

Визначення максимальних механічних напружень в ізоляційному матеріалі навколо дефекту з високою діелектричною проникністю в електростатичному полі

В роботі розроблено двовимірну математичну модель розрахунку методом скінченних елементів розподілу механічних напружень під дією електростатичного поля в ізоляційному матеріалі з дефектом. Модель являє собою послідовно розв'язувані задачі електростатики та структурної механіки. У якості матеріалу дефекту виступали іонізоване повітря і вода. Розглядалися варіанти з внутрішніми та поверхневими дефектами, з врахуванням і без пружних властивостей дефекту. Поле механічних напружень розраховувалося на основі критерію фон Мізеса. Встановлено, що мінімальне відношення найбільших напружень в ізоляційних матеріалах з поверхневими тріщинами і порами для іонізованого повітря склало 9,3 рази для максимального співвідношення півосей поперечного перерізу дефекту 10. Для водного дефекту аналогічне відношення склало 2...5,6 разів, збільшуючись при зміні відносної діелектричної проникності ізоляційного матеріалу від 7 до 2. Визначено, що при збільшенні модуля Юнга ізоляційного матеріалу від 1 МПа до 100 ГПа кути нахилу до вісі лінеаризованих залежностей максимальних механічних напружень навколо обмежених пор з іонізованим повітрям (водою) збільшуються на 35,9° (58,0°) і 18,6° (20,1°) при орієнтаціях великих півосей під кутами 0° і 45° відповідно. Бібл. 28, табл. 1, рис. 10.

Ключові слова: ізоляційний матеріал, внутрішній і поверхневий дефект, електростатика, структурна механіка, механічні напруження за фон Мізесом, метод скінченних елементів.

Вступ. Тверді технічно чисті ізоляційні матеріали мають недосконалу, дефектну структуру. Дефекти можуть мати технологічну чи експлуатаційну природу походження. Структурна мікронеоднорідність твердих ізоляційних матеріалів підтверджується різними способами [1-4]. Усі ізоляційні матеріали на мікрорівні змінюють форму під впливом електричного поля. Наявність незначних за обсягом дефектів змінює розподіл напруженості електричного поля та викликає значну концентрацію механічних напружень у даній ділянці матеріалу, що за певних обставин може спричинити його часткове або повне руйнування. Найбільш значні механічні напруження виникають, коли діелектричні проникності ізоляційного матеріалу і матеріалу дефекту різко відрізняються, наприклад, коли обсяг дефекту заповнений водою або іонізованим повітрям, наприклад, в результаті часткового розряду, викликаного високою напруженістю електричного поля.

Аналіз публікацій. Закономірності розподілу електростатичного поля в ізоляційних матеріалах розглядалися у [5-10]. При висвітленні теми в [5] варто було б розглянути інші форми дефектів, наприклад, з еліпсоїдним поперечним перерізом, а також дослідити вплив на явище діелектричного пробоя неоднорідність розташування пор. Недоліком в [6] є відсутність визначення кореляції між збільшенням концентрації напруженості електричного поля і експериментальним зменшенням напруги пробоя, як це було зроблено в [5]. Також до недоліків цієї роботи варто віднести неврахування повітряних дефектів в моделі, які заміщуються водою, що надходить з навколишнього середовища. В [7] при дослідженні впливу дефектів на погонну ємність ізоляції не враховується компенсаційний ефект декількох дефектів різної природи, наприклад, комбінація локального потоншення і внутрішнього дефекту з меншою діелектричною проникністю ніж у ізоляційного матеріалу. При такому ефекті погонна ємність може майже не змінюватися, хоча концентрація електричного поля буде значно відрізнятися від середньої. Недоліками роботи [8] є недостатня обґрунтованість вибору форми і розміщення повітряних і водних включень, що

може мати вплив на результати роботи. Також в [8] об'єм ізоляційного матеріалу до просочування і після приймався незмінним, що видається, на мою думку, не зовсім вірним. На результати в [9] може мати вплив неврахування інших орієнтацій дефекту з трикутним поперечним перерізом. Недоліком в [10] є те, що точність розрахунку електричного поля на основі нейронної мережі зменшується, коли шукані параметри далекі від параметрів чисельної скінченно-елементної моделі, яка брала участь у навчанні. Класичний підхід до розгляду впливу іонізованої області на механічну міцність ізоляційного матеріалу ґрунтується на критеріях Гріффіта [11, 12]. Результати роботи [11] стосуються лише металевого включення, вірогідність якого в сучасній ізоляції досить незначна. До недоліків роботи [11] можна також віднести нехтування пружними властивостями дефекту, а також відсутність розгляду орієнтації дефекту під кутом 45° до площини електродів. Горюшицем [12] було розглянуто поверхневі тріщини, перпендикулярні площині електродів, у двовимірній та осесиметричній постановці. Недоліками в [12] є відсутність розрахунку поля механічних напружень, тобто немає розуміння розміру області концентрації напружень, а також не розглянуті всі можливі варіанти орієнтації поверхневої тріщини.

Stark і Garton внесли доповнення до теорії механічних напружень з урахуванням пластичних деформацій діелектрика для пояснення його руйнування [13]. Отриманий ними критерій руйнування відповідає мінімальній деформації, коли настає колапс товщини діелектрика. В [14] представлено більш загальну модель для врахування пластичної деформації в полімерах. Спільним недоліком цих моделей, на мою думку, є їх одномірність, що не дозволяє врахувати ефект Пуассона. У [15] представлена модель утворення зародка та зростання провідного каналу на основі енергетичного принципу з урахуванням електричного та механічного полів, а також хімічного потенціалу на межі провідний дефект – діелектрик. Проте феноменологічний параметр визначення мінімально можливого розміру провідного зародку, отриманий з дослі-

дження поверхні енергії, не підкріплений фізичною оцінкою його межі (наприклад, як цей параметр залежить від механічних напружень на межі розподілу двох фаз).

В [16] та [17] досліджено можливості утворення дефектів та дендритів відповідно під дією електромеханічного та механічного зусиль. В моделі [16] є параметри, які неможливо безпосередньо визначити, а тому їх значення обумовлюється лише необхідністю узгодження теоретичного і експериментального часів довговічності поліетиленової ізоляції. В [17] відсутня чисельна оцінка розмірів дефекту і електричного поля у ньому, що може вплинути на обґрунтованість запропонованого в роботі механізму росту дендриту. У [18, 19] розглянуто закономірності зростання дендритів під впливом електричної напруги із залученням понять тензора натяжінь Максвелла і механіки руйнування. В [18] встановлено, що передканальні структури не обумовлені частковими розрядами, а пропонується пояснення їх виникнення електромеханічними напруженнями і ударною іонізацією. Останній механізм в роботі не розглядається. Незначними недоліками в [18] при визначенні поля механічних напружень є відсутність врахування зміни густини матеріалу дендриту (що в роботі було встановлено експериментально), а також довільний вибір провідності стінок дендриту. Недоліком роботи [19] є те, що електромеханічні сили не обчислюються при рості дендриту, а лише оцінюються швидкістю виділення енергії.

У [20] розроблена модель визначення механічних напруг у поліетиленовій ізоляції з еліпсоїдальним дефектом, мала вісь якого паралельна площині електродів. В [21] розроблена математична модель розрахунку електричного поля, пов'язаних з ним сил і механічних напружень в області мікрodefektів поліетиленової ізоляції в осесиметричній постановці. Мультифізична тривимірна модель, що враховує електричне, теплове, механічне поля в області водних триінгів, представлена в [22]. Спільними недоліками робіт [20-22] є розгляд лише одної орієнтації дефекту (яка в свою чергу не є найвірогіднішою), неврахування пружних властивостей дефекту, недостатня обґрунтованість вибору електричних властивостей дефекту, частковість дослідження (розглядається лише поліетилен).

Експериментальне дослідження впливу рівня опромінення прискореними електронами з енергією 0,5 МеВ в результаті технологічного виготовлення на механічні та електричні характеристики кабельної ізоляції проведено в [23]. Незважаючи на високий рівень дослідження, в [23] відсутнє теоретичне пояснення сильного кореляційного зв'язку механічних і електричних характеристик радіаційно зшитої ізоляції. В [24] запропонована модель розрахунку електричного поля в трьохкомпонентній ізоляції, модельована як двошарова стрічка. Варто було б цю модель порівняти з чисельно-польовою моделлю, яка складається з скловолокнистої основи, просочувального складу, слою паперової стрічки. Авторами роботи [25] обґрунтована ефективність виявлення технологічних дефектів в високовольтній ізоляції на основі характеристик часткових розрядів в газових включеннях. В [25] відсутнє порівняння запропонованої ланцюгової

моделі з чисельно-польовою, а також є питання до форми дефекту.

В [26] проаналізовано різні критерії руйнування полімерів (і в загальному випадку пористих матеріалів, у тому числі композитних матеріалів, дерева, металів) і показано, що всі критерії можна звести до критерію фон Мізеса з тією чи іншою похибкою. Недоліком є те, що введення нових критеріїв руйнування, крім критеріїв фон Мізеса і Треска, потребує додаткових параметрів, які визначаються експериментально для конкретного матеріалу, що знижує їх універсальність.

Таким чином, на даний момент існуючі математичні моделі не дозволяють розрахувати максимальні механічні напруження для твердої ізоляції з рідким або газоподібним дефектом у двовимірній постановці і визначити їх в залежності від співвідношення півосей поперечного перерізу дефекту, орієнтації дефекту, а також при зміні пружних і діелектричних властивостей ізоляційного матеріалу і дефекту в широких межах.

Загальна характеристика роботи. Мета роботи складається з визначення максимальних механічних напружень за критерієм фон Мізеса в ізоляційних матеріалах навколо дефектів з іонізованим повітрям і водою в електростатичному полі. Проаналізувати вплив на вказані напруження наступних параметрів: розташування дефекту, кута орієнтації великої півосі поперечного перерізу дефекту і її відношення до малої півосі, пружних і діелектричних властивостей ізоляційного матеріалу і дефекту.

Актуальність роботи пов'язана з теоретичним поясненням неоднорідності мікроструктури ізоляційних матеріалів, а також виявленням особливостей та причин розвитку мікророзмірних повітряних/водних порожнин і триінгових утворень у таких матеріалах.

Об'єкт дослідження. У роботі пора в об'ємі діелектрика моделюється в поперечному перерізі як еліпс, а тріщина на поверхні діелектрика – як половина еліпса. Розрахункова область у разі пори є прямокутником зі сторонами $10a$ і $14a$, де a – велика піввісь еліпса. Менша піввісь еліпса визначається як $b = a/k$, де k – параметр, що лежить у межах $k \in [1...10]$. Розрахункова область у випадку тріщини є прямокутником зі сторонами $10a$ і $7a$. Відстань між електродами у першому випадку – більша сторона прямокутника, у другому випадку – менша. Розміри розрахункової області обрані так, щоб на її межах модуль вектора напруженості електричного поля наближався до значень модуля вектора напруженості в ізоляційному матеріалі без дефекту. У роботі розглядалися три випадки розташування еліпса та напівеліпса: при кутах 0° , 45° та 90° між малою піввіссю та площиною електрода. Також розглядалися варіанти наскрізної та обмеженої пори. У першому випадку пружними властивостями матеріалу дефекту можна знехтувати. У другому випадку мається на увазі досить довгий у напрямку перпендикуляра до розрахункової області, обмежений з обох боків паралельними площинами, циліндричний об'єм. Пружні властивості матеріалу цього об'єму мають впливати на розподіл механічних напружень в ізоляційному матеріалі.

Математична модель. Розрахунок електромеханічних зусиль ґрунтується на спільному розв'язанні

рівнянь електростатики та структурної механіки, складених для ізотропного кусково-однорідного середовища з лінійними властивостями у двовимірній постановці [27, 28]:

$$\begin{aligned} \nabla^2 \varphi &= 0; \\ \mathbf{E} &= -\nabla \varphi; \\ \mathbf{D} &= \varepsilon_0 \varepsilon_{ri(d)} \mathbf{E}; \\ \nabla \sigma &= 0; \end{aligned} \quad (1)$$

$$\varepsilon = 0,5[(\nabla \mathbf{u})^T + \nabla \mathbf{u}]; \quad (2)$$

$$(\sigma_{xx} \sigma_{yy} \sigma_{zz} \sigma_{xy})^T = C_M (\varepsilon_{xx} \varepsilon_{yy} \varepsilon_{zz} \varepsilon_{xy})^T, \quad (3)$$

де φ – скалярний електростатичний потенціал; \mathbf{E} – вектор напруженості електричного поля; \mathbf{D} – вектор електричної індукції; ε_0 – електрична стала ($8,854 \cdot 10^{-12}$ Ф/м); $\varepsilon_{ri(d)}$ – відносна діелектрична проникність ізоляційного матеріалу (дефекту); σ – тензор механічних напружень; ε – тензор деформацій; \mathbf{u} – вектор зміщень тіла (різниця координат кінцевого та початкового положення кожної точки); σ_{ij} , ε_{ij} – відповідно компоненти тензорів механічних напружень та деформацій; C_M – матриця еластичності, яка записується через модуль Юнга E_M та коефіцієнт Пуассона ν для ізотропного матеріалу у вигляді:

$$C_M = \frac{E_M}{(1+\nu) \cdot (1-2\nu)} \begin{pmatrix} 1-\nu & \nu & \nu & 0 \\ \nu & 1-\nu & \nu & 0 \\ \nu & \nu & 1-\nu & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0,5(1-2\nu) \end{pmatrix}.$$

Матрицю еластичності для газового та рідинного включення зручно записувати через модуль зсуву G та об'ємний модуль пружності K :

$$C_M = \begin{pmatrix} K + \frac{4G}{3} & K - \frac{2G}{3} & K - \frac{2G}{3} & 0 \\ K - \frac{2G}{3} & K + \frac{4G}{3} & K - \frac{2G}{3} & 0 \\ K - \frac{2G}{3} & K - \frac{2G}{3} & K + \frac{4G}{3} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & G \end{pmatrix}.$$

Відповідно до [27] всі об'ємні сили зводяться до поверхневих і враховуються через граничні умови.

Питома сила на одиницю площі поверхні ізоляційного матеріалу f_s обчислюється на основі тензору натяжінь Максвелла [28] як

$$f_s = (\mathbf{D}_2 \cdot \mathbf{n} \cdot \mathbf{E}_2 - \mathbf{D}_1 \cdot \mathbf{n} \cdot \mathbf{E}_1) - 0,5(\mathbf{D}_2 \cdot \mathbf{E}_2 - \mathbf{D}_1 \cdot \mathbf{E}_1) \cdot \mathbf{n}, \quad (4)$$

де \mathbf{n} – вектор зовнішньої нормалі.

Для рідин та газів модуль зсуву дорівнює нулю, проте для чисельної реалізації приймався $G = 0,2$ Па. Об'ємний модуль пружності дефекту у разі обмеженої пори для води приймався $K = 2,2$ ГПа, а для іонізованого повітря – $K = 0,101$ МПа.

Рівняння структурної механіки (1) – (3) записані у наближенні плоскої деформації [28], тобто $\varepsilon_{xz} = \varepsilon_{yz} = \varepsilon_{zx} = 0$. Отже, $\sigma_{xz} = \sigma_{yz} = 0$ і матриця еластичності змінює розмірність з 6×6 на 4×4 .

Граничні умови задачі електростатики:

- для нижньої площини $\varphi_1 = |\mathbf{E}_\infty| \cdot d$;
- для верхньої площини $\varphi_2 = 0$;
- для бокової поверхні $\mathbf{n} \cdot \mathbf{D} = 0$,

де \mathbf{E}_∞ – вектор напруженості електричного поля в ізоляційному матеріалі за відсутності дефекту; d – відстань між верхньою та нижньою площинами.

Граничні умови задачі структурної механіки:

- для нижньої площини $\mathbf{u} = 0$;
- для верхньої площини $\sigma \cdot \mathbf{n} = f_s$.

На межі розподілу двох середовищ приймаються: для задачі структурної механіки рівність векторів зміщень, для задачі електростатики – граничні умови Неймана.

Основні припущення, прийняті в моделі: ізоляційний матеріал не має провідності; заряди на межах розділу діелектричних середовищ відсутні, як і об'ємні заряди; відсутні складові механічних напружень, спричинені тепловим та гравітаційним полями; при зміні об'єму фізичні властивості матеріалів не змінюються і відсутня пов'язана з цим поляризація; малі деформації досліджуваного зразка (наприклад, була розрахована максимальна деформація для гуми у передпробійних полях, яка склала 2,4 %; для поліімідної плівки – 0,049 %). Останнє передбачає розгляд моделі тільки в межах теорії лінійної пружності, а також дозволяє зв'язану систему рівнянь розділити на дві підзадачі, які розв'язуються послідовно: задачу електростатики для обчислення питомого зусилля, яке потім використовується як гранична умова задачі структурної механіки. Внаслідок лінійності окремо взятих задач електростатики і структурної механіки при зміні розмірів зразка з дотриманням вищезазначених граничних умов величини електричного і механічного полів пропорційно змінюються.

Розподіл механічних напружень обчислювався за критерієм фон Мізеса [28]

$$\sigma = 0,5^{0,5} \cdot [(\sigma_{xx} - \sigma_{yy})^2 + (\sigma_{yy} - \sigma_{zz})^2 + (\sigma_{zz} - \sigma_{xx})^2 + 6(\sigma_{xy})^2]^{0,5}.$$

Серед таких напружень знаходилося максимальне значення σ_{\max} , яке надалі представлялось у відносних одиницях:

$$\sigma_{\max}^* = \sigma_{\max} / [0,5 \varepsilon_0 \varepsilon_{ri} (\mathbf{E}_\infty)^2].$$

Отже, без дефекту відносно механічне напруження за фон Мізесом становить $\sigma_{\max}^* = 1$. Обґрунтуванням для представлення механічних напружень у відносних одиницях служить подібність зусиль (4), створюваних електростатичним полем на основі тензора натяжінь Максвелла.

Модель також характеризується подібністю електростатичних полів при зміні проникності ізоляційного матеріалу, що справедливо, коли виконується умова $\varepsilon_{ri} \ll \varepsilon_{rd}$. Досліджувалися механічні напруженості при відносній діелектричній проникності ізоляційного матеріалу в межах $\varepsilon_{ri} \in [2 \dots 7]$, дефекту з водою $\varepsilon_{rd} = 80,2$. Сильно іонізовані області, що виникають при частковому пробой, моделювалися матеріалом з відносною діелектричною проникністю $\varepsilon_{rd} = 16000$ для настроювання чисельної моделі [5]. Таке значення вибрано з метою практичної реалізації в задачі електростатики моделі ідеального провідника з $\varepsilon_{rd} \rightarrow \infty$, як у декілька разів більше значення максимальної діелектричної проникності матеріалів у моделі. Наведена модель реалізована чисельно методом скінченних елементів у програмі COMSOL. Для більш загального підходу до проблеми механічних напружень, викликаних електричним полем, задача сформульована таким чином, щоб враховувати механічні і електричні властивості більшості електроізоляційних матеріалів (і навіть гіпотетичні значення такі, як $E_M = 10^5$ МПа). Фізичні властивості деяких електроізоляційних матеріалів наведені в табл. 1.

Тобто на основі аналізу властивостей електроізоляційних матеріалів були обрані наступні діапазони змінення параметрів: відносна діелектрична проникність $\epsilon_{ri} = 2-7$; коефіцієнт Пуассона $\nu = 0,1-0,499$; модуль Юнга $E_M = 1-10^5$ МПа.

Таблиця 1

Фізичні властивості деяких електроізоляційних матеріалів

Матеріал	Модуль Юнга E_M , МПа	Коефіцієнт Пуассона ν	Діелектрична проникність ϵ_{ri}
Гума	0,5...8	0,47	2,6
Полівініл-хлорид	$(2,7...4) \cdot 10^3$	0,35...0,38	3,2
Поліімідна плівка	$3 \cdot 10^3$	0,499	3,5
Целюлоза	$(2,7...6,5) \cdot 10^3$	0,38...0,46	6,5
Електро-порцеляна	$6 \cdot 10^4$	0,23	6...7

Результати досліджень. Приклади електричних полів і полів механічних напружень в ізоляційних матеріалах ($\epsilon_{ri} = 2$) при $|E_{oc}| = 40$ МВ/м з варіантами водного дефекту наведені на рис. 1–3. Максимум концентрації механічних напружень для дефекту, зображеного на рис. 1,б, розташовується під деяким кутом до великої півосі, який має тенденцію зменшуватися при збільшенні геометричного співвідношення перерізу дефекту. Відповідно до рис. 1 орієнтація областей концентрації механічних напружень сприяє проростанню в напрямку до протилежного електрода поверхневих тріщин з кутами $0^\circ...45^\circ$ між малою піввіссю та поверхнею електродів у разі перевищення механічного напруження межі міцності на стиснення ізоляційного матеріалу. Як видно із рис. 2, 3, при змінненні модуля Юнга ізоляційних матеріалів максимум механічного напруження зміщується. У випадку, представленому на рис. 2, концентрація механічних напружень зменшується на продовженні великої півосі та збільшується на малій. У випадку рис. 3 концентрація механічних напружень зі збільшенням модуля Юнга переміщується з положення над великою піввіссю під неї. Для обмеженої водної пори з великою піввіссю, паралельною площині електродів, та кругової обмеженої пори зона концентрації механічних напружень зі збільшенням модуля Юнга повертається стрибком на 90° .

Для повітряних іонізованих наскрізних пор зони концентрації механічних напружень розташовуються: як повернуті під невеликим кутом за годинниковою стрілкою відносно більшої півосі для області дефекту, аналогічно зображенню на рис. 3,з; на осі, паралельній площині електродів для інших випадків орієнтації пор.

На рис. 4 представлені результати розрахунку максимальних механічних напружень залежно від орієнтації поверхневого дефекту, заповненого іонізованим повітрям, його геометричного співвідношення та коефіцієнтів Пуассона ізоляційних матеріалів. Для варіантів тріщин з орієнтацією 0° та 45° вплив коефіцієнта Пуассона ізоляційного матеріалу на концентрацію напруженості навколо дефекту мінімальний. Для вказаних варіантів наведені залежності для матеріалу з $\nu = 0,1$. Розбіжність залежностей для дефектів в ізоляційному матеріалі з $\nu = 0,499$ становить до $-3,5\%$. При цьому вказані моделі для визначення поля напружень інваріантні до змінення модуля Юнга.

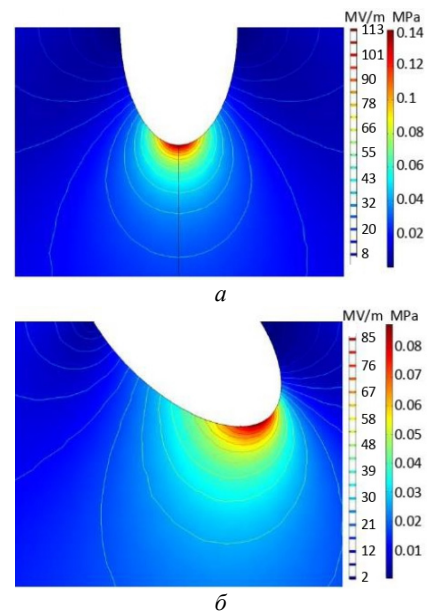


Рис. 1. Механічні та електричні поля навколо поверхневої водної тріщини, мала піввісь поперечного перерізу якої орієнтована під кутом 0° (а) і 45° (б) до площини електродів в ізоляційних матеріалах з $\nu = 0,1$ в незалежності від модуля Юнга

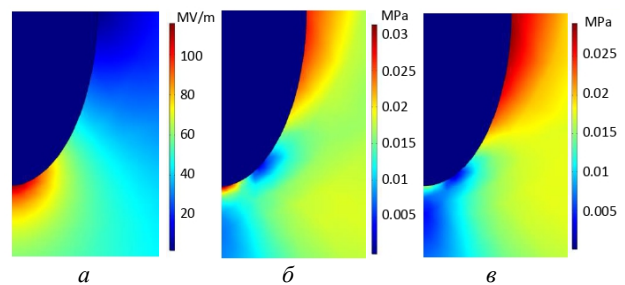


Рис. 2. Розподіл модуля вектора електричної напруженості (а) та напруження за фон Мізесом для випадків водної обмеженої пори в ізоляційних матеріалах з $\nu = 0,1$: $E_M = 1$ МПа (б), $E_M = 10^5$ МПа (в)

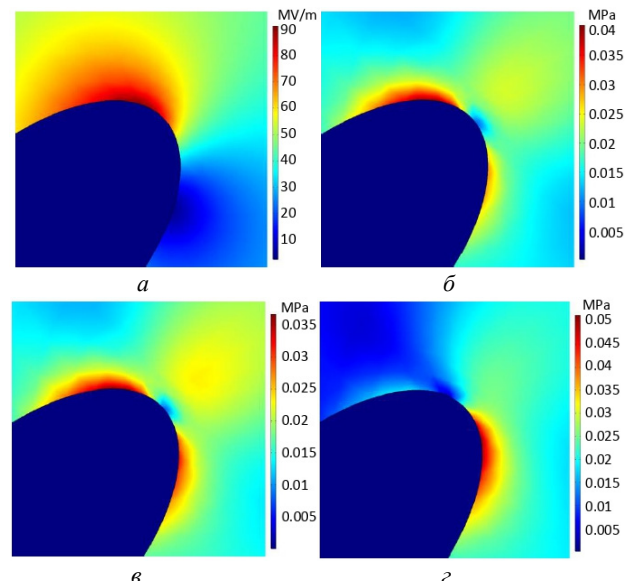


Рис. 3. Розподіл модуля вектора електричної напруженості (а) та напруження за фон Мізесом для випадків водної обмеженої пори в ізоляційних матеріалах з $\nu = 0,1$: $E_M = 1$ МПа (б), $E_M = 10^3$ МПа (в), $E_M = 10^5$ МПа (з)

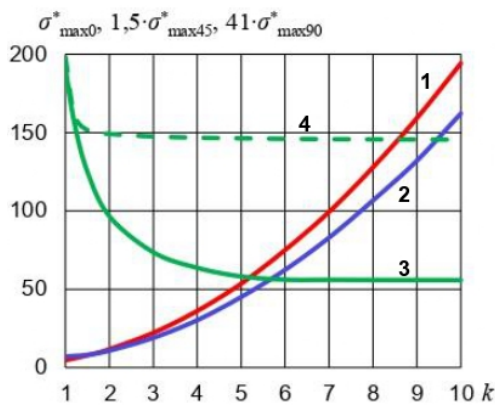


Рис. 4. Залежності максимальних механічних напружень навколо поверхневих тріщин з іонізованим повітрям, мала піввісь яких орієнтована до площини електродів під кутами 0° (крива 1), 45° (крива 2) і 90° (криві 3 та 4 для матеріалів з $\nu = 0,1$ і з $\nu = 0,499$ відповідно), від геометричного співвідношення

На рис. 5, 6 представлені результати розрахунку максимальних механічних напружень в залежності від орієнтації поперечного перерізу пори, заповненої іонізованим повітрям, її геометричного співвідношення та пружних властивостей ізоляційного матеріалу.

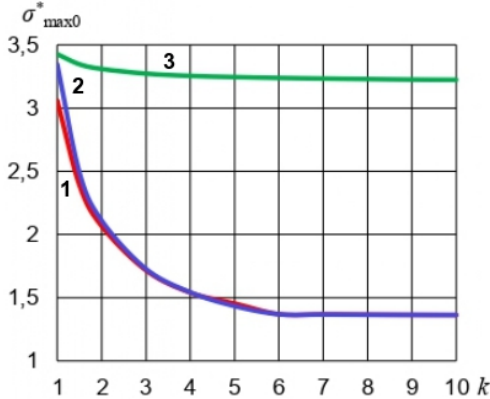


Рис. 5. Залежності максимальних механічних напружень навколо пор з іонізованим повітрям, мала піввісь яких орієнтована до площини електродів під кутом 0° , від геометричного співвідношення для випадків: обмеженої пори в матеріалі з $\nu = 0,1$ і $E_M = 1$ МПа (крива 1); наскрізних пор в матеріалах з $\nu = 0,1$ (крива 2) і з $\nu = 0,499$ (крива 3)

На рис. 5 графік напружень в матеріалі з $\nu = 0,1$ та $E_M = 10^5$ МПа збігається з графіком для наскрізної пори в матеріалі з відповідним коефіцієнтом Пуассона. Також на рис. 5 графік напружень в матеріалах з $\nu = 0,499$ та модулем Юнга в діапазоні $[1 \dots 10^5]$ МПа збігається з графіком для наскрізної пори в матеріалі з відповідним коефіцієнтом Пуассона. Максимальна розбіжність за модулем в цих випадках склала 1,1 %. На рис. 6 для обмежених пор з орієнтацією 45° в ізоляційних матеріалах з $E_M = 1$ МПа та коефіцієнтом Пуассона в діапазоні $[0,1 \dots 0,499]$ представлений графік, побудований за даними моделі з $\nu = 0,1$. Максимальні розбіжності за модулем відображення напружень для моделі з $\nu = 0,499$ склали 1,4 % і 10,9 % для $k \in [2 \dots 10]$ і $k = 1$ відповідно. На рис. 6 графіки напружень в матеріалах з $E_M = 10^5$ МПа та коефіцієнтами Пуассона $\nu = 0,1$ і $\nu = 0,499$ збігаються з графіками для наскрізної пори в матеріалах з відповідними коефіцієнтом Пуассона і положенням дефекту з максимальною розбіжністю $-0,54$ %.

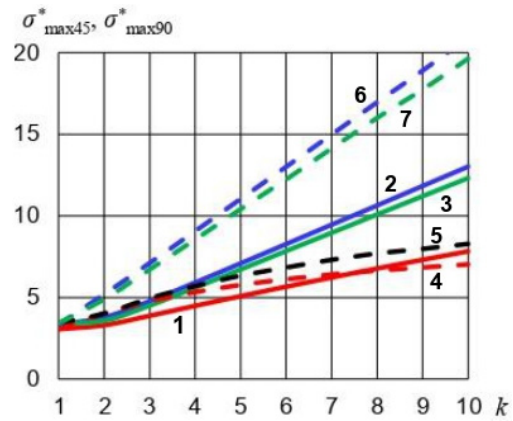


Рис. 6. Залежності максимальних механічних напружень навколо пор з іонізованим повітрям, мала піввісь яких орієнтована до площини електродів під кутами 45° (суцільні лінії), 90° (штрихові лінії), від геометричного співвідношення для випадків: в матеріалах з $E_M = 1$ МПа і $\nu = 0,1 \dots 0,499$ (крива 1); в матеріалі з $E_M = 1$ МПа і $\nu = 0,1$ (крива 4); в матеріалі з $E_M = 1$ МПа і $\nu = 0,499$ (крива 5); для наскрізних пор в матеріалах з $\nu = 0,1$ (криві 2 та 6) і з $\nu = 0,499$ (криві 3 та 7)

На рис. 7, 8 представлені результати розрахунку максимальних механічних напружень в залежності від орієнтації поперечного перерізу водної пори, її геометричного співвідношення та пружних властивостей ізоляційних матеріалів. На рис. 7 не показані графіки напружень в матеріалах з $\nu = 0,1$ та $E_M = 10^5$ МПа; $\nu = 0,499$ та $E_M = 1$ МПа; $\nu = 0,499$ та $E_M = 10^5$ МПа. Вони, як і у випадку пор з іонізованим повітрям, збігаються з графіками для наскрізних пор. Максимальна розбіжність при цьому становить 2,3 %. Залежності для матеріалів з $E_M = 10^5$ МПа та $\nu = 0,499$ при орієнтації дефектів під кутами 45° і 90° співпадають з приведеними на рис. 8 залежностями для матеріалу з $E_M = 10^5$ МПа та $\nu = 0,1$. Розбіжність залежностей для діапазону зміння параметра $k \in [2 \dots 10]$, що визначає розмір дефекту, складає за модулем $[4,9 \dots 1,2]$ %.

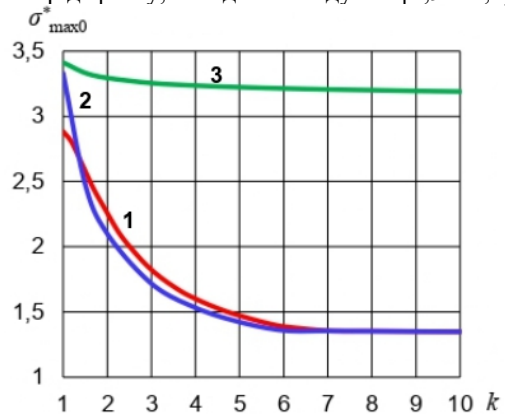


Рис. 7. Залежності максимальних механічних напружень навколо водних пор, мала піввісь яких орієнтована до площини електродів під кутом 0° , від геометричного співвідношення для випадків: обмеженої пори в матеріалі з $\nu = 0,1$ і $E_M = 1$ МПа (крива 1); наскрізних пор в матеріалах з $\nu = 0,1$ (крива 2) і з $\nu = 0,499$ (крива 3)

Для всіх розглянутих наскрізних пор зміння модуля Юнга ізоляційного матеріалу не впливає на картину розподілу напружень. Можна твердити про практичну ідентичність залежностей максимальних механічних напружень в області дефектів з іонізованим повітрям і водою при орієнтації їх більшої півосі під

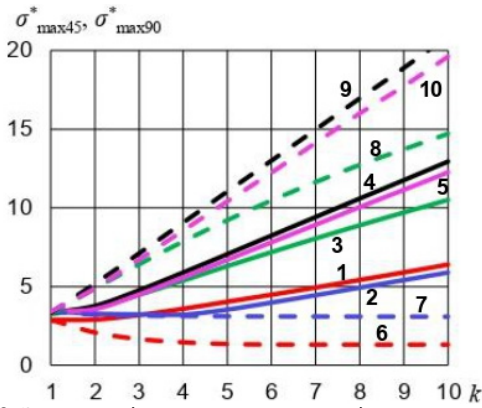


Рис. 8. Залежності максимальних механічних напружень навколо водних пор, мала піввісь яких орієнтована до площини електродів під кутами 45° (суцільні лінії), 90° (штрихові лінії), від геометричного співвідношення для випадків: в матеріалі з $E_M = 1$ МПа і $\nu = 0,1$ (криві 1 та 6); в матеріалі з $E_M = 1$ МПа і $\nu = 0,499$ (криві 2 та 7); в матеріалі з $E_M = 10^5$ МПа і $\nu = 0,1$ (криві 3 та 8); для наскрізних пор в матеріалах з $\nu = 0,1$ (криві 4 та 9) і з $\nu = 0,499$ (криві 5 та 10)

кутом 90° до площини електродів, а також про ідентичність напружень навколо наскрізних пор з іонізованим повітрям і водою при інших кутах. При зростанні співвідношення великої та малої півосей перерізу дефекту k від 1 до 10 максимальні механічні напруження навколо обмежених і наскрізних пор з іонізованим повітрям (водою) при орієнтації їх великих півосей до площини електродів під кутами 0° і 45° зростають у 2,3...6,3 (0,5...6,3) і 2,6...3,9 (2,2...3,9) рази відповідно.

При дослідженні поверхневого водного дефекту виявилась відсутність пропорційності механічних напружень при зміні відносної діелектричної проникності. Це може пояснюватись наявністю незначного електричного поля в дефекті, яке при зміні діелектричної проникності ізоляційного матеріалу буде змінюватися. А тому графіки, приведені на рис. 9, 10, побудовані при визначенні відносних механічних напружень наступним чином: $\sigma_{\max}^* = \sigma_{\max}^* \epsilon_{ri}$.

Представлені графіки на рис. 9, 10 справедливі для ізоляційних матеріалів, пружні властивості яких змінюються у широких межах. Середня розбіжність залежностей на рис. 9 при зміні коефіцієнта Пуассона в діапазоні [0,1...0,499] складає 3 %. Відповідно до рис. 9 при збільшенні відносної діелектричної проникності ізоляційного матеріалу від 2 до 7 для діапазону співвідношення великої та малої півосей перерізу дефекту $k \in [1...10]$ максимальні механічні напруження навколо поверхневих водних тріщин з орієнтацією малих півосей до площини електродів під кутами 0° і 45° зменшуються в 1,1...3 рази.

Отже, незважаючи на ідентичність розподілу електричного поля для тотожних областей варіантів із зовнішніми та внутрішніми дефектами розподіл поля механічних напружень не однаковий, а залежить від співвідношення пружних властивостей ізоляційного матеріалу і дефекту, місця знаходження дефекту.

Верифікація отриманих результатів. Модель тестувалась згідно з чисельним дослідженням роботи [20]. В моделі, наведеній в [20], розв'язувалась задача в осесиметричній постановці з урахуванням провідності на постійному струмі. Для адекватності порівняння в розробленій у даній роботі моделі враховувалась осесиметричність задачі та комплексна діелектрична проникність. Похибка для максимального значення

механічного напруження у порівнянні з результатом, отриманим в [20], склала 0,12 %, що підтверджує правильність чисельних результатів даної роботи. Крім того, за порядком електричних і електромеханічних величин чисельні результати даної роботи і робіт [21, 22] збігаються.

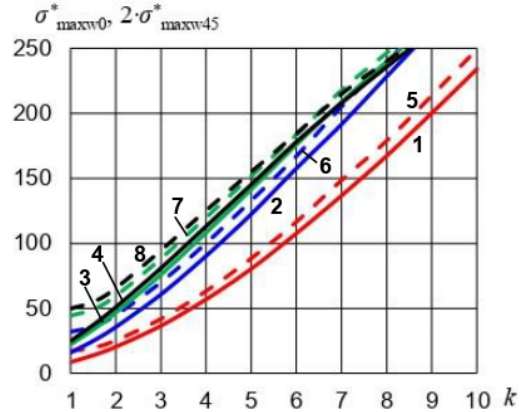


Рис. 9. Залежності максимальних механічних напружень навколо поверхневих водних тріщин, мала піввісь яких орієнтована до площини електродів під кутами 0° (суцільні лінії), 45° (штрихові лінії), від геометричного співвідношення для випадків: $\epsilon_{ri} = 2$ (криві 1 та 5), $\epsilon_{ri} = 4$ (криві 2 та 6), $\epsilon_{ri} = 6$ (криві 3 та 7), $\epsilon_{ri} = 7$ (криві 4 та 8)

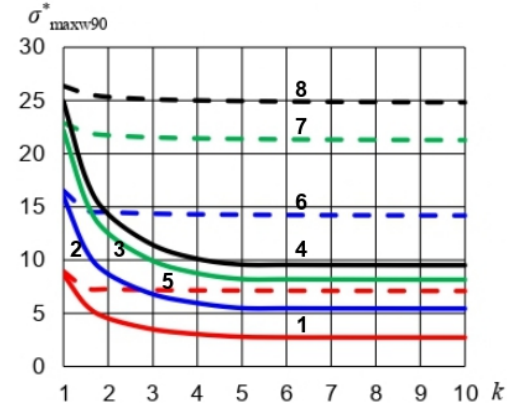


Рис. 10. Залежності максимальних механічних напружень навколо поверхневих водних тріщин, мала піввісь яких орієнтована до площини електродів під кутом 90°, від геометричного співвідношення в матеріалах з $\nu = 0,1$ (суцільні лінії) і з $\nu = 0,499$ (штрихові лінії) для випадків: $\epsilon_{ri} = 2$ (криві 1 та 5), $\epsilon_{ri} = 4$ (криві 2 та 6), $\epsilon_{ri} = 6$ (криві 3 та 7), $\epsilon_{ri} = 7$ (криві 4 та 8)

Висновки.

1. Розроблена чисельно-польова математична двовимірна модель, яка складається з послідовно розв'язуваних рівнянь електростатики і структурної механіки, для визначення розподілу механічних напружень в ізоляційному матеріалі з рідким або газоподібним дефектом і реалізована в COMSOL. Адекватність моделі підтверджена порівнянням з відомими у літературі результатами.

2. Мінімальне відношення найбільших напружень в ізоляційних матеріалах навколо поверхневих тріщин і пор для іонізованого повітря склало 9,3 рази для максимального, розглянутого в роботі, співвідношення великої та малої півосей поперечного перерізу дефекту $k = 10$. Для водного дефекту аналогічне відношення склало 2...5,6 разів, збільшуючись при зміні відносної діелектричної проникності ізоляційного матеріалу від 7 до 2.

3. При збільшенні модуля Юнга ізоляційного матеріалу від 1 МПа до 100 ГПа кути нахилу до вісі співвідношення великої та малої півосей поперечного

перерізу дефекту лінеаризованих залежностей максимальних механічних напружень навколо обмежених пор з іонізованим повітрям (водою) збільшуються на 35,9° (58,0°) і 18,6° (20,1°) при орієнтаціях великих півосей під кутами 0° і 45° відповідно.

4. Подальший напрямок досліджень полягає у встановленні залежностей розподілу механічних напружень в ізоляційних матеріалах з дефектами на основі удосконаленої математичної моделі урахуванням додаткової просторової координати та анізотропії фізичних властивостей матеріалів моделі.

Конфлікт інтересів. Автор статті заявляє про відсутність конфлікту інтересів.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Zhou T., Zhu X., Yang H., Yan X., Jin X., Wan Q. Identification of XLPE cable insulation defects based on deep learning. *Global Energy Interconnection*, 2023, no. vol. 6, no. 1, pp. 36-49. doi: <https://doi.org/10.1016/j.gloi.2023.02.004>.
2. Qu Z., Zhang G., Fu Y., An Y., Chen C., Shan X. Defect detection for the insulation layer of bent aircraft cables based on ultrasonic guided waves. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, 2023, vol. 72, pp. 1-8. doi: <https://doi.org/10.1109/TIM.2023.3241040>.
3. Zhou X., Tian T., Li X., Chen K., Luo Y., He N., Liu W., Ma Y., Bai J., Zhang X. and Zhang G. Study on insulation defect discharge features of dry-type reactor based on audible acoustic. *AIP Advances*, 2022, vol. 12, no. 2, art. no. 025210. doi: <https://doi.org/10.1063/5.0078735>.
4. Wang Y., Nie Y., Qi P., Zhang N., Ye C. Inspection of defect under thick insulation based on magnetic imaging with TMR array sensors. *IEEE Transactions on Magnetics*, 2021, vol. 58, no. 3, art. no. 6200510. doi: <https://doi.org/10.1109/TMAG.2021.3138587>.
5. Palchykov O.O. Breakdown voltage of micron range air inclusions in capacitor paper. *Electrical Engineering & Electromechanics*, 2020, no. 6, pp. 30-34. doi: <https://doi.org/10.20998/2074-272X.2020.6.05>.
6. Li G., Liang X., Zhang J., Li X., Wei Y., Hao C. Insulation properties and interface defect simulation of distribution network cable accessories under moisture condition. *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, 2022, vol. 29, no. 2, pp. 403-411. doi: <https://doi.org/10.1109/TDEI.2022.3157902>.
7. Vavilova G., Yurchenko V., Keyan L. Influence of the insulation defects size on the value of the wire capacitance. *Progress in Material Science and Engineering, Part of the Studies in Systems, Decision and Control book series (SSDC)*, 2021, no. 351, pp. 113-123. doi: https://doi.org/10.1007/978-3-030-68103-6_11.
8. Ndama A.T., Ndong E.O., Boussougou Y.C.M., Tsoumou G.J., Blampain E.J.J. Theoretical Study of Potential Manufacturing Insulation Defects in Medium-Voltage Traction Motors. *International Journal of Emerging Technology and Advanced Engineering*, 2022, vol. 12, no. 1, pp. 83-98. doi: https://doi.org/10.46338/ijetae0122_09.
9. Uydur C.C., Arikani J., Kalenderli Ö. The effect of insulation defects on electric and magnetic field distributions in power cables. *Tehnicky Vjesnik*, 2021, vol. 28, no. 4, pp. 1152-1160. doi: <https://doi.org/10.17559/TV-20200205084232>.
10. Han W., Yang G., Hao C., Wang Z., Kong D. and Dong Y. A data-driven model of cable insulation defect based on convolutional neural networks. *Applied Sciences*, 2022, vol. 12, no. 16, art. no. 8374. doi: <https://doi.org/10.3390/app12168374>.
11. Zeller H.R., Schneider W.R. Electrofracture mechanics of dielectric aging. *Journal of Applied Physics*, 1984, vol. 56, no. 2, pp. 455-459. doi: <https://doi.org/10.1063/1.333931>.
12. Сканиви Г.И. *Физика диэлектриков (область сильных полей)*. – М.: ГИФМЛ, 1958. – 909 с.
13. Blythe T., Bloor D. *Electrical properties of polymers*. Cambridge University Press, 2008. 496 p.
14. Zhou X., Zhao X., Suo Z., Zou C. Electrical breakdown and ultrahigh electrical energy density in poly (vinylidene fluoride-hexafluoropropylene) copolymer. *Applied Physics Letters*, 2009, vol. 94, no. 16, art. no. 162901. doi: <https://doi.org/10.1063/1.3123001>.
15. Karpov V.G., Kryukov Y.A., Karpov I.V., Mitra M. Field-induced nucleation in phase change memory. *Physical Review B*, 2008, vol. 78, no. 5, art. no. 052201. doi: <https://doi.org/10.1103/PhysRevB.78.052201>.
16. Montanari G.C., Seri P., Dissado L.A. Aging mechanisms of polymeric materials under DC electrical stress: A new approach and similarities to mechanical aging. *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, 2019, vol. 26, no. 2, pp. 634-641. doi: <https://doi.org/10.1109/TDEI.2018.007829>.

17. Ding H.-Z., Varlow B.R. Thermodynamic model for electrical tree propagation kinetics in combined electrical and mechanical stresses. *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, 2005, vol. 12, no. 1, pp. 81-89. doi: <https://doi.org/10.1109/TDEI.2005.1394018>.
18. Pallon L.K.H., Nilsson F., Yu S., Liu D., Diaz A., Holler M., Chen X.R., Gubanski S., Hedenqvist M.S., Olsson R.T., Gedde U.W. Three-Dimensional Nanometer Features of Direct Current Electrical Trees in Low-Density Polyethylene. *Nano Letters*, 2017, vol. 17, no. 3, pp. 1402-1408. doi: <https://doi.org/10.1021/acs.nanolett.6b04303>.
19. Kitani R., Iwata S., Imatani S. Energy-Release Rate in Electrically Deteriorated Materials Introduced by Using Maxwell Stress Tensor at Crack Tip. *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, 2021, vol. 28, no. 6, pp. 1925-1932. doi: <https://doi.org/10.1109/TDEI.2021.009692>.
20. Zuoqian Wang, Marcolongo P., Lemberg J.A., Panganiban B., Evans J.W., Ritchie R.O., Wright P.K. Mechanical fatigue as a mechanism of water tree propagation in TR-XLPE. *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, 2012, vol. 19, no. 1, pp. 321-330. doi: <https://doi.org/10.1109/TDEI.2012.6148534>.
21. Кучерявая И.Н. Компьютерный анализ электромеханических напряжений в полиэтиленовой изоляции силового кабеля при наличии микровключений. *Технічна електродинаміка*, 2012, № 5, с. 10-16.
22. Подольцев А.Д., Кучерявая И.Н. Мультифизические процессы в области включения в полиэтиленовой изоляции силового кабеля (трехмерное моделирование и эксперимент). *Технічна електродинаміка*, 2015, № 3, с. 3-9.
23. Bezprozvannyh G.V., Mirchuk I.A. Correlation between electrical and mechanical characteristics of cables with radiation-modified insulation on the basis of a halogen-free polymer composition. *Electrical Engineering & Electromechanics*, 2018, no. 4, pp. 54-57. doi: <https://doi.org/10.20998/2074-272X.2018.4.09>.
24. Bezprozvannyh G.V., Boyko A.N., Roginskiy A.V. Effect of a dielectric barrier on the electric field distribution in high-voltage composite insulation of electric machines. *Electrical Engineering & Electromechanics*, 2018, no. 6, pp. 63-67. doi: <https://doi.org/10.20998/2074-272X.2018.6.09>.
25. Bezprozvannyh G.V., Kyessayev A.G., Mirchuk I.A., Roginskiy A.V. Identification of technological defects in high-voltage solid insulation of electrical insulation structures on the characteristics of partial discharges. *Electrical Engineering & Electromechanics*, 2019, no. 4, pp. 53-58. doi: <https://doi.org/10.20998/2074-272X.2019.4.08>.
26. Abrate S. Criteria for Yielding or Failure of Cellular Materials. *Journal of Sandwich Structures & Materials*, 2008, vol. 10, no. 1, pp. 5-51. doi: <https://doi.org/10.1177/1099636207070997>.
27. Stratton J.A. *Electromagnetic Theory*. Hoboken, IEEE Press, 2007. 630 p.
28. Lurie A. I. *Theory of Elasticity*. Heidelberg, Springer-Verlag Berlin, 2005. 1050 p.

REFERENCES

1. Zhou T., Zhu X., Yang H., Yan X., Jin X., Wan Q. Identification of XLPE cable insulation defects based on deep learning. *Global Energy Interconnection*, 2023, no. vol. 6, no. 1, pp. 36-49. doi: <https://doi.org/10.1016/j.gloi.2023.02.004>.
2. Qu Z., Zhang G., Fu Y., An Y., Chen C., Shan X. Defect detection for the insulation layer of bent aircraft cables based on ultrasonic guided waves. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, 2023, vol. 72, pp. 1-8. doi: <https://doi.org/10.1109/TIM.2023.3241040>.
3. Zhou X., Tian T., Li X., Chen K., Luo Y., He N., Liu W., Ma Y., Bai J., Zhang X. and Zhang G. Study on insulation defect discharge features of dry-type reactor based on audible acoustic. *AIP Advances*, 2022, vol. 12, no. 2, art. no. 025210. doi: <https://doi.org/10.1063/5.0078735>.
4. Wang Y., Nie Y., Qi P., Zhang N., Ye C. Inspection of defect under thick insulation based on magnetic imaging with TMR array sensors. *IEEE Transactions on Magnetics*, 2021, vol. 58, no. 3, art. no. 6200510. doi: <https://doi.org/10.1109/TMAG.2021.3138587>.
5. Palchykov O.O. Breakdown voltage of micron range air inclusions in capacitor paper. *Electrical Engineering & Electromechanics*, 2020, no. 6, pp. 30-34. doi: <https://doi.org/10.20998/2074-272X.2020.6.05>.
6. Li G., Liang X., Zhang J., Li X., Wei Y., Hao C. Insulation properties and interface defect simulation of distribution network cable accessories under moisture condition. *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, 2022, vol. 29, no. 2, pp. 403-411. doi: <https://doi.org/10.1109/TDEI.2022.3157902>.
7. Vavilova G., Yurchenko V., Keyan L. Influence of the insulation defects size on the value of the wire capacitance. *Progress in Material Science and Engineering, Part of the Studies in Systems,*

Decision and Control book series (SSDC), 2021, no. 351, pp. 113-123. doi: https://doi.org/10.1007/978-3-030-68103-6_11.

8. Ndama A.T., Ndong E.O., Boussougou Y.C.M., Tsoumou G.J., Blampain E.J.J. Theoretical Study of Potential Manufacturing Insulation Defects in Medium-Voltage Traction Motors. *International Journal of Emerging Technology and Advanced Engineering*, 2022, vol. 12, no. 1, pp. 83-98. doi: https://doi.org/10.46338/ijetae0122_09.

9. Uydur C.C., Arikani J., Kalenderli Ö. The effect of insulation defects on electric and magnetic field distributions in power cables. *Tehnicki Vjesnik*, 2021, vol. 28, no. 4, pp. 1152-1160. doi: <https://doi.org/10.17559/TV-20200205084232>.

10. Han W., Yang G., Hao C., Wang Z., Kong D. and Dong Y. A data-driven model of cable insulation defect based on convolutional neural networks. *Applied Sciences*, 2022, vol. 12, no. 16, art. no. 8374. doi: <https://doi.org/10.3390/app12168374>.

11. Zeller H.R., Schneider W.R. Electrofracture mechanics of dielectric aging. *Journal of Applied Physics*, 1984, vol. 56, no. 2, pp. 455-459. doi: <https://doi.org/10.1063/1.333931>.

12. Scanavi G.I. *Physics of dielectrics (region of strong fields)*. Moscow, GIFML Publ., 1958. 909 p. (Rus).

13. Blythe T., Bloor D. *Electrical properties of polymers*. Cambridge University Press, 2008. 496 p.

14. Zhou X., Zhao X., Suo Z., Zou C. Electrical breakdown and ultra-high electrical energy density in poly (vinylidene fluoride-hexafluoropropylene) copolymer. *Applied Physics Letters*, 2009, vol. 94, no. 16, art. no. 162901. doi: <https://doi.org/10.1063/1.3123001>.

15. Karpov V.G., Kryukov Y.A., Karpov I.V., Mitra M. Field-induced nucleation in phase change memory. *Physical Review B*, 2008, vol. 78, no. 5, art. no. 052201. doi: <https://doi.org/10.1103/PhysRevB.78.052201>.

16. Montanari G.C., Seri P., Dissado L.A. Aging mechanisms of polymeric materials under DC electrical stress: A new approach and similarities to mechanical aging. *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, 2019, vol. 26, no. 2, pp. 634-641. doi: <https://doi.org/10.1109/TDEI.2018.007829>.

17. Ding H.-Z., Varlow B.R. Thermodynamic model for electrical tree propagation kinetics in combined electrical and mechanical stresses. *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, 2005, vol. 12, no. 1, pp. 81-89. doi: <https://doi.org/10.1109/TDEI.2005.1394018>.

18. Pallon L.K.H., Nilsson F., Yu S., Liu D., Diaz A., Holler M., Chen X.R., Gubanski S., Hedenqvist M.S., Olsson R.T., Gedde U.W. Three-Dimensional Nanometer Features of Direct Current Electrical Trees in Low-Density Polyethylene. *Nano Letters*, 2017, vol. 17, no. 3, pp. 1402-1408. doi: <https://doi.org/10.1021/acs.nanolett.6b04303>.

19. Kitani R., Iwata S., Imatani S. Energy-Release Rate in Electrically Deteriorated Materials Introduced by Using Maxwell Stress Tensor at Crack Tip. *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, 2021, vol. 28, no. 6, pp. 1925-1932. doi: <https://doi.org/10.1109/TDEI.2021.009692>.

20. Zuoqian Wang, Marcolongo P., Lemberg J.A., Panganiban B., Evans J.W., Ritchie R.O., Wright P.K. Mechanical fatigue as a mechanism of water tree propagation in TR-XLPE. *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, 2012, vol. 19, no. 1, pp. 321-330. doi: <https://doi.org/10.1109/TDEI.2012.6148534>.

21. Kucheriava I.M. Computer analysis of electromechanical stress in polyethylene insulation of power cable at available micro-inclusion. *Technical Electrodynamics*, 2012, no. 5, pp. 10-16. (Rus).

22. Podoltsev O.D., Kucheriava I.M. Multiphysics processes in the region of inclusion in polyethylene insulation of power cable (three-dimensional modeling and experiment). *Technical Electrodynamics*, 2015, no. 3, pp. 3-9. (Rus).

23. Bezprozvannykh G.V., Mirchuk I.A. Correlation between electrical and mechanical characteristics of cables with radiation-modified insulation on the basis of a halogen-free polymer composition. *Electrical Engineering & Electromechanics*, 2018, no. 4, pp. 54-57. doi: <https://doi.org/10.20998/2074-272X.2018.4.09>.

24. Bezprozvannykh G.V., Boyko A.N., Roginskiy A.V. Effect of a dielectric barrier on the electric field distribution in high-voltage composite insulation of electric machines. *Electrical Engineering & Electromechanics*, 2018, no. 6, pp. 63-67. doi: <https://doi.org/10.20998/2074-272X.2018.6.09>.

25. Bezprozvannykh G.V., Kyessayev A.G., Mirchuk I.A., Roginskiy A.V. Identification of technological defects in high-voltage solid insula-

tion of electrical insulation structures on the characteristics of partial discharges. *Electrical Engineering & Electromechanics*, 2019, no. 4, pp. 53-58. doi: <https://doi.org/10.20998/2074-272X.2019.4.08>

26. Abrate S. Criteria for Yielding or Failure of Cellular Materials. *Journal of Sandwich Structures & Materials*, 2008, vol. 10, no. 1, pp. 5-51. doi: <https://doi.org/10.1177/1099636207070997>.

27. Stratton J.A. *Electromagnetic Theory*. Hoboken, IEEE Press, 2007. 630 p.

28. Lurie A. I. *Theory of Elasticity*. Heidelberg, Springer-Verlag Berlin, 2005. 1050 p.

Надійшла (Received) 24.04.2023
 Прийнята (Accepted) 02.08.2023
 Опублікована (Published) 02.01.2024

Пальчиков Олег Олегович¹, к.т.н.,
¹Національний університет кораблебудування
 імені адмірала Макарова,
 54025, Миколаїв, пр. Героїв України, 9,
 e-mail: ole2012hulk@gmail.com

O.O. Palchykov¹
¹Admiral Makarov National University of Shipbuilding,
 9, Heroyiv Ukraine Ave, Mykolaiv, 54025, Ukraine.

Determination of the maximum mechanical stresses in the insulating material around a defect with a high dielectric permittivity in an electrostatic field.

Introduction. All insulating macrohomogeneous solid materials change shape under the influence of an electric field. **Problem.** The presence of minor defects changes the distribution of an electric field and causes a significant concentration of mechanical stresses in a given section of the material, which, under certain circumstances, can cause partial or complete destruction of this material. **Goal.** The purpose of the work is to determine maximum mechanical stresses according to the von Mises criterion in insulating materials around defects with ionized air and water in an electrostatic field. Also, to analyze the influence of the following parameters on the indicated stresses: the location of the defect, the orientation angle of the semi-major axis of the defect cross-section, the ratio of semi-major and semi-minor axes, elastic and dielectric properties of the insulating material and the defect. **Methodology.** The study is based on the interrelated equations of electrostatics and structural mechanics for an isotropic piecewise homogeneous medium. The solution of these equations is obtained by the finite element method. **Results.** Graphs of dependences of maximum mechanical stresses on the ratio of semi-major and semi-minor axes of the ellipsoidal cross-section of the defect have been obtained. The minimum ratio of the greatest stresses in the insulating materials around the surface cracks and pores for ionized air has been 9.3 times for the maximum ratio of major and minor semi-axes of the cross-section of the defect considered in the work, which is 10. For a water defect, the similar ratio has been 2...5.6 times, increasing when the relative dielectric permittivity of the insulating material changes from 7 to 2. When Young's modulus of the insulating material increases from 1 MPa to 100 GPa, the angles of the inclination of the linearized dependences of maximum mechanical stresses around bounded pores with ionized air (water) to the axis of the ratio of major and minor semi-axes of the defect cross-section have been increased by 35.9° (58.0°) and 18.6° (20.1°) at orientations of major semi-axes at angles of 0° and 45°, respectively. **Originality.** The numerical-field mathematical two-dimensional model has been developed for the first time, which consists of sequentially solved equations of electrostatics and structural mechanics, for the determination of the distribution of mechanical stresses in an insulating material with a liquid or gaseous defect. It has been established for the first time that the ratio of the elastic properties of the insulating material and the defect determines the angle of the inclination of the linearized dependence of the maximum mechanical stress to the axis of the ratio of major and minor semi-axes of the defect cross-section. **Practical value.** The types of defects that contribute to the aging of insulation materials under the combined action of an electric field and a stress field to the greatest extent have been established. References 28, table 1, figures 10.

Key words: insulating material, internal and surface defect, electrostatics, structural mechanics, von Mises stress, finite element method.