

Б. Д. Халмурадов, М. М. Багрій

Національний авіаційний університет, Київ, Україна

## ЗАСАДИ РОЗРОБЛЕННЯ МАТЕРІАЛІВ І КОНСТРУКЦІЙ ВИГОТОВЛЕННЯ ЗАСОБІВ ІНДИВІДУАЛЬНОГО ЗАХИСТУ ВІД ВПЛИВУ ЕЛЕКТРИЧНИХ ПОЛІВ

**Анотація.** Предметом дослідження є визначення загальних конструктивно-технологічних рішень виготовлення та випробування одягу для захисту працюючих від впливу електромагнітних полів. Обґрунтовано використання льняної тканини для виготовлення спецодягу, а саме пористість структури волокна, що дає можливість насичення її екрануючими металевими частинками (магнітною рідиною з вмістом феромагнітних наночастинок). Розглянуто два способи підвищення функціональності спеціального захисного одягу шляхом підвищення захисних властивостей одного шару металополімерного матеріалу. Перший – використання у якості екрануючої субстанції не залізорудного пилу, а залізорудного концентрату, який є кінцевим продуктом збагачення залізної руди. Другий спосіб полягає у збільшенні товщини металополімеру за рахунок зниження тиску під час його нанесення на текстильну основу (прокачування крізь вальці), що дозволить збільшити товщину екрануючих вставок до 1,0 – 1,5 мм та суттєво не вплине на ергономічні характеристики одягу. Отримані результати показують доцільність для підвищення ефективності захисту працюючих, дозволяють розробляти комбіновані засоби захисту з використанням як металополімерних, так і металотекстильних матеріалів.

**Ключові слова:** захисний матеріал, коефіцієнт екранування, феромагнітні наночастинок, залізорудний пил, залізорудний концентрат.

### Вступ

Міжнародний норматив [1] та національний норматив України [2] вимагають забезпечення персоналу, що працює в умовах впливу електричних, магнітних та електромагнітних полів наднормативних рівнів. Існуючі захисні костюми із вплетеними дротами не відповідають сучасним вимогам через необхідність заземлення одягу, низьку ергономічність через жорсткість матеріалу та деградацію захисних властивостей внаслідок розриву дротів у процесі експлуатації. Сучасні композиційні матеріали частково позбавлені цих вад, але жоден з них не відповідає актуальним вимогам у повному обсязі. Значною мірою це обумовлене неузгодженістю розроблення й дослідження захисних властивостей композитів та розроблення захисного одягу потрібних функціональних властивостей, що є актуальною науково-прикладною задачею.

**Стан питання.** Розробленню та дослідженню властивостей захисних матеріалів та виготовлення з них захисного одягу для персоналу, що працює в умовах впливу небезпечних та шкідливих факторів виробничого середовища приділяється багато уваги. Найбільша кількість досліджень й розробок присвячена захисту пожежних [3, 4].

Не дивлячись на відмінність факторів впливу, ці роботи важливі з точки зору термодинамічних характеристик костюму, що є обов'язковим для захисного одягу будь-якого призначення. У загальному випадку захист від впливу конкретного шкідливого фактора та інші параметри одягу можна поєднати [5]. Цей напрям досліджень розвинутий у роботі [6]. З'ємність конструктивних елементів захисту дозволяє змінювати рівень захисту від впливу електромагнітних полів у залежності від конкретних виробничих умов, але для деяких випадків, за відносно невеликих напруженостей по-

лів, доцільно розробити захисний костюм з одного прийняттого матеріалу. Такий матеріал може бути отриманий просоченням екрануючої субстанцією обраного текстильного матеріалу [7].

Дослідження [4] свідчать, що використання нанозаліза у вигляді магнітної рідини забезпечує великі коефіцієнти екранування магнітного поля промислової частоти та електромагнітного поля ультрависокої частоти. Але отримані показники надлишкові, тобто для більшості виробничих умов такі коефіцієнти екранування не потрібні, а вартість магнітної рідини дуже висока, зокрема у пропонуваніх кількостях.

Розробка [5] свідчить, що достатні, а за великих концентрацій металевої та металовмісної субстанції, великі коефіцієнти екранування можна отримати при використанні залізорудного пилу, а відповідно у якості носія (матриці) використовується пінолатекс, непридатний для виготовлення одягу. Отримані результати, зокрема універсальність щодо частоти екранованого поля та низька вартість, обумовлює доцільність досліджень щодо використання залізорудного пилу для виготовлення захисного покриття на основі текстильного матеріалу.

Актуальною є задача вибору найбільш раціонального матеріалу для виготовлення захисного одягу та конструкції для захисту від дії різних електромагнітних впливів.

**Метою роботи** є визначення загальних конструктивно-технологічних засад виготовлення та випробування одягу для захисту працюючих від впливу електромагнітних полів з урахуванням параметрів вихідних матеріалів.

### Результати досліджень

Досвід розроблення та дослідження текстильних та полімерних матеріалів для виготовлення

засобів індивідуального захисту свідчать, що обидва класи матеріалів придатні для цього.

Відмінності полягають тільки у конструкціях захисного одягу.

З текстильного матеріалу доцільно виготовляти одяг, який відповідає певним вимогам ергономічних характеристик. Це стосується персоналу, який у процесі виконання службових обов'язків багато пересувається:

робітники з обслуговування повітряних ліній електропередачі,

радіотехнічні об'єкти бездротового зв'язку та аеродромного обладнання.

Полімерні захисні матеріали застосовуються у якості вставок у захисний одяг [6].

Такі конструкції костюмів досить ефективні, але мають нижчі ергономічні показники через жорсткість конструкції. Цей одяг доцільно використовувати для виконання робіт, які не вимагають великої рухливості та пересування – електрозварювання, обслуговування трансформаторних підстанцій та відкритих розподільчих пристроїв енергетичних мереж.

Основною задачею проектування є способи закріплення залізорудного пилу у волокнах текстильного матеріалу. Звичайне просочення тканини водним розчином залізорудного пилу не дає бажаного результату через недостатнє зчеплення частинки з волокнами.

Необхідність доброго зчеплення обумовлюється обов'язковим витримуванням одягу багаторазового прання без втрати захисних властивостей. Запропоновано та проаналізовано два способи закріплення частинки залізорудного пилу у волокнах текстильного матеріалу

Для виготовлення захисних костюмів з текстильного матеріалу доцільно використовувати льняну тканину, волокна якої насичені екрануючими металевими частинками. Для проведення досліджень було обрано у якості основного матеріалу тканину (артикул – 3581, волокнистий склад: ЛН–75 %, ПЕФ–25 %), яка використовується для виробництва спеціального одягу. Її перевагою є висока міцність та низька горючість порівняно з синтетичними матеріалами.

Наприклад, у роботі [8] показано, що оброблення льняної тканини, просоченої магнітною рідиною з вмістом феромагнітних наночастинок у неоднорідному постійному магнітному полі напруженістю 450 А/м підвищує коефіцієнт екранування електричного поля промислової частоти з 1,4 до 2,9. Коефіцієнт екранування магнітного поля промислової частоти підвищується з 1,9 до 2,3. При цьому застосовувався лише один шар тканини. За двох шарів коефіцієнт екранування підвищується до 5,2, а при трьохшаровому захисті до 8,9. Відомо, що рівні електромагнітних полів промислової частоти у виробничих умовах майже ніколи не перевищують гранично допустимі у 2-3 рази, такі захисні якості матеріалу є цілком задовільними.

При проектуванні захисного одягу крім ергономічних показників необхідно враховувати міцні-

сні та термодинамічні параметри виробів. Щодо захисних властивостей, та згідно з національними нормативами, такий одяг повинен витримувати принаймні п'ять циклів прання або відповідну кількість хімічних чищень. Збереження захисних властивостей регламентується спеціальними випробуваннями за стандартною методикою.

Ще однією принциповою відмінністю захисних конструкцій щодо екранування електромагнітних полів промислової частоти є необхідність уникати у суцільних конструкціях різких звужень та заломів. У [8] показано, що за перебування у суцільному костюмі у вертикально спрямованому магнітному полі у шийному відділі відбувається не зниження, а підвищення індукції магнітного поля. Це обумовлене зменшенням площі протікання магнітного потоку. Тому при розробленні костюму захисний матеріал повинен переходити з верхньої частини костюму, що вкриває голову людини, до частини костюму, що вкриває плечовий пояс людини, без конструктивних елементів, що забезпечують прилягання одягу та заломів (трапецивидно).

Щодо електромагнітних випромінювань ультрависоких частот, які забезпечують бездротовий зв'язок (1,8 – 2,6 ГГц), та гарантовані коефіцієнти екранування 1-2-шаровими металотекстильними матеріалами складають 2 – 3. Враховуючи, що гранично допустимий рівень щільності потоку енергії для цих частот складає 10 мкВт/см<sup>2</sup>, наведені коефіцієнти екранування є достатніми.

Для виготовлення захисного одягу з екрануючими металополімерними вставками у технологічні кишені [6] не бажано застосовувати кілька шарів захисту через певну жорсткість матеріалу. Але захисні властивості одного шару металополімеру недостатні [7], як для магнітного поля промислової частоти (2,2 – 2,6), так і для випромінювання ультрависоких частот (2,1 – 2,4). Тому для підвищення функціональності такого одягу необхідно підвищити захисні властивості одного шару металополімерного матеріалу. Це можливе у два способи. Перший – використання у якості екрануючої субстанції не залізорудного пилу, який насичується на фільтрувальних завесах у аспіраційних системах при подрібненні залізної руди, а залізорудного концентрату, який є кінцевим продуктом збагачення залізної руди.

Другий спосіб полягає у збільшенні товщини металополімеру. Раніше розроблений матеріал мав товщини 0,3 – 0,5 мм. Тому зниження тиску під час нанесення металополімеру на текстильну основу (прокачування крізь вальці) дозволить збільшити товщину екрануючих вставок до 1,0 – 1,5 мм, суттєво не вплине на ергономічні характеристики одягу (рис. 1, 2). В той же час екрануючі властивості матеріалу зростають лінійно пропорційно з товщиною матеріалу.

У результаті захисні показники матеріалу складають 3,5 – 4,5, що є достатнім.

Результати випробувань захисних властивостей матеріалу наведено у табл. 1 та 2.

Таблиця 1 – Залежність коефіцієнта екранування електромагнітного поля  $K_e$  частотою 1,8 ГГц від кількості шарів захисного матеріалу  $n$ \*

$n$	1	2	3	4
$K_e$	2,8	5,6	9,6	17,0

\* Коефіцієнтом екранування вважається відношення щільності потоку енергії перед екраном до цього показника у захищеній зоні. Вихідна щільність потоку енергії 190-210 мкВт/см<sup>2</sup>

Таблиця 2 – Залежність коефіцієнта екранування електромагнітного поля  $K_e$  частотою 50 Гц від кількості шарів захисного матеріалу  $n$ \*

$n$	1	2	3	4
$K_e$	2,9	8,0	16,2	23,0

\* Коефіцієнтом екранування вважається відношення індукції магнітного поля перед екраном до цього показника у захищеній зоні. Вихідна індукція магнітного поля 230-240 мкТл

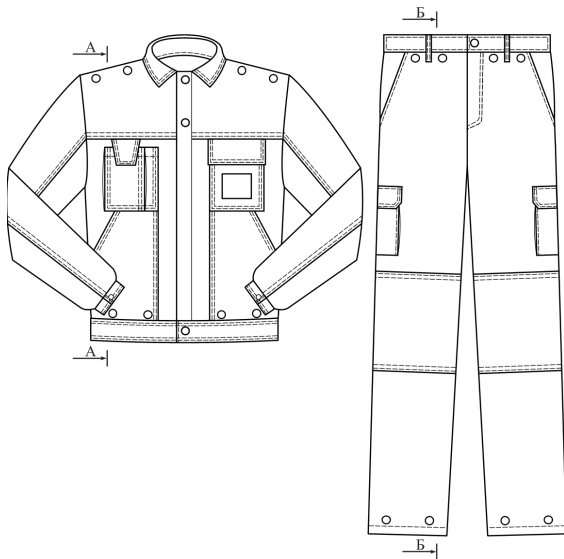


Рис. 1. Схематичне зображення зовнішнього виду костюму для захисту від впливу ЕМП широкого частотного діапазону

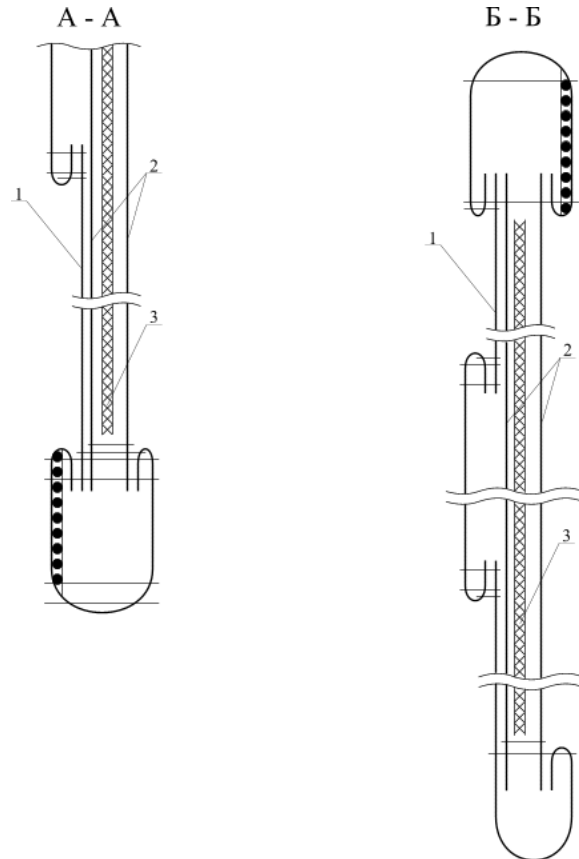


Рис. 2. Переріз пілочок куртки та переріз штанів.  
1 – тканина основи, 2 – тканина підкладки, 3 – з'ємний захисний елемент

Як видно з наведених даних, коефіцієнти екранування в обох випадках дещо вищі порівняно з даними, наведеними у [9].

Експериментально визначаються коефіцієнти екранування матеріалу у залежності від його товщини та вмісту екрануючої субстанції.

Для цього можна використати відоме співвідношення для довгого циліндричного екрана:

$$K_e \approx \frac{\mu_{ef} \cdot (b^2 - a^2)}{4b^2}, \quad (1)$$

де  $K_e$  – коефіцієнт екранування;  
 $\mu_{ef}$  – ефективна магнітна проникність матеріалу;

$b, a$  – зовнішній та внутрішній радіус екрана ( $b - a$  – товщина стінки).

На основі експериментальних даних щодо коефіцієнта екранування визначається залежність ефективної магнітної проникності від геометричних та фізико-хімічних параметрів екрана.

Цю залежність використовують у подальшому для отримання екрануючого матеріалу з коефіцієнтом екранування, відповідними умовами експлуатації захисного одягу.

Захисний одяг з металополімерними вставками відповідає чинним вимогам до таких виробів. Методики випробовувань захисних властивостей одягу для захисту від впливу електричних, магнітних та електромагнітних полів передбачає контрольні вимірювання у зонах голови, грудної клітки та нижньої частини тулуба. Але, як показано вище, захисний матеріал може сприяти підвищенню індукції магнітного поля у шийному відділі. Це ж можливе в інших місцях з великою кривизною захисного матеріалу. Тому доцільним є для підвищення ефективності захисту працюючих розробляти комбіновані засоби захисту з використанням як металополімерних, так і метало- текстильних матеріалів.

### Висновки

1. Проектування спеціального одягу для захисту працюючих від впливу електромагнітних полів слід здійснювати у двох напрямках з урахуванням інтенсивності перебування працівників. Для персоналу з експлуатації повітряних ліній електропередачі та обслуговування радіотехнічних об'єктів доцільно виготовляти засоби індивідуального захисту з металотекстильного матеріалу. Для електроразв'язувальників та персоналу відкритих розподільчих пристроїв – з металополімерного матеріалу.

2. Для підвищення функціональності матеріалів для екранувального одягу доцільно збільшення коефіцієнтів екранування як низькочастотних, так й високочастотних полів. Це досягається магнітною обробкою текстильного матеріалу, просоченого магнітною рідиною. Для підвищення захисних властивостей металополімерного матеріалу має

сене заміни у якості екрануючого наповнювача залізородного пилу на залізородний концентрат та збільшити товщину матеріалу з 0,3 – 0,5 мм до 1,0 – 1,5 мм.

3. Підвищення індукції магнітного поля у підодяговому просторі у місцях звуження пакету одягу (шийний відділ) вимагає конструктивних рішень, за впровадження яких, елементи одягу не будуть мати заломів та звужень, де ущільнюється магнітний потік.

Доцільним є розроблення й випробовування захисного костюму комбінованого типу з використанням металотекстильного та металополімерного матеріалів.

4. Отриманий текстильний матеріал з заданими екрануючими властивостями має коефіцієнт екранування ( $K_e$ ) для частоти мобільного зв'язку 1,8 ГГц – 2,8-17,0 (зі збільшенням кількості шарів матеріалу зростає  $K_e$ ), для частоти 50 Гц – 2,9-23,0.

### СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Directive 2013/35/EU of the European Parliament and of the Council of 26 June 2013 on the minimum health and safety requirements regarding the exposure of workers to the risks arising from physical agents (electromagnetic fields). <http://eur-lex.europa.eu/LexUriServ/LexUriServ.do?uri=OJ:L:2013:179:0001:0021:EN>.
2. Державні санітарні норми і правила при роботі з джерелами електромагнітних полів: ДСанПіН 3.3.6.096–2002. Офіційний вісник України від 07.09.2009. 2009. № 66.
3. Болибрух Б., Хмель М. Разработка и верификация расчетной модели теплового состояния теплозащитной одежды пожарного при различных видах испытаний. *Bezpieczeństwo i Technika Pożarnicza*. 2015. № 2. С. 53-63.
4. Костенко Т.В. Охлаждения теплозащитного костюму рятувальника з допомогою пінного пристрою. *Геотехнічна механіка*. № 37. С. 42-48.
5. Третьякова Л.Д., Остапенко Н.В., Колосніченко М.В., Луцкер Т.В. Зонально-модульна модель для розроблення комплектів захисного одягу. Вісник Хмельницького національного університету. 2015. № 2. С. 69-72.
6. Багрій М.М. Розроблення та дослідження екрануючих властивостей спецодягу для захисту від електромагнітних впливів. *Системи управління, навігації та зв'язку*. 2019. № 4 (56) С. 118-121.
7. Левченко Л.О., Багрій М.М., Караєва Н.В. Дослідження екранування електромагнітного поля текстильним матеріалом з вмістом феромагнітних наночастинок. *ВІСТІ Донецького гірничого інституту*. 2019. № 2 (45) С. 103-109.
8. Glyva V., Varabash O., Kasatkina N., Katsman M., Levchenko L., Tykhenko O., Nikolaiev K., Panova O., Khalmuradov B., Khodakovskiy O. *Studying the shielding of an electromagnetic field by a textile material containing ferromagnetic nanostructures Eastern-European journal of enterprise technologies*. 2020. № 1/10 (103). P. 26-31
9. Тихенко О.М., Багрій М.М., Левченко Л.О., Ходаковський О.В., Резнік Д.В. Розроблення та дослідження захисних властивостей металотекстильних електромагнітних екранів. *Вісті Донецького гірничого інституту*. 2019. № 3. С. 47-51.

Received (Надійшла) 12.03.2020

Accepted for publication (Прийнята до друку) 29.04.2020

### Fundamentals of designing materials and structures for the manufacture of personal protective equipment against the influence of electric fields

B. Khalmuradov, M. Bahrii

**Abstract.** The subject of the study is the determination of the general structural and technological solutions for the manufacture and the testing of clothing to protect employees from the influence of electromagnetic fields. It is substantiated that the use of linen fabric for the manufacture of workwear, namely the porosity of the structure of the fiber, which makes it possible to saturate it with shielding metal particles (a magnetic fluid containing ferromagnetic nanoparticles). Were considered two ways of enhancing the functionality of special protective clothing by enhancing the protective properties of one layer of metallic polymer material. The first is the use of iron ore concentrate, which is the final product of iron ore enrichment, as a shielding substance. The second method is to increase the thickness of the metal polymer by reducing the pressure during its application to the textile base (pumping through rollers), which will increase the thickness of the shield inserts to 1.0 - 1.5 mm and will not significantly affect the ergonomic characteristics of clothing. The results obtained show the feasibility of increasing the efficiency of worker protection, allowing the development of combined means of protection using both metal-polymer and metal-textile materials.

**Keywords:** protective material, shielding factor, ferromagnetic nanoparticles, iron ore, iron ore concentrate.