

## ВЛИЯНИЕ НАПРЯЖЕННОСТИ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ПОЛЯ НА РАЗРУШЕНИЕ ПОВЕРХНОСТНОГО СЛОЯ ИЗОЛЯЦИОННОЙ КОНСТРУКЦИИ

*Представлені результати теоретичних і експериментальних досліджень процесів руйнування поверхневого шару електричної ізоляції при впливі імпульсами грозової перенапруги, показано їх вплив на ресурс ізоляційної конструкції, розглянуто причини появи водних трійнгів у поверхневих шарах полімерної ізоляції.*

*Представлены результаты теоретических и экспериментальных исследований процессов разрушения поверхностного слоя электрической изоляции при воздействии импульсами грозового перенапряжения, показано их влияние на ресурс изоляционной конструкции, рассмотрены причины появления водных трингов в поверхностных слоях полимерной изоляции.*

### АКТУАЛЬНОСТЬ ПРОБЛЕМЫ

Снижение веса и габаритов высоковольтного оборудования связано с необходимостью повышения рабочих напряженностей электрического поля в электрической изоляции, повышением температурного индекса применяемых изоляционных материалов, использованием новых теплостойких материалов. Электрическая прочность поверхностного слоя в десятки раз ниже пробивной прочности применяемых материалов и она в первую очередь определяет ресурс конструкции в целом.

Наличие примесей, дефектов в изоляции влияет не только на ее прочность, но и изменяет профиль силовых и эквипотенциальных линий картины электрического поля на поверхностном слое, что позволяет с помощью электроемкостных преобразователей изучать это явление.

При рассмотрении процессов развития поверхностного разряда необходимо учитывать влияние ряда факторов. Разряд происходит вдоль границы раздела сред твердого диэлектрика со слоями твердого, газообразного или жидкого диэлектриков. Каждая фаза развития разряда – корона, скользящий разряд, перекрытие – зависят от неоднородности электрического поля, соотношения нормальной и тангенциальной составляющих, вида диэлектрика и его диэлектрической проницаемости, внешних факторов.

Считают [1], что нормальная составляющая поля должна прижимать разряд к поверхности, замедляя его продвижение. Это усиливает термическое воздействие на диэлектрик, разогревая поверхность, тем самым, облегчая процесс перекрытия. По мнению автора [2] большое влияние на процесс поверхностного разряда оказывает концентрация зарядов на поверхности диэлектрика, что является причиной снижения пробивного напряжения. Перераспределение приложенного напряжения происходит также в случае образования между электродом и диэлектриком промежуточной среды (воздушное включение, влага), когда напряженность поля в диэлектрической среде обратно пропорциональна диэлектрической проницаемости включения. Это свидетельствует об определяющей роли в поверхностном разряде ионизационных процессов, условий формирования поверхностного объемного заряда.

### АНАЛИЗ СУЩЕСТВУЮЩИХ ИССЛЕДОВАНИЙ И ПУБЛИКАЦИЙ

В [1, 2] показано, что на начальное коронирование на поверхности электродов оказывает наличие микровыступов, неплотное прилегание электродов к поверхности диэлектрика. Из-за различия диэлектрических проницаемостей материала слоя диэлектрика и окружающей среды, а также воздушных и водных включений, создается местное увеличение напряженности электрического поля, которое приводит к ионизационным процессам и появлению начальных электронов. Кроме того, при малых зазорах между электродом и диэлектриком удаление газов и паров воды затруднено. Все это приводит к более интенсивному повреждению поверхности диэлектриков в предразрядной стадии вблизи места касания катода и диэлектрика.

Вопросам ионизации контактной зоны металлического электрода и контактирующего с ним диэлектрика посвящены работы, в которых рассмотрены вопросы создания источников электронов с использованием взрывной эмиссии микроострий. Показано, что, обладая малым временем взрыва, порядка нескольких десятков наносекунд, энергия электронов в пучке может достигать  $3 \cdot 10^6$  эВ и ток до  $5 \cdot 10^4$  А [3, 4]. Электронно-микроскопическое наблюдение острий показывает, что они содержат много тонких микроострий радиусом 0,1-1 мкм, на которых напряженность поля усиливается в десятки и более раз, что способствует процессу автоэлектронной эмиссии электронов.

В [5] показано, что при резких перенапряжениях на электродах у их поверхности возникнут сильные электрические поля, которые приведут к образованию стримера и лавины, т.е. к искровому пробою. Такой пробой, при котором высокая напряженность поля приложена к острию в течение наносекунд, не перекрывает разрядный промежуток. Образование искры подавляется или тормозится, если перенапряжение снимается до того, как стример пересек разрядный промежуток; отсюда и название такого процесса "незавершенные электрические разряды". Особенностью такого разряда является наличие намного больших токов и напряжения одновременно при соответствующих более высоких значениях температуры.

Анализируя перечисленные работы можно сделать вывод, что первопричиной разрушения диэлектрического материала в зоне "металлический электрод–диэлектрик" является автоэлектронная эмиссия и взрывная эмиссия, возникающие в зоне повышенной напряженности поля.

### МЕХАНИЗМ РАЗРУШЕНИЯ ПОВЕРХНОСТНОГО СЛОЯ ИЗОЛЯЦИИ

Одним из возможных механизмов разрушения поверхностного слоя диэлектрика в области контакта электрода с изоляционным материалом описан в [3]. Явления, предшествующие перекрытию изоляции, объясняют большой величиной предразрядного тока. Эмитируемые с вершины микровыступа автоэлектроны, проходя зону повышенной напряженности поля, получают ускорение  $\Delta U = E_a a$ , где  $a$  – высота выступа,  $E_a$  – напряженность электрического поля на расстоянии  $a$  от вершины микровыступа. Вблизи микровыступа электроны получают энергию порядка сотен электроновольт. Возникающие при ионизации положительные ионы втягиваются в середину электронного пучка и двигаются в направлении эмиттера, бомбардируя эмиттер, разогревая его, что ведет к увеличению первичного электронного тока. Это в свою очередь увеличивает интенсивность бомбардировки электронами диэлектрика, испаряется часть вещества диэлектрика, в зоне бомбардировки диэлектрика пучком образуется облако газов и паров, причем молекулы разлетаются по закону косинуса [7]. Электронный пучок, проходя через такое облако, производит ионизацию, и внутри пучка снова втягиваются положительные ионы, которые увеличивают электронный ток с эмиттера, разогревая последний, а также, нейтрализуя частично объемный отрицательный заряд пучка электронов. При определенных условиях этот процесс может быть кумулятивным, тогда происходит заметное повреждение поверхности диэлектрика при значительной величине измеряемого тока, что может закончиться расплавлением и испарением части микровыступа. Перекрытие по поверхности диэлектрика может наступить в том случае, если облако паров и газов заполнит межэлектродный промежуток и разряд развивается в этой среде.

Рассматривая возможный механизм повреждения диэлектрика вблизи катода, следует отметить, что в непосредственной близости от катода (в том месте, где зазор между катодом и поверхностью диэлектрика очень мал, т.е.  $l_n$  мало) повреждения диэлектрика более интенсивны. Это обстоятельство можно объяснить тем, что  $l_n$  по величине близко к величине микровыступов в этом месте. Кроме того, при малых зазорах между катодом и диэлектриком удаление молекул газов и паров затруднено. Комплекс этих факторов и приводит к более интенсивному повреждению поверхности диэлектриков в предразрядной стадии вблизи места касания катода и диэлектрика.

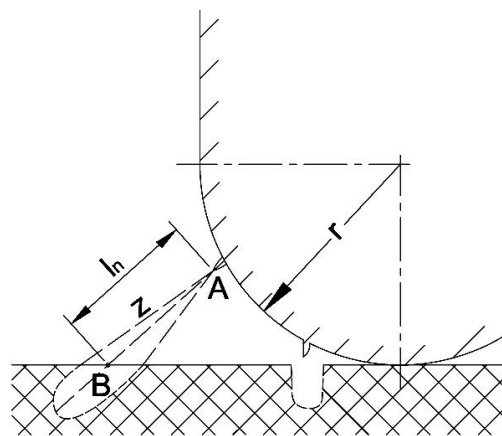


Рис. 1. Схема взаимодействия электронного пучка с диэлектриком

### АКТИВАЦИЯ ПОВЕРХНОСТНОГО СЛОЯ ПОЛИМЕРНОЙ ИЗОЛЯЦИИ

Свободные электроны, атомы и радикалы, ультрафиолетовое излучение являются активными компонентами плазмы, воздействующей на контактный слой полимера с электродом. Наличие коротких импульсов высокой напряженности поля и высокой температуры приводят к интенсивным плазмохимическим реакциям и воздействию ультрафиолетового излучения. Сам процесс активации длится миллисекунды, но этого времени достаточно, чтобы изменить свойства поверхностного слоя. Изменение химического состава тонкого слоя поверхности можно определить по изменению контактного угла смачиваемости капли влаги на поверхности активированного плазмой полимера. Взаимодействие с плазмой приводит к образованию полярных групп в поверхностном слое, росту поверхностной энергии полимера и как следствие к увеличению смачиваемости и величине адгезии к металлам и органическим веществам. В результате этого процесса гидрофильность слоя полиэтилена сохраняется до 12 месяцев. Активация поверхностного слоя в плазме сопровождается процессом разрушения поверхностного слоя и удалением при этом газообразных продуктов. Глубина прогрева материала  $\delta_c$  может быть представлена в виде [8]:

$$\delta_c = \frac{\lambda_c}{\rho_0 \nu C_{экр}} \ln \left[ 1 + \frac{C_{экр} (T_\omega - T^*)}{C_0 (T^* - T_0) + \Delta H^*} \right], \quad (1)$$

где  $\lambda_c$  – теплопроводность материала выше слоя разложения;  $\rho_0$  – плотность непрореагировавшего материала;  $\nu$  – линейная скорость перемещения поверхности за счет ее разрушения;  $C_{экр}$  – эквивалентная теплоемкость прореагировавшего слоя;  $C_0$  – теплоемкость полимера;  $T_\omega$  – температура разрушения;  $T^*$  – температура термического разложения;  $T_0$  – температура непрореагировавшего материала;  $\Delta H^*$  – тепловой эффект физико-химических превращений.

Наибольшая скорость уноса материала полимера происходит в кислородной среде и для полиэтилена составляет до  $0,42 \text{ мг/см}^2 \cdot \text{час}$ .

Данный процесс можно считать одним из основных при выяснении причин появления водных дендритов с поверхностного слоя изоляции. Процессы

выноса материала в зоне коронного и незавершенного коронного разрядов являются причиной появления микротрещин и зарождения водных дендритов в материале изоляции.

#### МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА РАЗРУШЕНИЯ ПОВЕРХНОСТНОГО СЛОЯ ИЗОЛЯЦИИ

Рассмотрим постановку задачи расчета электростатического поля, система уравнений для которого имеет вид:

$$\vec{\text{rot}} E = 0; \quad (2)$$

$$\vec{\text{div}} D = \rho; \quad (3)$$

$$\vec{D} = \varepsilon \vec{E}; \quad (4)$$

где  $\vec{E}$  – вектор напряженности электрического поля;

$\rho$  – объемная плотность свободных зарядов;  $\vec{D}$  – вектор индукции электрического поля;  $\varepsilon$  – диэлектрическая проницаемость среды.

На границе  $L^n$  раздела сред  $(n-1)$  и  $(n+1)$  с различными диэлектрическими проницаемостями векторы электрического поля должны удовлетворять следующим граничным условиям:

$$E_{\tau}^{n-1} = E_{\tau}^{n+1}, \quad (5)$$

$$D_n^{n-1} = D_n^{n+1}, \quad (6)$$

где  $E_{\tau}^{n-1}, E_{\tau}^{n+1}$  – касательные к границе раздела двух сред

компоненты вектора  $\vec{E}$ ;  $D_n^{n-1}, D_n^{n+1}$  – нормальные к границе раздела двух сред компоненты вектора  $\vec{D}$ .

Безвихревой характер электростатического поля позволяет ввести скалярный магнитный потенциал  $U$ :

$$\vec{E} = -\text{grad}U. \quad (7)$$

Таким образом, систему уравнений (2)–(4) можно свести к уравнению Пуассона относительно скалярного потенциала:

$$\frac{\partial^2 U}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 U}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 U}{\partial z^2} + \frac{\rho}{\varepsilon} = 0. \quad (8)$$

Рассмотрим задачи электростатики для системы проводник-изоляция-оплетка, расчетная схема которой представлена на рис. 2.

Геометрия и граничные условия задачи позволяют рассмотреть ее в осесимметричной постановке, для которой уравнение (8) в цилиндрической системе координат при отсутствии свободных зарядов преобразуется к виду:

$$\frac{\partial}{\partial r} \left( r \frac{\partial U}{\partial r} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( r \frac{\partial U}{\partial z} \right) = 0. \quad (9)$$



Рис. 2. Расчетная схема

Граничные условия для уравнения (9) рассматриваем в виде условий Дирихле:

$$U(r, z)_{r, z \in \Gamma} = U^*, \quad (10)$$

где  $\Gamma$  – граница области.

Для сформулированной выше задачи электростатики проблема решения краевой задачи для дифференциального уравнения (9) с граничными условиями (10) эквивалентна задаче отыскания минимума следующего функционала, для которого дифференциальное уравнение (9) служит уравнением Эйлера [10]:

$$I = \iint_S \left\{ \frac{1}{2} \left[ \left( \frac{\partial U}{\partial r} \right)^2 + \left( \frac{\partial U}{\partial z} \right)^2 \right] \right\} r dr dz. \quad (11)$$

Задача численно реализована с использованием метода конечных элементов (МКЭ). В результате показано, что наличие неоднородности в материале изоляции приводит к искажению картины распределения изолиний потенциала. Данный факт может быть положен в основу создания методики контроля качества изоляции.

#### ВЫВОДЫ

1. Наиболее часто разрушение ПЭ и образование микропор происходит в результате усиления электрического поля в местах контакта электрода (экрана кабеля) с полимерным материалом и неоднородности контактной поверхности.

2. В местах повышенной напряженности поля происходит модификация поверхности полимера, усиление гидрофильности поверхности, а водный триинг по существу представляет собой процесс усталостного разрушения полимера под воздействием поля и окружающей среды. Роль поверхностно-активной среды играет вода, имеющаяся в порах. При наложении поля поверхностное натяжение на границе ПЭ–вода резко падает. Причиной разрушения ПЭ является процесс, который возникает в результате резкого перепада значений  $\varepsilon$  на границе ПЭ–вода, электронного и теплового воздействия. В объеме ПЭ вблизи заполненного водой микровключения образуется термомеханическое напряжение, которое приводит к потере массы ПЭ и образованию микротрещин. Вода, попадая в микротрещины, усиливает процесс дальнейшего развития водного триинга.

3. На скорость прорастания водного триинга ВТ влияет форма приложенного напряжения. При импульсных перенапряжениях положительной полярности ВТ развивается быстрее благодаря образованию объемного заряда в зоне ионизации.

4. Электрическая прочность поверхностного слоя зависит также от сферолитной структуры, канал разряда формируется преимущественно в межсферолитном пространстве, имеющем более рыхлую и совершенную структуру.

5. Замедлить скорость роста ВТ можно известными технологическими и конструктивными приемами, а именно: высокое качество изготовления кабеля (чистота поверхности электродов; отсутствие микро-

выступов; однородность и чистота изоляционного материала; отсутствие пор с недопустимыми размерами; защита электрической изоляции от проникновения влаги металлическим экраном; введение присадок в ПЭ, препятствующих распространению ВТ.)

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Разевиг Д.В. Техника высоких напряжений / Д.В. Разевиг, В.П. Ларионов, Л.Ф. Дмоховская, Ю.С. Пинталь. – М.: Энергия, 1976. – 487с.
2. Сканави Г.И. Физика диэлектриков (область сильных полей) / Г.И. Сканави. – М.: ГИФМЛ, 1958. – 910 с.
3. Киндяков В. С. Эмиссия электронов перед перекрытием по поверхности диэлектриков в вакууме / В. С. Киндяков // Труды СибНИИЭ. Сер.: Электрофизические исследования в области электрической изоляции. – М.: Энергия, 1970. – С. 47-63.
4. Месяц Г.А. Генерирование мощных наносекундных импульсов / Г.А. Месяц. – М.: Советское радио, 1976. – 256 с.
5. Okress E.C., Vincent J.H., Ta-Kuan Chian "Suppressed or arrested electric discharges in gases", Proceedings of the IEEE, vol.55, Dec. 1967, pp. 113-114.
6. Елинсон М.И. Автоэлектронная эмиссия / М.И. Елинсон, Г.Ф. Васильев. – М.: Государственное издательство физико-математической литературы, 1958. – 274 с.
7. Холлэнд Л. Нанесение тонких пленок в вакууме / Холлэнд Л. – М.: Госэнергоиздат, 1963. – 608 с.
8. Полежаев Ю.В. Тепловая защита / Ю.В. Полежаев, Ф.Б. Юревич. – М.: Энергия, 1976. – 392 с.
9. Тозони О.В. Расчет трехмерных электромагнитных полей / Тозони О.В., Маергойз И.Д. – К.: Техніка, 1974. – 352 с.
10. Зенкевич О. Метод конечных элементов в технике / Пер. с англ. – М.: Мир, 1975. – 541 с.

**Bibliography (transliterated):** 1. Razevig D.V. Tehnika vysokih napryazhenij / D.V. Razevig, V.P. Larionov, L.F. Dmohovskaya, Yu.S. Pinal'. - M.: `Energiya, 1976. - 487s. 2. Skanavi G.I. Fizika di`elektrikov (oblast' sil'nyh polej) / G.I. Skanavi. - M.: GIFML, 1958. - 910 s. 3. Kindyakov V. S. `Emissiya `elektronov pered perekrytiem po poverhnosti di`elektrikov v vakuume / V. S. Kindyakov // Trudy SibNIE. Ser.: `Elektrofizicheskie issledovaniya v oblasti `elektricheskoy izolyacii. -

M.: `Energiya, 1970. - S. 47-63. 4. Mesyac G.A. Generirovanie moschnyh nanosekundnyh impul'sov / G.A. Mesyac. - M.: Sovetskoe radio, 1976. - 256 s. 5. Okress E.C., Vincent J.H., Ta-Kuan Chian "Suppressed or arrested electric discharges in gases", Proceedings of the IEEE, vol.55, Dec. 1967, pp. 113-114. 6. Elinson M.I. Avto`elektronnaya `emissiya / M.I. Elinson, G.F. Vasil'ev. - M.: Gosudarstvennoe izdatel'stvo fiziko-matematicheskij literatury, 1958. - 274 s. 7. Holl`end L. Nanesenie tonkih plenok v vakuume / Holl`end L. - M.: Gos`energoizdat, 1963. - 608 s. 8. Polezhaev Yu.V. Teplovaya zaschita / Yu.V. Polezhaev, F.B. Yurevich. - M.: `Energiya, 1976. - 392 s. 9. Tozoni O.V. Raschet trehmernyh `elektromagnitnyh polej / Tozoni O.V., Maergojz I.D. - K.: Tehnika, 1974. - 352 s. 10. Zenkevich O. Metod konechnyh `elementov v tehnikе / Per. s angl. - M.: Mir, 1975. - 541 s.

Поступила 14.05.2013

*Гонтарь Юлия Григорьевна*

Национальный технический университет  
"Харьковский политехнический институт"  
кафедра "Электроизоляционная и кабельная техника"  
61002, Харьков, ул. Фрунзе, 21  
тел. (057) 7076010, e-mail: gontar\_yulia@mail.ru

*Лавинский Денис Владимирович, к.т.н. доц.*

Национальный технический университет  
"Харьковский политехнический институт"  
кафедра теоретической механики  
61002, Харьков, ул. Фрунзе, 21

*Gontar Y.G., Lavinsky D.V.*

#### **Effect of electric field strength on surface layer destruction in insulation construction.**

Results of theoretical and experimental studies of surface layer destruction in electrical insulation under lightning surge pulses are given, their impact on the insulation construction durability shown. Causes of water treeing in the surface layers of polymer insulation are analyzed.

**Key words – water treeing, space charge, ionization, surface destruction, surface activation, field electron emission, field inhomogeneity.**