

## ЗАВИСИМОСТЬ ВОЗМУЩЕНИЙ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ПОЛЯ В ДИЭЛЕКТРИКЕ ОТ ДИСПЕРСНОСТИ БЛИЗКО РАСПОЛОЖЕННЫХ ВОДНЫХ МИКРОВКЛЮЧЕНИЙ

М.А.Щерба<sup>1</sup>, канд.техн.наук, С.С. Розискулов<sup>1</sup>, О.В. Васильева<sup>2</sup>

<sup>1</sup> – Институт электродинамики НАН Украины,

пр. Победы, 56, Киев-57, 03680, Украина, e-mail: [m.shcherba@gmail.com](mailto:m.shcherba@gmail.com)

<sup>2</sup> – ПАО "Завод "Южкабель", ул. Автогенная, 7, Харьков, 61099, Украина.

*Определены закономерности возмущения электрического поля в диэлектрике в зависимости от дисперсности его близко расположенных водных микровключений. Выявлено, что дробление микровключений (т.е. увеличение их количества при неизменном суммарном объеме) увеличивает напряженный объем диэлектрика. К увеличению напряженного объема может приводить также изменение конфигурации как совокупности ("облака") близко расположенных включений, так и каждого включения по отдельности. В частности, увеличение напряженного объема диэлектрика происходит при вытягивании водных микровключений и уменьшении расстояний между ними. Наибольшее возмущение электрического поля возникает при объединении вытянутых включений в одну проводящую структуру вдоль поля. Таким образом, показано, что для твердого диэлектрика появление совокупности мелких водных включений с точки зрения деградации его структуры является более опасным, чем нескольких крупных. Библиограф. 5, рис. 3.*

**Ключевые слова:** электрическое поле, диэлектрик, возмущение, напряженный объем, водные микровключения.

Деградация твердого диэлектрика в электрическом поле (ЭП), возмущенном проводящими водными микровключениями, обсуждалась в работах [1–5]. В них отмечалось, что появление таких включений может значительно усиливать электрическое поле в отдельных микрообластях диэлектрика и вызывать в них пороговые электрофизические процессы, способствующие их разрушению и пробое. В работах [3, 5] показано, что контроль лишь максимальных размеров включения, как это предлагается в действующих рекомендациях, является недостаточным для оценки степени возмущения ЭП. Кроме определения максимальной напряженности поля, целесообразно определять также величину областей напряженного объема диэлектрика, то есть областей, в которых напряженность ЭП  $E$  хоть и меньше критического значения  $E_{кр}$  пробоя, но выше определенной допустимой величины  $E_{доп}$  для данного материала ( $E_{кр} > E > E_{доп}$ ) [5].

Водные микровключения могут возникать в сшитой полиэтиленовой изоляции в результате распада агентов сшивки изоляции и диэлектрофореза молекул воды в электрическом поле. Под действием электрических сил и в зависимости от конфигурации микропор и микротрещин диэлектрика появившийся в нем объем жидкости может образовывать несколько крупных микровключений (размерами десятки и сотни микрон) или распределиться по большему объему в виде мелкодисперсных капель (микронных размеров). Для точного анализа деградационных процессов в твердом диэлектрике следует определить закономерности возмущения электрического поля в зависимости от дисперсности водных микровключений в его объеме.

**Целью работы** является определение закономерностей возмущения электрического поля в диэлектрике в зависимости от дисперсности его близко расположенных водных микровключений при неизменном суммарном объеме появляющейся жидкости.

Физико-математическая постановка задачи формулировалась в квазиэлектростатическом приближении для неферромагнитного, линейного и изотропного диэлектрика с водными микровключениями, в котором возникает неоднородное, гармоническое электрическое поле частотой 50 Гц [3, 5]. Для исключения зависимости функций от времени использовался метод комплексных амплитуд. Расчеты, как и в работах [3–5], проводились методом конечных элементов для скалярного электрического потенциала  $\dot{\phi}$ , согласно уравнению

$$\operatorname{div} [-(\gamma + i\omega\varepsilon_0 \dot{\varepsilon}) \operatorname{grad} \dot{\phi}] = 0. \quad (1)$$

Расчетное уравнение дополнялось граничными условиями на границах раздела сред

$$\dot{\phi}_1 = \dot{\phi}_2, \quad (\gamma_1 + i\omega\varepsilon_0 \dot{\varepsilon}_1) \partial \dot{\phi}_1 / \partial n = (\gamma_2 + i\omega\varepsilon_0 \dot{\varepsilon}_2) \partial \dot{\phi}_2 / \partial n \quad (2)$$

и условиями Дирихле и Неймана на границах расчетной области. На верхней и нижней границе расчетной области задавались значения потенциалов (условия Дирихле), на боковых границах – равенство нулю производных потенциалов по нормали к поверхности (условия Неймана), что соответствует отсутствию токов в этих направлениях.

На рис. 1 показаны результаты математического моделирования ЭП в твердом диэлектрике вблизи одного, трех, пяти сферических и пяти эллипсоидальных микровключений. Диаметр наибольшего микровключения  $d = 50$  мкм, объем жидкости в нем –  $6,5 \cdot 10^{-14}$  м<sup>3</sup>. Диаметры включений в облаке принимались меньше 50 мкм и выбирались таким образом, чтобы суммарный объем жидкости оставался равным  $6,5 \cdot 10^{-14}$  м<sup>3</sup>. Расстояние  $l$  между микровключениями на рис. 1 равнялось половине их диаметра ( $l = d/2$ ). В дальнейшем в работе рассмот-

рены микровключения на расстояниях от  $l = 2d$  до  $l = 0$  (соприкосновение включений).

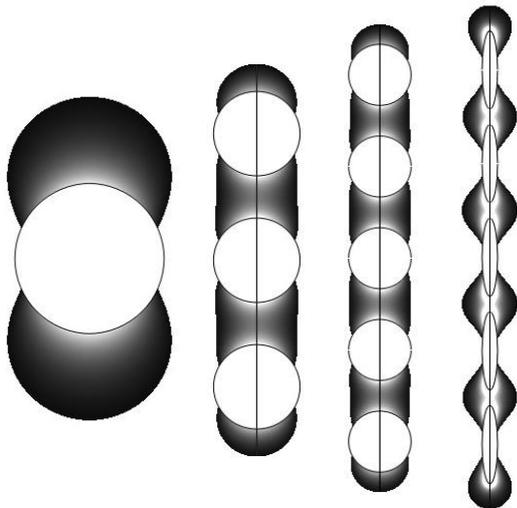


Рис. 1

Если микровключения в облаке расположены на близких взаимных расстояниях, то есть на расстояниях меньших их размеров, то наблюдается дополнительное усиление ЭП. Оно возникает за счет взаимодействия наведенных электрических зарядов на близко расположенных полюсах включений и подробно описано в работах [3, 5].

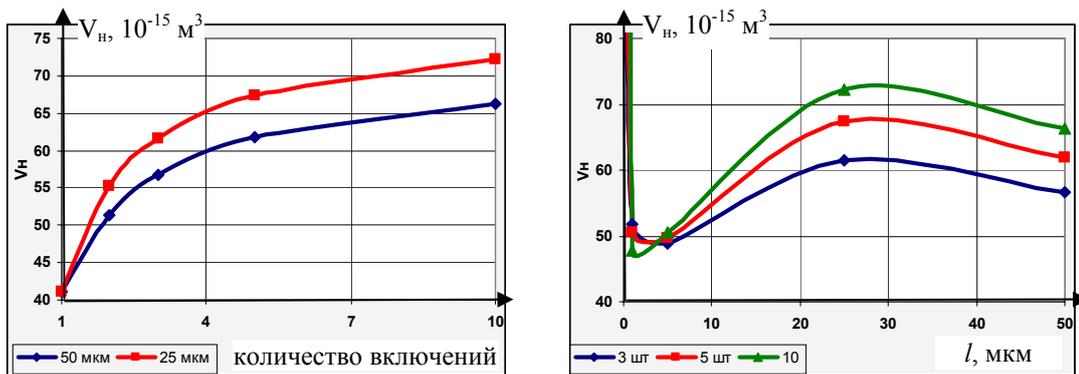


Рис. 2

Наибольшее усиление поля в диэлектрике возникает возле микровключений, расположенных вдоль силовых линий ЭП [3-5]. В данной работе проведен анализ усиления поля при произвольном пространственном расположении включений (то есть при разных углах  $\alpha$  между осью, соединяющей центры включений, и направлением внешнего поля). Результаты численного эксперимента показали, что лишь при углах  $\alpha$  от 0 до 45 градусов наблюдается дополнительное усиление поля из-за взаимодействия наведенных поверхностных зарядов (рис. 3). Таким образом, из всех возможных конфигураций двух включений лишь в половине случаев будет возникать дополнительное усиление.

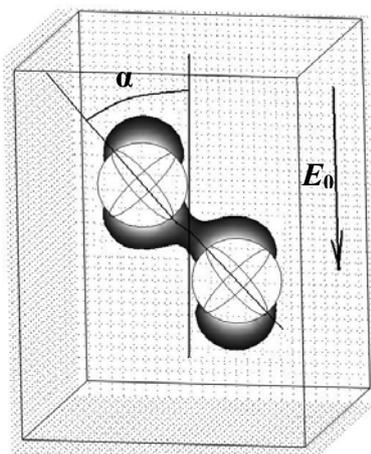


Рис. 3

На микровключения, близко расположенные вдоль ЭП, действуют электрические силы взаимного притяжения, что обосновано в работе [5]. Расстояния между такими включениями со временем могут уменьшаться. На рис. 2, б показаны графики зависимости величины напряженного объема  $V_n$  от расстояния  $l$  между тремя, пятью и десятью микровключениями. Расстояние  $l$  изменялось от  $l = d$  (диаметр сферы) до  $l = d/50$  (1 мкм и менее). Как видно из рис. 2, при уменьшении величины  $l$  от  $l = d$  (диаметр сферы) до  $l = d/2$  величина  $V_n$  возрастает в 1,5 и более раза. При достижении максимального значения и дальнейшем сближении включений величина напряженного объема уменьшается, что хорошо согласуется с результатами, приведенными в работе [5].

Как отмечалось в работах [1, 3, 4], проводящие микровключения под действием электрических сил во внешнем поле могут вытягиваться вдоль его силовых линий. Такая деформация сферических включений в эллипсоидальные может увеличивать величину  $V_n$  в 4 раза и более. Численный расчет показал, что вытягивание каждого из близко расположенных водных микровключений облака увеличивает величину напряженного объ-

ема в 10 и более раз, что существенно увеличивает вероятность возникновения пороговых деградационных процессов в диэлектрике по истечении длительного времени. Расчет также показал, что наиболее опасным является соприкосновение включений и объединение их в одну проводящую структуру, что приводит к росту величины напряженного объема  $V_n$  в 15 раз и более.

**Выводы.** Определены закономерности возмущения электрического поля в зависимости от дисперсности водных микровключений в объеме твердого диэлектрика.

К факторам, вызывающим рост величины напряженного объема изоляции, относятся:

- увеличение количества включений, вызывающее увеличение общего напряженного объема до 2 раз;
- уменьшение расстояний между включениями, которое может увеличить  $V_n$  до 2 раз;
- вытягивание включений вдоль поля в эллипсоиды с увеличением  $V_n$  до 10 раз;
- объединение водных включений в одну проводящую структуру с увеличением  $V_n$  до 15 раз.

Таким образом, наличие совокупности близко расположенных микровключений с размерами намного меньшими, чем допустимые стандарты, для твердого диэлектрика являются более опасными, чем наличие одного или нескольких крупных включений такого же суммарного объема.

1. Dissado L.A. Understanding Electrical Trees in Solids: From Experiment to Theory // IEEE Trans. on DEI. – 2002. – Vol. 9. – Pp. 483–497.

2. Shimizu N., Tanaka H. Effect of Liquid Impregnation on Electrical Tree Initiation in XLPE // IEEE Trans. DEI. – 2001. – Vol. 8. – Pp. 239–243.

3. Щерба А.А., Подольцев А.Д., Кучерявая И.Н. Электромагнитные процессы в кабельной линии с полиэтиленовой изоляцией на напряжение 330 кВ // Технічна електродинаміка. – 2013. – № 1. – С. 9–15.

4. Резинкина М.М., Щерба А.А., Гринченко В.С., Резинкина К.О. Расчетный выбор параметров электромагнитных экранов сложной пространственной конфигурации // Технічна електродинаміка. – 2012. – № 1. – С. 10–16.

5. Щерба М.А. Закономерности распределения электрического поля в диэлектрической среде при изменении размеров и формы проводящих включений // Технічна електродинаміка. – 2012. – № 2. – С. 19–20.

УДК 621.3.01:537.212

#### ЗАЛЕЖНІСТЬ ЗБУРЕНЬ ЕЛЕКТРИЧНОГО ПОЛЯ В ДІЕЛЕКТРИКУ ВІД ДИСПЕРСНОСТІ БЛИЗЬКО РОЗТАШОВАНИХ ВОДНИХ МІКРОВКЛЮЧЕНЬ

М.А.Щерба<sup>1</sup>, канд.техн.наук, С.С.Розіскулов<sup>1</sup>, О.В.Васильєва<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Інститут електродинаміки НАН України, пр. Перемоги, 56, Київ-57, 03680, Україна, e-mail: [m.shcherba@gmail.com](mailto:m.shcherba@gmail.com)

<sup>2</sup>ПАО "Завод "Південкабель", вул. Автогенна, 7, Харків, 61099, Україна.

Визначено закономірності збурення електричного поля в діелектрику в залежності від дисперсності його близько розташованих водних микровключень. Виявлено, що подібнення микровключень (тобто збільшення їхньої кількості при незмінному сумарному об'ємі) збільшує напружений об'єм діелектрика. До збільшення напруженого об'єму може призводити також зміна конфігурації як сукупності ("хмари") близько розташованих включень, так і кожного включення окремо. Зокрема збільшення напруженого об'єму діелектрика відбувається при витягуванні водних микровключень і зменшенні відстаней між ними. Найбільше збурення електричного поля виникає при об'єднанні витягнутих включень в одну провідну структуру вздовж поля. Таким чином, показано, що для твердого діелектрика поява сукупності дрібних водних включень з точки зору деградації його структури є більш небезпечною, ніж декількох великих. Бібл. 5, рис. 3.

**Ключові слова:** електричне поле, діелектрик, збурення, напружений об'єм, водне микровключення.

#### DEPENDENCE OF ELECTRIC FIELD DISTURBANCES IN DIELECTRICS ON THE DISPERSION OF CLOSELY SPACED WATER MICRO-INCLUSIONS

M.A.Shcherba<sup>1</sup>, S.S.Roziskulov<sup>1</sup>, O.V.Vasilyeva<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Institute of Electrodynamics National Academy of Science of Ukraine, pr. Peremohy, 56, Kyiv-57, 03680, Ukraine.

e-mail: [m.shcherba@gmail.com](mailto:m.shcherba@gmail.com)

<sup>2</sup>Yuzhcable Works PJSC, Avtohenna str. 7, Kharkiv, 61099, Ukraine.

The regularities of electric field disturbances in dielectric, depending on the dispersity of its closely spaced water micro-inclusions were defined. It was revealed that fragmentation of micro-inclusions (i.e. when its number increases at invariable its summarized volume) increases the tensed volume of dielectric. The configuration change both closely spaced inclusions aggregate ("cloud") and each inclusion individually can also result in increase the tensed volume. In particular the increase of dielectric tensed volume occurs when water micro-inclusions are stretched and distances between them are decreased. The greatest disturbance of the electric field occurs when stretched inclusions coalesce in one conducting structure along the field. Thus, it is shown that the appearance of small water inclusions aggregate for solid dielectric is more dangerous in the view of its structure degradation than a few large inclusions. References 5, figures 3.

**Keywords:** electric field, dielectric, disturbance, tensed volume, micro-inclusions.

1. Dissado L.A. Understanding Electrical Trees in Solids: From Experiment to Theory // IEEE Trans. on DEI. – 2002. – Vol. 9. – Pp. 483–497.

2. Shimizu N., Tanaka H. Effect of Liquid Impregnation on Electrical Tree Initiation in XLPE // IEEE Trans. DEI. – 2001. – Vol. 8. – Pp. 239–243.

3. Shcherba A.A., Podoltsev A.D., Kucheriavaia I.N. Electromagnetic processes in the polyethylene insulated cable line for voltage 330 kV. // Tekhnichna Elektrodynamika. – 2013. – № 1. – Pp. 9–15. (Rus)

4. Rezinkina M.M., Shcherba A.A., Grinchenko V.S., Rezinkina K.O. Estimated range of electromagnetic shields parameters of complex spatial configuration computational selection // Tekhnichna Elektrodynamika. – 2012. – № 1. – Pp. 10–16. (Rus)

5. Shcherba M.A. The laws of electric field distribution in a dielectric medium when changing conducting inclusions sizes and shape. // Tekhnichna Elektrodynamika. – 2012. – № 2. – Pp. 19–20. (Rus)

Надійшла 10.02.2014