

РАЗВИТИЕ ВОДНЫХ ТРИИНГОВ В ЭКСТРУДИРОВАННОЙ КАБЕЛЬНОЙ ИЗОЛЯЦИИ КАК ЭЛЕКТРИЧЕСКИЙ ЭФФЕКТ РЕБИНДЕРА

ЧАСТЬ 2

М.Ю. Шувалов, д-р техн. наук, зав. лабораторией;

Ю.В. Образцов, канд. техн. наук, зав. отделом;

В.Л. Овсиенко, канд. техн. наук, ведущий научный сотрудник;

П.Ю. Удoviцкий, аспирант, инженер;

А.С. Мнека, аспирант, зав. лабораторией;

ОАО «ВНИИКП»

В первой части статьи [1] нами предложена качественная модель электрохимического старения полимерной изоляции силовых кабелей среднего и высокого напряжения, основанная на аналогии между ростом водных триингов (ВТ) и эффектом Ребиндера (ЭР), то есть обратимым снижением прочности, обусловленным действием внешней среды (в данном случае – воды) и связанным с уменьшением работы образования новых поверхностей в ходе разрушения. В [1] сопоставляются известные из литературы характерные признаки ЭР и соответствующие особенности влажного старения экструдированной изоляции. Приведен ряд экспериментальных фактов, полученных как нами, так и зарубежными исследователями, подтверждающий значительное сходство между развитием триингов и ЭР.

Во второй части статьи мы переходим от качественного моделирования к количественному и рассмотрим две математические модели ВТ, так или иначе имеющие отношение к ЭР.

Первая из моделей описывает развитие ВТ и принимает во внимание десорбцию влаги из ВТ и релаксацию микрополостей (МП), составляющих ВТ: чем выше воздействующие температуры, тем более значимы указанные явления.

Модель рассматривает рост ВТ как одномерный и по существу сводящийся к диффузии воды и растворенных в ней агрессивных примесей (при этом подвижная фаза принимается как единое целое) и бимолекулярной реакции «взрывообразного» образования МП [2].

Десорбцию влаги из ВТ мы будем учитывать упрощенно – подобно тому, как в теории теплопередачи учитывается отвод тепла от стержня в окружающую газообразную или жидкую среду, то есть посредством граничных условий 3-го рода [3]. Что же касается закрывания МП, то мы рассматриваем этот процесс как релаксацию, в простом экспоненциальном приближении, хотя и с некоторой поправкой.

Результирующая модель выглядит следующим образом:

$$\begin{cases} \frac{\partial C}{\partial t} = \partial/\partial x (D_0 \cdot \Pi \cdot \partial C/\partial x) - K_1 \cdot C \cdot (N_0 - \Pi) - \alpha \cdot C + K_2 \cdot \Pi \cdot (1 - \mu \cdot C) \\ \frac{d\Pi}{dt} = K_1 \cdot C \cdot (N_0 - \Pi) - K_2 \cdot \Pi \cdot (1 - \mu \cdot C) \end{cases}, \quad (1)$$

где t – время; x – пространственная координата, соответствующая направлению роста ВТ; C – концентрация диффузанта; Π – концентрация микрополостей; N_0 – начальная концентрация реакционно-способных или слабых мест, на которых зарождаются МП; K_1 – коэффициент скорости процесса накопления МП; K_2 – коэффициент скорости релаксации (закрывания МП); α – коэффициент массоотдачи в окружающий полимер; μ – эмпирический коэффициент.

Здесь мы приняли, что коэффициент диффузии D пропорционален концентрации МП [4], то есть $D = D_0 \cdot \Pi$.

Согласно Ребиндеру, среда должна создавать в МП (у Ребиндера – в микротрещинах [5, 6]) некоторое «раздвигающее»¹ давление (P), которое должно препятствовать релаксации, а именно закрытию МП. По мере десорбции, то есть удаления диффузанта из МП, это давление должно убывать, увеличивая тем самым скорость релаксации. Этим обстоятельством и объясняется присутствие в уравнении (1) упомянутой поправки, а именно множителя $(1 - \mu \cdot C)$ в правой части системы, учитывающего описанное явление в линейном приближении.

«Раздвигающее» давление должно, очевидно, также увеличивать коэффициент K_1 . Предполагаемая связь между P и K_1 обсуждается ниже.

Алгоритм интегрирования уравнения (1) составлен нами так, что он позволяет вычислить временную зависимость длины ВТ (как координаты фронта диффузии/повреждаемости) и наибольшей концентра-

¹ Этот термин употреблен в [6]. Раздвигающее усилие не следует путать с расклинивающим давлением, как это иногда делается. Различие между этими двумя понятиями подчеркивалось самим П.А. Ребиндером [5]; представление о расклинивающем давлении введено Б.В. Дерягиным и М.М. Кусаковым применительно к иным процессам [7].

ции МП. Последняя величина пропорциональна оптической плотности ВТ, которая может быть измерена микроспектрофотометрическим методом.

Решение уравнения (1) для случая, когда эффектом обратимости можно пренебречь, подробно рассмотрено в [2]; там же приведено его сравнение с экспериментом.

На рис. 1а, б представлены результаты расчета по уравнению (1), показывающие усиление факторов десорбции и релаксации с ростом температуры. Как можно видеть из приведенных графиков, эти результаты находятся в удовлетворительном соответствии с опытными данными. Последние были получены следующим образом. Образцы изоляционной системы на основе пероксидно-сшитого полиэтилена в виде так называемых «чашек Роговского»² испытывались нами при напряженности электрического поля, равной 8 кВ/мм, и температурах 20 ± 5 °С и 90 ± 5 °С. Образцы снимались с испытаний по истечении 500, 1000, 2500, 4000, 7000, 10 000, 14 000 и 19 000 ч; после чего в «чашках Роговского» измерялись длины ВТ – «вееров», растущих от электропроводящего экрана, и «бантов», зародившихся на дефектах в толще изоляции.

Здесь стоит обратить внимание уважаемых читателей на то, что для моделирования развития как «бантов», так и «вееров» использована одна и та же модель. Ранее мы писали о различии в динамике роста двух этих видов ВТ [10], связанном с тем, что дефекты в виде полостей или инородных включений, на которых растут «банты», могут являться «резервуарами ограниченной емкости» для агрессивных водорастворимых примесей, что может приводить к стабилизации длин этих триингов со временем. Однако опыт обследования кабелей после длительных испытаний (до 2 лет) или после более или менее продолжительного периода эксплуатации (12–15 лет) показал, что «банты» могут быть столь же большими, как и «веера», а динамика их роста – качественно одинаковой, что позволяет, по крайней мере в ряде случаев, применять для описания эволюции обеих разновидностей ВТ одну и ту же модель. Как видно из рис. 1а, б, соответствие между результатами моделирования и эксперимента примерно одинаковое для обоих типов триингов.

Вторая из предлагаемых моделей рассматривает «крайний» случай, когда кабель, электрическая изоляция (ЭИ) которого содержит ранее выросшие ВТ, находится в сухой среде; при этом триинги не только не растут, но, напротив, высыхают, что приводит к восстановлению электрической прочности (см. п. 4 таблицы, приведенной в первой части статьи).

² Rogowski cups – их конструкция была предложена норвежскими специалистами и описана в [8]; такие экспериментальные объекты были рекомендованы исследовательским комитетом 21 СИГРЭ «Кабели высокого напряжения» для сравнительных испытаний электроизоляционных систем на стойкость к ВТ [9].

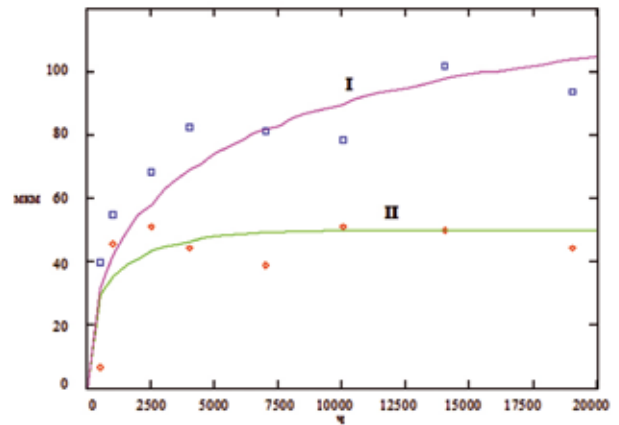


Рис. 1а. Зависимость длины водных триингов типа «веер» (мкм) от времени испытания (ч). Верхняя кривая (I) соответствует образцам, испытанным при 20 °С, нижняя (II) – при 90 °С. Сплошные линии – расчет по уравнению (1), точки – опытные значения

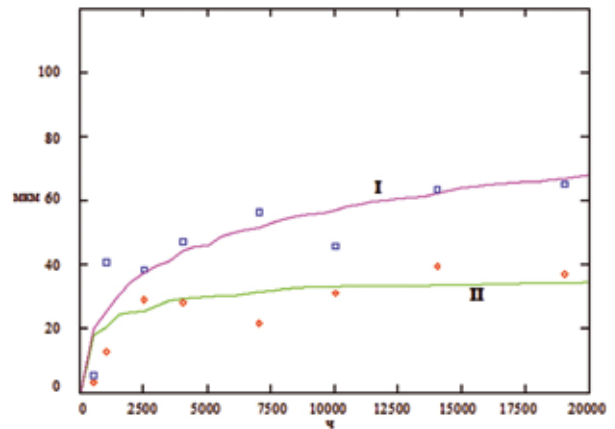


Рис. 1б. Зависимость длины водных триингов типа «бант» (мкм) от времени испытания (ч). Верхняя кривая (I) соответствует образцам, испытанным при 20 °С, нижняя (II) – при 90 °С. Сплошные линии – расчет по уравнению (1), точки – опытные значения

Интерес к данной задаче обусловлен неизбежными перерывами, которые имеют место между изъятием образцов кабелей из эксплуатации или снятием их с длительных испытаний на ускоренное влажное старение и испытаниями этих образцов с целью определения их электрической прочности.

В рамках этой модели мы рассмотрим те же процессы восстановления, что и выше, то есть диффузию влаги из ВТ (причем на этот раз учтем ее более подробно), и релаксацию, закрытие МП. Соответствующая система уравнений выглядит следующим образом:

$$\begin{cases} \frac{\partial C}{\partial t} = D \cdot \frac{\partial^2 C}{\partial y^2} + K_2 \cdot \Pi \cdot (1 - \mu \cdot C) \\ \frac{d\Pi}{dt} = -K_2 \cdot \Pi \cdot (1 - \mu \cdot C) \end{cases}, \quad (2)$$

где y – пространственная координата, отсчитываемая в направлении, перпендикулярном направлению роста ВТ.

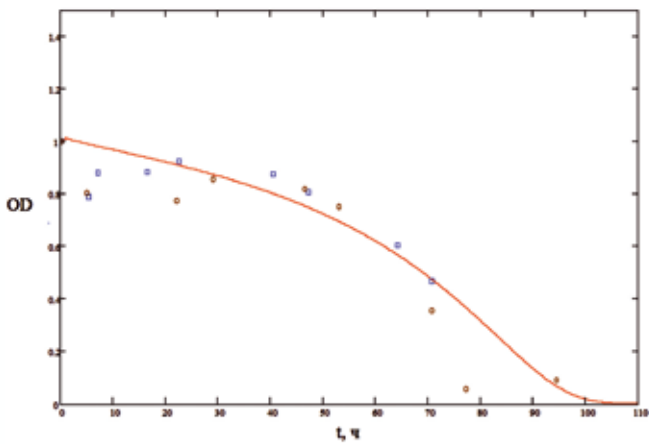


Рис. 2. Сопоставление экспериментально полученных данных (точки) с расчетной зависимостью нормированной оптической плотности высыхающего водного триинга типа «бант» от времени высыхания (сплошная линия). Расчет выполнен по уравнению (2). Синие и коричневые точки соответствуют двум независимым опытам

Отметим, что поскольку диффузия осуществляется в основном вне ВТ, зависимостью D от Π в данном случае можно пренебречь, положив $D = const$.

На рис. 2 показано сопоставление данных прямого эксперимента по осушению ВТ с данными расчета по уравнению (2). В качестве объекта для опыта был использован срез изоляции толщиной (в направлении просвечивания) 3 мм, содержащий ВТ; высыхание происходило при комнатной температуре (21 ± 1 °С). При этом средствами микроспектрофотометрии измерялась оптическая плотность ВТ, то есть в различные моменты времени снимались спектры поглощения (фактически – светорассеяния) в видимой и ближней ультрафиолетовой области.

Соответствие между результатами расчета и эксперимента также можно оценить как удовлетворительное.

Отдельные стадии высыхания ВТ продемонстрированы на фото рис. 3³.

Моделирование роста ВТ в соответствии с уравнением (1) может быть использовано, например, для прогноза ресурса кабеля, эксплуатируемого во влажной среде при сравнительно высоких температурах.

Что же касается исследования высыхания триингов, то его результаты указывают, в частности, на то, что предусмотренные в [11] допустимые нормы пребывания образцов кабеля без контакта с водой (3 суток) в промежутках между длительными испытаниями и испытаниями по определению электрической прочности являются неоправданно

³ Фотомикрографии рис. 3 выполнены для срезов, имеющих толщину 250 мкм. Более тонкие срезы позволяют добиться более высококонтрастных изображений ВТ, но скорость высыхания триингов, содержащихся в этих срезах, значительно выше, чем для срезов толщиной 3 мм, использованных в эксперименте, результаты которого представлены на рис. 2. Соответственно характерные значения времени высыхания для обоих случаев сильно отличаются.

«либеральными» и их следует ужесточить, то есть снизить. Необходимо отметить, что эти промежутки в условиях испытаний, проводимых во ВНИИКП, не превышают 1,5 ч, а время пребывания образца без напряжения (то есть интервал между окончанием

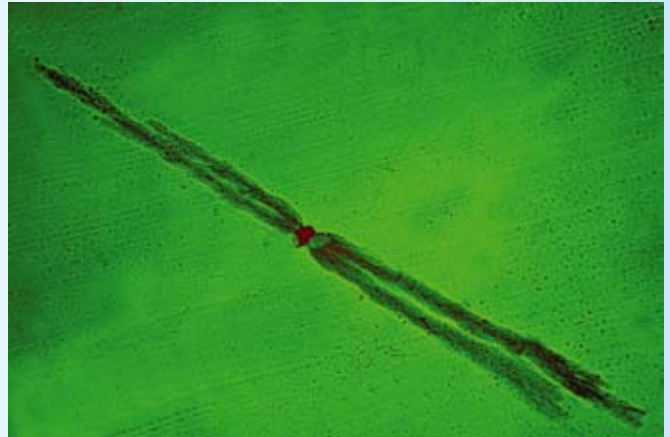


Рис. 3а. Фотография «высыхающего» водного триинга, полученная с использованием узкополосного зеленого светофильтра (максимум полосы пропускания фильтра находится при длине волны $\lambda = 546$ нм). Исходное состояние

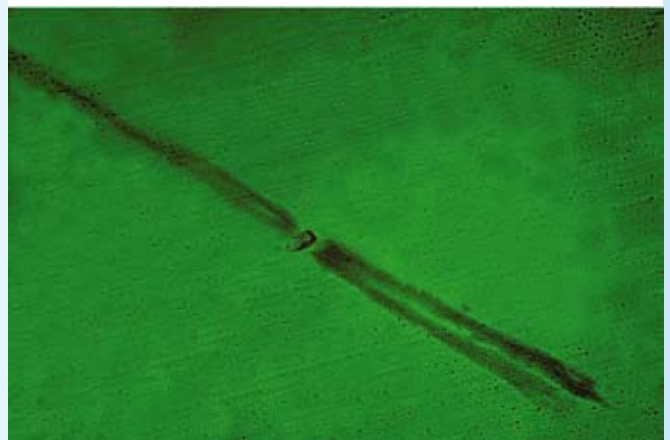


Рис. 3б. То же, что и на рис. 3а, по прошествии 2 ч с начала эксперимента

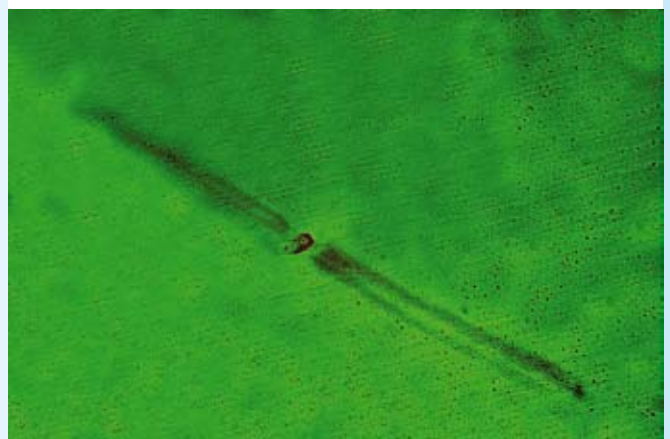


Рис. 3в. То же, что и на рис. 3а, б, по прошествии 5 ч с начала эксперимента

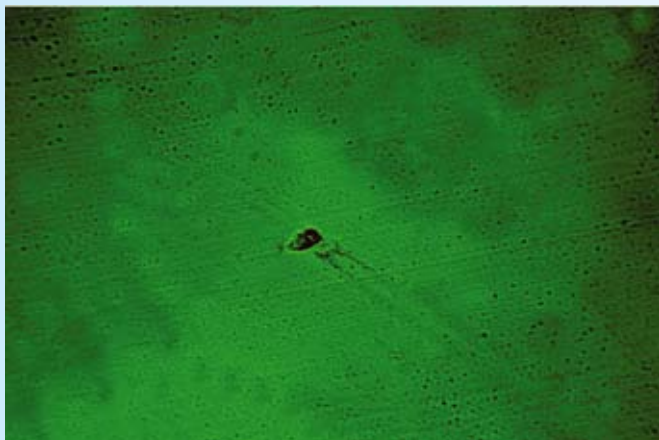


Рис. 3г. Последняя из зафиксированных стадия «высыхания» водного трипинга, показанного на рис. 3а–3в. Продолжительность эксперимента – 24 ч

соответствующего этапа длительных испытаний и приложением напряжения в условиях испытаний на пробой) – 24 ч.

ЭР представляет собой сложный комплекс явлений, и при его математическом моделировании возникают значительные трудности. Вот некоторые из них.

I. Ключевая идея ЭР – уменьшение работы образования новых поверхностей. Согласно [12, 13] это эквивалентно уменьшению эффективной энергии активации (U_0). В принципе можно представить два варианта проявления этого феномена.

A. U_0 снижается (по сравнению со случаем «сухого» старения) до некоторой фиксированной величины, что, в свою очередь, соответствует некоторому постоянному значению константы скорости реакции (в данном случае – K_1 в уравнении (1)).

B. По мере того как идет процесс, «раздвигающее» давление, создаваемое адсорбированными молекулами на стенки полостей ([5], с. 173, [6, 13]), возрастает и U_0 продолжает снижаться, то есть создается положительная обратная связь, процесс ускоряется. Это можно объяснить, например, так: развитие ВТ сопровождается молекулярным разрушением, окислением полимера; концентрация продуктов деградации материала (карбонильных групп, сопряженных двойных связей и т.д.) на стенках МП возрастает, они становятся еще более гидрофильными; концентрация и давление сорбированных молекул также возрастают.

Проблема, однако, в том, что экспериментально мы не можем (пока, по крайней мере) отделить эффекты возрастания гидрофильности, увеличения степени окисления и т.д., связанные с ростом числа МП, от тех, что обусловлены изменениями состояния самих МП. Поэтому случай **B** остается привлекательной рабочей гипотезой, но проще и практичнее моделировать случай **A**.

II. Так как ВТ состоят из МП и предположительно субмикроскопических каналов, их соединяющих [14], то поверхностная диффузия играет, очевидно, значительную роль в развитии ВТ (см. п. 12 таблицы, при-

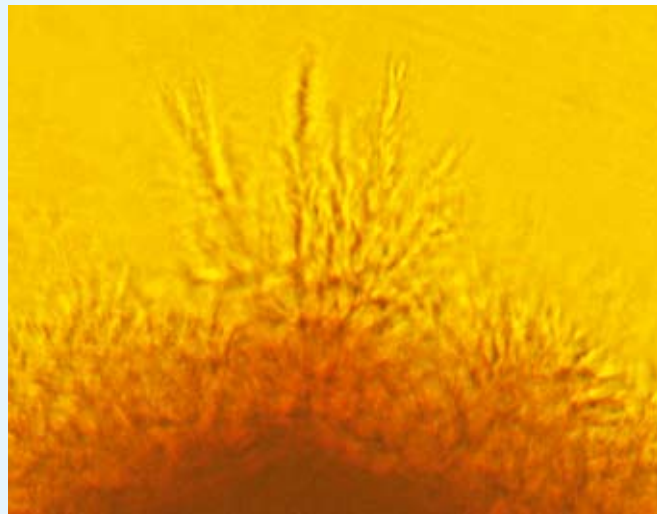


Рис. 4. «Лидирующие» периферические области выращенного в лабораторных условиях водного трипинга, имеющие форму, близкую к клиновидной

веденной в первой части статьи). Мы в своих моделях, однако, не делаем различия между поверхностной и объемной диффузией, которая также должна иметь место: перенос воды и растворенных в ней примесей в не поврежденные еще микрообласти полимера, очевидно, предшествуют образованию МП и каналов.

В завершение статьи мы бы хотели снова вернуться к тому, чему, собственно, была посвящена ее первая часть, – к качественному сопоставлению роста ВТ и ЭР. Как неоднократно отмечалось П.А. Ребиндером, важным условием для проявления эффекта адсорбционного понижения прочности является клиновидный характер сечения трещин, развивающихся в твердых телах при их механическом разрушении [5, 6, 16, 17]. С точки зрения целей, стоящих перед данной статьей, интересно сопоставить строение трещин «по Ребиндеру» и ВТ.

Наблюдения показывают, что ВТ, выросшие в процессе модельных испытаний (выполненных по методу «водяных игл», то есть в резко неоднородном поле), характеризуются «лидирующими» периферическими полостями, имеющими форму, действительно напоминающую клиновидную (рис. 4). Эта структурная особенность ВТ, выращенных в лаборатории, имеет место часто, но не всегда, что и неудивительно – слишком сложным и специфичным в физико-химическом отношении является процесс электрохимического старения полимерной изоляции.

Что же касается ВТ, развившихся в условиях промышленной эксплуатации (рис. 5), то форма полостей, их составляющих, даже при максимальных, иммерсионных увеличениях выглядит как сферическая или эллипсоидная. Эти полости имеют размеры порядка 1 мкм, соизмеримые с разрешением светового микроскопа, поэтому дифракционные ограничения могут препятствовать правильному отображению их реальной геометрии.

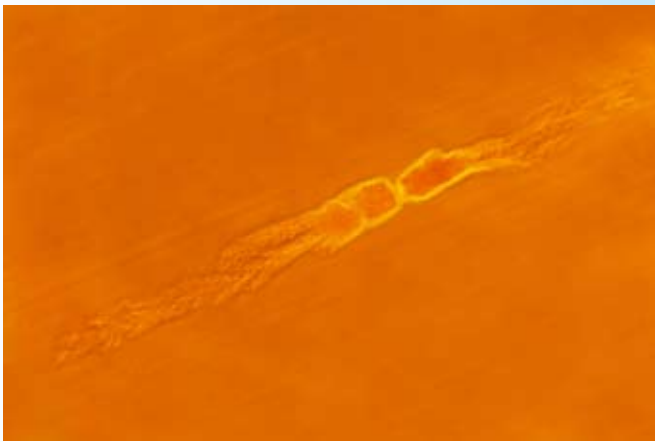


Рис. 5а. Фотография водного триинга типа «бант», полученная с использованием фазового контраста. Объектив 15 × 0,50, ширина кадра 600 мкм



Рис. 5б. Периферическая часть водного триинга, представленного на рис. 5а, сфотографированная при большем увеличении и разрешении. Фазовый контраст, объектив 100 × 1,30 масляно-иммерсионный, ширина кадра 90 мкм. Мелкие светлые пятна соответствуют микрополостям, находящимся в фокусе

Аналогичные трудности создает также многократное наложение микрополостей друг на друга в изображении триинга (то есть полости, находящиеся в разных оптических срезах, при формировании изображения с разной «степенью нерезкости» проектируются в одну плоскость).

Необходимо отметить, что соответствующие наблюдения были сделаны нами для заполненных водой интактных триингов с использованием метода фазового контраста; фотографии делались со срезов толщиной 40 мкм. Применение же окрашивания и последующего микроскопирования окрашенных, но осушенных ВТ хотя и обеспечивает высокий контраст, но для данной задачи неприемлемо, поскольку неизбежно искажает тонкую структуру ВТ. Это заставляет нас скептически относиться к некоторым работам, посвященным исследованию морфологии ВТ, в том числе к [18, 19].

Подчеркнем также, что микроскопическое обследование ВТ практически всегда выполняется по прошествии значительного промежутка времени после

отключения напряжения. За этот временной интервал морфология ВТ могла измениться за счет частичной релаксации, которая возможна даже в условиях хранения образцов в воде.

Мы не планируем, несмотря на перечисленные препятствия, оставить попытки анализа структуры ВТ, пока нам не удастся подтвердить или опровергнуть предположение о морфологическом сходстве водных триингов и «трещин Ребиндера».

В первой части этой статьи мы уже отмечали некоторые различия, неизбежно существующие между ЭР и ВТ. Однако, обобщая все сказанное, мы можем признать: сходство между этими явлениями все же велико. Это стимулирует дальнейшие исследования электрохимической деградации экструдируемой изоляции силовых кабелей, основанные на данной плодотворной аналогии.

ЛИТЕРАТУРА



1. Шувалов М.Ю., Образцов Ю.В., Овсиенко В.Л., Удовичкий П.Ю., Мнека А.С. Развитие водных триингов в экструдируемой кабельной изоляции как электрический эффект Ребиндера // Кабели и провода. 2006. № 4 (299). С. 14.
2. Шувалов М.Ю. Исследование кабелей высокого напряжения, разработка усовершенствованных методов электрического расчета и микродиагностики: Докт. дисс. М.: ОАО «ВНИИКП», 2000. 342 с.
3. Беляев Н.Н., Рядно А.А. Методы теории теплопроводности. В 2 ч. М.: Высшая школа, 1982.
4. Глазков С.О. Физика пористых структур. М.: Наука, 1997. 175 с.
5. П.А. Ребиндер. Избранные труды. Поверхностные явления в дисперсных системах. М.: Наука, 1979.
6. Лихтман В.И., Шукин Е.Д., Ребиндер П.А. Физико-химическая механика металлов. М.: Изд. АН СССР, 1962. 303 с.
7. Дерягин Б.В., Кусаков М.М. // Известия АН СССР. Сер. Химическая. 1936. № 5. С. 741; 1937. № 5. С. 1119.
8. Faremo H., Ildstad E. The EFI Test Method for Accelerated Growth of Water Trees. 1990 IEEE International Symposium on Electrical Insulation. Toronto, Canada, June 3–6, 1990. Conference Record. P. 191–194.
9. Banks V.A.A., Dhuicq B., Faremo H., Steennis E.F. An Accelerated Ageing Test for Water Treeing in Cables. A recommendation of CIGRE WG 21–11. CIGRE. 1990. 17 p.
10. Шувалов М.Ю., Маврин М.А. Теоретическое и экспериментальное исследование водных триингов типа «бант» // Кабели и провода. 2002. № 1 (272). С. 42–44.
11. Harmonized standard CENELEC HD 605 S1: 1994/A3: 2002 «Electric cables – Additional test methods».
12. Цой Б., Карташов Э.М., Шевелев В.В. Прочность и разрушение полимерных пленок и волокон. М.: Химия, 1999. 496 с.
13. Бартнев Г.М., Разумовская И.В. Временная зависимость прочности хрупких тел в поверхностно-активных средах // ДАН СССР, 1963. Т. 150. № 4. С. 784–787.
14. Ross R., Smith J. Composition and Growth of Water Trees in XLPE. IEEE Transactions, Vol. IE-27. № 3. 1992. P. 519–531.
15. Шукин Д.Е., Сумм Б.Д. Роль процессов распространения адсорбционно-активной среды по поверхности твердых тел в проявлении адсорбционного понижения прочности // Сб. Поверхностная диффузия и растекание / Под ред. проф. Я.Е. Гергузина. М.: Наука, 1969. С. 161–187.
16. Reh binder P. New Physico-Chemical Phenomena in the Deformation and Mechanical Treatment of Solids «Nature». 1947, June 28. Vol. 159. P. 866–867.
17. Горюнов Ю.В., Сумм Б.Д., Шукин Е.Д., Ребиндер П.А. О роли кинетических факторов в процессе адсорбционного понижения прочности металлов // ДАН СССР. 1963. Т. 153. № 3. С. 634–637.
18. Moreau E., Mayoux C., Laurent C., Boudet A. The Structural Characteristics of Water Trees in Power Cables and Laboratory Specimens. IEEE Transactions. Vol. EI-28. 1993. № 1. P. 54–64.
19. King J.A., Grundmeyer M., Stepp D., Hugo D. Water Tree Morphology. IEEE Transactions, Vol. EI-28, № 3, p. 415–419.