

## ВПЛИВ ВИРОБНИЧИХ ФАКТОРІВ НА УМОВИ ВИКОРИСТАННЯ ЗАСОБІВ ІНДИВІДУАЛЬНОГО ЗАХИСТУ

*Л. Д. Третьякова, канд. техн. наук, А. О. Гуленко, студ. (НТУУ "КПІ")*

*Рассмотрены вопросы оценки дополнительных рисков, который возникают при использовании работниками АЭС средств индивидуальной защиты. Приведены математическая модель, методика и результаты численного расчета электростатических и тепловых полей вблизи работника.*

*Ключевые слова: средства индивидуальной защиты, электростатическое поле, теплообмен процесс.*

*Розглянуто питання оцінки додаткових ризиків, які виникають під час використання працівниками АЕС засобів індивідуального захисту. Наведено математичну модель, методичку і результати чисельного розрахунку електростатичних і теплових полів поблизу працівника.*

*Ключові слова: засоби індивідуального захисту, електростатичне поле, тепломасообмінний процес.*

*Questions of estimation the additional risks that arise in the process of using the personal protective equipment by NES workers are considered. Mathematical model, method and results of numerical calculation of electrostatic and thermal fields near a worker are presented.*

*Key words: personal protective equipment, electrostatic field, heat-mass-exchange processes.*

**Вступ.** Система індивідуального захисту на атомних електричних станціях (АЕС) передбачає одночасний захист тіла, обличчя, голови та органів дихання працівника. Сучасні засоби індивідуального захисту (ЗІЗ) виготовляють з полімерних матеріалів, які мають широкий спектр захисних властивостей. Такі матеріали водонепроникні, стійкі до дії хімічних речовин, пилу з радіонуклідними частинками і мають підвищені фізико-механічні характеристики, що забезпечує високий рівень надійності виробів. Недоліками таких матеріалів є відсутність повітро- і паропроникності та високий електричний опір, що може призвести до утворення додаткових ризиків під час використання ЗІЗ. У статті під ризиками розуміємо можливість небажаної події, яка обумовлює появу небезпеки, пов'язаної з погіршенням самопочуття і здоров'я працівника [1].

Аналіз використання ЗІЗ дав змогу виокремити основні виробничі фактори, які обумовлюють додаткові ризики. У першу чергу це пов'язано з утворенням у внутрішніх і поверхневих шарах ЗІЗ електростатичних полів, які негативно впливають на здоров'я працівників і супроводжуються електричними розрядами. Статична електризація з подальшим розрядом на заземлене устаткування або електричний розряд з незаземленого устаткування через тіло людини викликає болісні та нервові відчуття, які супроводжуються мимовільними різкими рухами, в результаті яких можуть мати місце травми. Використання ізолювальних ЗІЗ, особливо у теплий період року, може

призвести до порушення теплового стану працівників. Тому виникає необхідність оцінки ступеня ризиків і впровадження заходів, які запобігають їх утворенню.

**Мета статті** – аналіз електричного і теплового навантаження на працівника в ізолювальному захисному комплекті в умовах АЕС. Об’єкт досліджень – системи індивідуального захисту працівників АЕС. Предмет досліджень – методика розрахунку електростатичного і теплового поля на поверхнях ЗІЗ.

**Виклад основного матеріалу.** У виробничих умовах АЕС джерелом електричних зарядів є заряджені частки пилу, які осідають на захисних засобах, і зовнішні електричні поля. Електростатичне поле утворюється системою нерухомих зарядів за відсутності електричного струму. Основні диференціальні рівняння, які встановлюють зв’язок між зарядами  $q$ , напруженістю поля  $E$  і потенціалом  $\varphi$ , запишемо у вигляді [2]

$$\operatorname{div} E = \frac{q}{\varepsilon_r \varepsilon_0}, \quad (1)$$

$$E = -\operatorname{grad}(\varphi), \quad (2)$$

де  $\varepsilon_r$  – відносна діелектрична проникність середовища;  $\varepsilon_0$  – постійна діелектрична проникність.

Поле, яке утворили заряди, є функцією тривимірних координат  $x, y, z$  і змінюється впродовж часу  $\tau$ .

$$q = f(x, y, z, \tau).$$

Відповідно  $\operatorname{grad}(\varphi)$  можна виразити через складові градієнта електричного потенціалу за віссю у тривимірному просторі  $\frac{\partial \varphi}{\partial x}, \frac{\partial \varphi}{\partial y}, \frac{\partial \varphi}{\partial z}$ :

$$\operatorname{grad}(\varphi) = \mathbf{i} \frac{\partial \varphi}{\partial x} + \mathbf{j} \frac{\partial \varphi}{\partial y} + \mathbf{k} \frac{\partial \varphi}{\partial z}. \quad (3)$$

Градієнт потенціалу позначаємо через символічний оператор “набла”  $\nabla$  і за таких перетворень (2) набуває вигляду

$$E = -\nabla \varphi. \quad (4)$$

Знак мінус показує, що потенціал убуває в напрямку ліній напруженості поля і це дає змогу прирівняти потенціал однієї точки до нуля. Поле, яке характеризується такими функціями (1–4), є потенціальним, і потенціал поверхні, на якій знаходиться працівник, прийнято за нульовий.

Роботи на АЕС здійснюються в умовах коливань температури зовнішнього середовища в діапазоні від  $-10$  °C до  $+60$  °C. Захисний ізолювальний комплект, передбачений в контрольованих зонах АЕС, ізолює організм працівника від одного або кількох видів небезпеки. В той же час захисний одяг створює

працівнику штучно регульований мікроклімат. Мікроклімат у підодяговому просторі за своїми параметрами і властивостями суттєво відрізняється від параметрів зовнішнього середовища і характеризується меншими коливаннями температур. Температура  $t$  є параметром стану тіла і характеризує теплове поле у просторі і часі:

$$t = f(x, y, z, \tau).$$

Організм людини – це система з внутрішнім джерелом тепла, в якій кількість тепла, що виробляється, відповідає кількості тепла, що віддається у зовнішнє середовище. За балансу цих складових температура тіла працівника залишається незмінною і він знаходиться у зоні теплового комфорту. Зміна функціонального стану організму зумовлена м'язовою роботою (статичною і динамічною) верхніх і нижніх кінцівок та інших органів. Додаткове статистичне навантаження виникає також під час використання ізолювального комплекту ЗІЗ (захисний одяг, респіратор, спеціальне взуття, рукавиці, запобіжні пояси та ін.), вага якого може досягати до 20 кг. Якщо кількість теплоти, що виробляється, перевищує кількість теплоти, що віддається, відбувається перегрівання всього організму. Кількість теплоти  $Q$ , що передається через захисний комплект одиницею площі в одиницю часу визначається за законом Фур'є [3]

$$Q = -\lambda \cdot \text{grad}(t), \quad (5)$$

де  $\lambda$  – коефіцієнт теплопровідності матеріалу.

Після аналогічних перетворень градієнта температури загальна зміна кількості теплоти і температури в об'ємі  $(dx, dy, dz)$  у тривимірному полі визначаємо

$$dQ = -\lambda \nabla^2 t,$$

$$\frac{\partial t}{\partial \tau} = \frac{\lambda}{c\gamma} (\nabla^2 t),$$

де  $c$  – теплоємність;  $\gamma$  – питома вага матеріалу.

Таким чином, теплове та електростатичне поля, які утворюються на поверхнях захисних комплектів, характеризуються різними фізичними моделями, але описуються однаковими математичними моделями потенціальних полів.

Завданням розрахунку електростатичного поля є визначення розподілу напруженості і потенціалів на поверхні ізолювального комплекту та у просторі навколо працівника. Завданням розрахунку процесу теплообміну є визначення зміни потоку теплоти, що передається від працівника через багат шаровий пакет одягу у зовнішнє середовище. Розв'язати такі завдання аналітичним способом у кінцевому вигляді можна лише для окремих спрощених випадків, обмежених певними умовами: прямолінійні поверхні нескінченної довжини; однорідне середовища з рівномірним поверхневим зарядом або температурою.

Звести до таких умов реальні електростатичні і теплові поля, які виникають на поверхнях ЗІЗ в умовах АЕС, неможливо.

За таких умов розв'язання завдання розрахунку показників потенціального поля можна отримати одним з відомих нині чисельних методів, реалізованих у комп'ютерних програмах. У цій праці для розв'язання завдання було використано пакет програм COMSOL.

Використання пакету програм COMSOL вимагало розроблення окремих комп'ютерних програм, адаптованих до вимог моделі працівник–ЗІЗ–потенціальне поле–виробниче середовище. Такі програми передбачають створення геометричної фігури працівника, на яку накладається розподілення зарядів або температур [4]. Вихідну інформацію було отримано за результатами натурних експериментів. Розрахунок відповідних диференціальних рівнянь здійснено чисельним методом кінцевих елементів [5].

У результаті розрахунку поверхневого електростатичного поля отримано розподілення потенціалів за поверхнею ЗІЗ, напруженість у всіх точках поля (рис. 1).

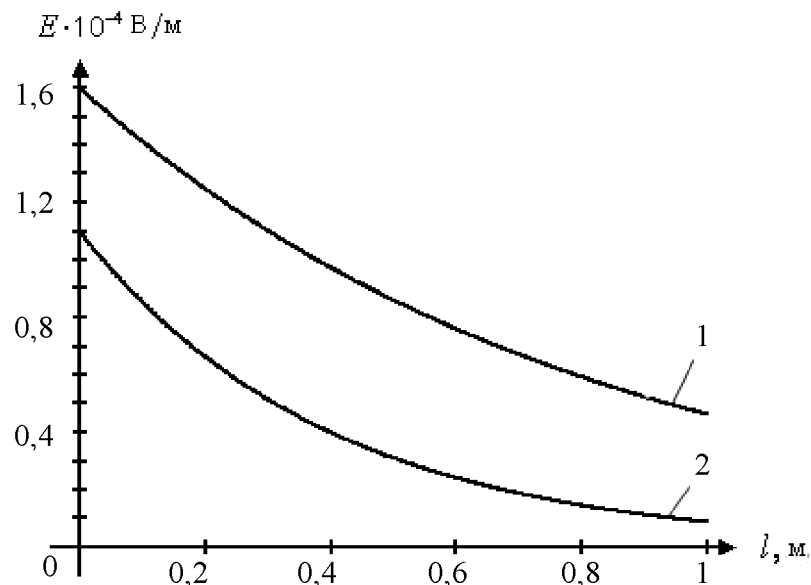


Рис. 1. Розподілення напруженості електростатичного поля в зовнішньому середовищі біля працівника за нерівномірного (1) і рівномірного (2) розподілення поверхневої густини зарядів

Для максимального зафіксованого значення поверхневої густини зарядів, яке дорівнювало  $10^{-7} \text{ Кл/м}^2$ , максимальне значення потенціалу становить 8 кВ у ділянці шиї та передньої пілочки одягу.

Моделювання процесу теплопередачі, який залежить від приросту кількості теплоти в організмі людини і зовнішньої температури, дало змогу визначити результуючий тепловий потік від працівника, одягнутого у захисний комплект (натільна білизна, бавовняний комбінезон та ізолювальний костюм, респіратор), у зовнішнє середовище. Зменшення відводу теплового потоку від працівника у зовнішнє середовище під час зростання температури змушує

обмежувати час безперервної роботи і приводить до необхідності відпочинку впродовж певного періоду (рис. 2).

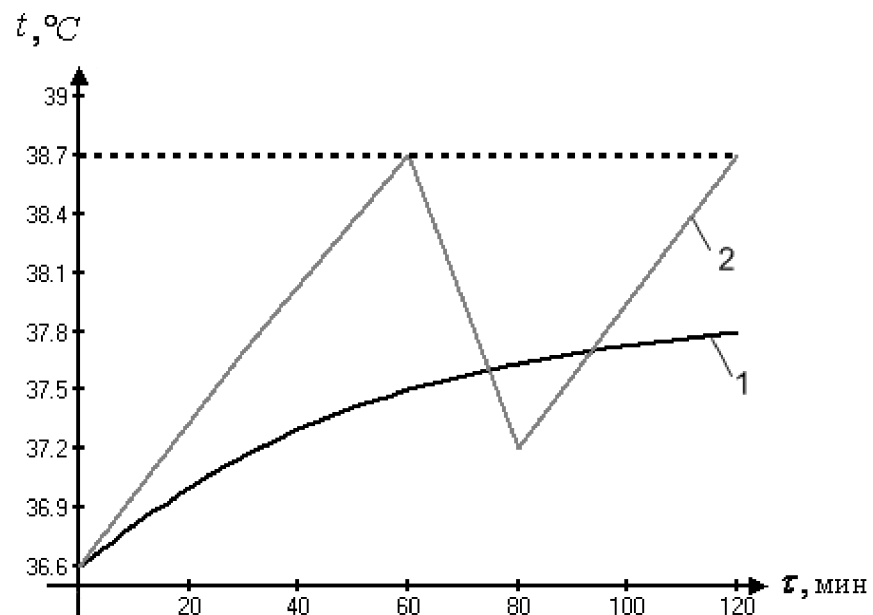


Рис. 2. Залежність температури тіла працівника  $t$  у часі від температури зовнішнього середовища: 1 –  $t_{\text{зс}} = 15 ^\circ\text{C}$ ; 2 –  $t_{\text{зс}} = 24 ^\circ\text{C}$

Як випливає з розрахунків, основними чинниками, які визначають граничну тривалість роботи, є температура тіла працівника, яка не повинна перевищувати  $38,7 ^\circ\text{C}$ , і температура зовнішнього середовища. За температури, що перевищує  $33 ^\circ\text{C}$ , тепловий потік спрямовано у бік людини, що практично обмежує тривалість робіт в ізолювальному комплекті до 10–15 хвилин.

### Висновки

1. Комплект ЗІЗ необхідно обирати з урахуванням умов праці, зважаючи на можливі додаткові ризики під час застосування, обумовлені впливом факторів виробничого середовища, що змінюються. В умовах АЕС роботу у ЗІЗ ускладнюють електростатичні та теплові поля, які виникають на їх поверхнях.

2. Запропоновано методику чисельного розрахунку електростатичного поля і процесу тепломасообміну між працівником у ізолювальному комплекті і зовнішнім середовищем на основі єдиного підходу до формування математичної моделі.

3. За результатами розрахунків отримано розподілення напруженості та електричних потенціалів за поверхнею і в просторі та величини результуючих теплових потоків між працівником, який виконує роботи з різним рівнем інтенсивності, і зовнішнім середовищем. Отримані результати дають можливість розробити заходи з обмеження додаткових ризиків.

1. EN – 340: 1993. Protective clothing. General requirements. London, BSI, 1993. – 7 p.
2. Демирчян К. С. Теоретические основы электротехники. Т. 3 / К. С. Демирчян, Л. Р. Нейман, Н. В. Коровкин, В. Л. Чечурин. – С.-Пб. – Изд. дом “Питер”. – 2004. – 376 с.

3. *Исаченко В. П.* Теплопередача / В. П. Исаченко, В. А. Осипова, А. С. Сукомел. – М.: Энергия, 1965. – 423 с.

4. *Третьякова Л. Д.* Анализ электростатического поля вблизи человека в защитной одежде из полимерного материала при наличии на ней поверхностного заряда / Л. Д. Третьякова, А. Д. Подольцев // *Технічна електродинаміка*, 2010, № 6. – С. 10–15.

5. *Третьякова Л. Д.* Дослідження і моделювання теплового стану працівника в ізолювальному комплекті / Третьякова Л.Д. // *Вісник НТУУ “КПІ”. Серія “Гірництво”*. – 2010. – Вип. 19. – С. 154–161.