

## КОМПЬЮТЕРНЫЙ АНАЛИЗ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ПОЛЯ И СИЛ В ПОЛИЭТИЛЕНОВОЙ ИЗОЛЯЦИИ СИЛОВОГО КАБЕЛЯ ПРИ НАЛИЧИИ ДЕФЕКТА

*Проведено математичне моделювання і вивчено розподіл неоднорідного електричного поля та електричних сил у поліетиленовій ізоляції силових кабелів із включенням у вигляді еліпсоїда. Показано значне збільшення електричного поля і концентрації діелектрофоретичної сили на полюсах включення, що є одним з механізмів руйнування діелектрика.*

В мировой практике в энергосистемах все чаще используются силовые кабели с изоляцией из сшитого полиэтилена. Такая изоляция обладает отличными электрическими и механическими свойствами, большим запасом термической стойкости, обеспечивает высокую надежность и более длительный срок службы по сравнению с другими серийно выпускаемыми кабелями. Несмотря на все преимущества [3], уязвимым местом сшитого полиэтилена является чувствительность к разнообразным дефектам в структуре материала, в том числе на микроуровне [6, 9, 11]. Наличие в изоляции таких микроразмерных объемных неоднородностей, как загрязнения, расслоения, трещины, полости-поры, заполненные водой или газом, повышает в локальных областях вокруг себя напряженность электрического поля, снижает пробивное напряжение, вызывает образование водных и электрических триингов [19]. Развитие триингов приводит к электрохимическому старению изоляции и лежит в основе механизма деградации изоляции силовых кабелей не только среднего, но и высокого напряжения. В частности, на инородных включениях, в местах расположения микропустот-полостей в полимере под действием электрического поля и воды зарождаются водные триинги типа "бант" (рис. 1 *a* внизу), которые впоследствии могут перерасти в электрические триинги [6, 19].

Одним из важных факторов, определяющих формирование и рост водных триингов, является диэлектрофорез в неоднородном переменном электрическом поле [12, 16–18]. В силу механизма диэлектрофореза полярные молекулы воды в полиэтиленовой изоляции притягиваются к структурным дефектам, неоднородностям материала, создавая локальную зону с повышенной влажностью. Неоднородности в полиэтилене, притягивающие молекулы воды, являются гидрофильными. Напряженность электрического поля в объеме таких неоднородностей меньше, чем в полиэтиленовой изоляции. В то же время в их окрестности существуют

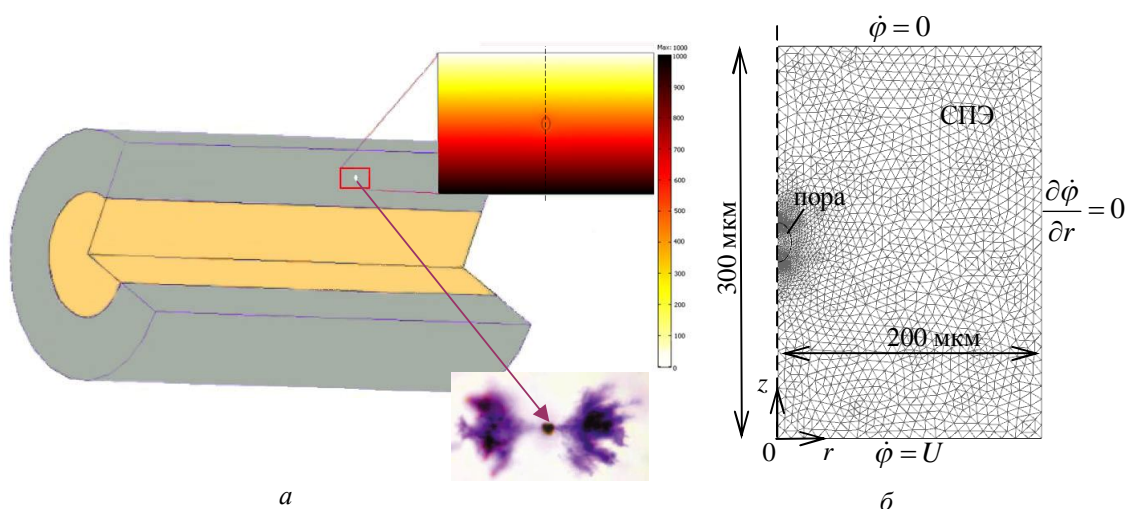


Рис. 1

области с высокими значениями поля.

В общем случае водные триинги, зарождаемые в местах микронеоднородностей, могут рассматриваться как совокупность микропор со средним размером 10...20 мкм. Как отмечается в работе [14], объем таких пор заполняется жидкостью, в которой содержатся вода, соли (NaCl и др.) и HCl.

Распространение триингов происходит под действием электрического поля и в присутствии воды в полиэтилене. Скорость роста водных триингов определяется также характеристиками дефектов в полиэтилене, в том числе формой дефектов, их электрическими параметрами, величиной локального усиления поля в зоне неоднородностей [9, 18].

Для исследования триингов в диэлектрике важным является знание их электрических характеристик. В работе [13] путем измерений найдена диэлектрическая проницаемость водных триингов. Установлено, что в зависимости от длины триинга среднее значение проницаемости изменяется в интервале 4...6. При этом относительная проницаемость качественного полиэтилена составляет  $\varepsilon = 2, 3$ .

В работе [10] полагалось, что среда внутри триинга является проводящей, а в [8] считалось, что область триинга – диэлектрическая среда. Экспериментальные исследования, проведенные в работе [15], показали, что электропроводность триинга в сшитом полиэтилене изменяется в пределах от  $3 \cdot 10^{-3}$  до  $2 \cdot 10^{-2}$  См/м (на основании этих данных в расчетах настоящей работы для триинга задавалось  $\sigma = 5 \cdot 10^{-2}$  См/м). Согласно данным работы [7] сшитый полиэтилен имеет электропроводность  $\sigma = 1 \cdot 10^{-15}$  См/м.

В работе [5] проведено математическое моделирование и изучено неоднородное электрическое поле в полиэтиленовой изоляции силового кабеля с триингом в виде проводящего стержня с воздушным включением. Показано значительное локальное увеличение поля на острие триинга.

Настоящая работа посвящена исследованию методом компьютерного моделирования электрического поля и силового воздействия со стороны поля на полиэтилен с микропорой в своей структуре. Предполагается, что триинг зарождается на эллипсоидном включении различного размера, находящемся в малом объеме диэлектрика – сшитом полиэтилене (СПЭ), см. рис. 1 а. С позиций изучения силы, действующей на молекулы воды в объеме диэлектрика, может быть объяснен механизм образования и роста водных триингов в местах его повреждений.

**Постановка задачи и ее решение.** Физической моделью для исследования процессов формирования триинга служит фрагмент изоляции силового кабеля из сшитого полиэтилена, который находится в переменном магнитном поле  $\dot{\mathbf{E}}_0 e^{j\omega t}$ , изменяющемся гармонически с угловой частотой  $\omega$ . Он содержит малый объем диэлектрика – сшитого полиэтилена со встроенным включением (см. рис. 1). В качестве геометрической модели включения-триинга выбран эллипсоид.

Основные положения и предположения задачи следующие.

Полагается, что материал изоляции является изотропным, хотя на самом деле сшитый полиэтилен имеет полукристаллическую структуру. Элементы модели (диэлектрик с включением) составляют композиционную дисперсную систему. Сторонние заряды в диэлектрике отсутствуют.

Триинг рассмотрен как слабо проводящая среда, способная исказить электрическое поле в изоляции. Расчеты проведены для квазистатического случая с учетом того факта, что электрическое поле слабо изменяется во времени (частота  $f = 50$  Гц). Расчетная модель представлена как осесимметричная, для двумерного случая, в цилиндрической системе координат  $r\theta z$  (рис. 1 б).

При таких условиях комплексное электрическое поле  $\dot{\mathbf{E}}$  в композиционной структуре описывается системой уравнений:

$$\nabla \times \dot{\mathbf{E}} = 0 \text{ или } \dot{\mathbf{E}} = -\nabla \dot{\phi}; \quad (1)$$

$$\mathbf{J} = \sigma \dot{\mathbf{E}} + j\omega \varepsilon_0 \dot{\mathbf{E}}; \quad (2)$$

$$\nabla \cdot \dot{\mathbf{J}} = 0, \quad (3)$$

где  $\dot{\phi}$  – комплексное значение электрического потенциала (напряжения);  $\sigma$  – электропроводность среды при постоянном токе;  $\dot{\epsilon}$  – комплексная диэлектрическая проницаемость материала (относительное значение);  $\epsilon_0 = 8,85 \cdot 10^{-12}$  Ф/м – диэлектрическая проницаемость вакуума;  $\dot{\mathbf{J}}$  – плотность полного тока, включающего токи проводимости и ток смещения;  $\omega$  – угловая частота;  $j$  – мнимая единица.

Зависящие от координат электропроводность  $\sigma$  и комплексная относительная диэлектрическая проницаемость  $\dot{\epsilon}$  задаются следующими выражениями:

$$\sigma = \begin{cases} \sigma_m & \text{во включении,} \\ \sigma_{cnz} & \text{в изоляции} \end{cases}; \quad \dot{\epsilon} = \begin{cases} \dot{\epsilon}_m & \text{во включении,} \\ \dot{\epsilon}_{cnz} & \text{в изоляции} \end{cases}.$$

Из уравнений (1)...(3) следует, что электрический потенциал  $\dot{\phi}$  удовлетворяет уравнению непрерывности полного тока:

$$\nabla \cdot [(\sigma \nabla \dot{\phi} + j\omega \epsilon_0 \dot{\epsilon} \nabla \dot{\phi})] = 0. \quad (4)$$

Соотношение между потенциалом и электрическим полем

$$\dot{\mathbf{E}} = -\nabla \dot{\phi}. \quad (5)$$

При решении полевой задачи использовались граничные условия в направлении поля  $\dot{\phi} = 0$  и  $\dot{\phi} = U$ , на других границах задавались осевая симметрия и условие Неймана:  $\partial \dot{\phi} / \partial n = 0$  (рис. 1 б). На границе раздела двух сред принято условие непрерывности:  $\mathbf{n} \cdot (\dot{\mathbf{J}}_1 - \dot{\mathbf{J}}_2) = 0$ ,  $\mathbf{n}$  – единичный вектор внешней нормали.

По найденным из (4)...(5) составляющим комплексного электрического поля определяется нормированная величина напряженности электрического поля:

$$\|\dot{\mathbf{E}}\| = \sqrt{\dot{\mathbf{E}} \cdot \dot{\mathbf{E}}}. \quad (6)$$

В диэлектрической среде при отсутствии сторонних зарядов действует объемная сила, величина которой находится на основании выражения [2]

$$\mathbf{F}_e = \frac{\epsilon_0}{2} \nabla (\epsilon - 1) \mathbf{E}^2. \quad (7)$$

В полиэтиленовой изоляции силовых кабелей, как правило, имеется определенное количество влаги, что содействует образованию и росту триингов в изоляции.

На отдельную молекулу воды в полиэтилене, обладающую электрическим дипольным моментом  $\mathbf{p}$  и находящуюся во внешнем неоднородном электрическом поле  $\mathbf{E}(t)$  (постоянном или изменяющемся во времени), действует электрическая сила, определяемая выражением [4]

$$\mathbf{F}_w = (\mathbf{p} \cdot \nabla) \mathbf{E}. \quad (8)$$

Будем полагать, что молекула всегда направлена по полю  $\mathbf{E}$ . Тогда выражение для дипольного момента молекулы запишется как

$$\mathbf{p} = p \frac{\mathbf{E}}{|\mathbf{E}|}, \quad (9)$$

где дипольный момент для молекулы воды  $p = 6,2 \cdot 10^{-30}$  Кл·м. После подстановки выражения (9) в (8) получим

$$\mathbf{F}_w = \frac{p}{|\mathbf{E}|} (\mathbf{E} \cdot \nabla) \mathbf{E}. \quad (10)$$

Проведем преобразование выражения (10) для случая  $\nabla \times \mathbf{E} = 0$ , используя математическое тождество из [1]:  $\nabla (\mathbf{E} \cdot \mathbf{E}) = 2\mathbf{E} \times (\nabla \times \mathbf{E}) + 2(\mathbf{E} \cdot \nabla) \mathbf{E} = 2(\mathbf{E} \cdot \nabla) \mathbf{E}$ . Тогда выражение (10) примет вид:

$$\mathbf{F}_w = p \nabla |\mathbf{E}|. \quad (11)$$

Из выражения (11) видно, что векторное силовое поле  $\mathbf{F}_w$  является потенциальным и амплитуда силы  $\mathbf{F}_w$  пропорциональна величине градиента модуля напряженности электрического поля, т.е. зависит от степени неоднородности поля в диэлектрике.

**Результаты компьютерных расчетов.** Размеры расчетной области указаны на рис. 1 б. На нижней границе области задавалось условие  $U = 1000$  В, что соответствует среднему значению электрического поля  $E_0 = 3,3$  кВ/мм. Задаваемые электрофизические характеристики материалов приведены в таблице.

Среда	$\sigma$ , См/м	$\epsilon$
СПЭ	$1 \cdot 10^{-15}$	2,3
Водная среда во включении	$5 \cdot 10^{-2}$	5

Моделирование проводилось методом конечных элементов в программном пакете Comsol 3.3 [19]. Элементное разбиение области показано на рис. 1 б. Заметно сгущение сетки вокруг включения, где зарождается триинг (в дальнейшем оно называется порой).

Распределение электрического потенциала в малом объеме изоляции кабеля с включением представлено на рис. 1 а и 2. На рис. 2 изменение потенциала в расчетной области показано в оттенках серого цвета и контурными линиями. На вставке слева вверху дано изменение потенциала вдоль оси  $Oz$  на отрезке  $AB$ . Изолинии потенциала с вектором электрического поля, отображенным стрелками в окрестности поры в полиэтилене, показаны на нижней вставке к рис. 2. Видно, что электрический потенциал во внутренней области поры постоянен. Это объясняется тем, что значение напряженности электрического поля  $\|\mathbf{E}\|$  в этой области незначительно. Это показано на рис. 3 а, где распределение поля  $\|\mathbf{E}\|$  представлено в оттенках серого цвета и в виде контурных линий. На рис. 3 б показано изменение величины напряженности электрического поля  $\|\mathbf{E}\|$  вдоль дуги  $l$  на различном расстоянии от поры (пояснение  $l$  и выбора дуг см. на вставке справа). Видно, что изменение величины  $\|\mathbf{E}\|$  по дуге  $l$  все более резкое по мере приближе-

ния к поверхности поры.

Данные рис. 2 и 3 показывают искажение потенциала и поля в зоне расположения поры. Величина напряженности электрического поля незначительна в области поры. Максимальные значения поля имеют место на полюсах по высоте поры.

Согласно формуле (7) электрическая сила  $\mathbf{F}_e$  пропорциональна величине  $E^2$ . Распределения значений  $E^2$  (в оттенках цвета) и век-

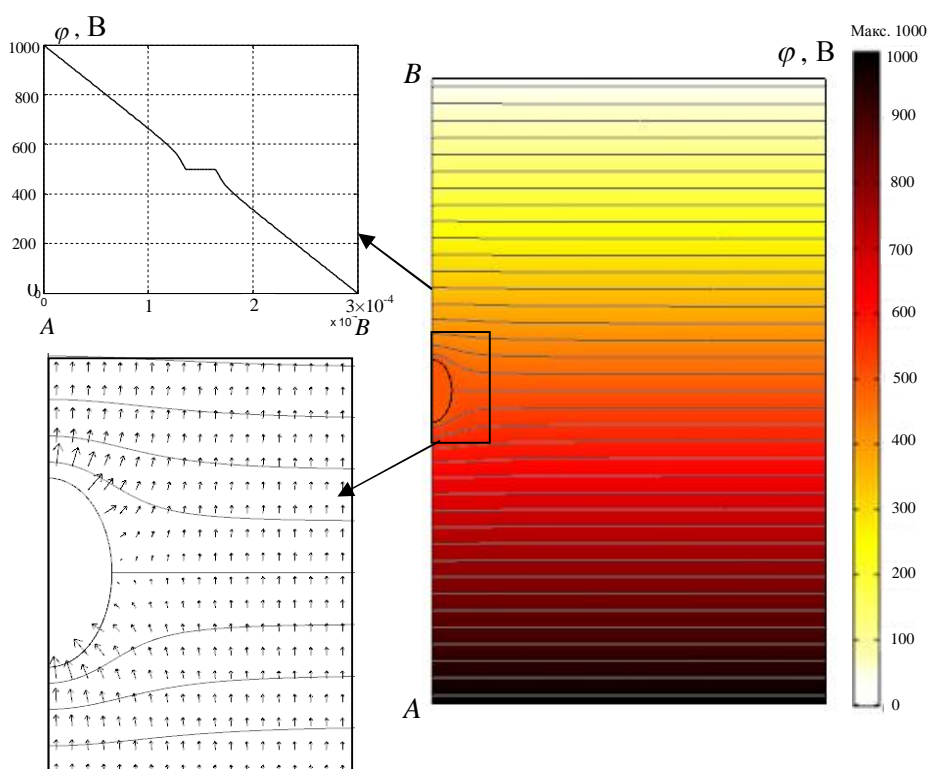


Рис. 2

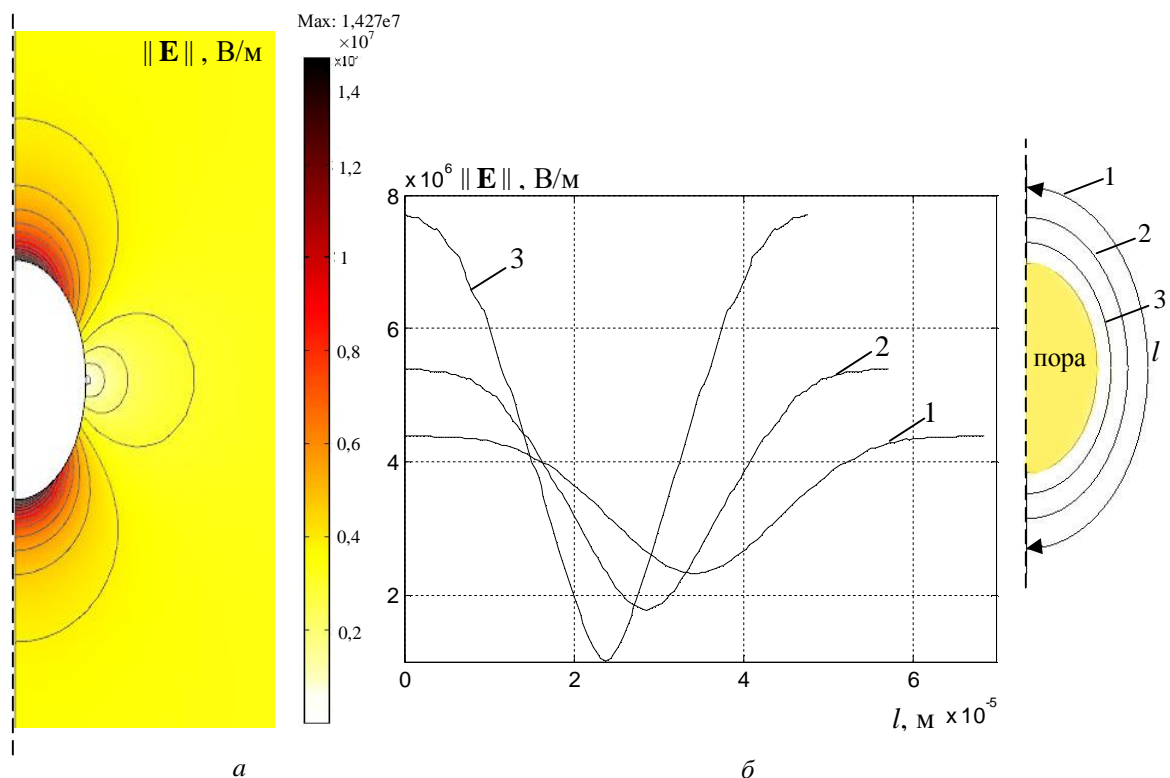


Рис. 3

торного силового поля  $F_e$  (в виде пропорциональных стрелок) в окрестности полости в полиэтилене показаны на рис. 4. Как видно, имеет место большая деформация поля  $E^2$  вокруг эллипсоидальной поры.

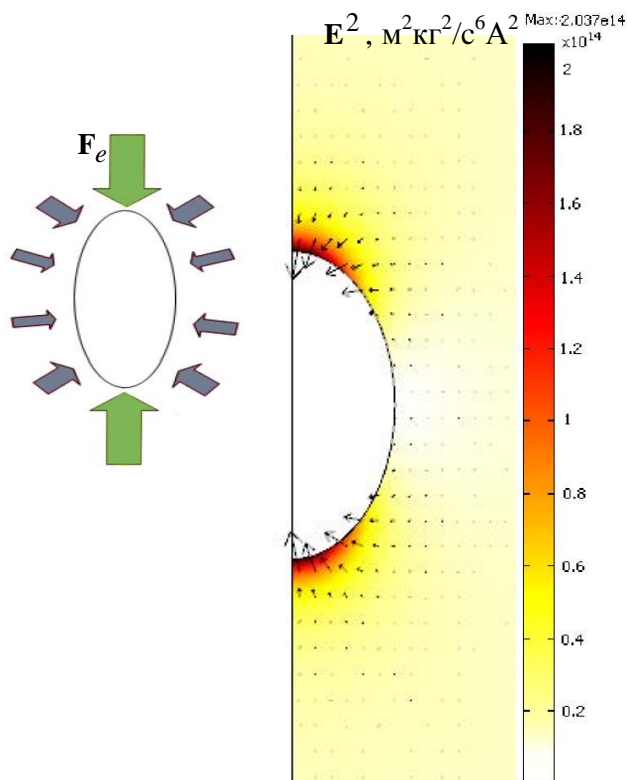


Рис. 4

В стороне слева рис. 4 схематически представлен характер действия на пору силы  $F_e$ , выражающийся в сжимающем эффекте. Величина этой силы наибольшая на полюсах поры. Внутри поры электрическая сила незначительна, т.к. потенциал здесь постоянен (см. верхнюю вставку рис. 2).

Характер изменения значения силы  $|F_e|_{\max}$  в зависимости от размера поры  $h/a$  ( $h = \text{var}$ ;  $a = \text{const}$ ) показан на рис. 5. Видно, что при удлинении поры на нее действует бóльшая по величине сила, сконцентрированная на вершинах поры.

Действие электрической силы  $F_e$  связано с накоплением упругой энергии, которая при определенных условиях преобразовывается в работу разрыва молекулярных связей и может приводить к локальной деформации и разрушению полимерных материалов. Направленное сжимающее действие этой силы на пору в изоляции (рис. 4) показывает возможность растрескивания поверхности поры и дальнейшего увеличения ее объема.

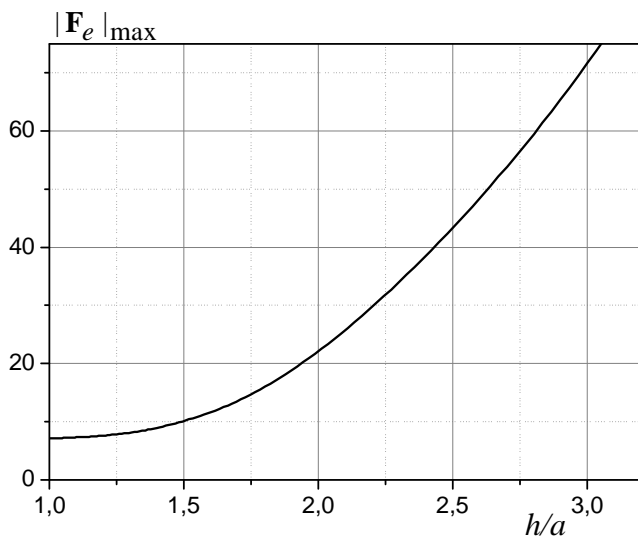
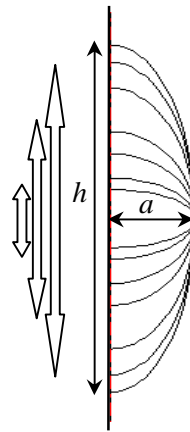


Рис. 5



На рис. 6 представлены распределения значений электрической силы  $|\mathbf{F}_w|$ , действующей на молекулы воды в полиэтилене, и вектора силы  $\mathbf{F}_w$  (в виде стрелок) в окрестности полости в полиэтилене. В стороне слева схематически показан характер действия силы  $\mathbf{F}_w$  на молекулы воды.

Из рис. 6 видно, что более высокие значения вектора силы  $\mathbf{F}_w$  имеют место на вершинах поры.

Вследствие направленного действия диэлектрофоретической силы  $\mathbf{F}_w$  обеспечивается механизм, при котором молекулы воды в полиэтилене притягиваются к неоднородностям в материале, мигрируют и проникают в поры. Тем самым они создают вокруг повреждений в диэлектрике все более распространяющиеся зоны с повышенной влажностью.

Таким образом, микронеоднородности типа пор и пустот в изоляции силовых кабелей заметно искажают электрическое поле в локальных областях, прилегающих к ним. Наибольшее изменение поля происходит в непосредственной близости от дефектов (рис. 3). Диэлектрофоретическая сила, действующая на молекулы воды, стремится притянуть их в зону дефектов (рис. 6). Это в свою очередь вызывает повышение влажности в локальной области, способствует распространению триинговых структур и,

как следствие, приводит к ускоренному старению полиэтиленовой изоляции силового кабеля.

*Проведено математическое моделирование и изучено распределение неоднородного электрического поля и электрических сил в полиэтиленовой изоляции силовых кабелей с включением в виде эллипсоида. Показано значительное увеличение электрического поля и концентрации диэлектрофоретической силы на полюсах включения, что является одним из механизмов разрушения диэлектрика.*

*The mathematical modeling and computer analysis of inhomogeneous electric field and electric forces in the polyethylene insulation of power cables with ellipsoidal inclusion are carried out. The considerable increase of electric field and concentration of dielectrophoretic force at the poles of the inclusion is shown. This is one of the mechanisms providing destruction of dielectric.*

1. Борисенко А.И., Тарапов И.Е. Векторный анализ и начала тензорного исчисления. – М.: Высш. шк., 1966. – 252 с.

2. Ландау Л.Д., Лившиц Е.М. Электродинамика сплошных сред. – М.: Наука, 1982. – 621 с.
3. 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; Т. 4. – М.: Папирус-Про, 2005. – 640 с.
4. Парселл Э. Электричество и магнетизм. – М.: Наука. 1983. – Т. 2. – 416 с.
5. Шидловский А.К., Щерба А.А., Подольцев А.Д., Кучерявая И.Н., Золотарев В.М., Карпушенко В.П., Антоненко Ю.А., Василец Л.Г. Математическая модель и методика численного расчета неоднородного электрического поля и нагрева полиэтиленовой изоляции высоковольтных силовых кабелей при возникновении дендритных микроканалов // Техн. электродинамика. – Темат. вип. «Силовая електроніка та енергоефективність». – Ч. 4 – 2006. – С. 116–120.
6. Шувалов М.Ю., Образцов Ю.В., Овсиенко В.Л., Удовичкий П.Ю., Мнека А.С. Развитие водных триингов в экструдированной кабельной изоляции как электрический эффект Ребиндера. Ч. 1 // Кабели и провода. – 2006. – № 4 (299). – С. 14–19.
7. Acedo M., Filippini J.C., Notingher P.V. et al. Water treeing in underground power cables: modeling of the trees and calculation of the electric field perturbation // Journal of Electrostatics. – 2001. – Vol. 53. – P. 267–294.
8. Chen J.L., Filippini J.C. The morphology and behavior of the water tree // IEEE Trans. Electr. Insul. – 1993. – Vol. 28. No. 2. – P. 271–286.
9. Dissado L.A., Wolfe S.V., Fothergill J.C. A study of the factors influencing water tree growth // IEEE Trans. Electr. Insul. – 1983. – Vol. 18. – P. 565–576.
10. Filippini J.C., Notingher P.V., Ciuprina F., Teissedre G. Crosslinking influence on water tree resistance in polyethylene // IEEE Conference on Electr. Insul. Dielectr. Phenomena (CEIDP). – 2001 Annual Report. – P. 245–248.
11. Filippini J.C., Poggi Y., Raharimalala V. Water treeing as mechanical damage // IEEE Trans. Electr. Insul. – 1990. – Vol. 25 (6). – P. 1056–1065.
12. Hughes M.P. Numerical simulation of dielectrophoretic ratchet structures // Journal of Physics D: Applied Physics. – 2004. – Vol. 37. – P. 1275–1280.
13. Koo J.Y., Meyer C.T., Filippini J.C. et al. Electrical behavior and structure of water trees in relation to their propagation // IEEE Conference on Electr. Insul. Dielectr. Phenomena (CEIDP). – 1983 Annual Report. – P. 301–305.
14. Meyer C.T. Water absorption during water treeing // IEEE Trans. Electr. Insul. – 1983. – Vol. 18, No. 1. – P. 28–31.
15. Ozaki T., Ito N., Kawai J. et al. Relative permittivity and conductivity of water-treed region in XLPE estimated by an equivalent circuit // Electrical Engineering in Japan. – 2004. – Vol. 148. No. 3. – P. 7–14.
16. Patsch R. The role of dielectrophoresis in the water treeing process // 1995 Annual Report. Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena. – 22–25 Oct. 1995. – P. 73–76. [http://ieeexplore.ieee.org/xpl/freeabs\\_all.jsp?arnumber=483579](http://ieeexplore.ieee.org/xpl/freeabs_all.jsp?arnumber=483579)
17. Patsch R., Paximadakis A., Romero P. The role of dielectrophoresis in the water treeing phenomenon // Proceedings of IEEE international symposium on electrical insulation. – Toronto, 1990. – P. 160–164.
18. Steenis E.F., Kreuger F.H. Water treeing in polyethylene cables // IEEE Trans. Electr. Insul. – 1990. – Vol. 25, No. 5. – P. 989–1028.
19. Comsol Multiphysics 3.3 – <http://www.comsol.com>

Надійшла 19.02.2010