

М. А. ЩЕРБА, канд. техн. наук, Институт электродинамики НАН Украины, Киев.

ВЛИЯНИЕ ХАРАКТЕРА РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ВЛАГИ В СПЭ ИЗОЛЯЦИИ КАБЕЛЕЙ НА ЭЛЕКТРОФИЗИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ ЕЕ ДЕГРАДАЦИИ

Введение. В связи с широким применением сшитой полиэтиленовой (СПЭ) изоляции электроэнергетического оборудования все на более высокие уровни рабочего напряжения усложняется задача обеспечения ее высокой надежности и длительного ресурса эксплуатации [1–7]. Например, увеличение толщины (т.е. радиуса) СПЭ изоляции высоковольтных силовых кабелей цилиндрической конструкции пропорционально кратности K повышения уровня напряжения их эксплуатации не может быть технологическим решением из-за увеличения объема и массы изоляции в K^2 раз [5]. Кроме этого, увеличение толщины твердой полимерной изоляции при неизменности технологии изготовления повышает ее структурную неоднородность, что уменьшает ее удельную электрическую прочность, а соответственно надежность и ресурс эксплуатации [4, 5, 12].

Одной из основных причин, которые ограничивают электрическую прочность СПЭ изоляции, считается появление в ней дефектов структуры и сторонних микровключений, возникающих в процессе изготовления и эксплуатации. В настоящее время при изготовлении и эксплуатации силовых кабелей со СПЭ изоляцией особое внимание уделяется появлению в ее локальных микрообъемах жидких (водяных) микровключений, которые могут иметь различные размеры, формы, ориентации, взаимные расположения и удельные плотности [2, 4–6, 8–10]. Водяные нано- и микровключения в локальные микрообъемы твердой СПЭ изоляции могут проникать извне – в результате нарушения продольной и/или поперечной герметичности конструкций кабелей, или возникать внутри изоляции – из-за разложения ее структуры и/или агентов ее сшивки. Удельная проводимость водяных включений на 14–16 порядков больше, чем СПЭ изоляции, поэтому они по сравнению с материалом изоляции могут считаться токопроводящими (т.е. обладающими электронной проводимостью).

В результате проявления диэлектрофореза в неоднородном электрическом поле (ЭП) внутри изоляции силового кабеля цилиндрической формы [5] проводящие водяные нано- и микровключения будут втягиваться в микрообласти повышенной напряженности поля, образуя там "облако" близко расположенных водяных нано- и микровключений, а затем более крупные водяные образования разных форм и размеров, но преимущественно втянутых вдоль силовых линий ЭП [8–10]. Со временем такие водяные микрообразования могут становиться центрами зарождения и дальнейшего развития водяных триингов с последующими частичными и полными разрядами СПЭ изоляции [5, 8].

Поскольку обеспечить абсолютное невозникновение проводящих жидких включений внутри твердой СПЭ изоляции высоковольтных кабелей при их изготовлении и эксплуатации практически невозможно, то актуальным является проведение исследований, направленных на выявление условий появления наиболее опасных образований проводящих жидких микровключений и разработка рекомендаций для повышения надежности эксплуатации такой изоляции. При этом важно учитывать, что наиболее интенсивная деградация СПЭ изоляции происходит при комплексном (совместном) воздействии электрических, термических и механических процессов, возникающих в ней при действии сильных неоднородных переменных ЭП. Важно также для всех возможных диапазонов изменения электрических, термических и механических условий эксплуатации СПЭ изоляции установить главные (приоритетные) механизмы ее обратимой и необратимой деградации, на что и направлены исследования данной статьи.

В работах [5, 8, 12] обосновано, что проводящие микровключения в диэлектрической среде существенно усиливают электрическое поле у своих полюсов, расположенных вдоль поля, и создают области напряженных объемов (объемов изоляции с напряженностью ЭП выше допустимого значения). Превышение напряженности поля E предельного значения пробоя изоляции $E_{пр}$ может возбудить электрический пробой ее локальной области. При росте размеров областей напряженного объема V_n частота стохастических частичных электрических пробоев изоляции может увеличиваться и процессы деградации всей толщины изоляции ускоряться. С точки зрения возникновения электрофизических процессов старения твердого диэлектрика, наиболее опасными являются включения вытянутые вдоль силовых линий поля, а также группы близко расположенных включений и включения с водяными триингами на поверхности [5, 12].

В переменном ЭП на полюсе каждого жидкого проводящего микровключения из-за накопления поверхностного заряда возникают пульсирующие давления, которые с удвоенной частотой действуют на материал диэлектрика. Вблизи острых полюсов и остриев триингов наибольшие такие давления могут быть сопоставимы с механической прочностью СПЭ изоляции [8, 9].

В работах [8, 10] показано, что накопление влаги в СПЭ изоляции в виде множества близко расположенных микровключений малого размера – "облака" может быть опаснее, чем концентрация всей жидкости в одном включении большого размера, поскольку с ростом количества микровключений может увеличиваться как максимальная напряженность ЭП, так и количество локальных напряженных микрообластей, и общий напряженный объем в СПЭ изоляции вблизи полюсов проводящих микровключений.

В публикациях [15, 20] обосновано, что проводимость полиэтилена носит в основном ионный характер, который зависит от концентраций собственных диссоциированных ионов и примесей, а их перемещение можно представить, как перемещение заряженных частиц в периодических потенциальных ямах. В такой модели при возникновении внешнего ЭП высота потенциального барьера в направлении его силовых линий уменьшается, и вероятность прыжка носителя заряда в соседнюю яму, а также вероятность получения им достаточного количества энергии для перепрыгивания через несколько ям возрастают. Таким образом, нелинейное увеличение тока проводимости $J_{пр}$ при линейном росте напряженности ЭП E можно описать увеличением удельной проводимости $\sigma(E)$ согласно закону Ома: $J_{пр} = \sigma(E) \cdot E$. Величина напряженности поля E , необходимая для проявления таких нелинейных свойств, должна составлять от 20 кВ/мм и выше.

Подобные значения E могут достигаться у полюсов проводящих микровключений, сильно вытянутых вдоль ЭП, у остриев водяных трингов, а также между близко расположенными проводящими включениями. Кроме этого, в работе [15] показано, что вследствие миграционной поляризации, на границе раздела полиэтилен – вода может накапливаться объемный заряд, который может дополнительно усиливать напряженность ЭП в близлежащих областях диэлектрика.

Поскольку в работе [10] проведен анализ распределения ЭП в СПЭ изоляции вблизи совокупности водяных микровключений только в линейном допущении, то целесообразно провести исследования при учете ее нелинейных свойств в сильном ЭП.

Целью работы является расчет и анализ распределения электрического поля в сшитой полиэтиленовой изоляции возле "облака" близко расположенных водяных микровключений различной конфигурации с учетом ее нелинейных свойств.

Постановка задачи. Анализировалось распределение ЭП в слое СПЭ изоляции толщиной 0,5 мм вблизи токопроводящей жилы силового кабеля напряжением 330 кВ. Напряженность E_{Δ} на расстоянии Δ от поверхности полупроводящего слоя жилы кабеля определялась согласно уравнению $E_{\Delta} = \frac{U}{(R_1 + \Delta) \ln(R_2/R_1)}$ [1, 16] и

при $\Delta < 5$ мм средняя напряженность поля $E_{ср}$ равнялась 10–13 кВ/мм. К рассматриваемому слою изоляции прикладывалось синусоидальное напряжение амплитудой $\Delta\phi = 5-7,5$ кВ и частотой 50 Гц. В этом характерном слое предполагалось наличие "облака" близко расположенных водяных микровключений сферической формы. Расчетная область изоляции имела кубическую форму со стороной 500 мкм (см. рис. 1), а радиус микровключений задавался в зависимости от их количества, так чтобы суммарный объем жидкости оставался неизменным и соответствовал одиночному сферическому микровключению радиусом 50 мкм.

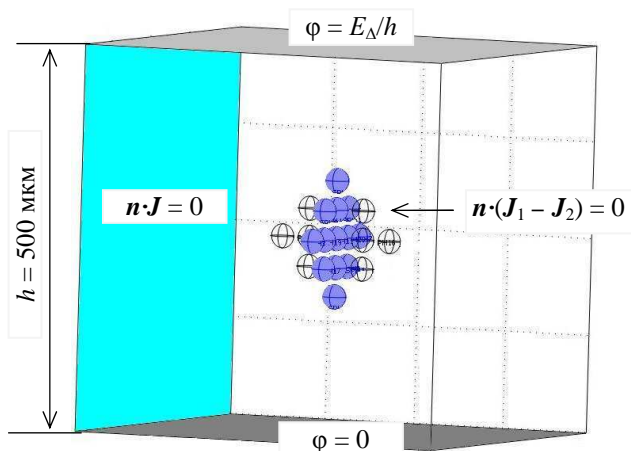


Рис. 1 Расчетная область изоляции с микровключениями

сшитого полиэтилена в слабом ЭП, e – заряд носителя, T – абсолютная температура, $k = 1,38 \cdot 10^{-23}$ Дж/К – постоянная Больцмана и a – расстояние между потенциальными энергетическими барьерами, которое для полиэтилена порядка 2 нм [20]. При этом во всем диапазоне исследуемых напряженностей ЭП диэлектрическая проницаемость СПЭ изоляции принималась неизменной, т.е. $\epsilon \approx \text{const}$.

Вектор плотности полного тока $J_{полн}(t)$ в изоляции с водяными микровключениями состоит из суммы векторов тока проводимости $J_{пр}(t)$ и тока смещения $J_{см}(t)$:

$$J_{полн}(t) = J_{пр}(t) + J_{см}(t) = \sigma(E)E(t) + \epsilon\epsilon_0 \frac{\partial E(t)}{\partial t} \quad (2)$$

Таким образом, при слабом ЭП основным током в локальной области изоляции является ток смещения $J_{см}(t)$, а в микровключениях – ток проводимости. При сильных ЭП учитывалась нелинейная зависимость проводимости $\sigma(E)$ в изоляции, что может существенно увеличить токи проводимости.

Из допущения о безвихревом характере ЭП был введен скалярный электрический потенциал $\phi(t)$, при этом $E(t) = -\text{grad } \phi(t)$.

Используя уравнение непрерывности полного тока (3):

СПЭ изоляция внутри расчетной области считалась изотропной, кусочно-однородной и нелинейной. Нелинейность учитывалась тем, что при превышении в изоляции напряженности ЭП выше критических значений ее удельная проводимость $\sigma(E)$ уже была не постоянной, как ранее, а задавалась функцией напряженности электрического поля E .

Уравнение для $\sigma(E)$, как и в работе [20], имело вид:

$$\sigma(E) = \sigma_{const} \left(\frac{2kT}{aeE(t)} \right) \text{sh} \left(\frac{aeE(t)}{2kT} \right), \quad (1)$$

где $\sigma_{const} = 10^{-14}$ См/м – постоянная проводимость

$$\operatorname{div} \mathbf{J}_{\text{полн}}(t) = 0, \quad (3)$$

и уравнение (2) было получено дифференциальное уравнение для расчета распределения потенциала $\varphi(t)$ и соответственно напряженности ЭП:

$$\operatorname{div} \left[\sigma(E) \operatorname{grad} \varphi(t) - \varepsilon \varepsilon_0 \frac{\partial \operatorname{grad} \varphi(t)}{\partial t} \right] = 0. \quad (4)$$

Уравнение (4) на верхней и нижней границах расчетной области (см. рис. 1) дополнялось условиями Дирихле (заданием значений потенциалов), а на боковых поверхностях – условиями Неймана (равенством нулю производных потенциалов по нормали к поверхности, соответствующим отсутствию нормальных токов). На границе СПЭ изоляция – водяное микровключение задавались условия равенства нормальной компоненты плотности полного тока и непрерывности потенциала.

Расчетный интервал времени Δt дискретизировался, а уравнение (4) с учетом нелинейной зависимости (1) решалось методом конечных элементов для каждого момента t_i . В каждой точке расчетного объема диэлектрика определялись величины $\varphi(t_i)$, $\mathbf{E}(t_i)$, $\mathbf{J}_{\text{пр}}(t_i)$, $\mathbf{J}_{\text{см}}(t_i)$ и $\mathbf{J}_{\text{полн}}(t_i)$. Расчет задачи начинался с нулевых начальных условий при $t = -0$. С момента времени $t = +0$ начинался переходный процесс до достижения установившегося режима при $U(t) = U_m \sin(314 t)$ кВ. Анализировались амплитудные значения величин φ_m , \mathbf{E}_m , $\mathbf{J}_{\text{пр}m}$, $\mathbf{J}_{\text{см}m}$ и $\mathbf{J}_{\text{полн}m}$ в установившемся режиме. Для сокращения обозначений в дальнейшем индекс "m" будет опускаться.

Результаты исследований. Проведенные расчеты показали, что максимальная напряженность ЭП E наблюдается у полюсов микровключений вдоль поля. Наличие близко расположенных включений вдоль его силовых линий существенно увеличивает значение E (в 15 раз и более), в то время как включения близко расположенные поперек поля уменьшают значение E (на 20–30%). Таким образом, "облако" из множества включений можно рассматривать, как близко расположенные цепочки включений ориентированные вдоль ЭП. Основное влияние на характер возмущения поля оказывает конфигурация собственных включений в цепочке, в то время как другие цепочки оказывают незначительное влияние на данную.

На рис. 2 показаны результаты расчета изменения максимальной напряженности ЭП E_{max} в СПЭ изоляции в центральной цепочке включений "облака". E_{max} наблюдается у полюсов центрального включения цепочки при их нечетном количестве или у близко расположенных полюсов двух центральных включений при четном. Величина E_{max} приведена в относительных единицах, деленная на E_{cp} – среднюю напряженность ЭП в расчетном объеме изоляции без включений. Расстояния между включениями также приведены в относительных единицах, деленные на радиус включений r . Количество включений могло увеличиваться при одновременном уменьшении их размеров (т.е. при дроблении включений в цепочке), также могли изменяться расстояния между ними.

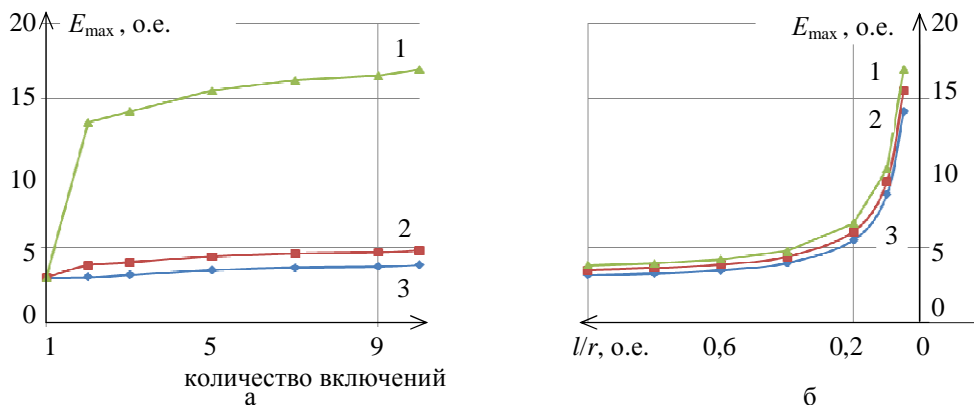


Рис. 2 Зависимости максимальной напряженности ЭП E_{max} : а – от количества включений в цепочке при неизменном расстоянии между ними; б – от расстояния между включениями при неизменном их количестве.

На рис. 2, а показана зависимость максимальной напряженности ЭП E_{max} в изоляции от количества включений в цепочке при неизменном расстоянии между ними. Так при расстояниях $0,5 r$ при дроблении включений величина E_{max} растет на 20%. На рис. 2, б показано изменение максимальной напряженности ЭП E_{max} при сближении включений в цепочке от расстояния между ними при неизменном количестве включений. Кривые 1, 2 и 3 соответствуют расчетам для цепочек из 3, 5 и 10 включений. Так величина E_{max} при сближении включений может возрастать в 15 раз и более.

Также в работе анализировалось изменение суммарного напряженного объема V_n изоляции при дроблении и сближении включений в "облаке" (см. рис. 3).

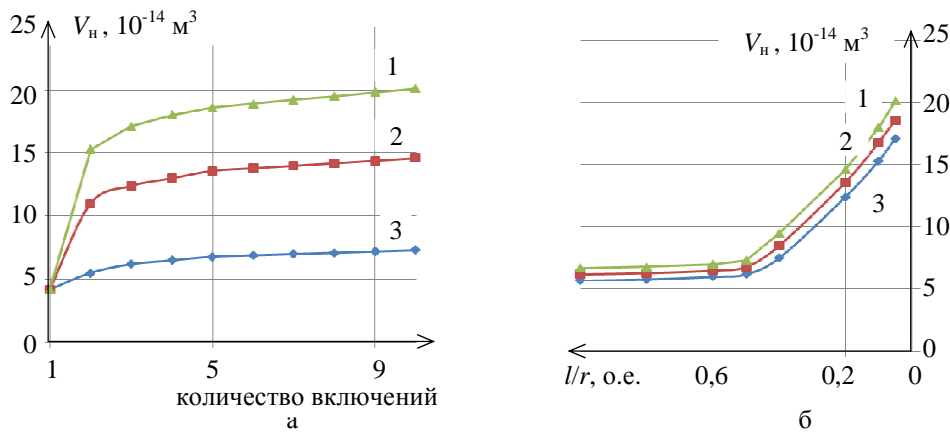


Рис. 3 Зависимости величины V_n в изоляции : а – от количества включений в цепочке при неизменном расстоянии между ними; б – от расстояния между включениями при неизменном их количестве.

На рис. 3, а показана зависимость в изоляции от количества включений в цепочке при неизменном расстоянии между ними. Так при дроблении включений величины V_n увеличивается в 2 раза и более при расстояниях между включениями более 0,1 их радиуса, и увеличивается в 3 раза и более при расстояниях менее 0,1 радиуса. На рис. 3, б показано изменение величины V_n при сближении включений в цепочке от расстояния между ними при неизменном количестве включений. Кривые 1, 2 и 3 соответствуют расчетам для цепочек из 3, 5 и 10 включений.

Описанные выше усиления ЭП можно объяснить тем, что при дроблении микровключений в "облаке" его протяженность вдоль поля увеличивается. Если предположить что между микровключениями сохраняются одинаковые расстояния, то размеры "облака" вдоль силовых линий поля увеличиваются в 5 раз и более при его конфигурации близкой к сферической и в 10 раз и более при расположении включений преимущественно вдоль электрического поля.

Расчет величин E_{max} и V_n и $J_{пр}$ при учете нелинейных свойств СПЭ изоляции в сильных электрических полях показал что при росте проводимости $\sigma(E)$ в областях наибольшего усиления ЭП величины E_{max} и V_n уменьшаются на 50% и менее. При этом плотности тока проводимости в некоторых локальных областях изоляции увеличиваются на 2–3 порядка, что способствует локальным перегревам, ухудшению электрической и механической прочности и вызывает ее ускоренное старение. Кроме того, в такие области за счет диэлектрфореза могут втягиваться микронные и субмикронные капли жидкости, которые, заполняя микропоры и микротрещины материала, способствуют возникновению водяных триингов. Прорастание водяных триингов между близко расположенными микровключениями может привести к их объединению в одну проводящую структуру, которая, как обсуждалось в работах [1,3], еще больше усиливает ЭП в объеме изоляции, интенсифицируя процессы ее старения.

Выводы. 1. Проведен расчет и анализ распределения электрического поля в локальном объеме сшитой полиэтиленовой изоляции при наличии в нем "облака" близко расположенных микровключений различной конфигурации. Анализ показал, что дробление микровключений (увеличение их количества и уменьшение размеров при неизменном суммарном объеме жидкости в изоляции) может вызывать увеличение суммарного напряженного объема изоляции в 2 раза и более при расстояниях между включениями более 5 мкм, и к увеличению в 3 раза и более при расстояниях менее 5 мкм. При этом величина напряженности электрического поля в диэлектрических промежутках между включениями возрастает в 15 раз и более.

2. Дробление водяных микровключений приводит к увеличению размеров "облака" вдоль силовых линий поля в 5 раз и более при его конфигурации близкой к сферической и в 10 раз и более при расположении включений преимущественно вдоль поля. Возле полюсов каждого из включений в изоляции создаются области повышенной напряженности поля, в которые со временем втягиваются микронные и субмикронные капли воды. В совокупности с пульсирующими давлениями на материал диэлектрика, создаются условия для возникновения и прорастания водяных триингов с поверхности включений в направлении объединения элементов "облака" в одну цельную проводящую структуру.

3. Учет нелинейных свойств СПЭ изоляции в сильных электрических полях, а именно зависимости ее удельной проводимости от напряженности электрического поля позволяет учесть рост плотности тока проводимости в изоляции на 2–3 порядка, что способствует локальным перегревам, ухудшению электрической и механической прочности и вызывает ее ускоренное старение уже преимущественно за счет механизмов термодегradации, а не электродеградации.

Список литературы: 1. Золотарев В.М. Решение проблемы создания отечественных электротехнологических комплексов производства кабелей энергетического назначения напряжением до 330 кВ // Вісн. НТУ "ХПІ". – 2009. – № 39. – С. 50–63. **2.** Кри С.Х. Новые материалы для производства кабелей высокого напряжения / Кри С.Х., Гессенс Т., Кьелквист Е.Б., Мендельсон А., Гау И. // Кабели и провода. – 2009. – № 1 (314). – С. 26–30. **3.** Мещанов Г.И. Кабели на напряжение 10–500 кВ: состояние и перспективы развития (анализ, прогноз, исследования) / Мещанов Г.И., Шувалов М.Ю., Каменский М.К., Образцов Ю.В., Овсиенко В.Л. // Кабели и провода. – 2008. – № 5 (312). – С. 32–38. **4.** Пешков И.Б. Кабели и провода. Основы кабельной техники. // М.: Энергоатомиздат, 2009. – 470 с. **5.** Шидловский А.К. Кабели с полимерной изоляцией на сверхвысокие напряжения. / Шидловский А.К., Щерба А.А., Золотарев В.М., Подольцев А.Д., Кучерявая И.Н. // К.: Ин-т электродинамики НАН Украины, 2013. – 550 с. **6.** Шувалов М.Ю. Анализ дефектов в изоляции силовых высоковольтных кабелей методами видеомикроскопии и микроэксперимента / Шувалов М.Ю., Ромашкин А.В., Овсиенко В.Л. // Электричество. – 2000. – № 5. – С. 49–57. **7.** Щерба А.А. Концепция электротехнологических систем для нанесения полимерной изоляции на жилы сверхвысоковольтных кабелей / Щерба А.А., Золотарев В.М., Подольцев А.Д. // Пр. Ін-ту електродинаміки НАН України. 36. наук. пр.– К.: ІЕД НАНУ: 2011. Вип. № 29. – С. 138–147. **8.** Щерба М.А. Возмущение электрического поля проводящими включениями в диэлектриках. – К.: Наш формат, 2013. – 224 с. **9.** Щерба М.А. Моделирование пондеромоторных сил влияния водяных микровключений и трингов на твердую изоляцию в переменном электрическом поле // Энергосбережение, энергетика, энергоаудит. – 2014. – Спец. вып. – № 9 (128). – Т.2 – С. 25–31 **10.** Щерба М. А. Зависимость возмущений электрического поля в диэлектрике от дисперсности близко расположенных водяных микровключений / М. А. Щерба, С. С. Розискулов, О. В. Васильева // Техн. електродинаміка. - 2014. - № 4. - С. 17-19. **11.** Boggs S.A. A rational consideration of space charge. *Electrical Insulation Magazine*, IEEE, 2004. 20(4): pp. 22-27. **12.** Dissado L.A. Electrical degradation and breakdown in polymers / Dissado L.A. and Fothergill J.C. // IEE Materials and Devices Series 9, 1992. – Peter Peregrinus. Ltd., London, UK. – 601 p. **13.** Kato T. et al. Characteristics of space charge behavior and conduction current in xlpe and annealed polyethylene under high DC stress // *Electrical Insulating Materials (ISEIM)*, Proceedings of 2014 International Symposium on. – IEEE, 2014. – С. 370-373. **14.** Kurihara, Takashi, et al. Measurement of Residual Charge using Pulse Voltages for Water Tree Degraded XLPE Cables Diagnosis. / Kurihara, Takashi, et al. // *IEEE Transactions On Dielectrics And Electrical Insulation*, 2014. 21.1: 321-330. **15.** Li Y. Space charge behavior under ac voltage in water-treed PE observed by the PEA method. *Dielectrics and Electrical Insulation* / Li Y., Kawai J. et al. // *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, 1997. – Vol. 4. – No. 1. – Pp. 52–57. **16.** Moreau E. The structure characteristics of water trees in power cables and laboratory specimens // Moreau E., Mayoux C., Laurent C., and Boudet A. // *IEEE Trans. Electr. Insulation*, 1993. Vol. EI-28, no. 1, pp. 54–64. **17.** O'Dwyer J.J. The theory of electrical conduction and breakdown in solid dielectrics. – Oxford: Clarendon Press, 1973. **18.** Ross R. Dielectric properties of water trees, in *Properties and Applications of Dielectric Materials*. / Ross R. and Megens M. // Proceedings of the 6th International Conference on. 2000. **19.** Saniyyati, C. N., et al. Investigation on propensity difference of water tree occurrences in polymeric insulating materials. *Power Engineering and Optimization Conference (PEOCO), 2014 IEEE 8th International*. **20.** Thomas A.J. A theoretical investigation for the development of a water tree dielectric response model. / Thomas A.J. and Saha T.K. // *IEEE Conf. Electr. Insul. Dielectr. Phenomena*. Kansas City, 2006. – Pp. 368–378.

Bibliography (transliterated): 1. Zolotarev V.M. The generation of electro-domestic production complexes cables energy purposes up to 330 kV // *Visn. NTU "KhPI"*. – 2009. - № 39. – P. 50-63. **2.** Kri S.H., Gessens T., Kelkvist E.B., Mendelson A., Gau I. New materials for the production of high-voltage cables // *Cables and wires*. – 2009. – № 1 (314). – P. 26-30. **3.** Meshchanov G.I., Shuvalov M.Y., Kamensky M.K., Obratzov Y.V., Ovsienko V.L. Cables for voltage 10-500 kV: state and prospects of development (analysis, forecast and research) // *Cables and wires*. – 2008. – № 5 (312). – P. 32-38. **4.** Peshkov I.B. Cables and wires. Fundamentals of cable technology. // М.: Энергоатомиздат, 2009. – 470 p. **5.** Shydlovski A.K., Shcherba A.A., Zolotarev V.M., Podoltsev A.D., Kucheryava I.N. Cables with polymeric insulation ultra-high voltage // К.: Institute of Electrodynamics National Academy of Sciences of Ukraine, 2013. – 550 p. **6.** Shuvalov M.Y., Romashkin A.V., Ovsienko V.L. Analysis of defects in the insulation of high-voltage power cables by video-microscopy and micro-experiments techniques // *Electricity*. – 2000. – № 5. – P. 49-57. **7.** Shcherba A.A., Zolotarev V.M., Podoltsev A.D., The concept of electro-deposition systems for polymer insulation on the wire UHV cables // *Pr. In-elektrodinamiki the NAS of Ukraine*. ST. Sciences. pr.- K.: IED NASU: 2011 № 29. – P. 138-147. **8.** Shcherba M.A. The electric field perturbation in dielectrics by conductive inclusions. – К.: Our format, 2013. – 224 p. **9.** Shcherba M.A. Modeling the influence of ponderomotive forces and water micro-treeing in the solid insulation on the electric field alternating // *Energy-saving, energy efficiency and conservation*. – 2014 – Special. Vol. – № 9 (128). – Vol.2 – P. 25-31 **10.** Shcherba M.A., Roziskulov S.S., Vasiliyeva O.V. Dependence of the electric field perturbation in the dielectric from dispersion of closely spaced water micro-inclusions // *Tech. elektrodinamika*. - 2014. - № 4. - pp 17-19. **11.** Boggs S.A. A rational consideration of space charge. *Electrical Insulation Magazine*, IEEE, 2004. 20(4): pp. 22-27. **12.** Dissado L.A. Electrical degradation and breakdown in polymers / Dissado L.A. and Fothergill J.C. // *IEE Materials and Devices Series 9*, 1992. – Peter Peregrinus. Ltd., London, UK. – 601 p. **13.** Kato T. et al. Characteristics of space charge behavior and conduction current in xlpe and annealed polyethylene under high DC stress // *Electrical Insulating Materials (ISEIM)*, Proceedings of 2014 International Symposium on. – IEEE, 2014. – С. 370-373. **14.** Kurihara, Takashi, et al. Measurement of Residual Charge using Pulse Voltages for Water Tree Degraded XLPE Cables Diagnosis. / Kurihara, Takashi, et al. // *IEEE Transactions On Dielectrics And Electrical Insulation*, 2014. 21.1: 321-330. **15.** Li Y. Space charge behavior under ac voltage in water-treed PE observed by the PEA method. *Dielectrics and Electrical Insulation* / Li Y., Kawai J. et al. // *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, 1997. – Vol. 4. – No. 1. – Pp. 52–57. **16.** Moreau E. The structure characteristics of water trees in power cables and laboratory specimens // Moreau E., Mayoux C., Laurent C., and Boudet A. // *IEEE Trans. Electr. Insulation*, 1993. Vol. EI-28, no. 1, pp. 54–64. **17.** O'Dwyer J.J. The theory of electrical conduction and breakdown in solid dielectrics. – Oxford: Clarendon Press, 1973. **18.** Ross R. Dielectric properties of water trees, in *Properties and Applications of Dielectric Materials*. / Ross R. and Megens M. // Proceedings of the 6th International Conference on. 2000. **19.** Saniyyati, C. N., et al. Investigation on propensity difference of water tree occurrences in polymeric insulating materials. *Power Engineering and Optimization Conference (PEOCO), 2014 IEEE 8th International*. **20.** Thomas A.J. A theoretical investigation for the development of a water tree dielectric response model. / Thomas A.J. and Saha T.K. // *IEEE Conf. Electr. Insul. Dielectr. Phenomena*. Kansas City, 2006. – Pp. 368–378.

Поступила (received) 31.08.2015