

УДК 621.315.2 :004.94

**МУЛЬТИФИЗИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ В ОБЛАСТИ ВКЛЮЧЕНИЯ  
В ПОЛИЭТИЛЕНОВОЙ ИЗОЛЯЦИИ СИЛОВОГО КАБЕЛЯ  
(ТРЕХМЕРНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ И ЭКСПЕРИМЕНТ)**

**Подольцев А.Д.**, докт.техн.наук, **Кучерявая И.Н.**, докт.техн.наук  
Институт электродинамики НАН Украины,  
пр. Победы, 56, Киев-57, 03680, Украина. E-mail: [podol@ied.org.ua](mailto:podol@ied.org.ua)

*Исследованы трехмерные распределения электрического поля, электрических сил, температуры и электромеханических напряжений в микрорайонах полиэтиленовой изоляции с включениями в виде упрощенных триинговых структур. Определены количественные зависимости этих характеристик от формы включений. Компьютерное моделирование выполнено методом конечных элементов. Результаты моделирования подтверждены экспериментально. Получил объяснение один из механизмов разрушения изоляции на микроуровне, связанный с действием электрической силы, всесторонне сжимающей включения, и с локализацией электромеханических напряжений на полюсах включений и вершинах каналов триингов. Результаты представляют практический интерес в связи с внедрением в последнее время в энергосистемы Украины кабелей со сшито-полиэтиленовой изоляцией на напряжение до 330 кВ. Библ. 14, рис. 6, табл. 1.*

**Ключевые слова:** мультифизические процессы, сшито-полиэтиленовая изоляция, триинговые структуры, электромеханические напряжения, трехмерное компьютерное моделирование.

В последнее время современные полимерные материалы, в том числе сшитый полиэтилен, широко используются для изготовления электрической изоляции силовых кабелей, которые постепенно вытесняют устаревающие кабельные системы с бумажной и масляной изоляцией [3]. В мире установилась тенденция использования кабелей со сшито-полиэтиленовой изоляцией как на высокое, так и на сверхвысокое напряжения (до 500 кВ). Их практическое использование и многочисленные исследования механизмов старения изоляции показывают, что чем выше класс напряжения кабелей, тем большее влияние на качество изоляции оказывают различного рода дефекты на микроуровне, среди которых развивающиеся со временем триинговые структуры [7].

Основные механизмы разрушения полиэтиленовой изоляции и снижения электрической прочности кабелей показаны на рис. 1 [7, 12]. Они представляют собой совокупность факторов и процессов различной физической природы – это и электрические явления, и электромеханические изменения, и тепловые процессы. К основным условиям развития триингов в полиэтиленовой изоляции относятся воздействие электрического поля, наличие воды и технологических дефектов, особенности морфологии (физической структуры изоляции), уровень механических напряжений и временной фактор [4, 7, 9, 13]. Например, только внутренние механические напряжения технологического происхождения способны снижать электрическую прочность кабеля на 20–25% [4]. Развитие триингов происходит в виде распространения микротрещин на границах дефектов в изоляции и на концах триингов, что экспериментально обнаружено в работе [9].

Электромеханическая нестабильность полимерных материалов в условиях высоких значений электрического поля и температуры (что возможно, например, в аварийных режимах работы кабелей) детально исследована в [10]. Выявлено, что возникновение критических значений электрического поля в материале зависит от его прочностных свойств и, в частности, от модуля Юнга. В свою очередь, прочностные свойства полиэтиленовой изоляции зависят от температуры и времени воздействия

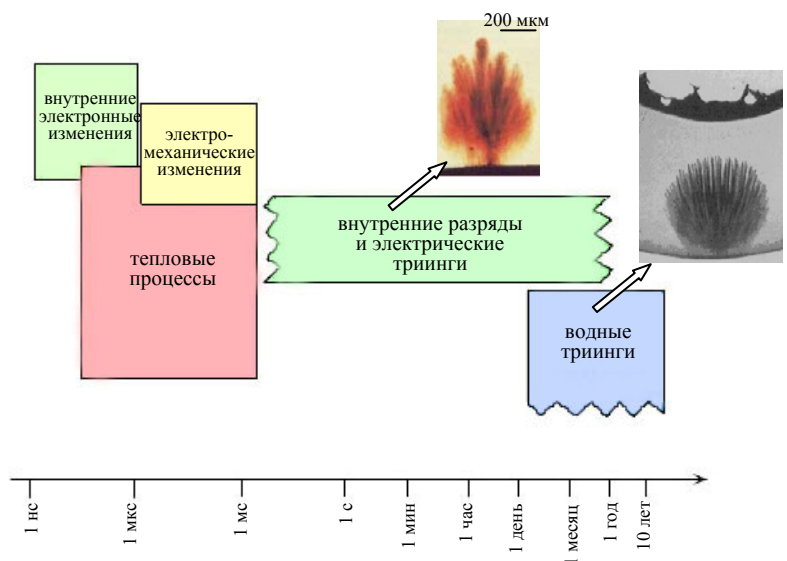


Рис. 1

© Подольцев А.Д., Кучерявая И.Н., 2015

механических нагрузок. В статье [8] экспериментально исследовано влияние механических деформаций сшитого полиэтилена на процессы разрушения материала и электрического пробоя в нем. В [14] экспериментальным путем показано совместное влияние частоты приложенного напряжения и внутренних механических напряжений на рост и структуру трингов (включая толщину каналов трингов) в сшитом-полиэтиленовом материале.

Не только экспериментальные работы, но и приведенные ниже расчетно-теоретические исследования показывают связь между процессами различной физической природы (электрическими, тепловыми и механическими процессами), протекающими в области неоднородностей в изоляции и способствующими ее деградации.

Работа [11] посвящена двумерному компьютерному моделированию и экспериментальному исследованию электромеханических напряжений в области простого включения сферической формы. Показано, что механические напряжения могут достигать уровня мегаПаскаль (до 8–18 МПа) и достаточны, чтобы с течением времени привести к разрушению материала.

В [1] проведен компьютерный анализ механических напряжений, возникающих под действием объемной электрической силы в полиэтиленовой изоляции в окрестности микровключений различной формы. Путем двумерного моделирования выявлено, что с заострением вершины включения значения электрической силы и электромеханического напряжения изменяются на несколько порядков.

В данной работе описаны результаты трехмерного компьютерного моделирования и исследования связанных электрического, температурного полей и электромеханических напряжений в области модельных тринговых структур в сшитом полиэтилене с целью более полного понимания факторов, приводящих к деградации изоляционного материала. Для модельной тринговой структуры проведено экспериментальное исследование. Получено хорошее совпадение экспериментальных данных с результатами компьютерного моделирования.

**Полевые задачи и их решение.** Электротепловые процессы и электромеханические напряжения исследуются в малом объеме полиэтиленового материала с включениями различной формы, заполненными водой и содержащими тринговые каналы. Предполагается, что объем изоляции испытывает воздействие переменного электрического поля  $\dot{\mathbf{E}}_0 e^{j\omega t}$ , изменяющегося гармонически с угловой частотой  $\omega$ .

*Электрическая задача* (задача 1). Распределение электрического поля  $\dot{\mathbf{E}} = -\nabla\phi$  находится из уравнения для комплексного значения электрического потенциала  $\phi$

$$\nabla \cdot [(\sigma \nabla \phi + j\omega \varepsilon_0 \varepsilon_r \nabla \phi)] = 0, \quad (1)$$

где  $\sigma$  – электропроводность среды;  $\varepsilon_r$  – диэлектрическая проницаемость материала (относительное значение),  $\varepsilon_0 = 8,85 \cdot 10^{-12}$  Ф/м – диэлектрическая проницаемость вакуума;  $j$  – мнимая единица.

На границах трехмерной области, значительно удаленных от включения (на расстоянии не менее 4–5 его характерных размеров), задается условие электрической изоляции  $\mathbf{n} \cdot \dot{\mathbf{J}} = 0$  ( $\mathbf{n}$  – единичный вектор внешней нормали,  $\dot{\mathbf{J}}$  – плотность полного тока), а на границах, ориентированных вдоль поля,  $\phi = 0$  и  $\phi = U$ , где  $U$  – приложенное напряжение.

*Тепловая задача* (задача 2). Распределение температурного поля  $T$  определяется стационарным уравнением теплопроводности

$$-\nabla \cdot (\lambda \nabla T) = Q, \quad (2)$$

где  $\lambda$  – теплопроводность соответствующей среды,  $Q$  – мощность тепловых источников в единице объема, вычисляемая с учетом джоулева тепла и диэлектрических потерь в полиэтиленовой изоляции

как

$$Q = \begin{cases} \sigma |\dot{\mathbf{E}}|^2 & \text{– в водном включении,} \\ \text{tg}\delta \cdot \omega \varepsilon_0 \varepsilon_r |\dot{\mathbf{E}}|^2 & \text{– в изоляции,} \end{cases} \quad (3)$$

$\text{tg}\delta$  – тангенс угла диэлектрических потерь.

Уравнение (2) с учетом (3) дополняется граничными условиями: на внешних границах расчетной области задается значение температуры изоляции кабеля  $T = T_0$ .

*Задача структурной механики* (задача 3). Предположениями при постановке задачи являются учет действия силы со стороны электрического поля и отсутствие внешних силовых нагрузок и давления в материале.

Электромеханические напряжения в изоляции определяются путем решения уравнения механического равновесия

$$\nabla \sigma_M + \mathbf{F}_e = 0, \quad (4)$$

в котором  $\sigma_M$  – тензор механических напряжений;  $\mathbf{F}_e$  – объемная электрическая сила (средняя за период), действующая в диэлектрической среде в предположении отсутствия объемных зарядов и рассчитываемая по выражению [2]

$$\mathbf{F}_e = \frac{\varepsilon_0}{2} \nabla (\varepsilon - 1) |\dot{\mathbf{E}}|^2. \quad (5)$$

На всех внешних границах задается условие свободных поверхностей, полагая, что границы свободны от внешних силовых нагрузок.

*Связь между задачами и их решение.* Сформулированные на основе уравнений (1), (2), (4) три полевые задачи принадлежат различным физическим дисциплинам и связаны между собой (рис. 2, а). В этом смысле они

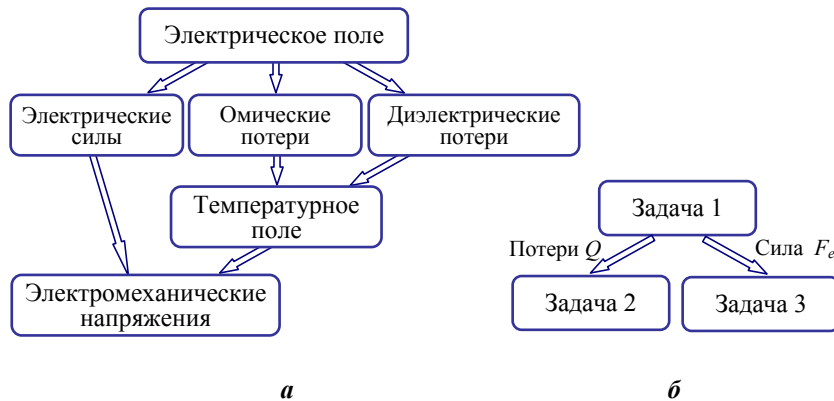


Рис. 2

являются мультифизическими и решаются путем передачи данных, как показано на рис. 2, б.

**Результаты компьютерного моделирования.** Исходные данные для расчетов даны в таблице.

Задачи решены методом конечных элементов в профессиональном пакете программ Comsol Multiphysics [6]. Расчеты проведены для водных включений трех вариантов: в виде сфероида и круглых включений с двумя и сближенными тремя ответвлениями согласно рис. 3 с целью сравнения картин распределения в их окрестности электрического поля, температуры и электромеханических напряжений.

На рис. 3 показано распределение относительного значения напряженности электрического поля  $E = |\mathbf{E}|/E_0$  ( $E_0 = U/h$ ,  $h$  – высота расчетной области вдоль поля) в центральном сечении области с водным включением различной формы. Видно, что максимальные значения поля локализованы на вершинах включений, ориентированных вдоль поля (рис. 3, а), и на вершинах триингов (рис. 3, б, в). При этом максимальное электрическое поле превышает значение среднего поля  $E_0$  почти до 32 раз в зависимости от заостренности вершин триингов.

Рис. 4 представляет распределение электрической силы  $\mathbf{F}_e$ , вычисленной по выражению (5), и температуры  $T$  для водных включений в виде сферы (рис. 4, а) и в виде упрощенного триинга с тремя ответвлениями (рис. 4, б, в). На рис. 4, б показан распределение векторной величины силы  $\mathbf{F}_e$  в виде стрелок в плоскости изображения (слева) и с продольным поворотом (справа) с тем, чтобы отобразить объемный характер силы и наличие боль-

Параметры	Значения
<i>Электрические характеристики</i>	
Среднее значение поля в изоляции, кВ/мм.	3
Частота, Гц	50
Электропроводность полиэтилена, См/м	$1 \cdot 10^{-15}$
Электропроводность среды триинга, См/м	$5 \cdot 10^{-2}$
Диэлектрическая проницаемость полиэтилена	2,3
Диэлектрическая проницаемость среды триинга	5
Гангенс угла диэлектрических потерь изоляции	$4 \cdot 10^{-3}$
<i>Тепловые характеристики</i>	
Теплопроводность полиэтилена, Вт/(м·К)	0,276
Теплопроводность водной среды триинга, Вт/(м·К)	0,6
<i>Механические характеристики полиэтилена</i>	
Модуль Юнга, МПа	700
Коэффициент Пуассона	0,46
Плотность материала, кг/м <sup>3</sup>	930
<i>Параметры расчетной модели</i>	
Относительная точность решения задач	$10^{-6}$

ших по величине составляющих силы, действующей у вершин триинга и в данном случае в направлении, перпендикулярном приложенному полю. В целом электрическая сила  $F_e$  оказывает всесторонне сжимающее действие на включение, что содействует растрескиванию его поверхности и увеличению его в объеме, особенно в зонах у вершин триинговых микроканалов. Превышение температуры невелико – не выше  $10^{-4} \text{C}$  (рис. 4, в).

Распределение эквивалентного механического напряжения в полиэтиленовой изоляции вблизи включений показано на рис. 5. Максимальные значения механического напряжения имеют место на полюсах сферического включения и на вершинах каналов триингов, что подтверждает выводы экспериментальных исследований [9, 11] относительно механической усталости и разрушения изоляции вблизи этих зон, объясняет механизм распространения водных триингов в условиях циклических сжимающих нагрузок. По порядку величины рассчитанные эквивалентные механические напряжения совпадают с напряжениями, определенными в работе [11].

**Эксперимент.** Для подтверждения достоверности численного расчета поля в окрестности триинга экспериментально измерялась величина электрической силы, которая зависит от электрического поля и действует в двухэлектродной системе с модельным триингом, при различных значениях приложенного напряжения. Схема экспериментальной установки показана на рис. 6, а. Установка состоит из двух кольцевых электродов 1 с древовидной проволочной структурой 2 и электронных весов 3.

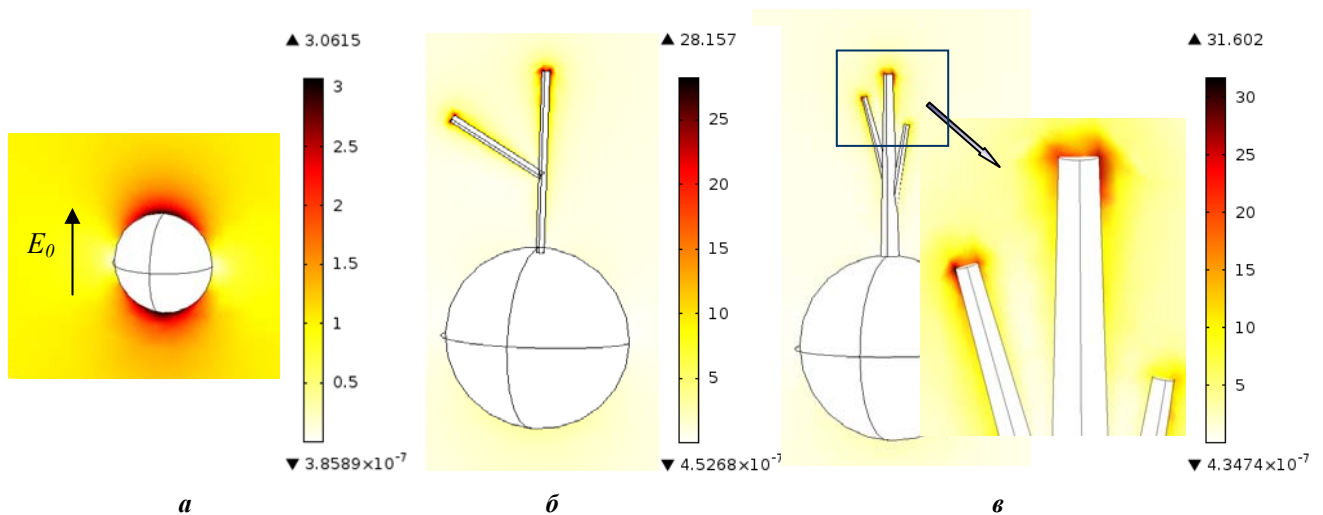


Рис. 3

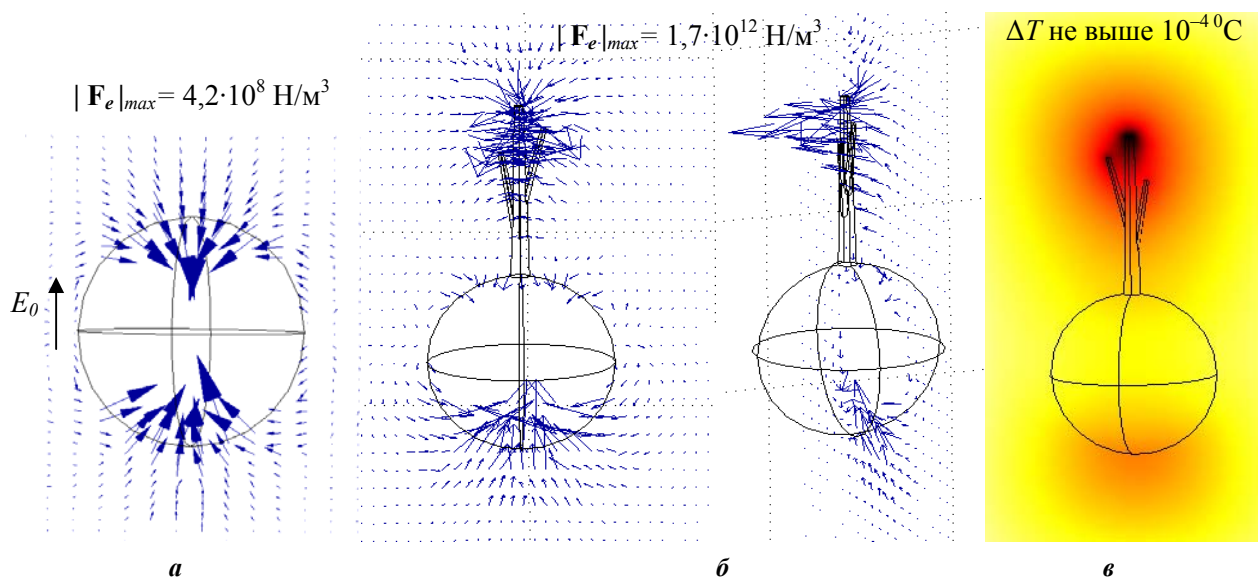


Рис. 4

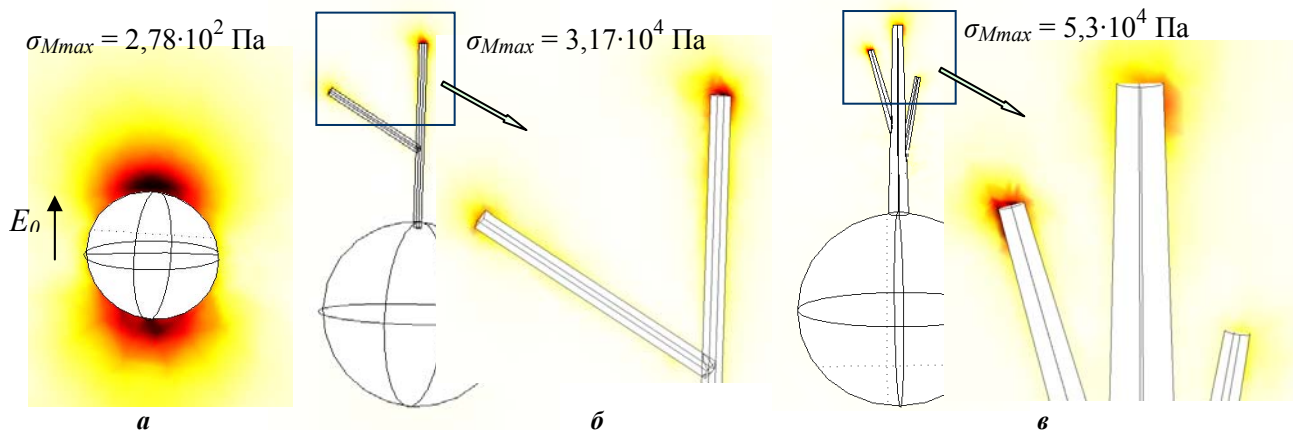


Рис. 5

Поскольку измерение электрического поля в окрестности триинга связано с трудностями из-за резко неоднородного распределения поля, выполнялось измерение электрической силы, действующей на нижнюю пластину с модельным триингом. Использовался подход, аналогичный описанному в патенте [5], с той лишь разницей, что в патенте измерялась магнитная сила, действующая на образец, а в данной работе – величина электрической силы.

Для измерения электрической силы использовались высокоточные электронные весы фирмы Kern&Sohn GmbH с дискретностью  $10^{-4}$  г. Выполнялось измерение веса  $P$  нижнего электрода с подставкой при отсутствии напряжения на электродах, затем определялся вес  $P - F_e$  при наличии напряжения. Здесь  $F_e$  – величина электрической силы, действующей на нижний электрод с триингом. Разность двух показаний дает искомую величину силы  $F_e$ .

Характеристики экспериментальной установки следующие. Диаметр металлических электродов дисковой формы – 88 мм, расстояние между электродами – 26 мм. Модельный триинг изготовлен из медной проволоки высотой 14 мм и диаметром 0,6 мм. Длина ответвления триинга составляет 8 мм, угол его наклона к главной ветви –  $60^\circ$ . Такая модель соответствует структуре включения на рис. 3, б, где приведено распределение напряженности электрического поля вблизи такого триинга. Видно, что максимальное значение напряженности электрического поля локализовано на вершинах триинга и превышает значение среднего поля в 28 раз.

Наряду с экспериментальным измерением электрической силы проводились численные расчеты силы, действующей на нижний электрод с триингом. Для этого решалась описанная выше трехмерная задача (1) в электростатическом приближении. Значения силы рассчитывались с помощью тензора натяжения Максвелла.

Сравнение результатов численных расчетов и экспериментально полученных значений силы  $F_e$  показано на рис. 6, б. Как видно, максимальное расхождение между ними составляет 11% при большом напряжении, причем, с ростом напряжения расхождение между полученными данными увеличивается. Это обусловлено возникновением коронного разряда на вершинах триинга, что не учитывалось в численном расчете электрического поля и приводит к дополнительной погрешности.

**Заключение.** Путем трехмерного компьютерного моделирования связанных электрических, тепловых процессов и электромеханических напряжений в области водных включений в форме прос-

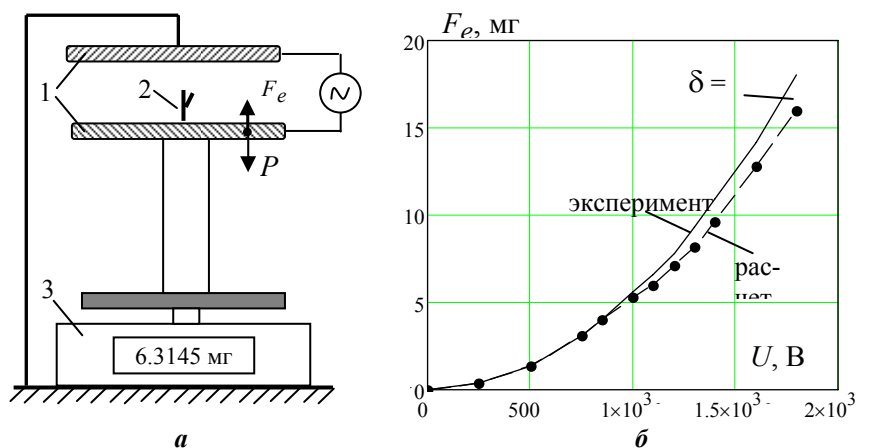


Рис. 6



тых триингов показана концентрация значений электрического поля, сил, температуры и электромеханических напряжений на концах каналов триингов с характерным размером до 0,6–0,9 мкм. При этом электрическая сила, действующая в этой зоне, на четыре порядка превышает среднюю силу, действующую в окрестности основной части триинга. Совместное воздействие сжимающей включение силы и циклических механических нагрузок объясняет один из механизмов распространения водных триингов в объеме полиэтиленовой изоляции, которое содействует ее ускоренному старению.

Достоверность результатов компьютерных расчетов подтверждена путем их сопоставления с результатами экспериментально измеренной электрической силы, действующей в двухэлектродной системе с модельным триингом. Максимальное расхождение численных и экспериментальных данных составило 11% в области приложенного напряжения 1,8 кВ.

Исследования позволили расширить понимание и получить качественные и количественные характеристики электрофизических процессов, связанных с формированием и ростом триинговых структур в неоднородной полиэтиленовой изоляции. Практическое значение результатов обуславливается широким внедрением высоковольтных кабелей со сшитой-полиэтиленовой изоляцией, необходимостью обеспечения ее высокого качества и надежности.

1. Кучерявая И.Н. Компьютерный анализ электромеханических напряжений в полиэтиленовой изоляции силового кабеля при наличии микровключений // Техн. електродинаміка. – 2012. – № 5. – С. 10–16.
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. – Т. 3. – М.: Папирус-Про, 2004. – 688 с.
4. Мецанов Г.И., Шувалов М.Ю., Каменский М.К., Образцов Ю.В., Овсиенко В.Л. Кабели на напряжение 10–500 кВ: состояние и перспективы развития (анализ, прогноз, исследования) // Кабели и провода. – 2008. – № 5 (312). – С. 32–38.
5. Кириленко О.В., Подольцев О.Д., Кондратенко І.П., Кучерява І.М., Чехун В.Ф., Бондар В.В., Лук'янова Н.Ю., Тодор І.М. Спосіб вимірювання магнітної сприйнятливості магнітних рідин та пристрій для його реалізації. Патент UA 72030 Україна, МПК H01F 7/02, 2012.
6. Comsol multiphysics modeling and simulation software – Available at: <http://www.comsol.com/>
7. Dissado L.A., Wolfe S.V., Fothergill J.C. A study of the factors influencing water tree growth // IEEE Trans. on Electrical Insulation. – 1983. – Vol. 18. – Pp. 565–576.
8. Martin C.P., Vaughan A.S., Sutton S.J. The thermomechanical behaviour of crosslinked polyethylene cable insulation material // 2003 Annual Report IEEE Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena. – USA, Albuquerque, 19–22 Oct 2003. – Pp. 88–91.
9. Pruitt L., Hermann R., Suresh S. Fatigue crack growth in polymers subjected to fully compressive cyclic loads // Journal of Materials Science. – 1992. – Vol. 27. – No 6. – Pp. 1608–1616.
10. Wang Q., Niu X., Pei Q., Dickey M.D., Zhao X. Electromechanical instabilities of thermoplastics: Theory and *in situ* observation // Applied Physics Letters. – 2012. – Vol. 101. – Is. 14. – Pp. 141911–141911-4.
11. Wang Z., Marcolongo P., Lemberg J.A., Panganiban B., Evans J.W., Ritchie R.O., Wright P.K. Mechanical fatigue as a mechanism of water tree propagation in TR-XLPE // IEEE Trans. on Dielectrics and Electrical Insulation. – 2012. – Vol. 19. – No. 1. – Pp. 321–329.
12. Werelius 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. – No 1. – Pp. 27–42.
13. Yoshimura N., Noto F., Kikuchi K. Growth of water trees in polyethylene and silicone rubber by water electrodes // IEEE Trans. on Electric Insulation. – 1977. – Vol. 12. – Pp. 411–416.
14. Zheng X., Chen G., Davies A.E., Sutton S.J. The influence of survival mechanical stress and voltage frequency on electrical tree in XLPE // 2002 Annual Report IEEE Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena. – Mexico, 20–24 Oct. 2002. – Pp. 955–958.

УДК 621.315.2 :004.94

## **МУЛЬТИФІЗИЧНІ ПРОЦЕСИ В ОБЛАСТІ ВКЛЮЧЕННЯ У ПОЛІЕТИЛЕНОВІЙ ІЗОЛЯЦІЇ СИЛОВОГО КАБЕЛЯ (ТРИВИМІРНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ТА ЕСПЕРИМЕНТ)**

**Подольцев О.Д.**, докт.техн.наук, **Кучерява І.М.**, докт.техн.наук

**Інститут електродинаміки НАН України,**

**пр. Перемоги, 56, Київ-57, 03680, Україна. E-mail: [podol@ied.org.ua](mailto:podol@ied.org.ua)**

*Досліджено тривимірні розподіли електричного поля, електричних сил, температури та електромеханічних напруг у мікрооб'ємі поліетиленової ізоляції із включеннями у вигляді спрощених триінгових структур. Визначено кількісні залежності цих характеристик від форми включень. Комп'ютерне моделювання виконано мето-*

дом кінцевих елементів. Результати моделювання підтверджено експериментально. Отримав пояснення один з механізмів руйнування ізоляції на мікрорівні, пов'язаний з дією електричної сили, що всебічно стискає включення, та з локалізацією електромеханічних напружень на полюсах включень і вершинах каналів трійнів. Результати становлять практичний інтерес у зв'язку із впровадженням останнім часом в енергосистеми України кабелів зі зшито-поліетиленовою ізоляцією на напругу до 330 кВ. Бібл. 14, рис. 6, табл. 1.

**Ключові слова:** мультифізичні процеси, зшити-поліетиленова ізоляція, трійнові структури, електромеханічні напруження, тривимірне комп'ютерне моделювання.

## MULTIPHYSICS PROCESSES IN THE REGION OF INCLUSION IN POLYETHYLENE INSULATION OF POWER CABLE (THREE-DIMENSIONAL MODELING AND EXPERIMENT)

**Podoltsev O.D., Kucheriava I.M.**

**Institute of Electrodynamics, National Academy of Sciences of Ukraine**

**pr. Peremohy, 56, Kyiv-57, 03680, Ukraine.**

**E-mail: [podol@ied.org.ua](mailto:podol@ied.org.ua)**

*The three-dimensional distributions of electric field, electric forces, temperature and electromechanical stresses in microvolume of polyethylene insulation with the inclusions in the form of simplified water trees are studied. The quantitative dependences of these characteristics on the shape of the inclusions are found. The computer simulation is carried out by finite-element method. The computational results are verified by experiments. One of the destructive mechanisms at the microlevel, associated with the action of the electric force, which compresses the inclusion from all directions, and with the localization of electromechanical stress at the poles of the inclusions and at the peaks of treeing microchannels, is explained. The results are of practical importance in view of application, in recent years in the power system of Ukraine, of cross-linked polyethylene insulated cables for voltage up to 330 kV. References 14, figures 6, table 1.*

**Key words:** multiphysics processes, cross-linked polyethylene insulation, treeing structure, electromechanical stress, three-dimensional computer modeling.

1. Kucheriava I.N. Computer analysis of electromechanical stress in polyethylene insulation of power cable at available micro-inclusion // *Tekhnichna Elektrodynamika*. – 2012. – № 5. – Pp. 10–16. (Rus)
2. Landau L.D., Livshits E.M. *Electrodynamics of continuous media*. – Moskva: Nauka, 1982. – 621 p. (Rus)
3. Makarov E.F. *Handbook on electric networks of 0,4–35 kV and 110–1150 kV*. Vol. 3. – Moskva: Papirus-Pro, 2004. – 688 p. (Rus)
4. Meshchanov G.I., Shuvalov M.Yu., Kamenskii M.K., Obratsov Yu.V., Ovsienko V.L. Cables for voltage of 10–500 kV: state and prospects for development (analysis, forecast, investigation) // *Kabeli i provoda*. – 2008. – № 5 (312). – Pp. 32–38. (Rus)
5. Kyrylenko O.V., Podoltsev O.D., Kondratenko I.P., Kucheriava I.M., Chekhun V.F., Bondar V.V., Lukiyanova N.Yu., Todor I.M. Method for measurement of magnetic permeability of ferrofluids and device for its realization. Patent UA 72030 Ukraine, MPK H01 F 7/02, 2012. (Ukr)
6. *Comsol multiphysics modeling and simulation software*. – Available at: <http://www.comsol.com/>
7. Dissado L.A., Wolfe S.V., Fothergill J.C. A study of the factors influencing water tree growth // *IEEE Trans. on Electrical Insulation*. – 1983. – Vol. 18. – Pp. 565–576.
8. Martin C.P., Vaughan A.S., Sutton S.J. The thermomechanical behaviour of crosslinked polyethylene cable insulation material // 2003 Annual Report IEEE Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena. – USA, Albuquerque, 19–22 Oct 2003. – Pp. 88–91.
9. Pruitt L., Hermann R., Suresh S. Fatigue crack growth in polymers subjected to fully compressive cyclic loads // *Journal of Materials Science*. – 1992. – Vol. 27. – No. 6. – Pp. 1608–1616.
10. Wang Q., Niu X., Pei Q., Dickey M.D., Zhao X. Electromechanical instabilities of thermoplastics: Theory and *in situ* observation // *Applied Physics Letters*. – 2012. – Vol. 101. – Is. 14. – Pp. 141911–141911-4.
11. Wang Z., Marcolongo P., Lemberg J.A., Panganiban B., Evans J.W., Ritchie R.O., Wright P.K. Mechanical fatigue as a mechanism of water tree propagation in TR-XLPE // *IEEE Trans. on Dielectrics and Electrical Insulation*. – 2012. – Vol. 19. – No. 1. – Pp. 321–329.
12. Werelius 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. – No 1. – Pp. 27–42.
13. Yoshimura N., Noto F., Kikuchi K. Growth of water trees in polyethylene and silicone rubber by water electrodes // *IEEE Trans. on Electric Insulation*. – 1977. – Vol. 12. – Pp. 411–416.
14. Zheng X., Chen G., Davies A.E., Sutton S.J. The influence of survival mechanical stress and voltage frequency on electrical tree in XLPE // 2002 Annual Report IEEE Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena. – Mexico, 20–24 Oct. 2002. – Pp. 955–958.

Надійшла 05.09.2014