

Peremohy, 56, Kyiv-57, 03680, Ukraine

### **Analysis of electromagnetic processes in the induction channel furnace used in the cable industry**

*A method of calculating electromagnetic processes and energy characteristics of the channel induction furnace to produce copper rod has been proposed. The model of the furnace is based on the equivalent electrical circuit with slowly changing load resistance due to an increase in the temperature pattern. From the results of calculations of reactive power consumed by the furnace at a different temperature pattern was shown that the value of this power at the end of the heating process is reduced by approximately 10 % from the initial value and hence the value of compensating capacitive at the end to be reduced by the same amount. References 7, figures 6.*

**Key words:** induction channel furnace, electromagnetic processes, reactive power, capacitor bank.

Надійшла 22.06.2016

Received 22.06.2016

УДК 621.315.2 : 004.94

## **ПОДХОДЫ К МОДЕЛИРОВАНИЮ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ПОЛЯ В ПОЛИЭТИЛЕНОВОЙ ИЗОЛЯЦИИ С МИКРОВКЛЮЧЕНИЯМИ**

**И.Н. Кучерявая**, докт. техн. наук

Институт электродинамики НАН Украины,  
пр. Победы, 56, Киев-57, 03680, Украина  
rB.irinan@gmail.com

*Путем компьютерного моделирования исследованы распределения электрического поля в неоднородном полиэтиленовом материале с микроразмерными включениями различной формы – сферическими, эллипсоидными, без каналов и соединенные каналами, заполненными водой, а также в виде упрощенного триинга с тремя ветвями. Численное моделирование проведено в двух- и трехмерном случаях. Используются модель эффективной композиционной среды и подходы к расчету гетерогенных диэлектриков как матричных или статистических смесей. Библ. 16, рис. 7.*

**Ключевые слова:** полиэтиленовая изоляция, микроразмерные водные включения, композиционный диэлектрик, эффективная диэлектрическая проницаемость, матричные и статистические смеси, компьютерное моделирование.

**Введение.** В настоящее время в мире широко используются силовые кабели с изоляцией из сшитого полиэтилена (ПЭ) на высокое и сверхвысокое (до 500 кВ) напряжения. Полиэтиленовая изоляция обладает отличными электрическими, термическими и механическими свойствами, что обеспечивает достаточно высокую надежность материала в эксплуатации. Недостатком полиэтиленовой изоляции является неоднородность ее структуры. Дефекты-неоднородности свойственны изоляции в исходном состоянии, а также появляются в процессе изготовления и функционирования кабелей. При эксплуатации полиэтиленовой изоляции под действием электрического поля и в присутствии воды в местах расположения микроразмерных полостей и инородных включений в полиэтиленовом материале зарождаются и распространяются водные триинги [13]. Развитие триингов приводит к деградации изоляции и снижению ее электрической прочности [10].

Картина водного триинга в полиэтиленовой изоляции силового кабеля показана на рис. 1 а [4]. В работах [6, 14] описана и использована модель роста триинга, которая состоит из совокупности микровключений, заполненных водой и соединенных каналами-микротрещинами (рис. 1 б). Такая модель экспериментально подтверждена, например, в [14]. Согласно данным работы [14] микровключения в полиэтиленовой изоляции возникают при изготовлении и в процессе эксплуатации из-за наличия аморфных областей, содержащих влагу и вследствие сгущения и группирования субмикроразмерных полостей в структуре полиэтилена.

Первоначальные размеры включений-неоднородностей в сшитом-полиэтиленовой изоляции варьируются от 1 до 20 мкм и в дальнейшем могут увеличиваться за счет образования

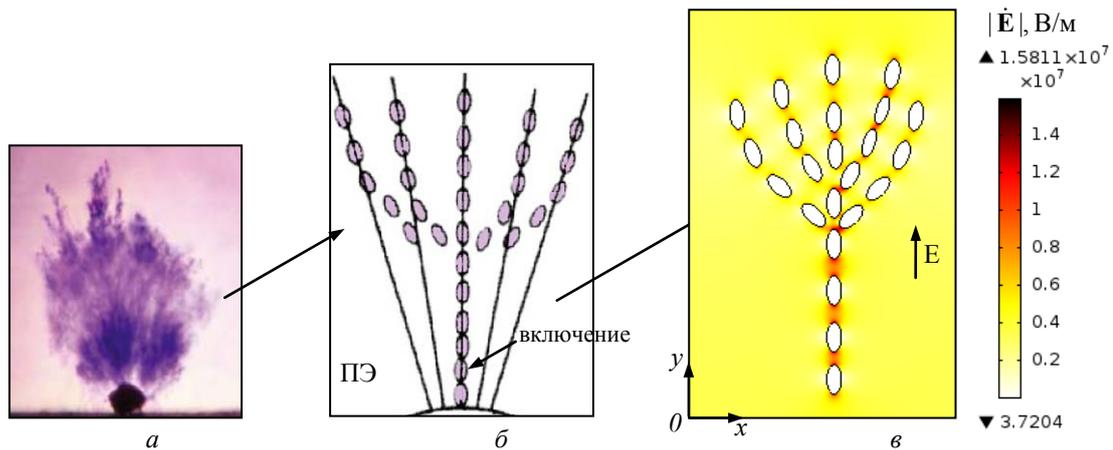


Рис. 1

исходящих от них микротрещин. Как отмечается в [11], в шитом полиэтилене концентрация включений размером от 1 до 5 мкм составляет  $10^6$  1/мм<sup>3</sup>, а по данным работы [5] в объеме 1 мм<sup>3</sup> насчитываются  $10^3$ – $10^7$  пустот в том же диапазоне размеров. Такое значительное количество микровключений в изоляционном материале приводит к ухудшению свойств и является причиной его старения. В силу этого внимание исследователей в области кабельной техники обращается на изучение неоднородной микроструктуры полиэтиленовой изоляции, распределение электрического поля в ней, а также влияние включений на электрическую прочность изоляции, например, в [4, 6, 10, 11, 13, 14].

*Целью данной работы* является представление и сравнение различных подходов к двух- и трехмерному компьютерному моделированию электрического поля в микрообъеме неоднородной полиэтиленовой изоляции. Рассматривается изоляционный материал, содержащий микровключения различной формы (сферические, эллипсоидные и в виде ветвей тринга), а также различного пространственного расположения (упорядоченные и хаотического распределения). Используются основные положения теории композиционных диэлектриков [2, 8, 9, 12, 16]. Гетерогенный диэлектрик (полиэтиленовая изоляция) представляется как двухкомпонентная среда, состоящая из основного полиэтиленового материала и ряда микровключений, заполненных водой. Задачи решаются для случая, когда составляющие среды имеют свои собственные диэлектрические проницаемости и проводимости. Кроме того, в случае трехмерного моделирования достаточно большого числа микровключений (объемной концентрации приблизительно от 3 до 12 %) используется понятие эффективной диэлектрической проницаемости многокомпонентной среды.

**Основные определения, положения и допущения расчетных моделей.** С использованием данных работ [2, 8, 9, 12, 15, 16] приведем основные теоретические положения.

– Композиционный материал – это неоднородный материал, состоящий из двух или более компонентов, имеющих четкую границу между собой и обладающих заданными электрическими свойствами.

– При применении моделей эффективной среды композиционный материал рассматривается как однородная среда с эффективными электрическими характеристиками. Свойства такой среды могут немало отличаться от свойств компонентов, формирующих композит.

– Электрическое поле в композиционной среде определяется формой, размерами и упорядоченностью составляющих компонентов.

– Композиционные материалы представляются смесью ряда компонентов. Предполагается, что смесь – физическая, т.е. ее компоненты не вступают друг с другом в химические реакции. Могут рассматриваться композиционные системы, в которых включения образованы не диэлектриком, а проводником.

– В зависимости от характера расположения в среде компонентов различаются матричные и статистические смеси. Статистические смеси – это многокомпонентные гетерогенные системы, характеризующиеся хаотическим, неупорядоченным пространственным рас-

пределением компонентов. Матричные смеси имеют периодическое, упорядоченное расположение составляющих элементов.

– Для расчета эффективной диэлектрической проницаемости матричных и статистических смесей предложено большое количество формул, вывод которых основан на теоретических предположениях и экспериментальных данных. Это формулы Максвелла, Бруггемана, Лихтенкера, Релея, Бетхера, Лорентца-Лоренца и другие, которые используются отдельно в каждом конкретном случае в зависимости от вида гетерогенной среды (например, при наличии сферических, цилиндрических включений или многослойных сред), а также в зависимости от расстояния включений друг от друга и соотношения диэлектрических проницаемостей компонентов.

К примеру, для матричных двухкомпонентных смесей может использоваться формула Максвелла-Вагнера [8] :

$$\varepsilon_{eff} = \varepsilon_1 \frac{2\varepsilon_1 + \varepsilon_2 + 2f(\varepsilon_2 - \varepsilon_1)}{2\varepsilon_1 + \varepsilon_2 - f(\varepsilon_2 - \varepsilon_1)}, \quad (1)$$

где  $\varepsilon_{eff}$  – эффективная диэлектрическая проницаемость двухкомпонентной среды;  $f$  – объемная фракция включений;  $\varepsilon_1, \varepsilon_2$  – диэлектрические проницаемости компонентов смеси.

При значительной разнице диэлектрических проницаемостей компонентов двухкомпонентных статистических смесей применяется формула В.И. Оделевского вида [2]

$$\varepsilon_{eff} = A + \sqrt{A^2 + \frac{\varepsilon_1 \varepsilon_2}{2}}, \quad (2)$$

где  $A = \frac{(3f_1 - 1)\varepsilon_1 + (3f_2 - 1)\varepsilon_2}{4}$ . Здесь  $f_1, f_2$  – объемные концентрации компонентов в смеси ( $f_1 + f_2 = 1$ ).

Задачи расчета напряженности электрического поля в полиэтиленовой изоляции могут решаться в двух- и трехмерной постановках, в декартовой и цилиндрической (при наличии осевой симметрии) системах координат.

Основными положениями расчетных моделей, приведенных в работе, являются следующие:

- 1) рассматривается композиционный диэлектрик, элементами которого являются полиэтиленовая изоляция и водные включения в ней;
- 2) микрообъем изоляции с включениями находится в переменном электрическом поле, изменяющемся по гармоническому закону;
- 3) электрическое поле медленно меняется во времени и рассчитывается как квазиэлектростатическое поле в частотной области при частоте  $f = 50$  Гц;
- 4) объемные электрические заряды в расчетной области отсутствуют;
- 5) полиэтиленовый материал предполагается изотропным; электрические свойства изоляции и водной среды во включениях не зависят от напряженности электрического поля;
- 6) включения в изоляции представляются слабо проводящей средой, способной искажать электрическое поле;
- 7) кроме трехмерного случая ветвей триинга (моделируемого с помощью усеченных конусов) рассматриваются включения правильной формы – в виде сферы и эллипсоида;
- 8) диэлектрическая проницаемость компонентов материала задается как вещественная величина;
- 9) трехмерное моделирование совокупности сферических включений проводится с использованием модели эффективной среды; определяется эффективная диэлектрическая проницаемость неоднородного полиэтилена с учетом упорядоченности включений и соотношения диэлектрических проницаемостей компонентов композиционного материала, эффективная электропроводность среды не используется, а задаются значения электропроводности, свойственные компонентам;

10) размер расчетных областей выбирается из условия его превышения трех-четырех характерных размеров включений (диаметров для сферических включений) на основании сравнения данных численного расчета и известного аналитического решения [3].

Дополнительные положения, относящиеся к отдельным моделям, приведены далее.

**Модель расчета электрического поля.** Распределение напряженности электрического поля  $\mathbf{E} = -\nabla\phi$  находится из уравнения для комплексного электрического потенциала  $\phi$ :

$$\nabla \cdot [(\sigma \nabla \phi + j\omega \varepsilon_0 \varepsilon \nabla \phi)] = 0, \quad (3)$$

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

Граничные условия решаемых задач такие. На границах расчетных областей, ориентированных вдоль поля, выбираются условия нулевого электрического потенциала  $\phi = 0$  и условие  $\phi = U$ , где  $U$  – приложенное напряжение, задаваемое так, чтобы среднее значение напряженности поля в области составляло 3 кВ/мм.

Для двухмерных моделей на внешней границе расчетной области задается условие электрической изоляции  $\mathbf{n} \cdot \mathbf{J} = 0$  ( $\mathbf{n}$  – единичный вектор внешней нормали,  $\mathbf{J}$  – плотность полного тока). При осесимметричном представлении включений в моделях, реализуемых в цилиндрической системе координат, на границе  $r = 0$  ставится условие осевой симметрии (рис. 2).

Задачи для трехмерных моделей совокупности сферических включений решаются с периодическими граничными условиями на боковых гранях, как показано далее на рис. 4 и 7. Периодические условия позволяют моделировать электрическое поле в малом объеме материала с конечным числом включений путем задания одинакового распределения электрического потенциала и его нормальной производной на противоположных границах.

Модель расчета электрического поля на основе дифференциального уравнения (3) с приведенными граничными условиями реализовывалась для ряда задач численно методом конечных элементов в программе Comsol [7]. Задавались значения электропроводности полиэтилена  $\sigma = 10^{-15}$  См/м. Для включений, соединительных каналов и ветвей триинга определялась электропроводность  $\sigma = 0,01$  См/м. Диэлектрическая проницаемость полиэтилена  $\varepsilon = 2,3$ , водных включений  $\varepsilon = 80$ . Рассчитанные по формулам (1) и (2) значения эффективной диэлектрической проницаемости трехмерных двухкомпонентных сред приведены далее, в том числе на рис. 4, 5, 7.

**Двухмерное компьютерное моделирование.** Простейшая физическая модель триинговой структуры с ветвями показана на рис. 1 в. Модель состоит из совокупности водных включений в виде эллипсоидов. Реализация модели в декартовой системе координат  $Oxy$  предполагает наложение дополнительных условий о значительном распространении включений по толщине изоляции и сохранении при этом их формы. Такое предположение делает модель скорее показательной, чем реалистичной.

Полученное в результате расчета модели в цилиндрической системе координат  $rOz$  распределение напряженности электрического поля в объеме изоляции с водными включениями без каналов и с соединительными каналами показано на рис. 2 а и б соответственно. Включения для двух случаев одинаковы по форме и размерам.

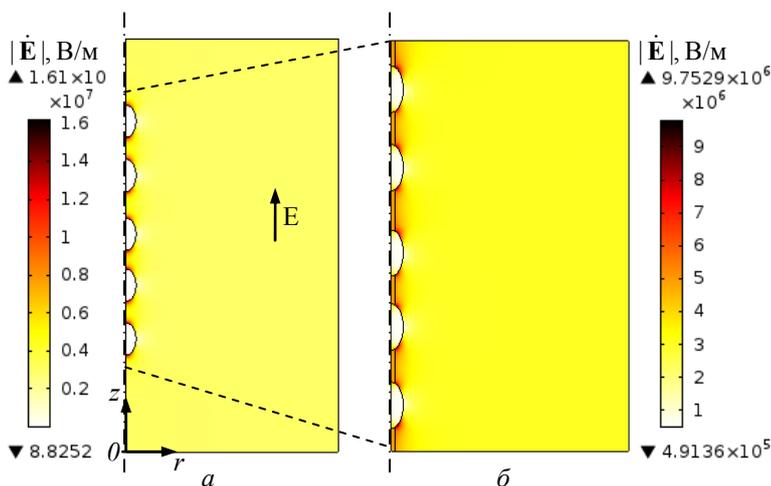


Рис. 2

Как видно из рис. 2, наличие каналов смещает зоны максимальной напряженности поля с вершин эллипсоидных включений в области перехода между включениями и каналами, а также содействует уменьшению максимального значения поля до  $|\dot{E}|_{\max} \approx 9,75$  кВ/мм.

Двухмерное моделирование в цилиндрической системе координат дефектов в изоляции, в том числе водных включений, возможно в предположении их сферической, эллипсоидной, цилиндрической формы, а также таких осесимметричных моделей, как, например, для включений с каналами на рис. 2 б или простейших триинговых структур с единичными каналами, как в статье [1].

**Трехмерное компьютерное моделирование.** Рассчитанное в трехмерной декартовой системе координат  $Oxyz$  распределение напряженности электрического поля в центральном сечении области с включениями различной формы и расположения представлено на рис. 3 а. Наибольшее значение напряженности поля имеет место на вершине удлинненного эллипсоидного включения, а на вершине сферического включения, ориентированной по полю, поле ниже и равно  $|\dot{E}| = 9,5$  кВ/мм. В цветовых оттенках показано увеличение электрического поля в области между двумя близко и различно расположенными по отношению к приложенному полю включениями в форме эллипсоидов.

Распределение напряженности электрического поля в области изоляции с ветвями триинга показано на рис. 3 б. Как видно, поле максимально на заостренных концах ветвей и превосходит в  $\sim 4$  раза максимальное значение  $|\dot{E}|$  в случае включений простой формы (рис. 3 а).

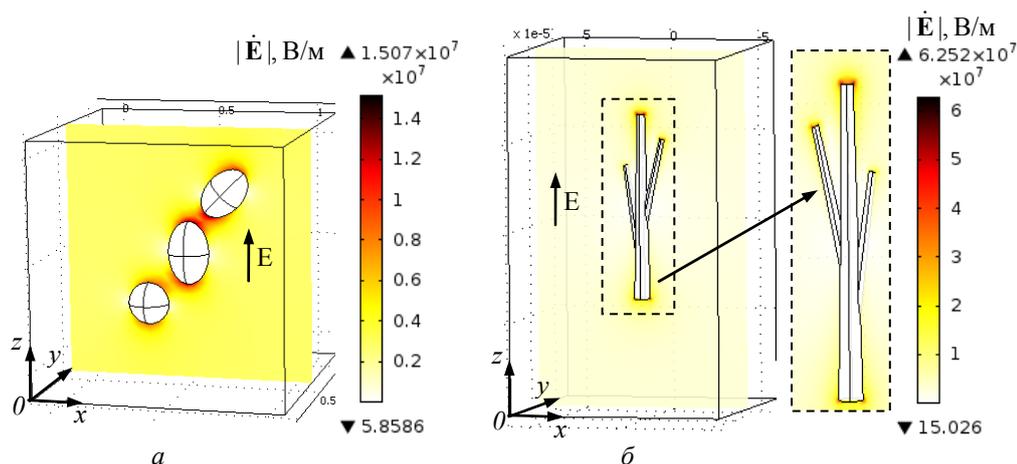


Рис. 3

Компьютерный расчет композиционного материала при большой разнице диэлектрических проницаемостей компонентов – основной полиэтиленовой изоляции ( $\varepsilon = 2,3$ ) и значительного количества включений ( $\varepsilon = 80$ ) сопряжен с некоторыми трудностями, среди которых необходимость выбора достаточно крупного сеточного разбиения и подходящего решателя. В связи с этим далее представлены случаи использования модели эффективной среды при различной объемной концентрации включений  $f = 0,0327; 0,0448; 0,0544; 0,0726$  и

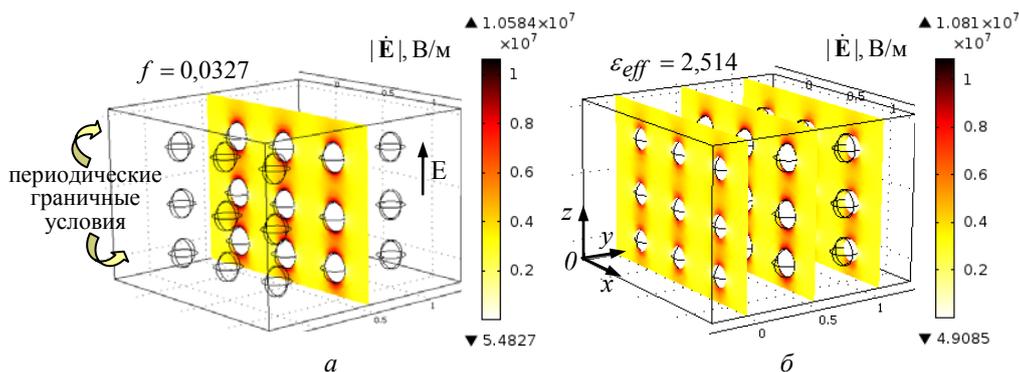


Рис. 4

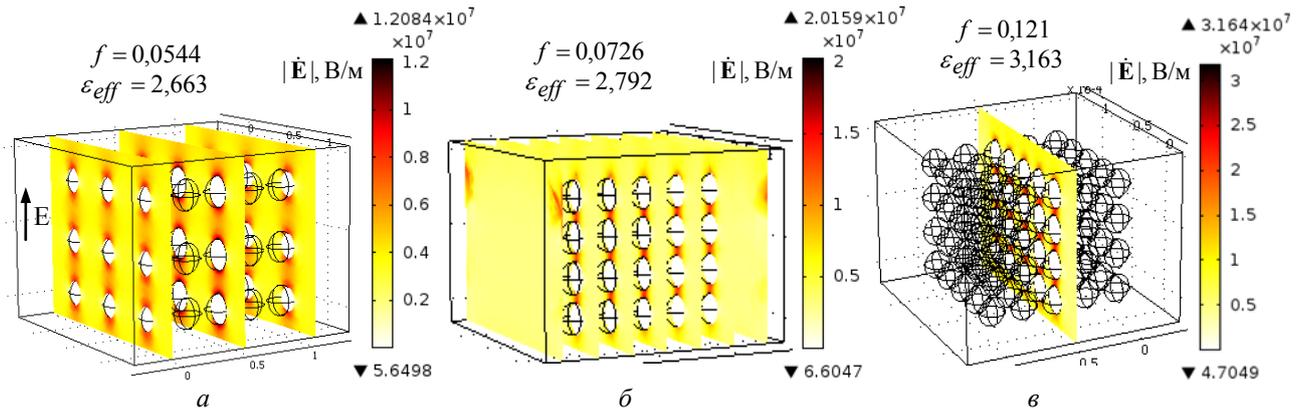


Рис. 5

0,121 на рис. 4 и 5 – для включений периодического расположения (как для матричной смеси), и на рис. 7 – для включений, распределенных случайным образом (как для статистической среды). В расчетных моделях на рис. 4, 5 и 7 на боковых гранях заданы периодические граничные условия, описанные выше.

На рис. 4 *a* показано распределение напряженности электрического поля в области со сферическими включениями объемной фракции  $f = 0,0327$  при диэлектрических проницаемостях, свойственных отдельным компонентам, а на рис. 4 *б* – в случае задания эффективной проницаемости двухкомпонентной среды  $\varepsilon_{eff} = 2,514$ , вычисленной по формуле (1).

По распределениям электрического поля и максимальным значениям  $|\dot{E}|$  для этих вариантов видно, что при малой концентрации включений (3,27 %) результаты для собственных диэлектрических проницаемостей и эффективной проницаемости согласуются между собой.

В трехмерной области при наличии совокупности включений эффективная диэлектрическая проницаемость среды  $\varepsilon_{eff}$  на макроуровне характеризуется в общем случае неодинаковыми значениями по различным направлениям. Например, в направлении приложенного поля (вдоль оси  $Oz$  на рис. 4 *б*)  $\varepsilon_{eff}$  может быть вычислена на основании формулы для плотности полного тока:

$$\langle \dot{J}_z \rangle = (\sigma + j\omega\varepsilon_0\varepsilon_{eff}) \langle \dot{E}_z \rangle, \quad (4)$$

где усредненная по всему объему  $V$  плотность тока определяется как

$$\langle \dot{J}_z \rangle = \frac{1}{V} \int_V \dot{J}_z(\mathbf{r}) d\mathbf{r}. \quad (5)$$

Здесь  $\mathbf{r}$  – пространственная координата.

По аналогичному выражению рассчитывается и усредненная по объему  $z$ -составляющая напряженности электрического поля  $\langle \dot{E}_z \rangle$ . Предполагается, что объем  $V$  имеет размеры, превышающие размеры включений-неоднородностей.

Как показали расчеты с использованием выражений (4), (5), эффективная проницаемость, соответствующая случаю рис. 4 *a*, имеет одинаковые значения по всем направлениям и равна  $\varepsilon_{eff}^* = 2,3012$ . Тогда расхождение с вычисленным по формуле (1) значением  $\varepsilon_{eff} = 2,514$  составляет  $\sim 9,2\%$ .

Данные рис. 5 представляют распределение напряженности электрического поля в матричной смеси со сферическими включениями при различных объемном содержании включений  $f$  и эффективной проницаемости композиционной среды  $\varepsilon_{eff}$ , определенной по формуле (1): на рис. 5 *a* для  $f = 0,0544$  и  $\varepsilon_{eff} = 2,663$ ; на рис. 5 *б* для  $f = 0,0726$  и  $\varepsilon_{eff} = 2,792$ ; на рис. 5 *в* для  $f = 0,121$  и  $\varepsilon_{eff} = 3,163$ . Показано взаимное влияние близко расположенных включений друг на друга, локализация напряженности электрического поля

на полюсах включений и в зонах между включениями, ориентированных по направлению поля. Выявлено, что с ростом концентрации включений  $f$  и увеличением  $\varepsilon_{eff}$  максимальное значение электрического поля в композиционном материале возрастает. Изменение проницаемости  $\varepsilon_{eff}$ , рассчитанной по выражению (1), и максимального значения поля  $|\dot{E}|_{max}$  в области с включениями в матричной смеси в зависимости от их концентрации  $f$  показано на рис. 6.

Рассматриваемая двухкомпонентная статистическая смесь схематически отображена на рис. 7 а, расчетная область со сферическими включениями объемной фракции  $f = 0,0448$  показана на рис. 7 б.

Эффективная проницаемость композиционной среды определена с помощью формулы В.И. Оделевского (2) и задана равной  $\varepsilon_{eff} = 2,621$ . В таком случае распределение напряженности электрического поля в трех различных сечениях расчетной области приведено на рис. 7 в. Более сложный характер распределения поля в области обусловлен расположением в ней включений случайным образом.

При расчете эффективной диэлектрической проницаемости согласно выражениям (4) и (5) в случае статистической смеси (рис. 7 б) и при задании свойственным компонентам смеси значениям проницаемости получено  $\varepsilon_{eff}^* = 2,3$ . Погрешность формулы (2) для рассматриваемого случая составляет  $\sim 14\%$ .

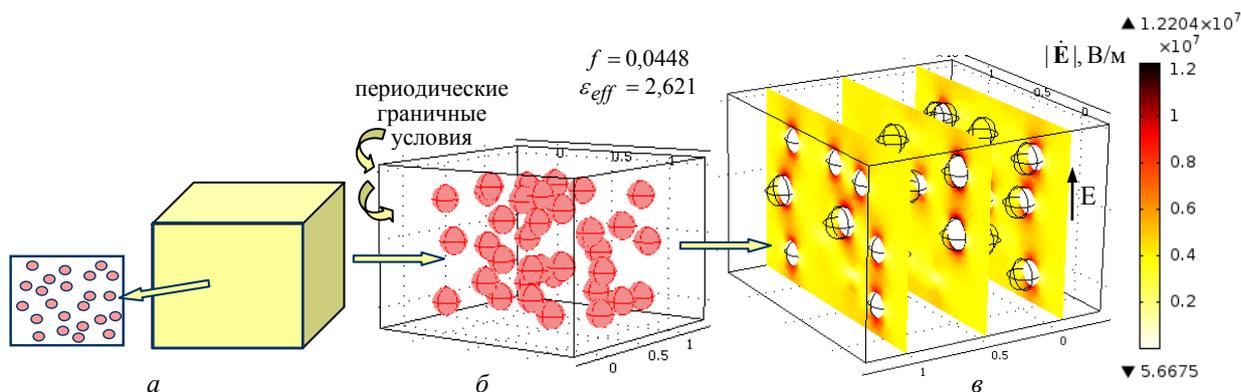


Рис. 6

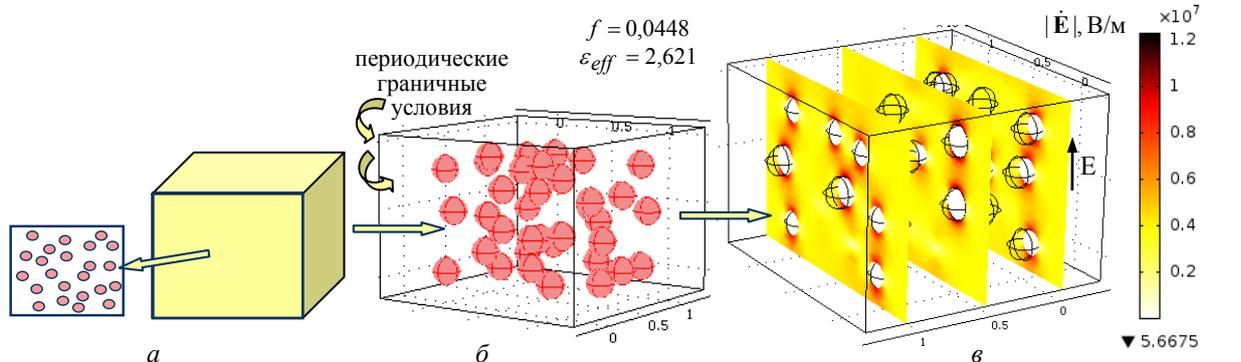


Рис. 7

**Заключение.** Представлены различные подходы к численному расчету электрического поля в объеме полиэтиленовой изоляции с водными микровключениями различных формы, концентрации и расположения. Показаны примеры двух- и трехмерного моделирования одиночных включений, совокупности включений, соединенных каналами (как модель отдельной ветви триинга), и включений без соединительных каналов.

В трехмерном случае при рассмотрении большого числа включений (с объемной фракцией до  $\sim 12\%$ ) расчеты проведены с использованием эффективной диэлектрической проницаемости матричной среды при упорядоченном расположении включений и эффективной проницаемости статистической среды при случайном распределении включений в микрообъеме изоляции.

Выявлены основные закономерности распределения электрического поля в неоднородной изоляции в зависимости от формы и концентрации микровключений, в частности, увеличение значения эффективной диэлектрической проницаемости среды и максимального значения напряженности электрического поля с увеличением объемной фракции включений в композиционной среде.

Результаты работы могут представлять интерес для исследователей в области кабельной техники и в связи с широким использованием в настоящее время силовых кабелей с изоляцией из сшитого полиэтилена на высокое и сверхвысокое напряжение.

1. Кучерявая И.Н. Компьютерный анализ электромеханических напряжений в полиэтиленовой изоляции силового кабеля при наличии микровключений // Техн. електродинаміка. – 2012. – № 5. – С. 10–16.
2. Тареев Б.М. Физика диэлектрических материалов. – М.: Энергоиздат, 1982. – 320 с.
3. Тэнэску Ф., Крамарюк Р. Электротехника в технике. – М.: Энергия, 1980. – 296 с.
4. Шувалов М.Ю., Образцов Ю.В., Овсиенко В.Л., Удовицкий 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.
5. 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.
6. Boggs S.A. Mechanisms for degradation of TR-XLPE impulse strength during service aging // IEEE Trans. on Power Delivery. – 2002. – Vol. 17, No. 2. – P. 308–312. – <http://faculty.ims.uconn.edu/~eprcable/ref06.pdf>
7. Comsol multiphysics modeling and simulation software – <http://www.comsol.com/>
8. Cret R., Cret L. Numerical computation of dielectric permittivity of mixtures // Journal of Optoelectronics and Advanced Materials. – 2004. – Vol. 6, No. 3. – P. 1045–1048.
9. Devaney A.J., Levine H. Effective elastic parameters of random composites // Applied Physics Letters. – 1980. – Vol. 37, No. 4. – P. 377–379.
10. Dissado L.A., Fothergill J.C. Electrical degradation and breakdown in polymers. – London: Peter Peregrinus Ltd. for IEE, 1992. – 601 p.
11. Kageyama S., Ono M., Chabata S. Microvoids in crosslinked polyethylene insulated cables // IEEE Trans. on Power Apparatus Systems. – 1975. – Vol. 94, No. 4. – P. 1258–1263.
12. Looer G.P. Dielectric properties of heterogeneous mixtures // Thesis, University of Leiden, 1956. – 94 p.
13. Steennis E.F., Kreuger F.H. Water treeing in polyethylene cables // IEEE Trans. on Electrical Insulation. – 1990. – Vol. 25, Is. 5. – P. 989–1028.
14. Tanaka T., Fukuda T. Residual strain and water trees in XPPE and PE cables // Annual report of the Conference on Electrical insulation and dielectric phenomena. – Commission on Sociotechnical Systems, National Research Council, National Academy of Sciences. – Printing and Publishing Office, USA, Washington, 1975. – 706 p. (Pp. 239–249).
15. Torquato S. Random heterogeneous materials. Microstructure and macroscopic properties. – N.Y.–Berlin–Heidelberg: Springer-Verlag, 2002. – 702 p.
16. Tuncer E. Dielectric mixtures: importance and theoretical approaches // IEEE Electrical Insulation Magazine. – 2013. – Vol. 29, Is. 6. – P. 49–58.

УДК 621.315.2 : 004.94

**І.М. Кучерява**, докт. техн. наук

Інститут електродинаміки НАН України,  
пр. Перемоги, 56, Київ-57, 03680, Україна

#### **Підходи до моделювання електричного поля в поліетиленовій ізоляції з мікророзмірними включеннями**

*Шляхом комп'ютерного моделювання досліджено розподіл електричного поля в неоднорідному поліетиленовому матеріалі з мікророзмірними включеннями різної форми – сферичними, еліпсоїдними, без каналів та з'єднані каналами, що заповнені водою, а також у вигляді спрощеного триїнга з трьома гілками. Чисельне моделювання проведено у дво- і тривимірному випадках. Використано модель ефективного композиційного середовища та підходи до розрахунку гетерогенних діелектриків як матричних або статистичних сумішей. Бібл. 16, рис. 7.*

**Ключові слова:** поліетиленова ізоляція, мікророзмірні водні включення, композиційний діелектрик, ефективна діелектрична проникність, матричні та статистичні суміші, комп'ютерне моделювання.

**I.M. Kucheriava**

Institute of Electrodynamics of the National Academy of Sciences of Ukraine,  
Peremohy, 56, Kyiv-57, Ukraine

#### **Approaches to modeling of electric field in polyethylene insulation with microinclusions**

*The distributions of electric field in heterogeneous polyethylene material with micro-sized inclusions of different shape (spherical, ellipsoidal shape, without channels and with connecting channels, in the form of simplified water tree having three branches) are studied by computer modeling. The numerical simulations are carried out for two- and three-dimensional models. The concept of effective composite medium and the approaches to computations of heterogeneous dielectrics as matrix or statistical mixtures are used. References 16, figures 7.*

**Key words:** polyethylene insulation, micro-sized inclusions, composite dielectric, effective permittivity, matrix and statistical mixtures, computer modeling.

Надійшла 15.04.2016

Received 15.04.2016