

В. А. Глива<sup>1</sup>, І. В. Матвєєва<sup>1</sup>, Л. О. Левченко<sup>2</sup>, Н. М. Кічата<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Національний авіаційний університет, Київ, Україна

<sup>2</sup> Національний технічний університет України «КПІ імені Ігоря Сікорського», Київ, Україна

## ПРОЕКТУВАННЯ КОМПОЗИТНИХ МАТЕРІАЛІВ НА ОСНОВІ ДРІБНОДИСПЕРСНОЇ ЗАЛІЗОВМІСНОЇ СУБСТАНЦІЇ ДЛЯ ЕКРАНУВАННЯ ІОНІЗУЮЧИХ ВИПРОМІНЮВАНЬ

**Анотація.** На основі аналізу механізмів розсіювання іонізуючих електромагнітних випромінювань та залежності ослаблення випромінювання від порядкового номера елемента та його густини зроблено висновок про можливість їх екранування матеріалами з вмістом заліза. Запропоновано засади проектування композиційного металополімерного матеріалу для зниження інтенсивності рентгенівського та гама-випромінювань. Показано, що зміна поглинання іонізуючого випромінювання зі зміною довжини хвилі випромінювання відбувається немонотонно. Тому для проектування матеріалу необхідно з'ясувати переважні довжини хвиль (частоти) випромінювання, яке потребує екранування. Встановлено, що для ефективного екранування випромінювання існує критична концентрація металевих частинок у полімерній матриці. Це відбувається на порозі протікання електричного струму за вмісту екрануючої субстанції 11–12 % (за вагою). Це добре узгоджується зі співвідношеннями електродинаміки суцільних середовищ. При проектуванні матеріалу з використанням залізородного концентрату слід враховувати його різні властивості у залежності від виробника. Проектуванню захисного матеріалу повинні передувати лабораторні дослідження з визначення переважної фракції залізородних частинок за розмірами та вмісту заліза і його сполук у вихідній сировині.

**Ключові слова:** іонізуюче випромінювання, композиційний матеріал, залізородний концентрат, ефективність екранування.

### Вступ

Захист від впливу фізичних факторів техногенного походження є одним з пріоритетних напрямів дослідження в галузі цивільної безпеки. Найбільш критичним з цих факторів є іонізуючі випромінювання. Захист від їх впливу зазвичай здійснюється за допомогою гумових та полімерних матеріалів із вмістом свинцю. Але такі матеріали дуже важкі, а свинець є токсичним, що обмежує застосування цих виробів. Тому доцільним є розглянути можливості виготовлення захисних матеріалів без використання свинцю зі збереженням достатніх коефіцієнтів екранування шкідливих випромінювань.

У сучасних умовах спостерігається підвищення робочих частот радіотехнічного обладнання – джерел неіонізуючих випромінювань. При цьому ці частоти поступово переходять у область надзвичайно високих. Враховуючи, що іонізуючі гамма-випромінювання також є електромагнітним випромінюванням, доцільно розглянути можливості розроблення композиційного матеріалу для одночасного екранування іонізуючих та неіонізуючих випромінювань різного походження. Так можливість обумовлена наявністю добре розробленими технологіями вироблення композиційних металополімерних матеріалів для захисту від електромагнітних впливів з керованими захисними властивостями. Тому доцільно розглянути можливість розроблення на базі таких матеріалів захисних конструкцій для екранування іонізуючих випромінювань різного походження.

**Аналіз останніх публікацій і досліджень.** Основним напрямом досліджень і прикладних розро-

бок з захисту персоналу підприємств й установ, які працюють з джерелами іонізуючих випромінювань є створення захисних матеріалів без вмісту свинцю. Відомо, що поглинальні властивості елементів щодо усіх видів радіоактивних випромінювань зростають зі зростанням порядкового номера у періодичній таблиці, тобто зарядового числа  $Z$ . Тому найбільш прийнятним та поширеним металом для екранування випромінювань є свинець ( $N=82$ ). У роботах [1, 2] розглянуто можливість застосувати у якості екрануючого елемента вісмут ( $N=83$ ). Цей метал має погані фізико-механічні властивості, тому його застосували у вигляді оксиду як наповнювача у нанокомпозитних матеріалах на основі полімерів. За прийнятних коефіцієнтів екранування рентгенівського випромінювання, такі матеріали мають великі вартості через складність технологій виготовлення.

У статті [3] наведено результати розроблення композиційного матеріалу із застосуванням у якості екрануючих елементів диспрозію та гедолінію. Їх зарядові числа достатньо великі, але ці метали мають надзвичайно високу вартість, тому великі обсяги захисних покриттів з них (навіть за малого вмісту у полімерній матриці) виготовляти недоцільно.

У статті [4] розглянуто можливість виготовлення композитів з використанням сполук елементів з малим зарядовим числом – бора та лужних металів.

Наведені ефективності екранування невеликі. Крім того, застосований карбід бора дуже дорогий у виробництві.

Багато досліджень присвячено визначенню захисних властивостей матеріалів із вмістом вольфра-

му. Так, у роботі [6] запропоновано композитний матеріал з етилен-вініл-ацетату з вольфрамовим наповнювачем, а у дослідженні [7] з наповнювачем з оксиду вольфраму. У цій же статті порівняно властивості композиційних матеріалів на основі сульфату барію, триоксиду вісмуту та оксиду вольфраму зі свинцем. Показано, що їх захисні властивості тільки на 10-15 % гірші за властивості чистого свинцю, що для більшості реальних виробничих умов цілком задовільно. При цьому, як показано у [8], у якості матриці можливо застосувати епоксидні матеріали, які не деградують під впливом іонізуючих випромінювань.

У роботі [9] наведено результати розроблення і дослідження захисних властивостей електромагнітних металополімерних екранів у високочастотній області спектра. Матеріал виготовлено з використанням збагаченої залізної руди у якості наповнювача полімерної матриці. Коефіцієнти екранування електромагнітних полів ультрависоких частот за вмісту металевої субстанції 5–20 % складають 3,3–44. Рационально розглянути можливості застосування таких матеріалів для екранування іонізуючих випромінювань. Наповнювач з залізородної сировини має низьку вартість і є перспективним для екранування поверхонь великих площ, тому актуальним є оцінювання його ефективності для іонізуючих випромінювань.

**Мета роботи** – визначення можливості використання залізної та залізвмісної дрібнодисперсної субстанції для створення композиційних матеріалів для захисту від впливу іонізуючих випромінювань.

### Виклад основного матеріалу

Аналіз досліджень з екранування іонізуючих випромінювань елементами з зарядовими числами меншими, ніж заряд ядра свинцю, свідчить, що цей напрям є перспективним для зниження рівне випромінювань, принаймні малих інтенсивностей. Такими випромінюваннями є, наприклад, паразитні випромінювання медичної апаратури, випромінювання обладнання у апаратних радіотехнічних засобів цивільної авіації тощо. Найбільш вагомою складовою таких випромінювань є гама-випромінювання. Ослаблення гама-випромінювання у шарі матеріалу визначається залежністю:

$$\varphi = \varphi_0 e^{-\mu d},$$

Таблиця 1 – Залежність лінійних коефіцієнтів ослаблення свинцю та заліза від енергій гама-випромінювань

| E, MeV                     | 0,50 | 1,0  | 1,5  | 2,0  | 3,0  | 4,0  | 5,0  | 10,0 |
|----------------------------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| $\mu_{Pb}, \text{см}^{-1}$ | 1,80 | 0,80 | 0,60 | 0,52 | 0,48 | 0,47 | 0,48 | 0,55 |
| $\mu_{Fe}, \text{см}^{-1}$ | 0,66 | 0,50 | 0,38 | 0,34 | 0,30 | 0,26 | 0,25 | 0,23 |

Наведені дані свідчать, що коефіцієнти ослаблення заліза не настільки низькі, порівняно зі свинцем, щоб їх не можна було компенсувати, наприклад, деяким збільшенням товщини захисного шару. Звертає на себе увагу немонотонність зміни коефіцієнта ослаблення для свинцю, отримані експериментально.

де  $\varphi$  – щільність потоку  $\gamma$  квантів після проходження поглинального матеріалу;  $\varphi_0$  – щільність потоку  $\gamma$  квантів попереду поглинального матеріалу;  $d$  – товщина поглинального шару;  $\mu$  – лінійний коефіцієнт ослаблення.

Масовий коефіцієнт ослаблення  $\mu_M = \mu/\rho$  ( $\text{м}^2/\text{кг}$ ), коефіцієнт, віднесений до лінійного коефіцієнта ослаблення. Зниження інтенсивності гама-випромінювання відбувається за трьома механізмами. Фотоэффект переважає за енергій  $E_\gamma < 0,5 \text{ MeV}$ . Масовий коефіцієнт ослаблення фотоэффекту  $\tau/\rho$  зростає зі збільшенням порядкового номера (зарядового числа) елемента  $Z$  й знижується зі зниженням енергії фотона:

$$\frac{\tau}{\rho} = \frac{Z^4}{(hv)^2},$$

де  $h$  – стала Планка,  $\nu$  – частота фотона.

За енергій, більших 1 MeV (приблизно до 5 MeV) переважає механізм утворення електронно-позитронних пар. Масовий коефіцієнт ослаблення утворення пар  $k/\rho$  визначається як:

$$\frac{k}{\rho} \sim Z \lg(hv).$$

За енергій фотонів 30 кеВ–5 MeV переважає ефект Комтона (розсіювання фотонів на вільні електрони):

$$\frac{\sigma}{\rho} = \frac{1}{hv}$$

Повний коефіцієнт ослаблення  $\mu$  визначається як:

$$\mu = \tau + k + \sigma.$$

Лінійний коефіцієнт ослаблення  $\mu^l$  ( $\text{м}^{-1}$ ) визначається як:

$$\mu^l = \mu \cdot \rho.$$

Наведені вище співвідношення для трьох видів розсіювання енергій фотонів не є суворими, але достатні для оцінювання ефективності поглинання. Для свинцю дані щодо лінійних коефіцієнтів відомі, тому доцільно порівняти їх із залізом, яке використовувалося у якості екрануючої субстанції у металополімерному композиті для екранування електромагнітних неіонізуючих полів [9] (табл. 1).

Цей факт свідчить про резонансні явища при поглинанні фотонів на деяких частотах для конкретного матеріалу.

Це підтверджується даними про масові коефіцієнти ослаблення рентгенівського випромінювання (табл. 2). Представлені результати свідчать, що для

деяких довжин хвиль ефективність заліза вища за ефективність свинцю, причому це відбувається на умовній межі «м'якого» рентгенівського випромінювання,

притаманного побічним (паразитним) випромінювань технічних засобів різного призначення.

Таблиця 2 – Залежність масового коефіцієнта ослаблення свинцю та заліза від довжинних хвиль рентгенівського випромінювання

| Елемент                             | $\lambda$ , нм |      |      |      |      |      |      |      |      |      |
|-------------------------------------|----------------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|
|                                     | 0,02           | 0,04 | 0,06 | 0,08 | 0,10 | 0,12 | 0,14 | 0,16 | 0,18 | 0,20 |
| $\mu/\rho$ , м <sup>2</sup> /кг, Pb | 46             | 330  | 770  | 1470 | 770  | 1280 | 1800 | 2580 | 3600 | 3820 |
| $\mu/\rho$ , м <sup>2</sup> /кг, Fe | 11             | 71   | 235  | 507  | 950  | 1700 | 2700 | 3900 | 610  | 780  |

Це відкриває можливості застосування для екранування іонізуючих електромагнітних випромінювань композитних металополімерних матеріалів на основі дрібнодисперсного заліза. У роботі [9] наведено технології виготовлення й дані щодо екранування електромагнітних випромінювань ультрависоких частот композитом з латексу та залізовмісного наповнювача з концентрату залізної руди. Головною проблемою, враховуючи малі довжини хвиль іонізуючих випромінювань, є вибір концентрації дрібнодисперсної металеві субстанції, яка забезпечує мінімальні та потрібні рівні ослаблення випромінювань. Для цього металеві частини повинні бути рівномірно та щільно розподілені у тілі полімеру.

Для розсіювання випромінювання матеріалом металеві частинки повинні утворювати практично суцільну структуру. Тобто, необхідно визначити концентрацію металевих частинок, достатню для екранування іонізуючих випромінювань. Це можливо реалізувати методом вимірювання електрофізичних властивостей матеріалу за різних концентрацій екрануючої субстанції – дрібнодисперсного пилу залізної руди. Визначення питомої провідності здійснювалося вимірюванням зворотної величини – питомого опору матеріалу методом подвійного мосту (рис. 1).

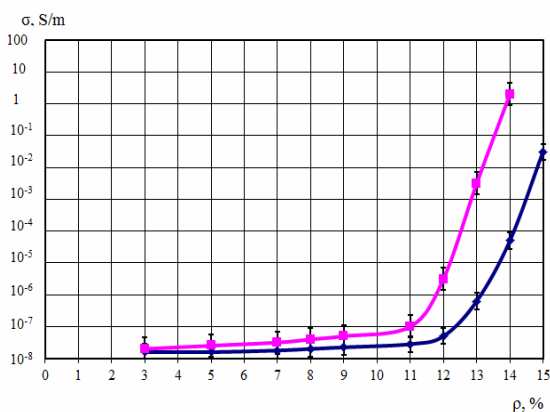


Рис. 1. Залежність питомої провідності металополімерного матеріалу від концентрації дрібнодисперсної металеві субстанції ■ – 5–10 мкм, ◆ – 15–25 мкм

З графічних даних видно, що різке підвищення провідності відбувається за концентрації металевих частинок 11-12 % (за вагою). Це свідчить, що за цих концентрацій матеріал досягає порогу провідності електричного струму, тобто провідні частинки утво-

рюють ланцюги провідності і починають контактувати одна з одною. Це добре узгоджується зі співвідношеннями електродинаміки суцільних середовищ. За концентрацій залізних частинок 15–20 % композиційний матеріал має властивості провідника й придатний для екранування як неіонізуючих, так й іонізуючих електромагнітних випромінювань.

Забезпечення суцільності матеріалу у наведений спосіб гарантовано тільки з достатньо великих товщин композиційного матеріалу (5-10 мм). Якщо йдеться про захисний матеріал малої товщини (0,5-1,0 мм), то потрібно шукати інші шляхи підвищення його ефективності щодо екранування іонізуючих електромагнітних випромінювань. Рис.1 свідчить, що збільшення дисперсності екрануючих залізних та залізовмісних частинок підвищує потрібні електрофізичні властивості (у даному випадку – питому електропровідність).

Для здешевлення вихідної сировини можливо застосувати готовий залізорудний пил різної і відомої дисперсності. Такий пил накопичується на фільтрувальних завісах аспіраційних систем ділянок зі збагачення залізної руди. Фільтрувальних завіс кілька. Розташовані вони послідовно. Тому, на них осідає пил різних дисперсностей.

Дослідження щодо гранулометричних характеристик частинок залізорудного пилу виконувалися на різних завісах, тому для застосування такого пилу додаткового аналізу виконувати не треба. Але вміст феромагнетиту у такому пилу (заліза та магнетиту) не перевищує 58-60 %, що знижує ефективність кінцевого виробу.

Для підвищення коефіцієнтів екранування у якості наповнювача можливо застосовувати залізорудний концентрат, отриманий методом флотації. Він має вміст заліза та магнетиту 72-90 % (у залежності від виробника). Розмір частинок 150-200 мкм. Але у висушеному вони злипаються. Тому доцільно їх механічно подрібнити. Це можливо із застосуванням кулькових млинів стандартної конструкції.

Ще одною проблемою є отримання з металеві субстанції та полімеру однорідної суміші з мінімальним злипанням екрануючих частинок. Це можливо забезпечити ультразвуковою обробкою рідкої суміші металополімеру. Висока дисперсність та щільність розташування металевих частинок має ще одну перевагу.

Найбільш поширеним джерелом іонізуючого випромінювання у промислових пристроях є Со<sub>60</sub> з енергіями гама-квантів 1,2 МеВ. На щільно упако-

ваних металевих та металовмісних кристалах ці випромінювання повинні піддаватися резонансному комбінаційному розсіюванню.

Перевагою таких матеріалів є можливість виготовлення екрануючих поверхонь великих площ, що обумовлене низькою вартістю залізородного концентрату.

У наведеному прикладі у якості полімерної матриці використовувався латекс, що не має принципового значення і він може бути замінений будь-яким полімером. Єдиною умовою є відсутність деградації механічних властивостей під впливом випромінювання.

Наведений підхід дозволяє проектувати матеріали з прогнозуваннями (необхідними) захисними властивостями за рахунок зміни концентрації залізвмісної субстанції та товщини матеріалу.

При проектуванні таких матеріалів слід враховувати, що залізородний концентрат окремих виробників має різну дисперсність та вміст заліза та магнетита. Ці параметри необхідно попередньо визначати через залежність захисних властивостей від розмірів екрануючих частинок та провідності матеріалу від вмісту заліза.

## Висновки

1. Показано, що для м'якого іонізуючого випромінювання у якості субстанції, яка забезпечує його екранування можливо використання заліза та його сполук, які містяться у залізородному концентраті.

2. Для деяких довжин хвиль іонізуючого випромінювання екрануючі властивості заліза перевищують цей показник для свинцю. Захисні властивості металевих матеріалів змінюються немонотонно, зі зміною довжини хвиль випромінювання, що треба враховувати при виконанні проектних робіт.

3. Для екранування іонізуючих випромінювань доцільно застосовувати композиційний метало-полімерний матеріал на основі залізородного концентрату. Зміна концентрації екрануючої субстанції дозволяє проектувати захисні матеріали потрібної ефективності та визначених геометричних характеристик.

4. Для підвищення якості екрануючого матеріалу необхідним є попереднє визначення у лабораторних умовах дисперсності вихідної екрануючої сировини та вміст у концентраті заліза та його сполук.

## СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Nambiar S., Osei E. K., Yeow J. T. W. Polymer nanocomposite based shielding against diagnostic X rays. *Journal of Applied Polymer Science*, 2013. 127(6). pp. 4939–4946.
2. Ambika M.R., Nagaiah N., Suman S. K., Role of bismuth oxide as a reinforcer on gamma shielding ability of unsaturated polyester based polymer composites. *Journal of Applied Polymer Science*. 2016. 134 (13). PP. 446–457.
3. Singh V.P., Badiger N. M. Kothan, S., Kaewjaeng S., Korkut, T., Kim H. J., Kaewkhao J. Gamma-ray and neutron shielding efficiency of Pb-free gadolinium based glasses. *Journal of Nuclear Science and Techniques*. 2015. № 27(4). P. 103–112.
4. Mann K. S., Rani A., Heer M. S., Shielding behaviors of some polymer and plastic materials for gamma-rays. *Radiation Physics and Chemistry*. 2015. 106. PP. 247–254.
5. Mann K. S., Sidhu G. S. Verification of some low-Z silicates as gamma-ray shielding materials. *Annals of Nuclear Energy*, 2012. 40(1), PP. 241–252.
6. Ersoz O. A., Lambrecht F. Y., Soylu H. M., Tungsten-ethylene vinyl acetate (EVA) composite as a gamma rays shielding material. *Indian Journal of Pure & Applied Physics*. 2016. 54 (12), PP. 793–796.
7. Seon-Chil Kim and Sung-Hyoun Cho. Analysis of the Correlation between Shielding Material Blending Characteristics and Porosity for Radiation Shielding Films. *Journals Applied Sciences*. 2019. 9(9). P. 1765. <https://doi.org/10.3390/app9091765>
8. Джур Е.А., Санин А.Ф., Божко С.А., Андрианов А.Ю., Белоус В.А., Рыбка А.В., Захарченко А.А., Борисенко В.Н., Зиновьев А.М., Кузнецов А.П., Плиса Ю.В. Композиционный материал для защиты радиоэлектронной аппаратуры космических аппаратов от ионизирующего излучения. *Вестник Сибирского государственного аэрокосмического университета им. академика М.Ф. Решетнева*. 2013. № 6 (52). С. 126–131.
9. Glyva V., Lyashok J., Matvieieva I., Frolov V., Levchenko L., Tykhenko O., Panova O., Khodakovskyy O., Khalmuradov B., Nikolaiev K. Development and investigation of protective properties of the electromagnetic and soundproofing screen. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2018. Iss. 6/5 (96). P. 54–61. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2018.150778>.

Received (Надійшла) 12.03.2020

Accepted for publication (Прийнята до друку) 29.04.2020

## Designing composite materials based on finely dispersed iron-containing substances for screening ionizing radiation

V. Glyva, I. Matvieieva, L. Levchenko, N. Kichata

**Abstract.** Based on an analysis of the scattering mechanisms of ionizing electromagnetic radiation and the dependence of radiation attenuation on the index number of the element and its density, it is concluded that it can be shielded by materials containing iron. The foundations of designing a composite metal-polymer material are proposed for reducing the intensity of x-ray and gamma radiation. It is shown that a change in the ionizing radiation absorption with a change in the radiation wavelength occurs nonmonotonically. Therefore, for the design of the material, it is necessary to find out the preferred wavelengths (frequencies) of radiation that require shielding. It has been established that for effective screening of radiation there is a critical concentration of metal particles in the polymer matrix. This occurs at the threshold of the flow of electric current when the content of the shielding substance is 11-12% (by weight). This is consistent with the electrodynamic ratios of continuous media. When designing a material using iron ore concentrate, its various properties should be taken into account, depending on the manufacturer. The design of the protective material should be preceded by laboratory studies to determine the overwhelming fraction of iron ore particles by the size and content of iron and its compounds in the feedstock.

**Keywords:** ionizing radiation, composite material, iron ore concentrate, shielding efficiency.