

ЧИСЛЕННОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО И ТЕМПЕРАТУРНОГО ПОЛЯ В ПОЛИЭТИЛЕНОВОЙ ИЗОЛЯЦИИ СИЛОВОГО КАБЕЛЯ С МИКРОВКЛЮЧЕНИЕМ

Методом комп'ютерного моделювання отримано та досліджено розподіл неоднорідного електричного і температурного полів у поліетиленовій ізоляції силових кабелів, що містить газове мікрОВКЛЮЧЕННЯ. Показано, що напруженість поля в локальній області вища у випадку включення циліндричної форми у порівнянні зі сферичним включенням. Нагрів у зоні включень залежить від їх розмірів, однак не може впливати на зміну властивостей ізоляційного матеріалу.

В настоящее время в мировой практике создания систем передачи и распределения электроэнергии широко применяются силовые кабели с изоляцией из сшитого полиэтилена как в классе среднего, так высокого и сверхвысокого напряжения. Наряду с многочисленными преимуществами, полиэтиленовая изоляция имеет существенный недостаток – подверженность деградации, которая проявляется тем больше, чем менее чистым и менее однородным является материал. По многим причинам в полиэтиленовой изоляции кабелей неизбежны технологические и эксплуатационные дефекты на микроуровне [1, 2, 5, 9]. К таким дефектам относятся микроразмерные воздушные полости, посторонние включения, трещины и др. Они возникают в твердой кабельной изоляции в процессе ее изготовления или прокладки и функционирования кабелей вследствие, например, периодических сжатий и расширений материала в режимах нагрузки. Микропустоты в структуре полиэтиленового материала заполняются газом из-за проникновения водяного пара и наличия летучих продуктов в производственных процессах сшивки и экструзии изоляции. Кроме того, в процессе эксплуатации кабелей во влажных условиях (например, при прокладке кабелей во влажном грунте) возможно проникновение влаги в объем изоляции. Под действием влаги и электрического поля в полимере зарождаются водные триинги, которые могут перерасти в электрические триинги [9].

Первоначальные размеры включений в сшитой-полиэтиленовой изоляции варьируются от 1 до 20 мкм и в дальнейшем могут увеличиваться за счет образования исходящих от них каналов-микротрещин. В работе [12] отмечается, что в сшитом полиэтилене концентрация включений размером от 1 до 5 мкм составляет 10^6 1/мм³, а по данным статьи [6] в объеме 1 мм³ насчитывается $10^3 \dots 10^7$ пустот в том же диапазоне размеров.

В изоляции в местах расположения дефектов имеет место повышение напряженности электрического поля выше электрической прочности материала, необратимо развиваются триинговые структуры, происходят ионизационные процессы, появляются частичные разряды [4, 7, 10]. Периодически повторяющиеся частичные разряды разрушают изоляцию путем образования в ней микротрещин, что приводит в итоге к ее пробое. Степень деградации сшитой-полиэтиленовой изоляции во многом зависит от уровня частичных разрядов, возникающих при рабочем и повышенном напряжении [11]. Обычно разрушение изоляции под действием частичных разрядов происходит в течение многих месяцев и даже лет.

Характерная картина дефектов в полиэтиленовой изоляции представлена на рис. 1 [2], где обозначено: 1 – посторонние включения, 2 – триинги, 3 – канал пробоя.

Одной из важных проблем, связанных с обеспечением высокой надежности электрических кабелей, является повышение устойчивости изоляционного материала кабелей к деградации.

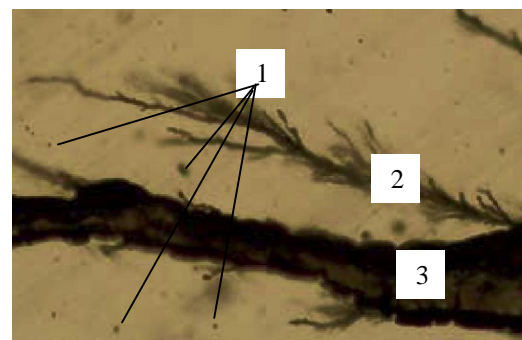


Рис. 1

Поскольку наличие водных и газовых включений в изоляции приводит к ухудшению свойств и является причиной ее старения, значительное внимание исследователей уделяется изучению влияния включений на электрическую прочность изоляции и ее локальный нагрев. К основным положениям, используемым в теоретических исследованиях по этому направлению, относится следующее:

- электрическая прочность сшитого-полиэтиленовой изоляции в кабелях среднего напряжения составляет 3 кВ/мм, кабелей высокого напряжения – 6 кВ/мм, а для сверхвысоковольтных кабелей – $E_{\max} = 11$ кВ/мм [14];

- для водных включений в сшитом полиэтилене, из которых развиваются триинги, электропроводность, найденная экспериментальным путем [17], составляет $3 \cdot 10^{-3} \dots 2 \cdot 10^{-2}$ См/м, а относительная диэлектрическая проницаемость изменяется в пределах от 4 до 6 в зависимости от длины триинга [13];

- собственная электрическая прочность полиэтиленовой изоляции выше, чем воздуха и других газов;

- полости в изоляции заполнены газом низкого давления; газ внутри включений имеет более низкие диэлектрическую проницаемость и диэлектрические потери, чем основная изоляция.

В работе [16] отмечается, что напряженность электрического поля в окрестности газовых включений в изоляции зависит от диэлектрической проницаемости, размеров включений, их количества, расположения по отношению к полю, толщины изоляции. Методом компьютерного моделирования в [16] исследовано влияние этих факторов на изменение электрической прочности диэлектрика.

В статье [11] численным методом граничных элементов проводятся исследование и анализ электрического поля и напряжения, приводящего к разрушению изоляции трехжильных силовых кабелей, содержащей внутреннее включение. Величина напряжения определяется как функция размеров и формы включения.

В работах [15, 18] методом конечных разностей исследованы условия возникновения частичных разрядов в сшитой полиэтиленовой изоляции высоковольтных кабелей и изменение температуры при этом в газовом включении изоляции. Отмечено, что особую опасность с точки зрения локального нагрева представляют включения в изоляции, расположенные достаточно близко к токопроводящей жиле кабеля. В таком случае свойства изоляционного материала могут изменяться, а при перегреве (нагреве до температуры $\sim 110^{\circ}\text{C}$ и выше) материал резко ухудшает свои изоляционные свойства.

В статье [3] проведено компьютерное моделирование и получено распределение неоднородного электрического поля и электрических сил в полиэтиленовой изоляции силовых кабелей, содержащей водное включение в виде эллипсоида. Исследованы механизмы разрушения диэлектрика на микроуровне.

Настоящая работа посвящена исследованию распределения электрического потенциала, напряженности электрического поля и температуры в полиэтиленовой изоляции силовых кабелей с газовым микровключением сферической формы различных размеров. Для рассмотренных случаев определяется уровень электрического поля, при достижении которого возможно образование частичных разрядов. Проводится сравнение результатов с расчетами для случая газового включения цилиндрической формы и сферического включения, заполненного водой.

Исследование проводится численным методом конечных элементов в пакете программ мультифизического моделирования Comsol 3.5 [8].

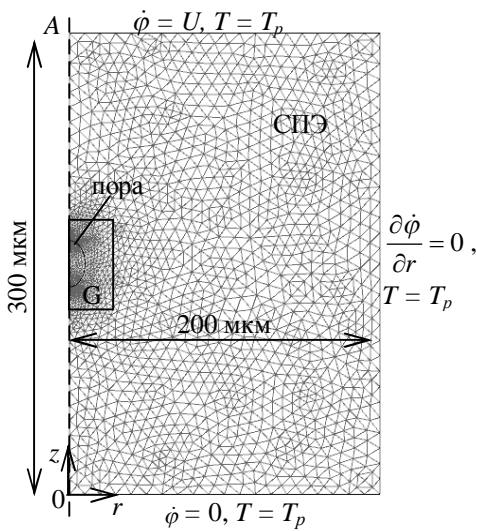


Рис. 2

Основные положения и модель для исследования. Область для исследования состоит из малого объема кабельной изоляции с газовым/водным микровключением, находящимся в переменном электрическом поле. Предполагается, что материал изоляции изотропный, элементы модели (диэлектрик с включением) составляют композиционную дисперсную среду, сторонние заряды в диэлектрике отсутствуют.

Задача рассматривается для квазистатического случая в предположении, что электрическое поле относительно медленно меняется во времени (частота 50 Гц). Двумерная расчетная модель представлена как осесимметричная в цилиндрической системе координат rOz (рис. 2).

Основными уравнениями модели являются

$$\nabla \cdot [(\sigma \nabla \dot{\phi} + j\omega \varepsilon_0 \dot{\varepsilon}_r \nabla \dot{\phi})] = 0; \quad (1)$$

$$-\nabla \cdot (\lambda \nabla T) = (\omega \varepsilon_0 \varepsilon_r \operatorname{tg} \delta + \sigma) |\dot{\mathbf{E}}|^2, \quad (2)$$

где $\dot{\phi}$ – электрический потенциал (напряжение); $\dot{\mathbf{E}}$ – напряженность электрического поля; T – температура; σ – электропроводность среды; $\dot{\varepsilon}_r$ – диэлектрическая проницаемость материала (относительное значение), $\varepsilon_0 = 8,85 \cdot 10^{-12}$ Ф/м – диэлектрическая проницаемость вакуума; ω – угловая частота; $\operatorname{tg} \delta$ – тангенс угла диэлектрических потерь; ρ – плотность пространственного заряда; λ – теплопроводность среды. Заметим, что параметры σ , ε_r , λ имеют различные значения в области включения и в области основной изоляции, т.е.

$$\sigma, \varepsilon_r, \lambda = \begin{cases} \sigma_v, \varepsilon_{r_v}, \lambda_v & \text{во включении,} \\ \sigma_{спэ}, \varepsilon_{r_{спэ}}, \lambda_{спэ} & \text{в изоляции.} \end{cases}$$

В уравнении (2) учитываются источники нагрева – джоулево тепло и диэлектрические потери в изоляции.

Соотношение между потенциалом и электрическим полем

$$\dot{\mathbf{E}} = -\nabla \dot{\phi}. \quad (3)$$

При решении электрической задачи использовались граничные условия в направлении поля: на нижней границе – $\dot{\phi} = 0$, на верхней границе – $\dot{\phi} = U$, на других границах задавались осевая симметрия и условие Неймана: $\partial \dot{\phi} / \partial \mathbf{n} = 0$ (\mathbf{n} – единичный вектор внешней нормали). Для тепловой задачи на всех границах, кроме осевой симметрии, выбиралась температура, равная рабочей температуре изоляции $T = T_p$ (см. рис. 2).

Уровень электрического поля, достигаемый в области включения в изоляции, является важной величиной с точки зрения возможности протекания ионизационных и разрядных процессов, которые влекут за собой разрушения диэлектрика. При достижении некоторого критического значения поля в области возникают частичные разряды. Такое значение поля для газового включения в полиэтилене определяется из формулы [15]

$$E_{кр} = k \cdot P^{0,7} \cdot d^{-0,3}, \quad (3)$$

где P – давление газа внутри включения в мм рт. ст.; d – диаметр в мм; $k = 8 \cdot 10^{-3}$ – константа для воздуха. Величина $E_{кр}$ в этой формуле выражается в кВ/мм.

Давление газа может быть найдено из уравнения состояния идеального газа – закона пропорциональности давления газа в замкнутом объеме абсолютной температуре

$$P = T \cdot P_0 / T_0. \quad (4)$$

Здесь P и T – давление и температура во включении соответственно; P_0 – давление газа при температуре T_0 . При этом может быть принято, что до эксплуатации кабеля газ при комнатной температуре имел нормальное атмосферное давление (760 мм рт. ст.).

Из формул (3), (4) следует, что критический уровень поля зависит от размера включения, давления газа в нем и температуры нагрева.

Отметим, что в общем случае формула (4) является хорошим приближением для реальных газов, однако неприменима в случае пара.

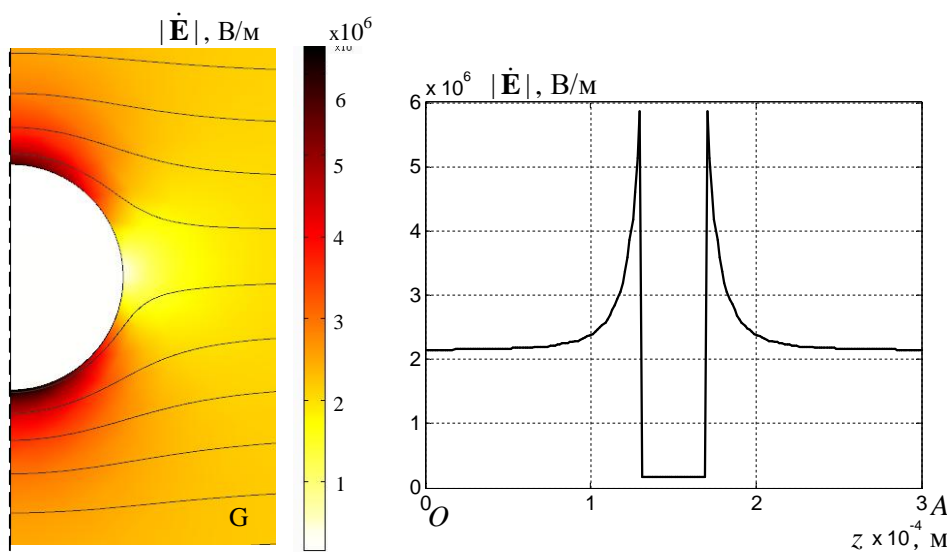
Таким образом, уравнения (1), (2) с описанными граничными условиями составляют математическую модель для решения электрической и тепловой задач в области полиэтиленовой изоляции с включением, а выражения (3), (4) определяют уровень критического поля, при котором в области включения начинают образовываться частичные разряды и проявляться механизмы деструкции материала на микроуровне.

Результаты компьютерного моделирования. Размеры расчетной области и граничные условия задачи указаны на рис. 2. На верхней границе области задавалось условие $U = 640$ В, что соответствует среднему значению электрического поля $E_0 \approx 2,13$ кВ/мм. Электрофизические характеристики материалов задавались на основании данных работ [13, 15, 17] и приведены в таблице. Диаметр включения сферической формы выбирался равным $d = 40$ мкм и в ходе исследования варьировался.

| Среда | σ , См/м | ϵ_r | $tg\delta$ |
|---------------------------|-------------------|--------------|-------------------|
| Сшитый полиэтилен | 10^{-15} | 2,3 | $4 \cdot 10^{-3}$ |
| Водная среда во включении | $5 \cdot 10^{-2}$ | 5 | — |
| Газ во включении | 10^{-4} | 1,00058 | 10^{-8} |

Электрическая задача (1) и тепловая (2) решались последовательно методом конечных элементов в программе Comsol 3.5. Элементное разбиение области, показанное на рис. 2, задавалось более густым в области включения и вокруг него.

Водное включение. Распределение электрического поля $|\dot{E}|$ в подобласти G с водным включением показано на рис. 3 а. Здесь оттенками серого и изолиниями отображен характер



искажения электрического поля рассматриваемым дефектом в изоляции. На рис. 3 б показано распределение напряженности электрического поля $|\dot{E}|$ вдоль оси симметрии $OА$, отмеченной на рис. 2. Как видно, на вершинах включения, ориентированных по полю, имеет место высокая электри-

Рис. 3

ческая напряженность. Именно в этих ослабленных зонах происходят ускоренные процессы старения изоляции – образуются трещины, включения увеличиваются в объеме.

Газовое включение. Распределение электрического поля $|\dot{\mathbf{E}}|$ и изолинии электрического потенциала φ в окрестности газового включения сферической и цилиндрической формы показаны на рис. 4 *а* и *б* соответственно. Как видно, значения электрического поля выше для включения цилиндрической формы.

Изменение

поля $|\dot{\mathbf{E}}|$ вдоль линии OA (см. рис. 4 *а*) для сферического газового включения показано на рис. 5 *а*. Здесь линией $E_{кр}$ отмечен уровень поля, необходимый для образования частичных разрядов, который превышает внутри включения. Изменение значения $E_{кр}$ в зависимости от радиуса включения R показано на рис. 5 *б*. Данные рис. 5 показывают, что наличие микrorазмерных включений может составлять опасность разрушения полимерного материала. Это объясняет необходимость обеспечения максимальной чистоты материала изоляции силовых кабелей с тем, чтобы избежать быстрого ее электрического старения.

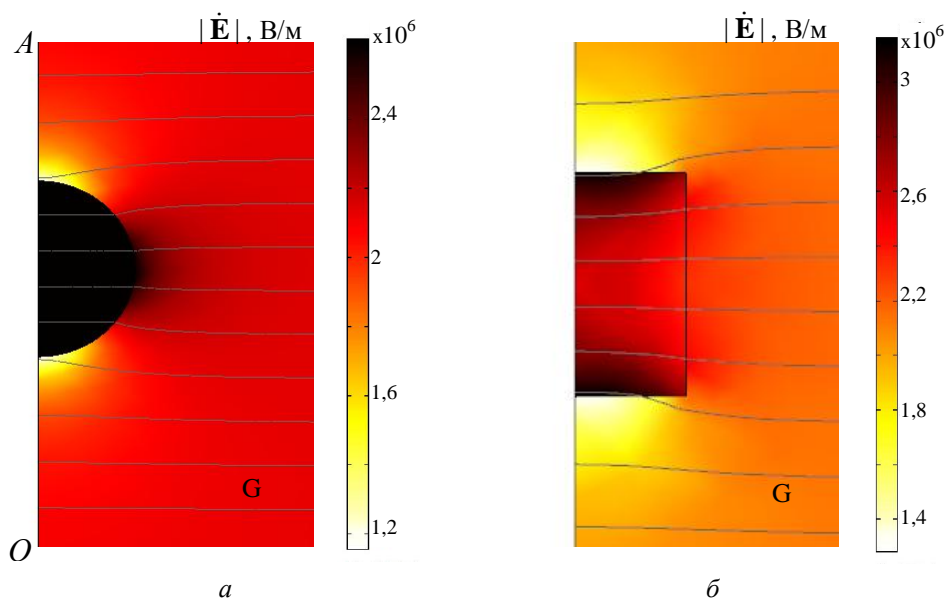


Рис. 4

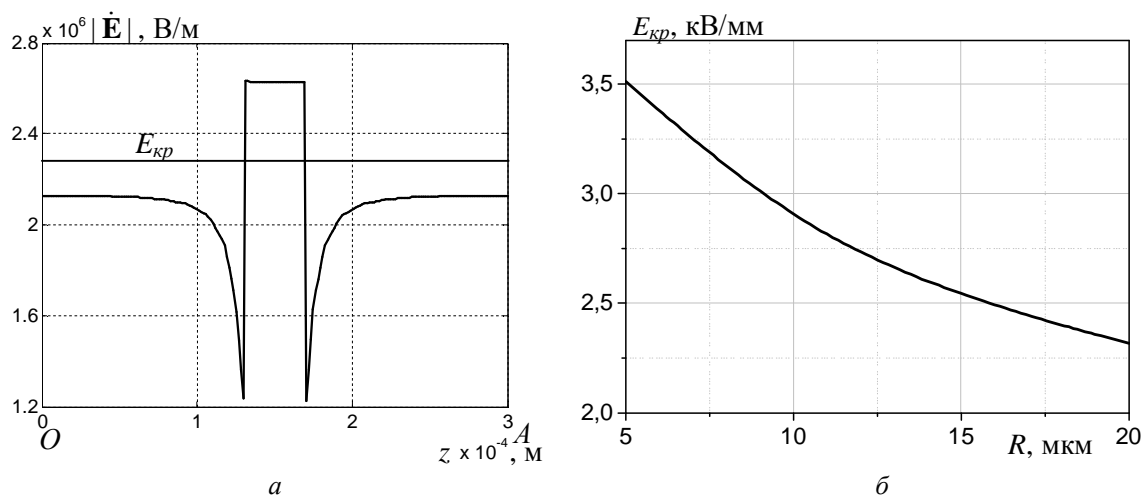


Рис. 5

Как показали компьютерные расчеты, основной вклад в нагрев материала при частоте 50 Гц привносят джоулевы потери во включении. Степень локального нагрева изоляции в окрестности включения в полиэтилене зависит от размера включения. В подтверждение этому на рис. 6 *а* показано изменение приращения температуры ΔT по координате r включения для различных значений радиуса сферического включения R . Характер распространения

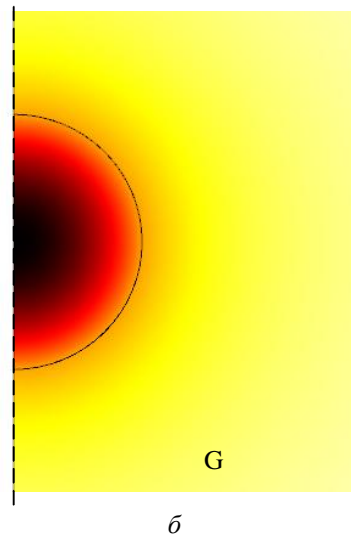
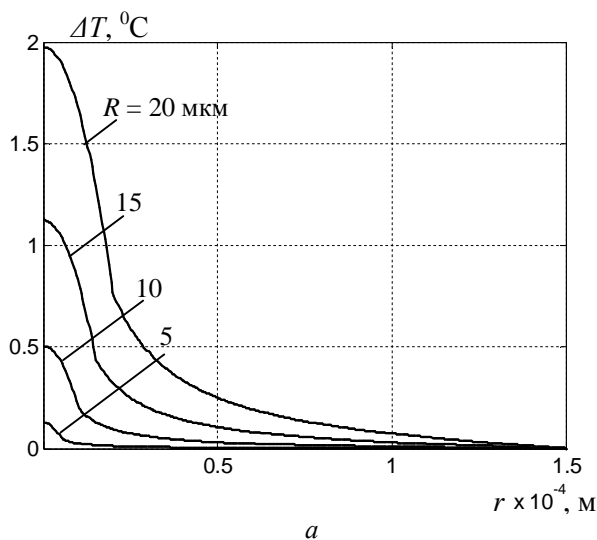


Рис. 6

температуры в области расположения включения G , представленной в оттенках серого цвета, отображен на рис. 6 б. Как видно, повышение температуры в зоне включений не может оказать существенного влияния на изменение свойств материала, в том числе на ослаб-

ление его изоляционных свойств.

В заключение отметим основные результаты работы:

- в газовых включениях с радиусом 10...20 мкм уровень электрического поля превышает критическую величину, что связано с образованием в этой области частичных разрядов и объясняет возможность разрушения диэлектрика в зоне включения (рис. 5);
- степень разрушения изоляции на микроуровне зависит от формы и размеров включения (рис. 4, 5 б); так, газовое включение цилиндрической формы представляет большую опасность разрушения по сравнению со сферическим включением;
- повышение температуры в зоне микровключения не может сказаться на изменении свойств изоляционного материала в локальной области (рис. 6).

Методом компьютерного моделирования получено и исследовано распределение неоднородного электрического и температурного полей в полиэтиленовой изоляции силовых кабелей, содержащей газовое микровключение. Показано, что напряженность поля в локальной области выше в случае включения цилиндрической формы в сравнении со сферическим включением. Нагрев в зоне включения зависит от его размера, однако не способен оказать влияния на изменение свойств изоляционного материала.

The distributions of inhomogeneous electric and thermal fields in the polyethylene insulation of power cables that includes micro-sized gaseous inclusion are obtained by computer modeling and analyzed. It is shown that the electric field strength in the local zone is higher for cylindrical inclusion than that for spherical inclusion. Heat of the zone with inclusions depends on their size and has no influence on insulating properties of material.

1. Золотарев В.М., Обозный А.Л. Новые отечественные разработки в области силовых кабелей // Электропанорама. – 2009. – № 1–2. – С. 22–23.
2. Ковригин Л.А. Технологические и эксплуатационные дефекты в изоляции кабелей // Кабель-news. – 2008. – № 10. – С. 58–60.
3. Кучерявая И.Н. Компьютерный анализ электрического поля и сил в полиэтиленовой изоляции силового кабеля при наличии дефекта // Пр. Ин-ту электродинамики НАН Украины: Зб. наук. пр. – К.: ІЕД НАН України. – 2010. – Вип. 25. – С. 126–132.
4. Кучинский Г.С. Частичные разряды в высоковольтных конструкциях. – Л.: Энергия, 1979. – 224 с.
5. Шувалов М.Ю., Овсиенко В.Л., Колосков Д.В. Исследование надежности силовых кабелей среднего и высокого напряжения с изоляцией из сшитого полиэтилена // Кабели и провода. – 2007. – № 5 (306). – С. 24–34.
6. Ball E.H., Holdup H.W., Skipper D.J., Vecillio B. Development of cross-linked polyethylene insulation for UV cables // CIGRE. – Paper SC21-01. – 1984. – 10 p.
7. Boggs S. A rational consideration of space charge // IEEE Electrical Insulation Magazine. – Vol. 20, No. 4. – 2004. – P. 22–27.
8. Comsol Multiphysics® – www.comsol.com
9. Dissado L.A., Fothergill J.C. Electrical degradation and breakdown in polymers. – Published by Peter Peregrinus for the IEE. – 1992. – 601 p.

10. *Fleming R.J.* Space charge in polymers, particularly polyethylene // Brazilian Journal of Physics. – Vol. 29, No. 2. – June, 1999. – P. 280–294. – Интернет источник: http://www.sbfisica.org.br/bjp/files/v29_280.pdf
11. *Hossam-Eldin A.A., Dessouky S.S., El-Mekawy S.M., Abd El-Aal R.A.* Investigation and analysis of inception voltage and field distribution in power cables with internal cavities in dielectric // The Online Journal on Power and Energy Engineering. – Vol. 1, No. 2. – Reference Number: W09-0013. – P. 55–61.
12. *Kageyama S., Ono M., Chabata S.* Microvoids in crosslinked polyethylene insulated cables // IEEE Power Apparatus Systems. – Vol. 94, No. 4. – 1975. – P. 1258–1263.
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. *Ljumba N.* High voltage cable insulation systems // Energize. – May, 2008. – P. 27–30. <http://www.eepublishers.co.za/images/upload/Trans%20-%20High%20voltage.pdf>
15. *Nouar A., Guibadj M., Lefkaier I.K., Boubakeur A.* Numerical study of partial discharges apparition in XLPE insulation of high voltage cables // Proc. of IEEE Power Tech Conference. – June 23th–26th, 2003, Bologna, Italy. – 7 p. – Интернет источник: <http://www.labplan.ufsc.br/congressos/Powertech/papers/420.pdf>
16. *O.H.N., Blackburn T.R., Phung B.T., Zang H., Khawaja R.H.* Investigation of electric field distribution in power cables with voids // Proc. of the 8th International Conference on Properties and applications of dielectric materials. – June, 2006. – P. 637–640.
17. *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.
18. *Seghir T., Nouar A., Lefkaier K., Mahi D.* Study by simulation of the effect of temperature on the appearance of partial discharges in gaseous cavities contained in the insulator of high voltage cable // Proc. of IEEE Power Tech Conference. – Vol. 2. – June 23th–26th, 2003, Bologna, Italy. – 4 p. – <http://www.labplan.ufsc.br/congressos/PowerTech/papers/169.pdf>

Надійшла 22.06.2010