

## ЭЛЕКТРОФИЗИЧЕСКАЯ ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ О РАСЧЕТЕ СИЛЬНОГО ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ПОЛЯ В ПОЛИЭТИЛЕНОВОЙ ИЗОЛЯЦИИ С УЧЕТОМ ЕЕ НЕЛИНЕЙНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК

**М.А. Щерба**, канд. техн. наук

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

*Описаны электрофизические процессы, возникающие в высоковольтной полиэтиленовой изоляции при локальном усилении низкочастотного электрического поля (ЭП) водными трипингами и другими проводящими микровключениями выше пороговых значений. Показано, что в таком случае из-за миграционной поляризации изоляции на границе с проводящим микровключением может накапливаться объемный заряд, достаточный для повышения вероятности "прыжка" носителей заряда изоляции между потенциальными ямами. Если напряженность ЭП превышает пороговое значение, то диэлектрическая проницаемость и удельная проводимость изоляции становятся функционально зависимыми от напряженности ЭП и могут измениться на несколько порядков. Причем с усилением поля удельная плотность тока в изоляции сначала увеличивается линейно, а затем начинает увеличиваться по экспоненциальному закону, характерному для процессов ее пробоя. Представлены подходы, позволяющие учесть приведенные особенности и уточнить распределение электрического поля и силовых воздействий в твердой изоляции с проводящими микровключениями. Библиограф. 26, рис. 6, таблица.*

**Ключевые слова:** электрическое поле, напряженность, усиление, полиэтиленовая изоляция, нелинейность, проводимость, диэлектрическая проницаемость, плотность тока, давление.

**Вступление.** Возмущение электрического поля (ЭП) различными микродефектами в твердых диэлектриках может вызывать его существенное усиление в некоторых локальных объемах и быть причиной возникновения в них необратимых пороговых электрофизических процессов, в том числе и электрических пробоев [1–8]. Возле острия водных микротрипингов и в промежутках твердой изоляции между близко расположенными проводящими микровключениями разных размеров, форм и конфигураций максимальная напряженность ЭП, ее градиент и напряженный объем могут увеличиваться в десятки раз [6–8]. В объеме такой изоляции возникает большая неоднородность плотностей поляризационных процессов и полных токов, определяемых характеристиками поля, изоляции и ее включений [1–5].

Современная сшитая полиэтиленовая изоляция является неполярным твердым диэлектриком, длинные молекулы которого имеют сильные поперечные электрические (химические) связи, образующие прочную аморфно-кристаллическую структуру [6]. Внешнее ЭП в такой структуре вызывает в основном электронную упругую поляризацию, которая является наиболее быстрой (завершается за время  $< 10^{-15}$  с) и происходит практически без потерь электроэнергии на нагрев изоляции [1]. При такой поляризации электроны смещаются относительно положительно заряженных ядер молекул, образуя пары связанных друг с другом зарядов – упругие диполи. Диэлектрическая проницаемость диэлектрика с чисто электронной поляризацией численно равна квадрату показателя преломления света  $\epsilon = n^2$ , что характерно и для полиэтилена ( $n^2 = 2,31$ ,  $\epsilon = 2,3-2,4$ ).

Появление гармонического ЭП в объеме полиэтиленовой изоляции с проводящими микровключениями вызывает полный электрический ток с удельной плотностью  $J_{\text{полн}}$ , являющийся суммой плотностей токов смещения  $J_{\text{см}}$  и проводимости  $J_{\text{пр}}$ . При этом плотность тока смещения  $J_{\text{см}} = dD/dt$ , определяемая скоростью изменения вектора электрической индукции  $D = \epsilon_0 \epsilon E$ , где  $E$  – вектор напряженности ЭП,  $\epsilon$  – относительная диэлектрическая проницаемость материала изоляции,  $\epsilon_0$  – электрическая постоянная), является перемещением средних положений связанных носителей заряда относительно центров молекул. Поскольку в полиэтилене электроны связаны ковалентной связью типа  $sp^3$ -гибридизации, то они имеют низкую мобильность и при эксплуатационных температурах и напряженностях ЭП не вносят существенного вклада в удельную электропроводность материала.

Электропроводность полиэтилена носит в основном ионный характер и обусловлена передвижением ионов основного материала и примесей (при низких температурах перемещаются слабо закрепленные ионы, а при высоких – термически освобождаемые ионы решетки). Поэтому при напряженностях ЭП  $E > 10$  кВ/мм в полиэтилене появляется значительный ток проводимости, экспоненциально возрастающий с ростом напряженности поля [9, 10, 15].

Удельная объемная электропроводность воды также зависит от концентрации в ней примесей и диссоциированных собственных ионов. Поэтому плотность тока в воде линейно зависит от напряженности поля  $E$  при  $E < 10$  кВ/мм (т.е. в слабых ЭП), а при  $E > 10$  кВ/мм (т.е. в сильных ЭП) в результате увеличения концентрации ионов – плотность тока начинает возрастать так же экспоненциально, как и в полиэтиленовой изоляции [9, 10].

В то же время в полярной среде водных микровключений одновременно протекают электронная поляризация и дипольно-релаксационная неупругая поляризация, которая определяется переориентацией диполей в направлении поля (причем последняя связана с тепловыми потерями в отличие от электронной поляризации). Поэтому диэлектрическая проницаемость  $\epsilon$  полярной жидкости является тем большей, чем больше есть электрический момент диполей  $\mu = q \cdot l$  и чем больше число молекул в единице объема ( $\epsilon_{\text{воды}} \approx 80$ ).

Описанные свойства относятся к собственным электрическим параметрам материалов и не затрагивают вопросов их совокупного взаимодействия. Однако появление и развитие вшитой полиэтиленовой изоляции водных триингов существенно влияет на ее электрофизические свойства. Для точного расчета и выявления закономерностей возмущений внешнего ЭП в изоляции возле такого типа проводящих микровключений и для уточнения механизмов деградации твердой изоляции в сильном электрическом поле необходимо учитывать нелинейные характеристики как изоляции, так и ее включений.

**Целью данной работы является** развитие электрофизической и математической постановки задачи для учета зависимостей электрических свойств твердой полиэтиленовой изоляции от напряженности сильного электрического поля возле проводящих микродефектов, в частности острия разветвленных водных микротриингов и близко расположенных проводящих микровключений разных размеров, форм и конфигураций.

**Накопление пространственного заряда вследствие межфазной поляризации.** Измерения, проведенные в работах [12, 17], показали, что под воздействием внешнего ЭП в полиэтилене возле острия ветвей водного триинга возможно существенное накопление пространственного (объемного) заряда (ПЗ). В работе [17] обосновывается, что такой заряд вызывается межфазной (миграционной) поляризацией, которая возникает на границе сред, имеющих разные электрические свойства. В частности, такая поляризация может быть обусловлена движением свободных зарядов (электронов или положительных и отрицательных ионов) и их дальнейшим закреплением на поверхностях с различными значениями проводимости и диэлектрической проницаемости, в частности, на границе твердый диэлектрик – вода. Она наблюдается в области низких частот внешнего ЭП и связана с потерями электрической энергии. Доказательством того, что процесс связан именно с межфазной поляризацией (а не с инъекцией электронов или ионной диссоциацией), является линейная зависимость между величиной плотности пространственного заряда  $\rho$  и приложенным напряжением  $U$ , которая хорошо прослеживается при очень низком напряжении.

Для расчета величины накопленного пространственного заряда используем одно из уравнений Максвелла и закон сохранения полного тока [4, 15]:

$$\nabla \cdot \mathbf{D} = \nabla \cdot (\epsilon \mathbf{E}) = \rho; \quad \nabla \cdot \mathbf{J} = \nabla \cdot \left[ \sigma \mathbf{E} + \frac{\partial \mathbf{D}}{\partial t} \right] = 0. \quad (1)$$

Если диэлектрик с проводящими дефектами в сильном неоднородном ЭП будет иметь пространственно неоднородные диэлектрическую проницаемость  $\epsilon$  и проводимость  $\sigma$ , тогда из приведенных уравнений целесообразно получить линейное дифференциальное уравнение первого порядка [12]:

$$\rho(t) = \sigma E_0 \cdot \nabla(\epsilon / \sigma) \cos \omega t - \frac{\epsilon}{\sigma} \frac{\partial \rho(t)}{\partial t}. \quad (2)$$

Если напряженность  $E$  приложенного ЭП считать косинусоидным с амплитудным значением  $E_0$  (т.е. если  $E = E_0 \cdot \cos \omega t$ ), то, используя метод интегрирующего множителя, в качестве решения дифференциального уравнения (2) можно получить уравнение [12]

$$\rho = \nabla \left( \frac{\varepsilon}{\sigma} \right) \frac{\varepsilon E_0}{1 + \omega^2 \left( \frac{\varepsilon}{\sigma} \right)^2} \left[ \frac{\sigma}{\varepsilon} \cos \omega t + \omega \sin \omega t - \frac{\sigma}{\varepsilon} e^{-\frac{\sigma}{\varepsilon} t} \right]. \quad (3)$$

Кусочно-линейная среда с описанными свойствами показана на рис. 1. Ее область водного триинга имеет диэлектрическую проницаемость  $\varepsilon_1$  и удельную проводимость  $\sigma_1$ , а область полиэтиленовой изоляции –  $\varepsilon_2$  и  $\sigma_2$ .

В уравнении (3) присутствует оператор-градиент, действующий на отношение диэлектрической проницаемости  $\varepsilon$  к удельной проводимости  $\sigma$ . На межфазной границе величина удельной проводимости  $\sigma$  уменьшается от  $1 \cdot 5 \cdot 10^{-8}$  до  $1 \cdot 10^{-14}$  (См/м), а относительная проницаемость от 80 до 2,3 [16], поэтому основным фактором, влияющим на накопление пространственного заряда, является изменение проводимости, а не диэлектрической проницаемости.



Рис. 1

Используя экспериментальные и теоретические результаты, полученные в работе [12], можно отметить следующее:

- большинство пространственного заряда накапливается на острие водного триинга;
- при увеличении количества влаги в полиэтиленовой изоляции плотность распределенного в ее объеме ПЗ увеличивается;
- при высокой частоте приложенного напряжения плотность пространственного заряда становится низкой, и эта тенденция усиливается при низком содержании влаги;
- величина ПЗ прямо пропорциональна приложенному напряжению;
- полярность пространственного заряда такая же, как и электрода, от которого растет водный триинг.

Возникновение пространственного заряда на границе диэлектрик–триинг дополнительно усиливает возмущенное ЭП возле острия ветвей триинга. В работах [16, 17, 20] показано, что величина напряженности ЭП в результате такого усиления может достигать пороговых значений, при которых модель, допускающая постоянные значения проницаемости  $\varepsilon$  и проводимости  $\sigma$ , будет давать неточный результат. Но прежде чем рассматривать зависимости величин удельной проводимости  $\sigma$  и диэлектрической проницаемости  $\varepsilon$  полиэтиленовой изоляции от величины напряженности  $E$  электрического поля надо ответить на вопрос, действительно ли величины возникающего пространственного заряда в изоляции могут быть достаточными для ее усиления до пороговой величины.

Экспериментальное измерение величины пространственного электрического заряда, накопленного в полимерной изоляции на границе диэлектрик–токопроводящая среда возможно с применением известного метода "защищенной иглы". Применение указанного метода в работе [6] показало, что в изоляции возле кончика иглы может образовываться заряд плотностью около  $3500 \text{ Кл/м}^3$  (см. рис. 2 а).

Перемещение ионов и вакансий в твердой изоляции под действием ЭП можно представить как движение заряженных частиц в периодических потенциальных ямах. Характерной плотностью потенциальных ям глубиной до 1 эВ в объеме полимерного диэлектрика считается порядка  $4 \cdot 10^{25}$  ям/м<sup>3</sup>. Плотность заряда  $3500 \text{ Кл/м}^3$  соответствует количеству около  $2 \cdot 10^{22}$  зарядов в 1 м<sup>3</sup>. Таким образом, чтобы поглощать или высвобождать  $3500 \text{ Кл/м}^3$ , полиэтиленовая изоляция должна иметь около 0,05 % своих потенциальных ям пустыми и 0,05 % полными. При этом в ямах будет находиться электрический заряд около  $10^{-10}$  Кл. Напряженность ЭП при таком количестве заряда будет достигать значений около 20 кВ/мм, достаточных для изменения удельной проводимости и диэлектрической проницаемости полиэтилена.

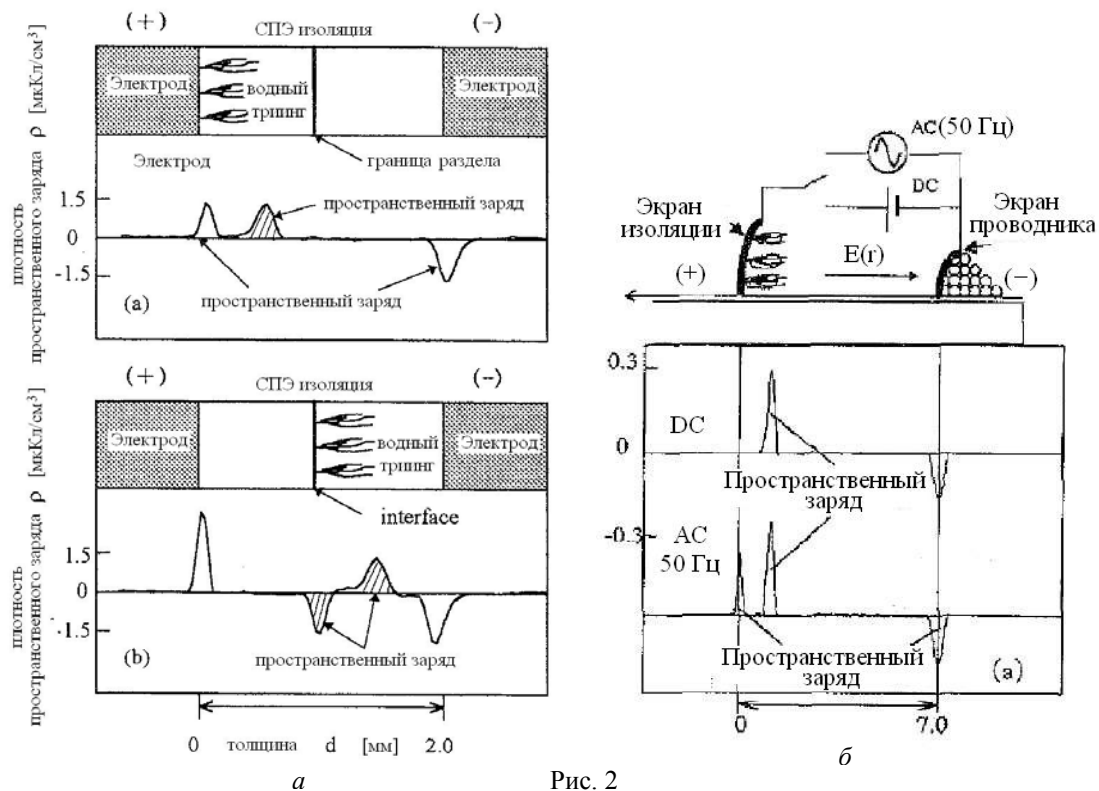


Рис. 2

В работах [2, 3] для измерения плотности пространственного заряда  $\rho$  на острие разветвленного водного триинга использовали импульсно-электроакустический (ИЭА) метод. На рис. 2 б показан полученный в работе [3] характерный профиль пространственного заряда в СПЭ изоляции, деградированной водным триингом. Для количественного расчета ПЗ согласно уравнению (3) в этой работе примем, что толщина изоляционного слоя составляет 6 мм, длина водного триинга – 3 мм, площадь межфазной поверхности – 1,5 мм<sup>2</sup>, а приложенное напряжение более 12 кВ. Проведенный расчет показал, что величина накопленного заряда может составлять около  $10^{-10}$  Кл. Накопления такого заряда достаточно, чтобы на расстояниях около 100 мкм от острия водного триинга возникало усиление напряженности ЭП до значений более 20 кВ/мм – предела линейных свойств полиэтиленовой изоляции [6]. При увеличении размеров водного триинга и/или приложенного напряжения такое расстояние может также увеличиваться.

Анализ результатов, отраженных на рис. 2, показывает, что в полиэтиленовой изоляции возле триингов возникают области локализации пространственного заряда, причем наибольшие его плотности наблюдаются на острие каналов триингов. Локальное усиление ЭП, вызванное накоплением пространственного заряда на острие водных триингов, может быть достаточным для изменения величин удельной электропроводимости и диэлектрической проницаемости в близко расположенных локальных объемах СПЭ изоляции. В таком случае указанные характеристики полиэтиленовой изоляции являются функциями от величины напряженности ЭП в указанных локальных объемах изоляции.

Анализ пороговых электрофизических процессов. В отличие от воды, для которой характерна плавная переориентация диполей с большими степенями, ориентация или смещение зарядов в полиэтилене происходит в ограниченных дискретных пределах ("прыжках" в соседние потенциальные ямы). Ионная проводимость полиэтилена обусловлена внутренним нарушением его структуры или точечными дефектами кристаллической решетки, которые можно описать двумя моделями. Согласно модели Френкеля ионы, получая достаточную энергию, покидают нормальные положения в решетке и попадают в пространство между закрепленными ионами решетки (т.е. в междоузлия) [1–3, 5, 20]. При тепловом возбуждении такие междоузельные ионы, преодолевая потенциальные барьеры, "перепрыгивают" из одного междоузельного равновесного положения в другое, реализуя протекание электрического тока. Если к полиэтилену приложено внешнее ЭП, то вероятность "прыжка" в направлении поля является наибольшей. Согласно модели Шотки дефекты образуются в результате удаления равного числа анионов и катионов из "нормальных" узлов решетки [1–3, 5, 20]. По-

сколькx из соседних "нормальных" узлов ионы перемещаются в незанятые узлы, то при наличии ЭП последовательные перемещения ионов в его направлении реализуют протекание электрического тока.

Таким образом, перемещение ионов и вакансий в твердой изоляции под действием ЭП можно представить как движение заряженных частиц в периодических потенциальных ямах (рис. 3). В отсутствие внешнего ЭП ион (вакансия) совершает периодические колебания с частотой  $\nu_0$  в пределах потенциальной ямы и при приобретении энергии, достаточной для преодоления потенциального барьера, переходит в соседнее положение равновесия [1–3, 5, 17, 20]. Вероятность такого перехода в единицу времени определяется выражением  $\omega = \nu_0 \exp(-U/kT)$ , где  $U$  – высота потенциального барьера.

При наличии внешнего электрического поля напряженностью  $E$  потенциальная энергия иона изменяется на величину  $eEx$ , поэтому высота потенциального энергетического барьера в направлении действия поля уменьшится (см. рис. 4), а в противоположном направлении увеличится на величину  $eEa/2$  (где  $a$  – расстояние между двумя соседними положениями равновесия).

В работах [4, 7] приведен вывод уравнения для результирующей удельной проводимости твердого диэлектрика при учете изменения вероятности "прыжка" носителя электрического заряда в приложенном сильном электрическом поле:

$$\sigma(E) = \sigma_0 \left( \frac{2kT}{eEa} \right) \sinh \left( \frac{eEa}{2kT} \right), \quad (4)$$

где  $\sigma_0 = 10^{-14}$  См/м – постоянная удельная проводимость сшитого полиэтилена в слабом электрическом поле;  $e$  – заряд носителя;  $a$  – расстояние между потенциальными энергетическими ямами, которое составляет длину порядка 2 нм [9].

Аналогичный подход можно применить для вывода уравнения функциональной зависимости степени поляризации материала диэлектрика от напряженности ЭП, поскольку поляризация является проявлением указанных "прыжков" только на более короткие расстояния, по сравнению с процессами проводимости ("прыжков" на дальние расстояния).

В случае поляризации полиэтилена "прыжки" носителей заряда в соседние потенциальные ямы можно рассматривать как дипольную ориентацию, а уравнение для поляризации

$$\mathbf{P} = (\varepsilon - \varepsilon_0) \mathbf{E} = u \boldsymbol{\mu}, \quad (5)$$

где  $u$  – количество диполей в поле  $E$ ;  $\mu$  – средний дипольный момент.

Согласно результатам работы [17], средний дипольный момент от "прыжка" носителей заряда в случае двумерной потенциальной ямы, приведенной на рис. 3, можно выразить как

$$\boldsymbol{\mu} = \frac{\sum_{i=1}^N q_i d_i}{u} = \frac{(f_f - f_r) ea}{(f_f + f_r) ea} = \frac{ea \sinh \left( \frac{eEa}{2kT} \right)}{\cosh \left( \frac{eEa}{2kT} \right)}, \quad (6)$$

где  $f_f$  – вероятность прыжка электрона в направлении ЭП;  $f_r$  – вероятность прыжка в противоположном направлении;  $q$  – заряд носителя;  $d$  – расстояние между дипольными зарядами. В урав-

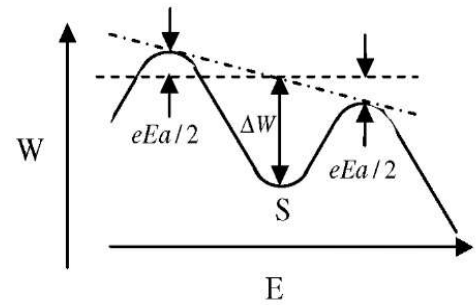


Рис. 3

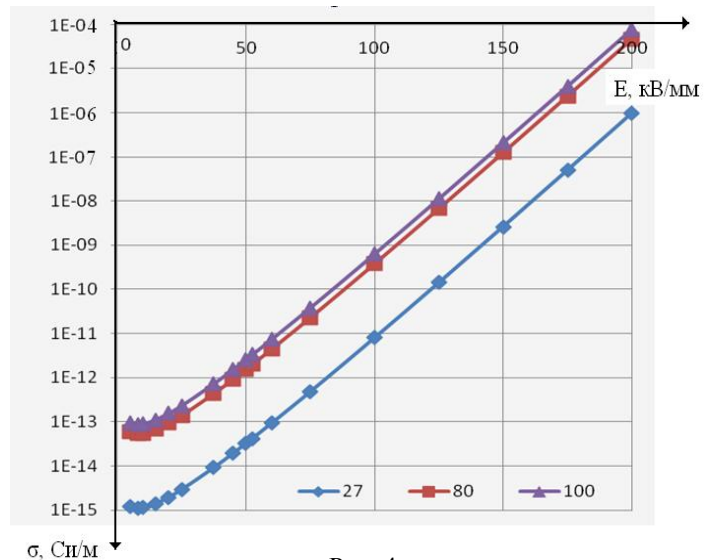


Рис. 4

нении использованы допущения, что все потенциальные ямы находятся на расстоянии  $a$  друг от друга ( $d = a$ ), и все носители заряда, участвующие в поляризации, являются электронами ( $q = e$ ).

Из уравнений (5) и (6) диэлектрическая проницаемость может быть выражена как

$$\varepsilon = \varepsilon_0 \left( \frac{2kT}{eaE} \right) \sinh \left( \frac{eaE}{2kT} \right). \quad (7)$$

**Результаты численного эксперимента.** На основании полученных функциональных зависимостей параметров твердой СПЭ изоляции от величины напряженности ЭП проведен численный расчет возмущений, возникающих в ней вблизи острия разветвленного водного триинга. Как и в работах [6–8], при расчетах допускалось, что диэлектрическая среда является кусочно-однородной, имеющей, в частности, гетерогенное проводящее микровключение – водный микротриинг на поверхности водного сферического микровключения. Внешнее электрическое поле принималось гармоническим, низкочастотным с одинаковой фазой во всех точках среды. Полагалось также, что в СПЭ изоляции принимать допущение  $\partial \mathbf{B} / \partial t \approx 0$  (где  $\mathbf{B}$  – вектор индукции магнитного поля). Это позволяет не учитывать взаимную связь между электрическим и магнитным полями, упрощая расчеты параметров ЭП.

Были рассмотрены два варианта решения задачи:

- с учетом зависимости значений удельной проводимости  $\sigma$  и диэлектрической проницаемости  $\varepsilon$  полиэтилена от величины напряженности  $E$  электрического поля и
- при предположении, что значения  $\sigma$  и  $\varepsilon$  являются неизменными коэффициентами, т.е. без учета зависимости значений  $\sigma$  и  $\varepsilon$  от величины напряженности  $E$ .

При учете нелинейных зависимостей удельной проводимости  $\sigma$  и диэлектрической проницаемости  $\varepsilon$  диэлектрика расчетное уравнение для скалярного электрического потенциала  $\varphi$  будет иметь вид

$$\Delta \varphi + \nabla \varphi \frac{\nabla \varepsilon}{\varepsilon} - \nabla \left( \frac{\varepsilon}{\sigma} \right) \frac{E_0}{1 + \omega^2 \left( \frac{\varepsilon}{\sigma} \right)^2} \left[ \frac{\sigma}{\varepsilon} \cos \omega t + \omega \sin \omega t - \frac{\sigma}{\varepsilon} e^{-\frac{\sigma}{\varepsilon} t} \right]. \quad (8)$$

Зависимости проводимости  $\sigma$  и проницаемости  $\varepsilon$  учитываются согласно уравнениям (4) и (7).

Вектор плотности полного тока  $\mathbf{J}_{\text{полн}}$  представлен в виде суммы векторов токов проводимости  $\mathbf{J}_{\text{пр}}$  и токов смещения  $\mathbf{J}_{\text{см}}$  в диэлектрике и проводящем включении с водным триингом, записанной в виде

$$\mathbf{J}_{\text{полн}} = \mathbf{J}_{\text{пр}} + \mathbf{J}_{\text{см}} = \sigma \mathbf{E} + \frac{\partial \mathbf{D}}{\partial t} = -\sigma \nabla \varphi - \varepsilon \frac{\partial \nabla \varphi}{\partial t}. \quad (9)$$

Если же изменения распределения потенциала  $\varphi$  из-за нелинейности свойств среды можно считать пренебрежимо малыми, то задачу рационально решать с применением метода комплексных амплитуд, как в работах [6–8]. Расчетное уравнение для скалярного электрического потенциала  $\dot{\varphi}$  в таком случае может описываться уравнением

$$\nabla \cdot [ -(\sigma + i\omega \varepsilon_0 \dot{\varepsilon}) \nabla \varphi ] = 0, \quad (10)$$

а вектор плотности полного тока  $\dot{\mathbf{J}}_{\text{полн}}$  определяться из уравнения

$$\dot{\mathbf{J}}_{\text{полн}} = -(\sigma + i\omega \varepsilon_0 \dot{\varepsilon}) \nabla \varphi. \quad (11)$$

Уравнения (8)–(11) дополняются условиями на границе раздела сред проводник–диэлектрик для электрических потенциалов и их производных по направлению нормали  $\mathbf{n}$  к поверхности границы:

$$\varphi_1 = \varphi_2; \quad (12)$$

$$(\sigma_1 + i\omega \varepsilon_0 \varepsilon_1) \partial \varphi_1 / \partial n = (\sigma_2 + i\omega \varepsilon_0 \varepsilon_2) \partial \varphi_2 / \partial n. \quad (13)$$

Для получения единственного решения уравнения (8) на верхней и нижней поверхностях расчетной области дополнительно задавались условия Дирихле (значения потенциалов), а на боковых поверхностях – условия Неймана, согласно которым производная потенциалов по нормали к поверхности равна нулю, что соответствует отсутствию токов в этих направлениях. Расчеты проводились с применением численного метода конечных элементов.

Как и в работах [12, 15, 17], принималось допущение, что преобладающее влияние на возмущение ЭП и изменение удельной плотности полного тока в полиэтиленовой изоляции возле острия водного триинга оказывает изменение ее удельной проводимости  $\sigma$ , поэтому влиянием изменения диэлектрической проницаемости  $\epsilon$  полиэтилена при изменении величины  $E$  можно пренебречь.

Для учета функциональной зависимости  $\sigma(E)$  на основе уравнения (4) было получено уравнение, аналогичное уравнению, приведенному в работе [9]:

$$\sigma(E) = \frac{\exp[a - b/T] \sinh\left[\frac{kE}{T}\right]}{E} = \frac{\exp\left[2,79 - 6698/T + 1,24 \times 10^{-7} |E|\right]}{E}. \quad (14)$$

Отметим, что в уравнении (14) используются экспериментальные данные, приведенные в работе [9], поэтому оно является приближенным и дает достаточно точный результат для значений напряженности поля  $E < 8$  кВ/мм. Поскольку такие значения напряженности ЭП соответствуют локальным напряженным объемам, возникающим в СПЭ изоляции сверхвысоковольтных кабелей у острия водных триингов и между близко расположенными проводящими микровключениями разных размеров, форм и конфигураций [6–8], то применение этого уравнения представляет большой теоретический и практический интерес.

На рис. 4 показано изменение значений удельной проводимости  $\sigma$  СПЭ изоляции при трех значениях ее температуры, равных 27, 80 и 100 °С и изменении величины напряженности ЭП  $E$  от 8 до 200 кВ/мм. Полученные расчеты совпадают с аналитическими результатами Богса, представленными в работе [9], и результатами экспериментальных исследований Токоро, приведенными в работе [15].

В таблице приведены некоторые из аналитических расчетов Богса и результатов экспериментальных исследований Токоро значений удельной проводимости  $\sigma$  СПЭ изоляции, полученных при изменении величины напряженности поля  $E$  в полиэтиленовой изоляции от 37,5 до 60 кВ/мм и ее температуры  $T$  от 27 до 100 °С.

	$\Sigma(E)$ , См/м T = 27 °С	$\sigma(E)$ , См/м T = 80 °С	$\sigma(E)$ , См/м T = 90 °С	$\sigma(E)$ , См/м T = 100 °С	$\sigma(E)$ , См/м T = 27 °С	$\sigma(E)$ , См/м T = 80 °С	$\sigma(E)$ , См/м T = 90 °С
E, кВ/мм	Boggs	Boggs	Tokoro	Boggs	Tokoro	Boggs	Tokoro
37,5	$9,14 \times 10^{-15}$	$2,61 \times 10^{-13}$	$2,38 \times 10^{-13}$	$4,4 \times 10^{-13}$	$2,46 \times 10^{-13}$	$7,22 \times 10^{-13}$	$6,20 \times 10^{-13}$
45	$1,93 \times 10^{-14}$	$5,51 \times 10^{-13}$	$6,83 \times 10^{-13}$	$9,3 \times 10^{-13}$	$8,92 \times 10^{-13}$	$1,52 \times 10^{-12}$	$1,79 \times 10^{-12}$
52,5	$4,19 \times 10^{-14}$	$1,2 \times 10^{-12}$	$1,37 \times 10^{-12}$	$2,02 \times 10^{-12}$	$2,20 \times 10^{-12}$	$3,31 \times 10^{-12}$	$3,82 \times 10^{-12}$
60	$9,3 \times 10^{-14}$	$2,66 \times 10^{-12}$	$2,65 \times 10^{-12}$	$4,48 \times 10^{-12}$	$4,20 \times 10^{-12}$	$7,35 \times 10^{-12}$	$7,12 \times 10^{-12}$

Анализ результатов, приведенных на рис. 4 и в таблице, показывает, что при увеличении величины напряженности ЭП в полиэтилене у острия водного триинга до значений порядка 200 кВ/мм значение его удельной проводимости  $\sigma$  в близлежащих областях увеличивается на 10 порядков от значения  $\sigma_1 \approx 10^{-14}$  См/м до  $\sigma_2 \approx 10^{-4}$  См/м. Такое большое увеличение удельной проводимости СПЭ изоляции, с одной стороны, увеличивает в ее локальных объемах значение плотности полного электрического тока  $J_{\text{полн}}$ , а с другой стороны, уменьшает в них значение максимальной напряженности поля  $E_{\text{мах}}$ , напряженного объема  $V_n$ , электрических давлений и сил, которые будут исследованы в дальнейшем.

Для обоснования необходимости учета зависимости значений удельной проводимости  $\sigma$  СПЭ изоляции в областях сильного ЭП проведен численный расчет распределения удельной плотности полного тока  $J_{\text{полн}}$ , протекающего в ней возле водного микровключения с разветвленным триингом на поверхности, результаты которого отражены на рис. 5.

Согласно шкале, показанной справа на рис. 5, тонированные области в локальных объемах СПЭ изоляции возле водных микровключений с триингом на поверхности отражают результаты расчета, полученные без учета зависимости  $\sigma(E)$  (рис. 5 а), и результаты, полученные с учетом зависимости  $\sigma(E)$  (рис. 5 б).

На рис. 5 а отражены результаты расчета значений плотности полного тока  $J_{\text{полн}}$  при неизменном значении  $\sigma = 10^{-14}$  См/м, характерном для напряженностей ЭП в СПЭ изоляции



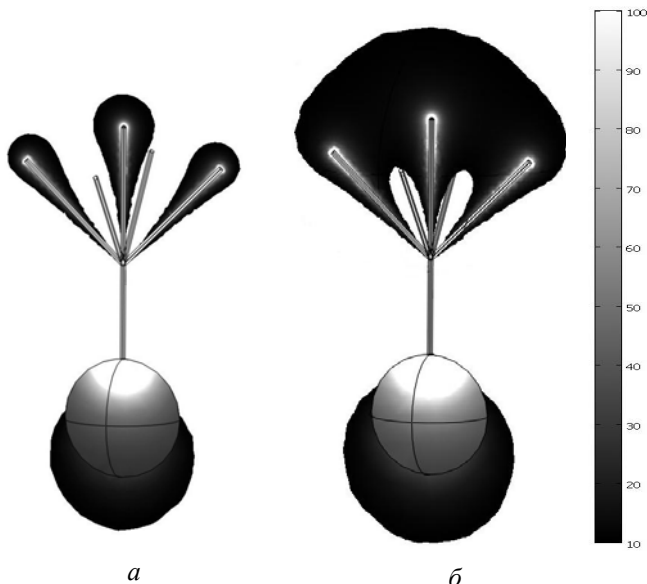


Рис. 5

$E < 8$  кВ/мм. На рис. 5 б приведены результаты расчета значений  $J_{\text{полн}}$  с учетом зависимости  $\sigma(E)$  согласно уравнению (8) при изменении значений  $\sigma$  от  $10^{-14}$  до  $10^{-9}$  См/м.

Максимальная плотность тока  $J_{\text{полн}}$  наблюдается у острия центральной ветви триинга и принимает значения  $300$  А/м<sup>2</sup> на рис. 5 а и  $480$  А/м<sup>2</sup> на рис. 5 б. Из размеров тонированных областей на рис. 5 видно, что при учете функциональной зависимости удельной СПЭ изоляции от напряженности сильного ЭП расчетная величина – значение плотности полного тока у острия триинга увеличивается на 60 %, что позволяет более точно учитывать процессы, вызывающие деградацию СПЭ изоляции.

Отметим, что при сложной конфигурации водных триингов плотности тока в их различных областях могут существенно отличаться. Причем из-за неоднородного распределения индуцированных зарядов на поверхности таких проводящих структур удельные плотности полного тока в локальных областях диэлектрика также могут существенно отличаться. Это будет вызывать неоднородную диссипацию в них электрической энергии и соответственно его неоднородную электротепловую деградацию. Аналогичное замечание справедливо и к областям близко расположенных токопроводящих микровключений различных размеров, форм и конфигураций, а также к изоляционным промежуткам между такими включениями и возле них.

**Появление нелинейной зависимости удельной плотности тока в СПЭ изоляции при сильном ЭП в ее объеме** в работе [17] проводится на основе "прыжковой модели" удельной проводимости СПЭ изоляции, согласно которой плотность полного тока в изоляции в соответствии с дифференциальным законом Ома пропорциональна напряженности ЭП при  $E < 8$  кВ/мм, а при  $E > 8$  кВ/мм начинает экспоненциально увеличиваться.

Это происходит потому, что в слабом ЭП носители зарядов термически активированы вне потенциальных ям изоляции глубиной около 1 эВ. В таком случае электрическое поле только увеличивает вероятность движения носителей зарядов в одном направлении. Но как только энергия носителей зарядов  $W_z$  при перемещении от одной потенциальной ямы к следующей становится сопоставимой с величиной энергии  $k_B T$  (где  $k_B$  – постоянная Больцмана, а  $T$  – абсолютная температура), то электрическое поле начинает заметно влиять на вероятность непопадания носителя в потенциальную яму.

При комнатной температуре  $k_B T \approx 0,025$  эВ, а расстояние между ловушками  $l \approx 2,8$  нм. Если напряженность ЭП  $E > 8$  кВ/мм, то энергия, передаваемая зарядам при их движении

между потенциальными ямами, становится сравнимой с величиной энергии  $k_B T$ . В таком случае линейная зависимость плотности тока от напряженности ЭП исчезает, а возникают функциональная зависимость  $\sigma(E)$  и экспоненциальная зависимость плотности полного тока в СПЭ изоляции от напряженности ЭП, представленные на рис. 6, где они показаны для двух полимерных материалов при температуре 45°C на основе данных измерений, приведенных в работе [11].

Для материала с энергией активации порядка 0,56 эВ нелинейная зависимость удельной плотности полного тока  $J_{\text{полн}}(E)$  начина-

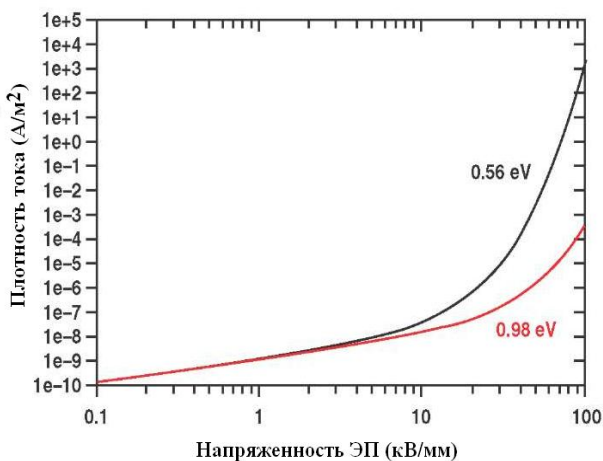


Рис. 6



лась при значениях напряженности электрического поля  $E$  от 8 до 10 кВ/мм.

Для материала с энергией активации 0,98 эВ (типичной для СПЭ изоляции, используемой в кабелях) зависимость плотности полного тока  $J_{\text{полн}}(E)$  начиналась при пороговых значениях  $E_{\text{пор}} \approx 20$  кВ/мм.

В работе [9] показано, что после превышения нелинейного порога плотности тока происходит быстрое увеличение пространственного заряда, а в работе [15] обосновано, что увеличение пространственного заряда уменьшает время электрического пробоя СПЭ изоляции.

**Выводы.** 1. Вследствие миграционной поляризации на границе раздела диэлектрик-водный триинг накапливается пространственный заряд, который дополнительно усиливает электрическое поле в локальных объемах твердого диэлектрика возле острия триингов, а также близко расположенных токопроводящих микровключений различных размеров, форм и конфигураций. После увеличения напряженности поля  $E$  выше порогового значения (для сшитого полиэтилена им является значение  $E_{\text{пор}} \approx 20$  кВ/мм) удельная проводимость  $\sigma$  и диэлектрическая проницаемость  $\varepsilon$  среды становятся функциями от значения напряженности  $E$ .

2. Для уточнения механизмов возмущения плотности полного тока и других электрических характеристик полиэтиленовой изоляции в сильных электрических полях (т.е. при  $E > E_{\text{пор}} \approx 20$  кВ/мм – предела линейных параметров сшитого полиэтилена) необходимо учитывать нелинейные зависимости  $\sigma(E)$  и  $\varepsilon(E)$ .

Физическим механизмом, объясняющим возникновение функциональных зависимостей  $\sigma(E)$  и  $\varepsilon(E)$ , является изменение вероятностей "прыжка" носителей заряда полиэтилена под действием электрического поля в периодических потенциальных ямах. Начиная с определенных значений напряженности поля, энергия, передаваемая им заряженным частицам при их движении между потенциальными ямами, становится сопоставимой с величиной энергии  $k_B T$  (где  $k_B$  – постоянная Больцмана, а  $T$  – абсолютная температура) и электрическое поле начинает заметно влиять на вероятность непопадания носителя зарядов в потенциальную яму.

3. При усилении электрического поля в полиэтиленовой изоляции возле острия водных триингов и близко расположенных микровключений ее удельная проводимость  $\sigma(E)$  изменялась от  $10^{-14}$  до  $10^{-9}$  См/м. Сравнение расчетных значений плотности полного тока в изоляции с учетом зависимости  $\sigma(E)$  и без нее показало различие значений на 60 %. Как видно, учет функциональной зависимости проводимости от напряженности поля позволяет точно рассчитать процессы, протекающие в СПЭ изоляции при ее деградации.

С ростом напряженности поля  $E$  в полиэтиленовой изоляции максимальная плотность тока  $J_{\text{полн}}$  у острия центральной ветви водного триинга сначала увеличивается линейно, а начиная с  $E > E_{\text{пор}} \approx 20$  кВ/мм – согласно экспоненциальному закону.

Автор статьи выражает благодарность д.т.н. Кучерявой И.Н., которая обратила внимание на важность проведения дополнительных исследований зависимости характеристик полиэтиленовой изоляции от напряженности сильного электрического поля.

1. Воробьев А.А., Приходько Н. Электрический пробой диэлектриков в неоднородном поле // Тр. Сиб. физ.-техн. ин-та. – 1936. – Т. 4. – Вып. 3. – С. 112–126.
2. Воробьев А.А., Воробьев Г.А. Электрический пробой и разрушение твердых диэлектриков. – М.: Высш. шк., 1966. – 224 с.
3. Иоффе А.Ф., Синельников К.Д., Гохберг Б.М. Высоковольтная поляризация в диэлектриках // Журн. Рус. физ.-хим. общ. Ч. Физическая. – 1926. – Т. 58. – Вып. 2. – С. 105–114.
4. Ландау Л.Д., Лифшиц Е.М. Электродинамика сплошных сред. – М.: Наука, 1980. – 560 с.
5. Сканава Г.И. Физика диэлектриков (область слабых полей). – М.: ГТТИ, 1949. – 500 с.
6. Шидловский А.К., Щерба А.А., Золотарев В.М., Подольцев А.Д., Кучерявая И.Н. Кабели с полимерной изоляцией на сверхвысокие напряжения. – К.: Наш формат, 2013. – 550 с.
7. Щерба М.А. Возмущение электрического поля проводящими включениями в диэлектриках. – К.: Наш формат, 2013. – 224 с.
8. Щерба М.А., Розискулов С.С., Васильева О.В. Зависимость возмущений электрического поля в диэлектрике от дисперсности близко расположенных водных микровключений // Техн. электродинамика. – 2014. – № 4. – С. 17–19.
9. Boggs S.A. A rational consideration of space charge // IEEE Electrical Insulation Magazine, 2004. – 20(4). – P. 22–27.
10. Boggs S.A. Semi-empirical High-field Conduction Model for Polyethylene and Implications Thereof // IEEE Trans. Dielectr. Electr. Insul. – 1995. – Vol. 2. – P. 97–106.

11. *Kurihara, Takashi et al.* Measurement of Residual Charge using Pulse Voltages for Water Tree Degraded XLPE Cables Diagnosis // IEEE Transactions On Dielectrics And Electrical Insulation. – 2014. – 21.1. – P. 321–330.
12. *Li Y. et al.* Space charge behavior under ac voltage in water-treed PE observed by the PEA method. Dielectrics and Electrical Insulation // IEEE Transactions on [see also Electrical Insulation, IEEE Transactions on]. – 1997. – 4(1). – P. 52–57.
13. *Montanari G.C., G. Mazzanti, F. Palmieri, G. Perego and S. Serra* Dependence of space-charge trapping threshold on temperature in polymeric DC cables in Proc. 2001 // IEEE Int. Conf. Solid Dielect., 2001. – P. 81–84.
14. *Moreau E., Mayoux C., Laurent C. and Boudet A.* The structure characteristics of water trees in power cables and laboratory specimens // IEEE Trans. Electr. Insulation. – 1993. – Vol. EI-28. – 1. – P. 54–64.
15. *O'Dwyer J.J.* The Theory of Electrical Conduction and Breakdown in Solid Dielectrics. – Oxford: Clarendon Press, 1973.
16. *Ross R. and Megens M.* Dielectric properties of water trees, in Properties and Applications of Dielectric Materials // Proceedings of the 6th International Conference, 2000.
17. *Thomas A. and Saha T.K.* A theoretical investigation for the development of a water tree dielectric response model // Proceedings of the IEEE Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena (CEIDP), 2006, Missouri, USA. – P. 369–372.
18. *Tokoro T., Nagao M. and Kosaki M.* High Field Dielectric Properties and ac Dissipation Current Waveforms of Polyethylene Film // IEEE Trans. EI. – Vol. 27, No. 3, June 1992. – P. 482–487.
19. *Saniyyati, C. N. et al.* Investigation on propensity difference of water tree occurrences in polymeric insulating materials // IEEE 8th International Power Engineering and Optimization Conference (PEOCO), 2014.
20. *Zeller H.R.* Noninsulation properties of insulation materials, in 1991 Annual Report of the Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena, 1991. – P. 19–47.

УДК 621.3.01:537.212

**М.А. Щерба**, канд. техн. наук

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

**Електрофізична постановка задачі про розрахунок сильного електричного поля в поліетиленовій ізоляції з урахуванням її нелінійних характеристик**

*Описано електрофізичні процеси, які виникають у високовольтній поліетиленовій ізоляції при локальному посиленні низькочастотного електричного поля (ЕП) водними триїнами та іншими провідними мікрровключеннями вище порогових значень. Показано, що в такому випадку через міграційну поляризацію ізоляції на межі з провідним мікрровключенням може накопичуватися об'ємний заряд, достатній для підвищення ймовірності "стрибка" носіїв заряду ізоляції між потенційними ямами. Якщо напруженість ЕП перевищує порогове значення, то діелектрична проникність і питома провідність ізоляції стають функціонально залежними від напруженості й можуть змінитися на кілька порядків. Причому з підсиленням поля питома щільність струму в ізоляції спочатку збільшується лінійно, а потім починає збільшуватися за експоненціальним законом, який характерний для процесів її пробую. Наведено підходи, що дають змогу врахувати особливості та уточнити розподіл електричного поля і силових впливів у твердій ізоляції з провідними мікрровключеннями. Бібл. 20, рис. 6, таблиця.*

**Ключові слова:** електричне поле, напруженість, підсилення, поліетиленова ізоляція, нелінійність, провідність, діелектрична проникність, щільність струму, тиск.

**M.A. Shcherba**

Institute of Electrodynamics of the National Academy of Sciences of Ukraine,  
Peremohy, 56, Kyiv-57, 03680, Ukraine

**The electrophysical problem statement of the strong electric field calculation in polyethylene insulation given its nonlinear characteristics**

*The electrical processes occurring in the highvoltage polyethylene insulation with local amplification of low-frequency electric field (EF) by water treeing and other conductive micro-inclusions above thresholds was described. It is shown that in this case due to the interfacial polarization in isolation at the boundary with conductive micro-inclusions space charge can accumulate, which is sufficient to increase "hop" of carriers probability in isolation between potential wells. If the EF strength exceeds the threshold, the insulation permittivity and the specific conductivity are functionally dependent on the intensity and can vary by several orders of magnitude. Moreover, with increasing field specific current density in isolation at first increases linearly, but then increases exponentially, which is characteristic of breakdown processes. The paper presents approaches, which takes into account discussed features and clarify the distribution of the electric field and force effects in the solid insulation with conductive micro-inclusions. References 20, figures 6, table.*

**Key words:** electric field, strength, gain, polyethylene insulation, nonlinearity, conductivity, dielectric constant, current density, pressure.

Надійшла 24.07.2014

Received 24.07.2014