

## Дослідження екранування електромагнітного поля текстильним матеріалом з вмістом феромагнітних наноструктур

В. А. Глива, О. В. Барабаш, Н. В. Касаткіна, М. Д. Кацман, Л. О. Левченко, О. М. Тихенко, К. Д. Ніколаєв, О. В. Панова, Б. Д. Халмурадов, О. В. Ходаковський

Розроблено технологію виготовлення текстильного матеріалу з вмістом феромагнітних наночастинок для екранування електромагнітних полів. Показано, що найбільш ефективним методом зчеплення наночастинок з волокнами текстильного матеріалу є нанесення магнітної рідини з наночастинками на матеріал та витримка його у неоднорідному постійному магнітному полі. За умов напруженості магнітного поля 450 А/м та його впливу протягом 12 годин імплантація наночастинок у льняну тканину стає практично незворотною. Досліджено захисні властивості розробленого матеріалу. За просочення магнітною рідиною з витратами 45–50 г/м<sup>2</sup> (вміст феромагнітних частинок – 9 % за вагою) коефіцієнти екранування для 1–3 шарів матеріалу складають: для електричного поля промислової частоти 1,4÷4,8; для магнітного поля – 1,9÷8,1. Після магнітної обробки ці показники складають 2,9÷8,6 та 2,3÷8,9 відповідно. Для видалення з магнітної рідини технологічних компонентів, таких як вакуумне мастило та олеїнова кислота, достатньо застосувати синтетичний миючий засіб, що підтверджено експериментальним шляхом.

Досліджено ефективність отриманого результату у реальних виробничих умовах. Встановлено, що зниження напруженості магнітного поля промислової частоти та її інтергармонік одним шаром просоченого матеріалу без магнітної обробки складає 1,4, з магнітною обробкою – 2. При цьому не відбувається суттєвого зниження рівня природного геомагнітного поля. Проведено моделювання розподілу магнітного поля у тілі людини у разі виготовлення з розробленого матеріалу захисного костюму. За умов гарантованого зниження напруженості магнітного поля у 2 рази у критичних місцях спостерігається підвищення рівня поля у шийному відділі через підвищення у цьому місці магнітного опору. Це необхідно враховувати при проектуванні конфігурації захисного костюму.

*Ключові слова:* електромагнітне поле, наночастинки, текстильний матеріал, коефіцієнт екранування, магнітна обробка

### 1. Вступ

Сучасні вимоги охорони праці персоналу, що експлуатує джерела електромагнітних полів [1], передбачають наявність засобів індивідуального та колективного захисту. Це пояснюється тим, що електричні та магнітні поля антропогенного походження шкідливі для здоров'я людини. У Додатку до [1] на основі аналізу гігієнічних даних наголошується, що електромагнітні поля широ-

кого спектра викликають як тимчасові, так і незворотні наслідки для здоров'я. Це, перш за все, пригнічення окисно-відновних процесів у тканинах, розширення судин, підвищення та зниження артеріального тиску, двостороння катаракта, електрокардіографічні зміни, зміни в поведінці, обумовлені порушеннями нервової системи при хронічному електромагнітному впливі. Гранично допустимі значення магнітного поля промислової частоти усередині приміщення складають 05 мкТл, а електричного поля – 0,5 кВ/м. При цьому Всесвітня організація охорони здоров'я застосовує до електромагнітних полів принцип ALARA (As Low As Reasonably Achievable). Це означає, що за наявності технічних можливостей значення електромагнітних полів необхідно мінімізувати.

Найбільш ефективними засобами зниження рівнів електромагнітних полів є електромагнітні екрани та спеціальний одяг, виготовлений з екрануючих матеріалів. Зокрема, такий одяг є обов'язковим для працівників енергетичної галузі. Головні вимоги до таких матеріалів – достатні коефіцієнти екранування електричного, магнітного поля наднизької (промислової) частоти та її гармонік, технологічність обробки та прийнятна вартість. Крім того, такі матеріали повинні витримувати механічну та термічну обробку (прання, хімічну чистку тощо) без суттєвої втрати захисних властивостей. На сьогоднішній день матеріали, які задовольняють усі ці вимоги, відсутні. Актуальною задачею є створення інноваційного матеріалу, придатного для виготовлення засобів індивідуального захисту від впливу електромагнітних полів.

## **2. Аналіз літературних даних та постановка проблеми**

Практично усі матеріали для захисту працівників в умовах впливу електромагнітних полів мають вплетений у тканину металевий дріт [2]. Принциповим недоліком таких структур є зниження захисних властивостей матеріалу у процесі експлуатації через розриви дрітків. Крім того, вироби з цих матеріалів передбачають заземлення. Це стосується також матеріалів з мікродротоми [3]. Таких недоліків позбавлені матеріали з рівномірним розподілом екрануючої субстанції у тілі матеріалу (матриці) [4]. Але феритові частинки у матриці мають великі розміри, що робить товщину матеріалу (1 мм і більше) непринятною для виготовлення захисного одягу. У роботі [5] запропоновано захисний матеріал широкого частотного діапазону, який складається із целюлози з вмістом вологи. Але такий матеріал швидко деградує, тобто втрачає вологу під час механічних впливів. Дослідження [6] стосується застосування нанокарбону у якості екрануючої субстанції у полімерній матриці. Такий матеріал має прийнятні коефіцієнти екранування. Але його неможливо застосовувати для виготовлення спеціального одягу через незадовільні термодинамічні характеристики. У роботі [7] показано, що ефективність екранування магнітного поля промислової частоти та електромагнітного поля ультрависокої частоти зростає зі зменшенням розмірів металевих частинок у композитному металополімерному матеріалі. Такі екрани виготовлялися з використанням мікрочастинок заліза та його оксидів і мали товщину 1–3 мм. Тому слід очікувати, що зі зменшенням екрануючих частинок до нанорозмірів можна зменшити товщину матеріалу зі збереженням ефективності екранування.

У роботі [8] досліджено можливості застосування наночастинок на основі феритів у якості екрануючих матеріалів. Її перевагою є наявність математичного апарату для розрахунку ефективності екрана, але робота стосується захисту від електромагнітних полів ультрависоких та надзвичайно високих частот. Використання поліпропілену у якості основи робить матеріал неприйнятним для виготовлення засобів індивідуального захисту.

Дослідження [9] стосується можливостей застосування карбонових волокон нанорозмірів для екранування електромагнітних полів, але розглядається захист від полів на частотах 8 ГГц і вище. Даних щодо використання нанокompозитів для захисту від електричних та магнітних полів промислової частоти не наведено.

У дослідженні [10] теоретично обґрунтовано і виконано обчислювальний експеримент щодо використання у якості магнітного екрана магнітної рідини. У роботі розглядався шар магнітної рідини, який неможливо отримати у реальних умовах, але наведені результати вказують на перспективність її застосування.

У статті [11] змодельована можливість проникнення магнітних наночастинок у пористі матеріали під впливом магнітного поля. Але експериментальних даних щодо його реалізації не наведено. Це зроблено у роботі [12]. Зокрема показано, що тонкий шар магнітної рідини на основі нанозаліза (до 0,25 мм) має коефіцієнти екранування магнітного поля промислової частоти від 2,4 до 3,4 в залежності від напруженості екранового поля. Показано, що ефективна магнітна проникність шаромагнітної рідини на поверхні складає 420–1050, а цей показник для самої магнітної рідини близько 100. Враховуючи, що коефіцієнт екранування магнітного поля зростає зі збільшенням відносної магнітної проникності матеріалу, зроблено висновок, що захисні властивості матеріалу обумовлені щільністю наночастинок в матеріалі. Але наведений у роботі захисний матеріал є модельним через те, що магнітна рідина наносилася на пористий папір, що не має практичного значення.

Тому постають задачі застосування магнітної рідини у якості екрануючої субстанції на реальному носії – текстильному матеріалі, незворотнього щільного закріплення екрануючих частинок у волокнах, дослідження захисних властивостей матеріалу й визначення можливостей виготовлення з нього засобів індивідуального захисту від впливу електромагнітних полів.

### **3. Мета і задачі дослідження**

Метою дослідження є виявлення захисних властивостей текстильного матеріалу з вмістом залізних та залізовмісних наночастинок та визначення можливості виготовлення з нього засобів індивідуального захисту.

Для досягнення мети були поставлені такі завдання:

- розробити технологію нанесення й закріплення металевих наночастинок на текстильному матеріалі;
- дослідити залежність захисних властивостей матеріалу від технології виготовлення;
- обґрунтувати можливість виготовлення з дослідженого матеріалу захисного одягу.

#### **4. Матеріали та методи досліджень захисних властивостей екрануючого матеріалу**

У якості основи матеріалу для екранування електромагнітних полів обрано стандартну льняну тканину, рекомендовану в Україні для виробництва спеціального одягу. Її перевагою є те, що, льняні волокна мають велику пористість, що підвищує можливості імплантації у них металевих наночастинок. Екрануючою субстанцією є магнітна рідина виробництва ТОВ «Ферогідродинаміка» («Ferrodynamic» Ltd) м. Миколаїв (Україна). Магнітна рідина є усталеним колоїдним розчином твердих частинок у рідкому носії – вакуумному мастилі та етиловому спирті. Дисперсна фаза розчину складається з частинок феромагнітних матеріалів (магнетит, ферити, залізо) розмірами 3–10 нм. Вміст наночастинок, за даними виробника, складає 9 % (за вагою). Для запобігання злипанню частинок між собою у магнітну рідину додається поверхнево-активна речовина – олеїнова кислота.

Вимірювання напруженості електричного поля та індукції магнітного поля промислової частоти здійснювалося каліброваним вимірювачем ВЕ-метр, модифікація «АТ-004» та «50 Гц» з блоком управління «НТМ-Термінал» (Російська Федерація) згідно інструкції з експлуатації. Межа допустимої відносної похибки вимірювань середньоквадратичних значень напруженості електричного та магнітного поля складає 15 %.

Визначення змін амплітудних значень електричного та магнітного поля низькочастотного спектра здійснювалося каліброваним аналізатором спектра Spectran NF-5035 (Німеччина) згідно інструкції з експлуатації. Максимальна похибка вимірювань не перевищувала 1 %. В усіх випадках екран, що випробувався, був геометрично замкнений навколо вимірювальної антени. Моделювання просторового розподілу магнітного поля й ефективності захисного одягу, виготовленого з розробленого матеріалу, здійснювалося з використанням пакету програм Comsol.

#### **5. Розроблення технології нанесення й закріплення металевих наночастинок на текстильному матеріалі**

Для отримання текстильного матеріалу для екранування електричних та магнітних полів у його структуру необхідно імплантувати екрануючі залізовмісні частинки нанорозмірів.

При проведенні першого етапу досліджень це здійснювалося просочуванням льняної тканини магнітною рідиною на основі 40 % водного розчину етилового спирту. Змінювати кількість нанозаліза на одиницю площі тканини на фіксовану величину складно, тому у процесі досліджень змінювали кількість шарів матеріалу, що відповідає подвоєнню та потроєнню концентрації екрануючої субстанції. Витрати магнітної рідини за однократного просочування тканини складала – 45–50 г/м<sup>2</sup>. Кількість наночастинок складала до 4,0–4,5 г/м<sup>2</sup>.

Але отриманий матеріал, не дивлячись на використання у якості основи етилового спирту, непридатний для практичного використання через маслянистість структури. Технологія виготовлення магнітної рідини передбачає додавання поверхнево-активної речовини – жирної олеїнової кислоти, яка запобігає злипанню наночастинок.

При проведенні другого етапу досліджень основною задачею було видалення жирної олеїнової кислоти з тканини. Для видалення кислоти було використано два засоби – нейтралізація лужним розчином (20 % водний розчин NaOH) та вимивання синтетичним миючим засобом, у даному випадку, безфосфатним засобом для видалення жиру «HG» (виробник HG International b. v., Нідерланди).

Тому на третьому етапі проведення досліджень для підвищення захисних властивостей матеріалу було розроблено технологію імплантації наночастинок у волокна тканини під впливом неоднорідного постійного магнітного поля. Для цього використовувався ніодімовий магніт з максимальною напруженістю магнітного поля 450 А/м. Оброблення матеріалу магнітним полем здійснювалося упродовж 12 годин. Для досліджень використовувалися по два просочені магнітною рідиною зразки, один з яких – контрольний. Використано магнітну рідину на основі вакуумного мастила VM-3. Це мастило може бути видалено тільки миючим засобом, але має кращі функціональні властивості, порівняно зі спиртовим розчином, через більшу в'язкість, що знижує вимивання рідини з тканини у процесі обробки. Магнітооброблений та контрольні зразки піддавалися впливу синтетичного миючого засобу аналогічним чином до повного видалення вакуумного мастила та олеїнової кислоти.

## **6. Дослідження залежності захисних властивостей матеріалу від технології виготовлення.**

Визначення коефіцієнтів екранування електромагнітних полів текстильними матеріалами також проводилося у три етапи.

На першому етапі досліджувалися захисні властивості матеріалів, просочених магнітною рідиною на основі етилового спирту.

Враховуючи, що електричне і магнітне поле промислової частоти є квазістаціонарним, для проведення вимірювань використовувалися геометрично замкнені поверхні з досліджуваного матеріалу (розміром  $0,2 \times 0,2 \times 0,2$  м), для яких не має значення відстань від джерела поля. Вимірювальна антена вміщувалася у захищену зону крізь технологічний отвір.

Результати вимірювання екранування матеріалом електричної та магнітної складових електромагнітного поля промислової частоти наведено у табл. 1.

Як видно з даних табл. 1, зі збільшенням кількості шарів захисного матеріалу коефіцієнт екранування обох складових електромагнітного поля промислової частоти різко підвищується, що обумовлено збільшенням концентрації ферромагнітних наночастинок. Враховуючи, що перевищення гранично допустимих рівнів у виробничих умовах майже ніколи не перевищує 2–3 рази [12], отриманий результат можна вважати прийнятним.

На другому етапі досліджувалися захисні властивості матеріалів, просочених магнітною рідиною та оброблених миючим засобом та лужним розчином (табл. 2).

Аналіз даних, наведених у табл. 2, показує, що після видалення олеїнової кислоти з матеріалу, його захисні властивості знижуються (табл. 1). В процесі вимивання технологічної рідини технологічної рідини відбувається додаткове вилучення екрануючих частинок з матеріалу. Дані табл. 2 показують, що нейт-

ралізація кислоти лужним розчином, порівняно з механічною обробкою синтетичним миючим засобом, не дає бажаного ефекту.

Таблиця 1

Екранування електромагнітного поля промислової частоти текстильним матеріалом, просоченим магнітною рідиною з залізовмісними наночастинками

<i>n</i>	<i>E</i> , V/m			<i>B</i> , μT		
	<i>E<sub>f</sub></i>	<i>E<sub>s</sub></i>	<i>K<sub>s</sub></i>	<i>B<sub>f</sub></i>	<i>B<sub>s</sub></i>	<i>K<sub>s</sub></i>
1	720	525	1,4	146	76	1,9
2	720	290	2,5	146	29	5,0
3	720	190	3,8	146	18	8,1

Примітка: *n* – кількість шарів захисного матеріалу; *E<sub>f</sub>* – напруженість електричного поля джерела поля; *E<sub>s</sub>* – напруженість електричного поля у зоні, захищеній екрануючим матеріалом; *K<sub>s</sub>* – коефіцієнт екранування (нормативна безрозмірна величина, що показує зниження напруженості поля,  $K_s = E_f / E_s$ ), *B<sub>f</sub>* – індукція магнітного поля джерела, *B<sub>s</sub>* – індукція магнітного поля у зоні, захищеній екрануючим матеріалом *K<sub>s</sub>* – коефіцієнт екранування магнітного поля.

Таблиця 2

Екрануючі властивості текстильного матеріалу після обробки лужним розчином та синтетичним миючим засобом

<i>n</i>	<i>E</i> , V/m					<i>B</i> , μT				
	<i>E<sub>f</sub></i>	<i>E<sub>a</sub></i>	<i>K<sub>a</sub></i>	<i>E<sub>w</sub></i>	<i>K<sub>w</sub></i>	<i>B<sub>f</sub></i>	<i>B<sub>a</sub></i>	<i>K<sub>a</sub></i>	<i>B<sub>w</sub></i>	<i>K<sub>w</sub></i>
1	770	592	1,3	476	1,7	190	123	1,5	110	1,7
2	770	355	2,2	325	2,3	190	100	1,9	90	2,1
3	770	230	3,4	215	3,8	190	78	2,4	72	2,6

Примітка: *E<sub>a</sub>* – напруженість електричного поля у зоні, захищеній екрануючим матеріалом, обробленим лужним розчином; *E<sub>w</sub>* – напруженість електричного поля у зоні, захищеній екрануючим матеріалом, обробленим синтетичним миючим засобом; *K<sub>a</sub>*, *K<sub>w</sub>* – відповідні коефіцієнти екранування; *B<sub>a</sub>* – індукція магнітного поля у зоні, захищеній екрануючим матеріалом, обробленим лужним розчином; *B<sub>w</sub>* – індукція магнітного поля у зоні, захищеній екрануючим матеріалом, обробленим синтетичним миючим засобом.

На третьому етапі досліджувалися захисні властивості матеріалів, просочених магнітною рідиною на основі вакуумного мастила, витримані у неоднорідному магнітному полі та оброблені миючим засобом (табл. 3).

Як видно з отриманих даних, магнітна обробка тканини, просоченої магнітною рідиною, значно підвищує її захисні властивості та забезпечує незворотність імплантації екрануючих частинок у волокна тканини. Наведені вище результати отримані для магнітного поля стабілізованого лабораторного джерела. Для визначення ефективності отриманого матеріалу у реальних умовах експлуатації було проведено експерименти щодо екранування магнітного поля електричної машини змінного струму (рис. 1).

Таблиця 3

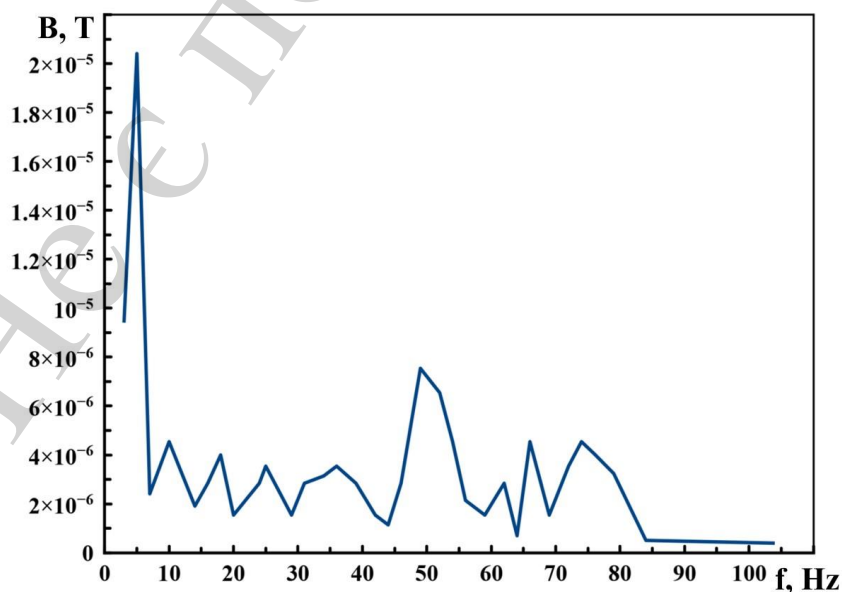
Екранування електромагнітного поля промислової частоти текстильним матеріалом, обробленим магнітною рідиною у неоднорідному постійному магнітному полі

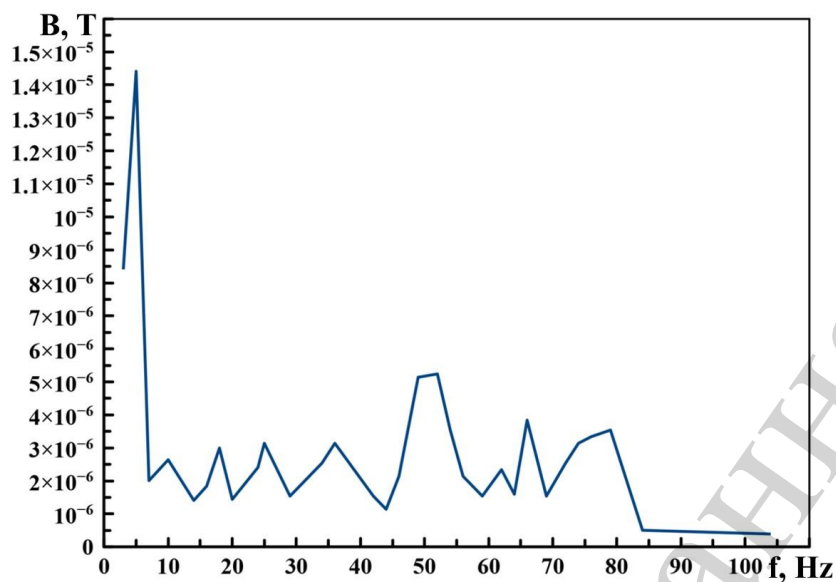
$n$	$E, \text{V/m}$					$B, \mu\text{T}$				
	$E_f$	$E_m$	$K_m$	$E_w$	$K_w$	$B_f$	$B_m$	$K_m$	$B_w$	$K_w$
1	360	125	2,9	320	1,13	490	200	2,3	460	1,06
2	360	80	4,5	240	1,50	490	95	5,2	420	1,17
3	360	42	8,6	185	1,96	490	55	8,9	380	1,30

Примітка:  $E_m$  – напруженість електричного поля у зоні, захищеній екрануючим матеріалом після його обробки магнітним полем та синтетичним миючим засобом;  $E_w$  – напруженість електричного поля у зоні, захищеній екрануючим матеріалом, обробленим тільки синтетичним миючим засобом;  $K_m, K_w$  – відповідні коефіцієнти екранування;  $B_m$  – індукція магнітного поля у зоні, захищеній екрануючим матеріалом після його обробки магнітним полем та синтетичним миючим засобом;  $B_w$  – індукція магнітного поля у зоні, захищеній екрануючим матеріалом, обробленим тільки синтетичним миючим засобом.

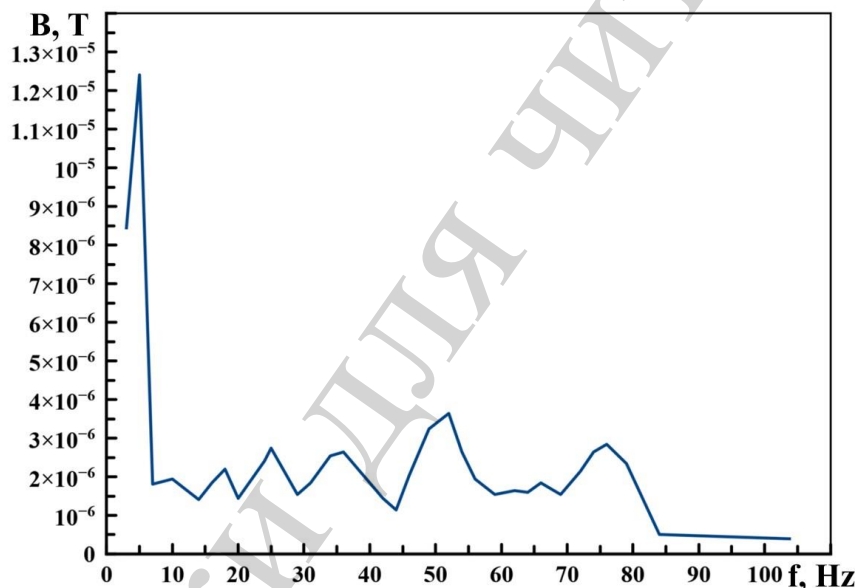
З наведених спектрів видно, що магнітне поле промислової частоти знижується одним шаром матеріалу без магнітної обробки у 1,4 рази; з магнітною обробкою – у 2 рази. Аналогічні результати стосуються й інтергармонік магнітного поля (канонічних і неканонічних), які завжди присутні у спектрах полів реального електричного обладнання. Присутній в усіх спектрах пік на частоті приблизно 5 Гц є низькочастотною складовою природного геомагнітного поля, значне зниження якого є небажаним.

Наведені результати, з огляду на дані лабораторних досліджень та малу товщину текстильної основи, можна вважати задовільними, а розроблений матеріал придатний для виготовлення екрануючих конструкцій.





*б*



*в*

Рис. 1. Екранування магнітного поля електричної машини змінного струму текстильним матеріалом з вмістом феромагнітних наноструктур: *а* – вихідний спектр магнітного поля електричної машини; *б* – спектр магнітного поля у зоні, захищеної одним шаром текстильного матеріалу, обробленого магнітною рідиною; *в* – спектр магнітного поля у зоні, захищеної одним шаром текстильного матеріалу, обробленого магнітною рідиною у неоднорідному постійному магнітному полі.

### **7. Обговорення результатів дослідження захисних властивостей текстильного матеріалу з вмістом феромагнітних наноструктур та можливості виготовлення з нього захисного одягу**

Аналізуючи отримані експериментальні дані, можна звернути увагу на деякі розбіжності результатів вимірювань, наведених у табл. 3 та на рис. 1. Такі розбіжності можуть бути обумовлені як дещо різною концентрацією наночас-



тинок у матеріалі, так і різною кількістю вихідної речовини, яка змивається синтетичним миючим засобом. Як зазначалося вище, витрати магнітної рідини складала 45–50 г/м<sup>2</sup>. При цьому, згідно даних виробника, кількість екрануючої субстанції – феромагнітних наночастинок складає 9 % (за вагою). Тому деякі відмінності за такого вмісту основної речовини цілком можливі, принаймні у лабораторних умовах. До того ж відомо, що коефіцієнти екранування електричних та магнітних полів залежать від амплітуд цих полів у кожному окремому випадку. Але після магнітної обробки коефіцієнти екранування полів залишаються достатніми для більшості виробничих умов.

Необхідною є оцінка можливостей виготовлення з розробленого матеріалу захисного одягу. Експериментальне визначення ефективності захисного костюму дуже складне через необхідність дистанційного вимірювання рівнів магнітних полів у дуже багатьох точках. Тому поставлена задача реалізована числовим методом скінченних елементів з використанням програми Comsol.

Для проведення моделювання розподілу магнітного поля у підкостюмному просторі обрано найнесприятливіший випадок: магнітне поле спрямовано вертикально зверху, захисні властивості матеріалу відповідають наведеному у табл. 1. Вважалося, що усе тіло людини покрито захисним матеріалом. Результати моделювання наведено на рис. 2.

Отримані результати свідчать, що навіть за малого вмісту феромагнітних наночастинок (до 5 г/м<sup>2</sup>) гарантований коефіцієнт екранування магнітного поля в області голови та грудної клітки – 2, який легко може бути підвищений за рахунок розробленої технології.

У результаті проведеного моделювання виявився неочікуваний факт підвищення рівня магнітного поля у області шиї, що ніколи не враховувалося при проектуванні захисного одягу. Причиною є проходження магнітного потоку поверхнею матеріалу малої площі у місці звуження, що призводить до підвищення магнітного опору. Це обумовлює намагніченість захисного матеріалу і проникнення поля у внутрішній простір. Тому при проектуванні та виготовленні захисного одягу слід уникати таких конструктивних заломів та проектувати захисний шолом разом з костюмом за рахунок суцільнокроєних деталей шолому та куртки.

Розроблена технологія магнітної обробки матеріалу дозволила отримати матеріал з достатньою кількістю екрануючих частинок після видалення хімічних домішок. У такому вигляді він придатний для пошиття захисного одягу, а також може бути використаний для суміжної галузі – забезпечення електромагнітної сумісності обладнання. Але багатошарова конструкція не технологічна та не практична. Це пояснюється необхідністю забезпечення у спецодязі нормативних термодинамічних та ергономічних вимог, тобто комфортності одягу. У виконаних дослідженнях використовувалося магнітне поле відносно малої напруженості, тому для підвищення концентрації екрануючих частинок у волокнах текстильного матеріалу доцільно вдосконалити магнітну обробку, за рахунок підвищення напруженості постійного магнітного поля та створення зон його великої неоднорідності. Це потребує розроблення спеціальної установки з конструкцією полюсів магніта, яка таку неоднорідність може забезпечити.

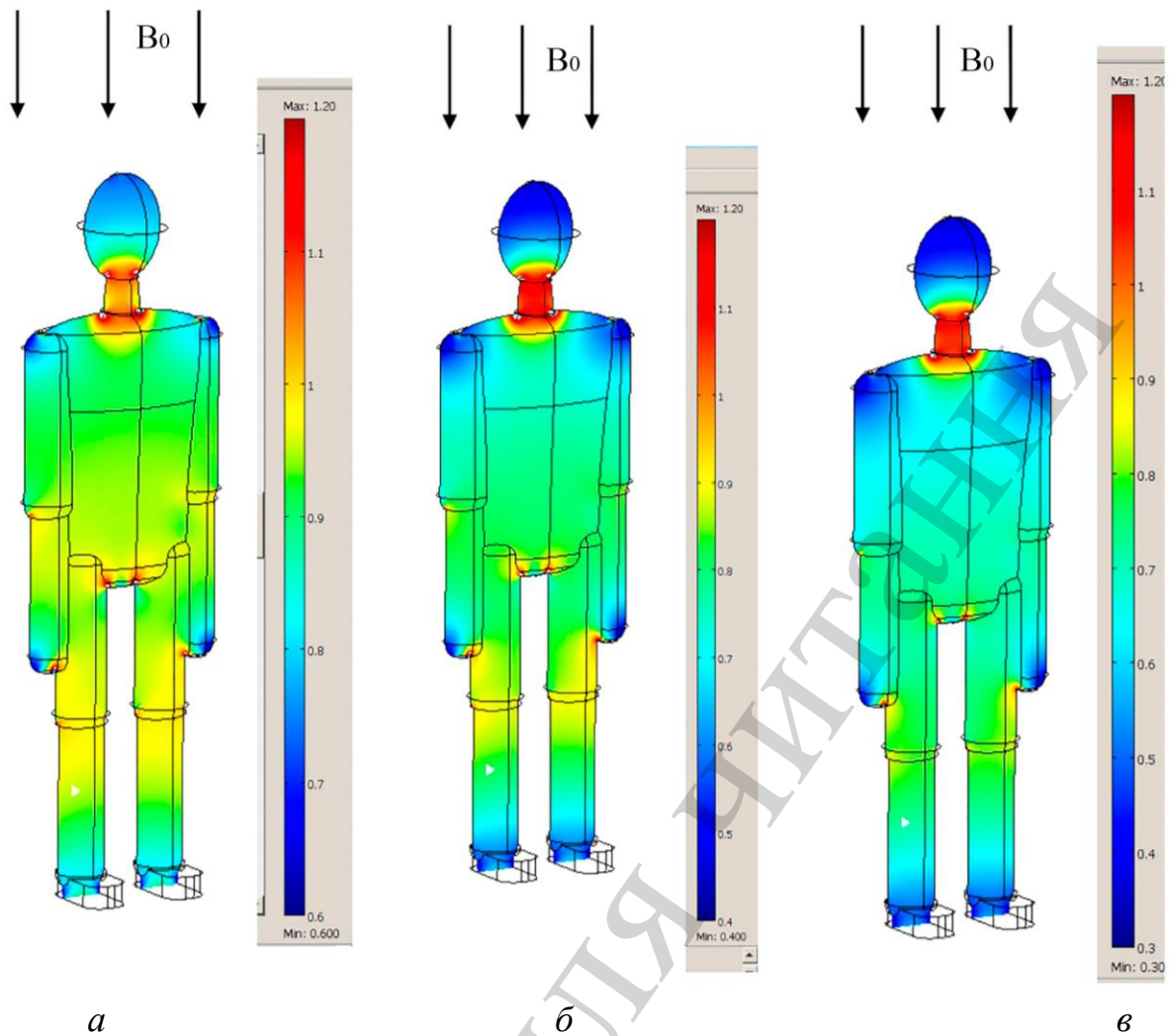


Рис. 2. Розподіл магнітного поля  $B/B_0$  у тілі людини (у середній площині) при його перебуванні у продольному магнітному полі  $B_0$  і за наявності захисного одягу: *а*, *б*, *в* – наявність 1, 2, 3 шарів захисної тканини

## 8. Висновки

1. Встановлено, що для забезпечення зчеплення феромагнітних наночастинок з текстильним матеріалом найбільш ефективним методом є нанесення на матеріал магнітної рідини та витримка його у неоднорідному постійному магнітному полі. Дослідження довели, що за впливу магнітного поля напруженістю 450 А/м упродовж 12 годин імплантація наночастинок у волокна льняної тканини стає практично незворотною.

2. Дослідження свідчать, що за просочення текстильного матеріалу магнітною рідиною у кількості 45–50 г/м<sup>2</sup> (вміст наночастинок складає 9 % за вагою) коефіцієнти екранування для 1–3 шарів матеріалу складають: для електричного поля промислової частоти 1,4÷3,8; для магнітного поля – 1,9÷8,1. У результаті магнітної обробки матеріалу ці показники 2,9÷8,6 та 2,3÷8,9 відповідно. При цьому магнітооброблений матеріал піддавався обробці синтетичним миючим засобом.

3. Визначено, що для видалення технологічних рідин (мастила, олеїнової кислоти), які є обов'язковими інгредієнтами магнітної рідини, достатньо вико-

ристання синтетичних миючих засобів. При цьому ступінь вимивання феромагнітних частинок є прийнятним. Застосування магнітної рідини на основі етилового спирту, з наступною нейтралізацією олеїнової кислоти лужним розчином, виявилось безперспективним через вимивання або хімічне руйнування наночастинок лугом, що підтверджено експериментально.

4. З метою визначення можливості виготовлення з розробленого матеріалу спеціального одягу для захисту від електричних та магнітних полів було виконано моделювання розподілу магнітного поля у тілі людини з використанням методу скінченних елементів і програми Comsol. Встановлено, що за прийнятних, у цілому, результатів у шийному відділі тіла людини спостерігається підвищення напруженості поля через ущільнення магнітного потоку. Це слід врахувати при проектуванні захисного одягу.

### Література

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). URL: <https://eur-lex.europa.eu/LexUriServ/LexUriServ.do?uri=OJ:L:2013:179:0001:0021:EN:PDF>
2. Ceken, F., Pamuk, G., Kayacan, O., Ozkurt, A., Ugurlu, Ş. S. (2012). Electromagnetic Shielding Properties of Plain Knitted Fabrics Containing Conductive Yarns. *Journal of Engineered Fibers and Fabrics*, 7 (4), 155892501200700. doi: <https://doi.org/10.1177/155892501200700404>
3. Ахмед, А. А. А., Пулко, Т. А., Насонова, Н. В., Лыньков, Л. М. (2015). Гибкие многослойные конструкции экранов электромагнитного излучения. Доклады Белорусского государственного университета информатики и радиоэлектроники, 5 (91), 95–99.
4. Patil, N., Velhal, N. B., Pawar, R., Puri, V. (2015). Electric, magnetic and high frequency properties of screen printed ferrite-ferroelectric composite thick films on alumina substrate. *Microelectronics International*, 32 (1), 25–31. doi: <https://doi.org/10.1108/mi-12-2013-0080>
5. Аль-Адеми, Я. Т. А., Ахмед, А. А. А., Пулко, Т. А., Насонова, Н. В., Лыньков, Л. Н. (2014). Широкодиапазонные конструкции экранов электромагнитного излучения на основе влагосодержащей целлюлозы. Труды МАИ, 77.
6. Mondal, S., Ganguly, S., Das, P., Khastgir, D., Das, N. C. (2017). Low percolation threshold and electromagnetic shielding effectiveness of nano-structured carbon based ethylene methyl acrylate nanocomposites. *Composites Part B: Engineering*, 119, 41–56. doi: <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2017.03.022>
7. Glyva, V., Podkopaev, S., Levchenko, L., Karaieva, N., Nikolaiev, K., Tykhenko, O. et. al. (2018). Design and study of protective properties of electromagnetic screens based on iron ore dust. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 1 (5 (91)), 10–17. doi: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2018.123622>
8. Yadav, Kuřitka, Vilčáková, Machovský, Škoda, Urbánek et. al. (2019). Polypropylene Nanocomposite Filled with Spinel Ferrite NiFe<sub>2</sub>O<sub>4</sub> Nanoparticles and In-

Situ Thermally-Reduced Graphene Oxide for Electromagnetic Interference Shielding Application. *Nanomaterials*, 9 (4), 621. doi: <https://doi.org/10.3390/nano9040621>

9. Jiao, Y., Wan, C., Zhang, W., Bao, W., Li, J. (2019). Carbon Fibers Encapsulated with Nano-Copper: A Core–Shell Structured Composite for Antibacterial and Electromagnetic Interference Shielding Applications. *Nanomaterials*, 9 (3), 460. doi: <https://doi.org/10.3390/nano9030460>

10. Полевиков, В. К., Ерофеев, В. Т. (2017). Численное моделирование взаимодействия магнитного поля с цилиндрическим слоем магнитной жидкости. *Информатика*, 2 (54), 5–13.

11. Lavrova, O., Polevnikov, V., Tobiska, L. (2016). Modelling and simulation of magnetic particle diffusion in a ferrofluid layer. *Magnetohydrodynamics*, 52 (4), 417–452.

12. Glyva, V. A., Podoltsev, A. D., Bolibrakh, B. V., Radionov, A. V. (2018). A thin electromagnetic shield of a composite structure made on the basis of a magnetic fluid. *Tekhnichna Elektrodynamika*, 2018 (4), 14–18. doi: <https://doi.org/10.15407/techned2018.04.014>

ТІЛЬКИ ДЛЯ ЧИТАННЯ