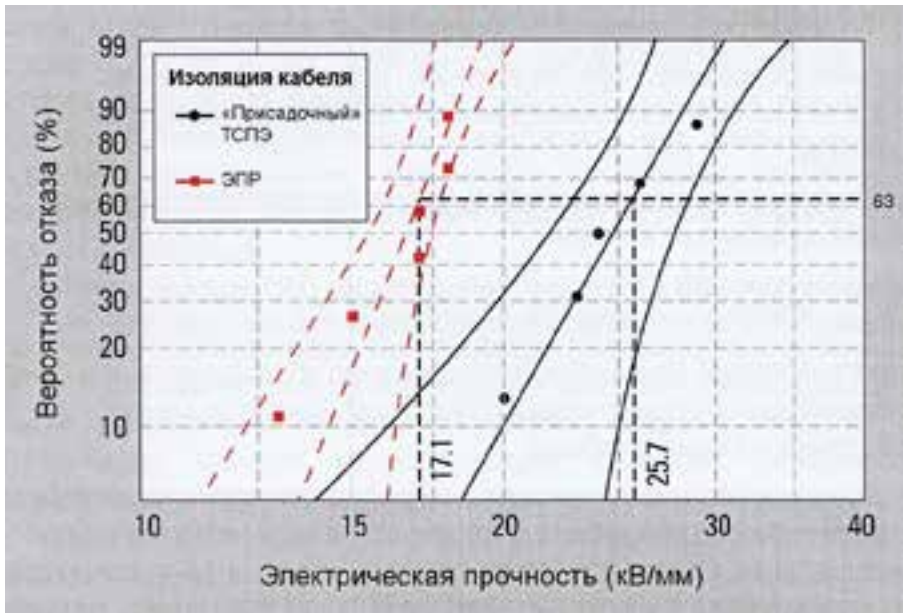
изоляции кабелей СН, и двух ЭПР, известных на мировом рынке (рис. 5). Продолжительность испытаний несколько

ЭПР, что существенно затрудняет создание унифицированного метода обнаружения ВТ. Для преодоления данной

Таблица 3

**Сравнение требований к остаточной электрической прочности кабелей среднего напряжения, изолированных триингостойким сшитым полиэтиленом и этиленпропиленовой резиной**

Нормативная документация	Уровень электрической прочности	
	СПЭ	ЭПР
HD 620 S2-2010 CENELEC [3]	Все 6 образцов: $\geq 23$ кВ/мм; из них 4 образца: $\geq 29$ кВ/мм, из них 2 образца: $\geq 35$ кВ/мм	Все 6 образцов: $\geq 14$ В/мм; из них 4 образца: $\geq 18$ кВ/мм, из них 2 образца: $\geq 22$ кВ/мм



**Рис. 6.** Распределение Вейбулла для электрической прочности при переменном напряжении, полученное для кабелей с изоляцией из триингостойкого СПЭ и с изоляцией из ЭПР после 17 лет эксплуатации. Вертикальными пунктирными линиями показаны соответствующие значения параметра масштаба для распределения Вейбулла – по [4]

Первый из них основан на следующих двух наблюдениях:

- материалы всех обследованных нами ЭПР обладают свойством первичной люминесценции, причём люминофорами являются антиоксиданты (что справедливо, впрочем, и для СПЭ);
- поскольку развитие ВТ связано с окислением полимера, антиоксиданты в пределах ВТ срабатываются, вследствие чего триинги люминесцируют слабее окружающего материала, что и создаёт необходимый оптический контраст (рис. 7 а и б).

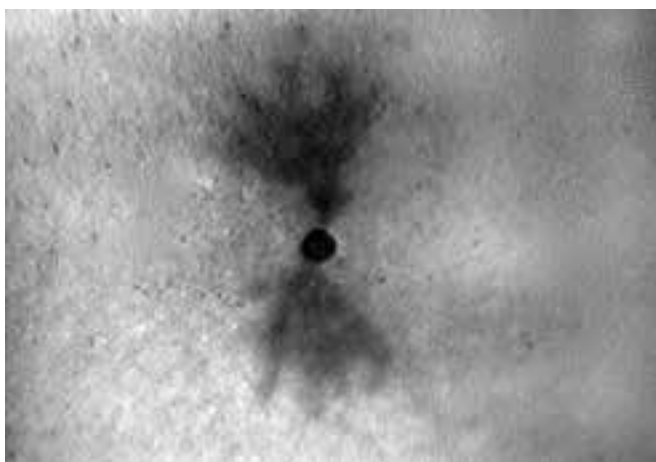
Данный метод обнаружения ВТ обладает, однако, двумя недостатками:

- хорошо выявляются лишь относительно крупные, хорошо развитые триинги, то есть выявление электрохимического старения на ранней стадии затруднено;
- в процессе наблюдения, фотографирования или спектрофотометрирования ВТ происходит интенсивное фотообесцвечивание.

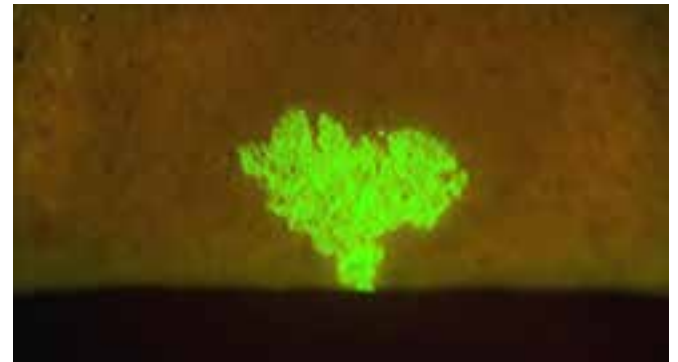
Эти недостатки преодолены во втором методе, также использующем явление люминесценции, но на сей раз – «вторичной», которая обеспечивается за счёт окраски образцов специально подобранными красителями – люминофорами. При этом применяется двойное



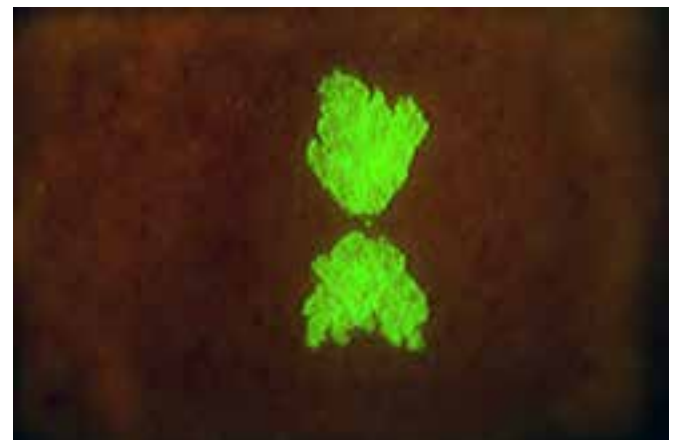
**Рис. 7а.** ВТ в ЭПР, сфотографированный в свете первичной люминесценции



**Рис. 7б.** ВТ в ЭПР, сфотографированный в свете первичной флуоресценции



**Рис. 8а.** ВТ типа «веер» в ЭПР. Флуоресценция, двойное окрашивание



**Рис. 8б.** ВТ типа «бант» в ЭПР. Флуоресценция, двойное окрашивание

трудности во ВНИИКП разработаны три независимых приема обнаружения ВТ в ЭПР.



Рис. 9. VT в ЭПР. Фотография в свете диффузного отражения, окрашивание отражающим красителем

Поэтому для определения степени электрохимической деградации полимерной матрицы в «теле» VT следует применять методы микроскопии в падающем свете. Во ВНИИКП показано, что в качестве таких методов эффективна регистрация спектров диффузного отражения и люминесценции, причём красители, подобранные в рамках 2-го и 3-го методов, описанных выше, являются количественными, то есть позволяют решать поставленную задачу определения уровня микрповреждаемости изоляции.

Сказанное иллюстрируется следующим примером. Были выполнены сравнительные испытания двух ЭПР, отличающихся составом, на стойкость к электрохимическому старению, при комнатной температуре и напряжённости поля 8 кВ/мм. Электрическая прочность образцов этих материалов («чашек Роговского») была измерена в исходном состоянии и по истечении 1000 ч испытаний. Оказалось, что у одной из ЭПР (№ 1) прочность упала почти в 2 раза, тогда как у другой (№ 2) осталась на исходном уровне (табл. 4).

Таблица 4

**Сравнительные данные по электрической прочности двух ЭПР**

Электрическая прочность (параметр масштаба распределения Вейбулла), кВ/мм	Материал	
	1 (промышленный)	2 (экспериментальный)
В исходном состоянии	78,04	78,60
После 1000 ч влажного старения при 8 кВ/мм	47,45	80,22

Таблица 5

**Средние размеры водных триингов в сравниваемых ЭПР**

Тип триинга	Материал	
	1	2
«Веер»	62,5 мкм	63 мкм
«Бант»	61 мкм	64 мкм

окрашивание: первоначально обследуемые срезы изоляции окрашиваются красным красителем, затем VT – зелёным. Такая техника позволяет исключить влияние собственной люминесценции материалов, которая различна для разных рецептур ЭПР. Применение второго метода иллюстрируется рис. 8 а и б.

Наконец, третий метод основан на использовании отражающего красителя, который избирательно связывается с VT, практически не затрагивая при этом неповреждённый диэлектрик (рис. 9).

Общепринято, что количественной мерой электрохимического старения кабельных экструдированных диэлектриков являются размеры VT. Нами в процессе многолетних исследований установлено, что этот показатель целесообразно, а в ряде случаев и необходимо дополнить другим, а именно мерой локальной электрохимической деградации полимера в объёме VT.

Применительно к СПЭ в качестве такой меры может быть использовано оптическое поглощение в видимой и/или ультрафиолетовой области, измеряемое средствами микроспектрального анализа [5].

ЭПР непрозрачна, более точно – обладает ограниченной прозрачностью в тонких срезах толщиной порядка 5–10 мкм, работать с которыми неудобно, особенно в случае необходимости обследования большого количества материала.

Измерения длин VT, выполненные с использованием окрашивания отражающим красителем, показали при этом, что размеры триингов, выросших в сравниваемых материалах, практически одинаковы (табл. 5).

Кажущееся противоречие между различием в стойкости к старению, определяемой значениями электрической прочности с одной стороны, и фактическим равенством длин VT с другой, преодолевается путём применения микроспектрального анализа VT, что показано на рис. 10 для флуоресценции и на рис. 11 для диффузного отражения.

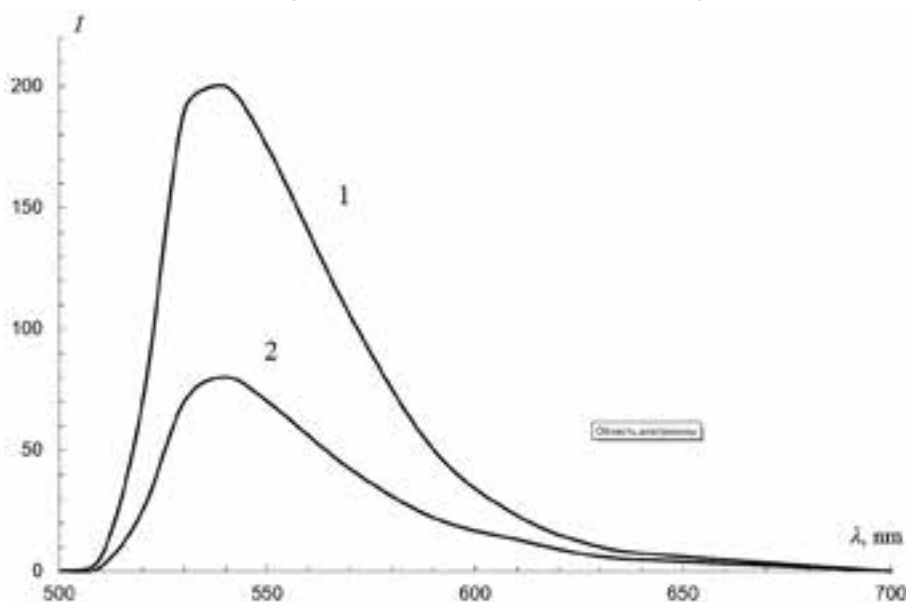
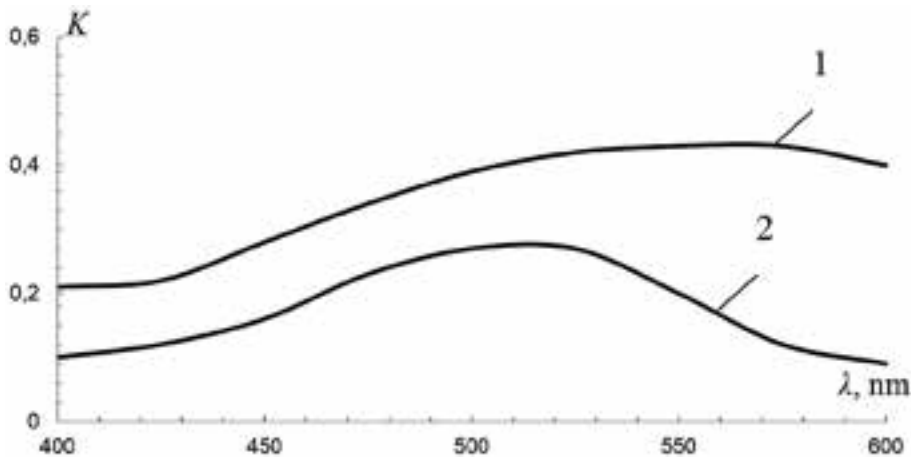


Рис. 10. Спектры вторичной флуоресценции VT в ЭПР, двойное окрашивание: 1 – для материала № 1, 2 – для материала № 2 (пояснения в тексте)



**Рис. 11.** Спектры контраста диффузного отражения ( $K_{\Gamma}$ ) в ЭПР, окрашенных отражающим красителем:  
1 – для ЭПР № 1; 2 – для ЭПР № 2

$$K_{\Gamma} = \frac{|I_t - I_b|}{I_b}$$

где  $I_b$  – «фоновый» сигнал диффузного отражения, относящийся к участку материала вблизи ВТ;  
 $I_t$  – сигнал диффузного отражения, относящийся к ВТ

В целях исключения паразитного сигнала, исходящего от неповреждённого материала, окружающего ВТ и проникающего в оптический тракт микроскопа, из спектров люминесценции ВТ вычтены спектры люминесценции диэлектрика, не охваченного электрохимической деградацией (строго говоря, для спектров, представленных на рис. 10, эта мера является отчасти избыточной, так как полезный и фоновый сигналы уже хорошо спектрально разделены, благодаря применению двойного окрашивания).

Аналогично на рис. 11 показаны спектры контраста диффузного отражения, а не самого диффузного отражения, причём в качестве аналитической области следует рассматривать сине-зелёную часть спектра, так как исследуемые ЭПР обладают собственной красной или розовой окраской.

Наблюдаемые и измеряемые различия в спектрах ВТ объясняются следующим образом: материал, более подверженный старению, характеризуется и большей степенью электрохимической деградации в объёме ВТ, что приводит к большему связыванию красителей с повреждённым полимером, и в результате – к большей интенсивности спектров.

Считаем необходимым подчеркнуть, что приведённые выше данные не претендуют на полноту и направлены не против производства и применения кабелей СН, изолированных ЭПР, но против недобросовестной рекламы. Такие кабели могут занять достойное место на кабельном рынке России. Однако необходимо учитывать, что при постановке на производство необходимо тщательно исследовать применяемые изоляционные и электропроводящие композиции и путём всесторонних испытаний подтвердить высокое качество и надёжность выпускаемой продукции.



ЛИТЕРАТУРА

1. Жданов Ю.С., Попов О.А. Применение этиленпропиленовой резины в кабельной технике // Вестник ПНИПУ. Электротехника, информационные технологии, системы управления. – 2014. – № 10. – С. 70–78.
2. ГОСТ Р 55025–2012. Кабели силовые с пластмассовой изоляцией на номинальное напряжение от 6 до 35 кВ включительно. Общие технические условия. – М.: Стандартинформ, 2014. – 35 с.
3. HD 620S2–2010 CENELEC Distribution cables with extruded insulation for rated voltages from 3,6/6 (7,2) kV up to and including 20,8/36 (42) kV.
4. Person T.J. et. al. Evaluation of Tr-XLPE and EPR-insulated 35 kV cables after 17 years of field service // Jicable 2003, 22–26 June 2003. – Versailles, France. – Paper B.9.5.
5. Шувалов М.Ю. Специальные методы исследований и испытаний изоляционных систем силовых кабелей среднего и высокого напряжения // Доклад на 48-м общем собрании Международной Ассоциации «Интеркабель». – Бремен, Германия, 1–5 декабря 2014 г.