

Л. А. Зозуля

Національний авіаційний університет, Київ, Україна

ЗАСАДИ РОЗРОБЛЕННЯ БЕЗСВИНЦЕВИХ МАТЕРІАЛІВ ДЛЯ ЕКРАНУВАННЯ ІОНІЗУЮЧИХ ТА НЕІОНІЗУЮЧИХ ЕЛЕКТРОМАГНІТНИХ ВИПРОМІНЮВАНЬ

Анотація. Сучасною тенденцією у галузі захисту населення та працюючих від впливу іонізуючих та неіонізуючих електромагнітних випромінювань є розроблення захисних матеріалів без вмісту свинцю. Існуючі безсвинцеві захисні матеріали мають велику вартість й неприйнятні для масового застосування і облицювання поверхонь великих площ. Розглянуто можливість екранування випромінювань композиційними матеріалами, виготовленими з латексу (матриця) й магнетиту (наповнювач). Доцільність такого підходу обумовлена поширеністю латексів (у тому числі й у рідкому стані) та великим вмістом магнетиту у залізорудному концентраті (більше 80%), який у великих обсягах виробляється гірничо-збагачувальними комбінатами. Теоретично показано, що масові коефіцієнти ослаблення залізвмісних матеріалів, принаймні для випромінювань малих енергій, не критично відрізняються від свинцю. Проведені випробування композиційного матеріалу на основі латексу із вмістом магнетиту з 60% (за масою). Джерелом випромінювання був радіоактивний ізотоп кобальту, який використовується у медичній апаратурі. Результати свідчать, що коефіцієнти екранування (кратності зниження інтенсивності випромінювання) за товщини композиту 1-5 мм складають 1,2 - 3,2; відповідний показник для свинцю тих же товщин – 1,5 – 3,9. Такий результат можна вважати цілком прийнятним з огляду на низьку вартість та екологічність композиту. Перевагою композиту є висока ефективність матеріалу у діапазонах ультрависоких, надвисоких і надзвичайно високих частотах електромагнітних випромінювань. Наявність феромагнітних властивостей у магнетиту забезпечує високі коефіцієнти екранування змінних магнітних полів промислової частоти та стаціонарних магнітних полів діагностичної апаратури. Показана доцільність визначення можливості застосування продуктів очищення промислових стічних вод (сполук важких металів) у якості екрануючих наповнювачів. Потребує досліджень можливість деградації полімерної матриці під впливом іонізуючих випромінювань.

Ключові слова: іонізуюче випромінювання, екранування, композиційний матеріал.

Вступ

Іонізуючі та неіонізуючі електромагнітні випромінювання надвисоких та надзвичайно високих частот шкідливі для людського організму, що підтверджено багатьма медико-гігієнічними дослідженнями [1, 2]. В той же час робочі частоти обладнання бездротового зв'язку постійно підвищуються, що поступово збільшує електромагнітне навантаження на побутове та виробниче середовище. Зростає кількість медико-діагностичного обладнання, яке використовує електромагнітні випромінювання високих енергій. На сьогоднішній день актуальною є задача захисту медичного персоналу від електромагнітних впливів, але існуючі захисні конструкції виготовлені на основі свинцю, який сам по собі є вкрай токсичним, а переробка виробів зі свинцю складна і дорогавартісна. Сучасною тенденцією у розробленні матеріалів для захисту від іонізуючих випромінювань є застосування безсвинцевих технологій. Але більшість з таких матеріалів мають велику вартість або масогабаритні параметри, обумовлені малі погонні значення коефіцієнта екранування.

Не дивлячись на панування концепції безпорогового впливу іонізуючих випромінювань Всесвітня організація охорони здоров'я щодо впливу цих та неіонізуючих електромагнітних випромінювань дотримується принципу ALARA (As Low As Reasonably Achievable - настільки низький, наскільки це розумно досяжно).

Тобто у процесі проектування матеріалів та конструкції з них враховуються не тільки технічні можливості, а й співвідношення між витратами та ефектом. Тому актуальною задачею є розроблення матеріалів достатньої ефективності у діапазонах іонізуючих та неіонізуючих електромагнітних випромінювань, виготовлених з компонентів низької вартості з використанням відносно простих технологій.

Сучасний стан питання

Зазвичай матеріали для екранування іонізуючих та неіонізуючих випромінювань розробляються окремо для кожного типу випромінювань і в залежності від діапазону електромагнітних хвиль. Це обумовлено різними фізичними механізмами розсіювання фотонів різної частоти.

У дослідженні [3] представлені результати розроблення матеріалу для екранування гамма-випромінювання на основі вольфраму. Для цього використовувався дрібнодисперсний вольфрам, що автоматично робить його дорогим у виготовленні. При цьому такий матеріал неефективний для поглинання електромагнітних випромінювань неіонізуючих енергій. Частково ці недоліки подолані у матеріалах, описаних у роботах [4, 5]. Певна універсальність досягається за рахунок вмісту заліза у матриці. Але для залізвмісної сполуки у першому випадку необхідна дисперсність майже нанорозмірів, а для другого матеріалу необхідно спеціально виготовляти хромат заліза. До суміші додається октоат кобальту.

Технологія поліефірних композитів складна. Наприклад, для прискорення реакції полімеризації у вихідні компоненти додають пероксид метилетилкетону. Це також ускладнює технологію й підвищує вартість кінцевого матеріалу. Аналогічний недолік притаманний композиційному матеріалу представленому у роботі [6].

Складна сполука заліза, селену та телуру заздалегідь робить матеріал неприйнятним для широкого застосування. До того ж наведені коефіцієнти екранування іонізуючих випромінювань обмежують його застосування випромінюваннями малих інтенсивностей.

Певним компромісом є застосування матеріалів зі зв'язаним свинцем [7] та аморфним залізом [8]. Отримання таких наповнювачів дуже складне, особливо аморфного заліза, яке здебільшого використовується для мінімізації розмірів мікрозондів, узгоджувальних трансформаторів тощо.

У дослідженнях [9, 10] започатковано розроблення безсвинцевих захисних матеріалів для екранування іонізуючих та неіонізуючих випромінювань. Однак перший з них ефективний тільки для м'якого рентгенівського випромінювання, а другий має великі масогабаритні параметри. Але концептуальний

підхід застосування у якості матриці та наповнювачів стандартних матеріалів, які у великих обсягах виробляються промисловістю уявляється коректним через можливість отримання захисної композиції, придатної для покриття поверхонь великих площ.

Мета роботи – розроблення загальних засад проектування екологічно чистих захисних матеріалів для екранування іонізуючих та неіонізуючих електромагнітних випромінювань.

Виклад основного матеріалу

У процесі розроблення захисного матеріалу та проектування захисної конструкції необхідно враховувати багато факторів та обмежень. Особливо це стосується умов, в яких необхідний одночасний захист від іонізуючого та неіонізуючого електромагнітного випромінювання.

Навіть за умови, що ці завдання окремі, бажана наявність універсального матеріалу прийнятних ефективностей в обох частотах електромагнітного спектра. Крім технічного рішення такий підхід й економічно обґрунтований.

У загальному випадку процес проектування захисного матеріалу або конструкції з нього можна схематично описати певним алгоритмом (рис. 1).

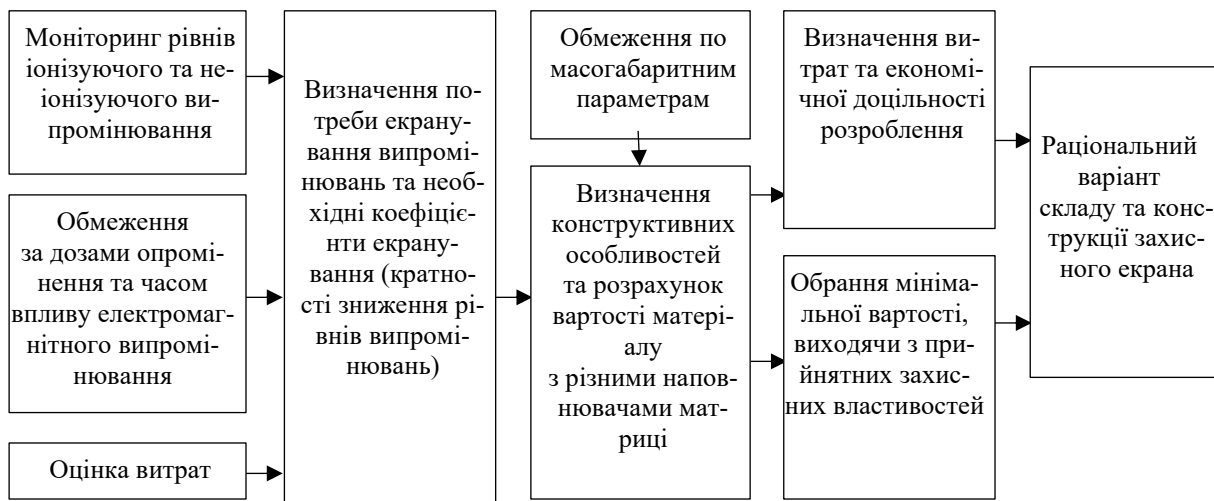


Рис. 1. Процес проектування захисного матеріалу або конструкції з нього

Для мінімізації витрат коштів та часу на розроблення захисних матеріалів найбільш раціональним є застосування в якості матеріалу матриці компонентів, які у великих обсягах виробляються промисловістю для інших цілей. Це поліетилени, поліпропілени та латекси.

Останні привабливі тим, що виробляються як у вигляді плівок, так і у рідкому стані.

Рідкі латекси швидко полімеризуються за кімнатної температури і добре розчиняють дрібнодисперсні домішки.

В'язкість рідкого латексу дозволяє здійснювати якісне перемішування вихідної суміші ультразвуковим випромінюванням. Цей процес добре опрацьований [11] і забезпечує ізотропність суміші, що вкрай важливо для екранування високочастотних електромагнітних випромінювань.

Найбільш критичним фактором щодо екранування іонізуючих випромінювань є матеріал наповнювача матриці, який і визначає ефективність екранування. З метою зниження вартості виробів замість металевого вольфраму можна застосовувати його оксиди, які є вихідними або побічними речовинами основних виробництв.

Достатній ефект, принаймні для енергії випромінювання рентгенівського діагностичного та лікувального обладнання, яке є джерелом гама-випромінювання (побічні складові) дає хром. Розсіювання гама-випромінювання відбувається на атомарному рівні, тому перебування хрому у хімічних сполуках не знижує ефект екранування.

У великих кількостях виробляється окис хрому (тривалентного), який доцільно застосовувати у якості наповнювача.

Найбільш привабливою сполукою для екранування іонізуючих та неіонізуючих електромагнітних випромінювань є магнетит.

Його феромагнітні властивості (відносна магнітна проникність – 4-5) дозволяє ефективно екранувати не тільки електромагнітні височастотні випромінювання малих інтенсивностей, а й магнітні поля промислової частоти.

Враховуючи значення діелектричних проникностей більшості полімерів, цілком можливо отримати композиційний матеріал з близькими за значеннями магнітної та діелектричної проникностями, що мінімізує коефіцієнти відбиття електромагнітних хвиль. Цей показник є вкрай важливим для захисту людей через унеможливлення перерозподілу випромінювань у приміщеннях через відбиття та перевідбиття електромагнітних випромінювань.

Слід враховувати, що у цьому випадку необхідно чітко визначити товщину матеріалу, достатню для прийнятного рівня поглинання електромагнітної енергії.

Перевагою магнетиту є те, що він є головною складовою залізородного концентрату, який у великих обсягах виробляється гірничо-збагачувальними комбінатами.

Наприклад, вміст магнетиту у залізородному концентраті, який виробляється Полтавським гірничо-збагачувальним комбінатом складає принаймні 80-85 %.

При цьому переважною фракцією є частинки дисперсністю до 20 мкм. У стані поставки концентрат схильний до злипання, але ультразвукова обробка суміші дозволяє рівномірно розподілити частинки у полімерній матриці.

Було проведено розрахунки щодо масового коефіцієнту ослаблення гамма-випромінювання композиційного матеріалу з вмістом магнетиту у полімерній матриці (латекс) 45-60 % (за масою).

Розрахунки здійснювалися за припущення, що джерело гама-випромінювання точкове (1 MeV), детектор має незначні розміри, порівняно з розмірами зразка, зразок має розміри 0,15 x 0,15 м визначеної товщини d .

$$D = D_0 \exp(-\mu d) = D_0 \exp(0,693d/\Delta_{0,5}),$$

де μ – лінійний коефіцієнт ослаблення, d – товщина зразка, $\Delta_{0,5}$ – шар, який знижує інтенсивність випромінювання удвічі, D_0 – потужність дози за $d = 0$.

Масовий коефіцієнт ослаблення μ_m визначається як $\mu_m = \mu/\rho$, де ρ – густина захисного матеріалу.

Встановлено, що масовий коефіцієнт ослаблення матеріалу із вмістом магнетиту складає 0,5–0,6 см²/г. Для свинцю стандартні значення складають 0,07–0,08 (у залежності від енергії випромінювання (1-2 MeV)).

Отриманий результат можна вважати прийнятним, враховуючи, що енергії випромінювань рентгєнівських установок масового використання не перевищують кількох десятків кілоелектронвольт.

Було проведено дослідження ефективності екранування матеріалу на основі латексу та магнетиту

(60 % за масою) гамма-випромінювання, джерелом якого є ⁶⁰Co, який застосовується у медичному обладнанні й порівняно результати зі свинцевим екраном (табл. 1, де Ke – відношення інтенсивності випромінювання перед екраном до показника у захищеній зоні).

Таблиця 1 – Ефективність екранування гамма-випромінювання матеріалу на основі магнетиту та свинцю

Товщина, мм	Ke	
	магнетит	свинць
1	1,2	1,5
3	2,1	3,0
5	3,2	3,9

Наведені дані свідчать, що матеріали на основі магнетиту можливо застосовувати для екранування гамма-випромінювань принаймні малих рівнів. При цьому слід враховувати, що випромінювання з боку устаткування, яке використовує джерела іонізуючих випромінювань, ізольовані від зовнішнього простору, тобто вплив на людей складають побічні компоненти випромінювань, які є частково розсіяними й мають малі інтенсивності.

Попередні дослідження довели, що пропонований матеріал дуже ефективний для екранування неіонізуючих електромагнітних полів широкого частотного діапазону, у тому числі й стаціонарних магнітних полів великих напруженостей, які застосовуються у діагностичній апаратурі.

Пропонований напрям розроблення захисних матеріалів уявляється перспективним. Однак потребують подальших досліджень деякі аспекти проблематики.

Відомо, що під впливом навіть ультрафіолетового випромінювання більшість полімерів втрачають вихідні механічні властивості.

Тому необхідно дослідити ступені деградації композиційних матеріалів під впливом іонізуючих випромінювань й з'ясувати їх гарантований ресурс експлуатації.

Доцільно дослідити можливість застосування продуктів очищення промислових стічних вод (наприклад, гальванічного виробництва) для вироблення захисних матеріалів.

Застосування таких відходів дає подвійний ефект (працезохоронний та екологічний) і знижує вартість кінцевої продукції.

Висновки

1. Розроблений алгоритм проектування матеріалів для екранування іонізуючих та неіонізуючих електромагнітних випромінювань мінімізує час розроблення та дозволяє проектувати матеріали потрібної ефективності на принципах розумної достатності.

2. Показана можливість застосування для екранування іонізуючих електромагнітних випромінювань магнетиту, який міститься у залізородному

концентраті, та латексу. Перевагою такого підходу є вироблення цих матеріалів промисловістю у великих обсягах, що здешевлює кінцевий продукт. Порівняння розробленого матеріалу зі стандартними захисними екранами зі свинцю показали прийнятну ефективність композиту принаймні для екранування випромінювань малих енергій.

3. Перспективним напрямом досліджень у цій галузі є визначення можливості застосування у якості екрануючого наповнювача продуктів очищення промислових стічних вод, які мають велику кількість сполук заліза та хрому. Проблемним питанням є деградація полімерної матриці під впливом іонізуючих випромінювань.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

- Duhaini I. The effects of electromagnetic fields on human health. *Physica Medica: European Journal of Medical Physics*. 2016. Vol. 32. P. 213.
- Seibold, P.; Auvinen, A.; Averbeck, D.; Bourguignon, M.; Hartikainen, J.M.; Hoeschen, C.; Laurent, O.; Noël, G.; Sabatier, L.; Salomaa, S.; et al. Clinical and epidemiological observations on individual radiation sensitivity and susceptibility. *Int. J. Radiat. Biol.* 2019. Vol. 96. P. 324–339.
- Abu-Al-Roos N. J., Azmana M. N. et al. Tungsten-based material as promising new lead-free gamma radiation shielding material in nuclear medicine. *Physica Medica*. 2020. Volume 78. Pages 48-57. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ejmp.2020.08.017>.
- M S Al-Buriah et al. Fe-based alloys and their shielding properties against directly and indirectly ionizing radiation by using FLUKA simulations. *Physica Scripta*. 2021. Vol. 96. № 4. 045303. DOI: <https://doi.org/10.1088/1402-4896/abdd52>.
- Akman F., Ozkan I., Kaçal M.R., Polat H., Issa Shams A.M., Tekin H.O., Agar O. Shielding features, to non-ionizing and ionizing photons, of FeCr-based composites. *Applied Radiation and Isotopes*. Volume 167. 2021. 109470. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.apradiso.2020.109470>.
- Hamad R.M., Mhareb M.H.A., Alajerami Y.S., Sayyed M.I., Saleh Gameel, Hamad M. Kh, Ziq KhA. A comprehensive ionizing radiation shielding study of Fe_xSe_{0.5}Te_{0.5} alloys with various iron concentrations. *Journal of Alloys and Compounds*. Volume 858. 2021. 157636. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2020.157636>.
- Rammah Y.S., Olariño I.O., El-Agawany F.I., El-Adawy A., Yousef El Sayed. The impact of PbF₂ on the ionizing radiation shielding competence and mechanical properties of TeO₂-PbF₂ glasses and glass-ceramics. *Ceramics International*. Volume 47. Issue 2. 2021. Pages 2547-2556. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2020.09.100>.
- Alshahrani B., Olariño I.O., Mutuwong C., Sriwunkum Chahkrit, Yakout H.A., Tekin H.O., Al-Buriah M.S. Amorphous alloys with high Fe content for radiation shielding applications. *Radiation Physics and Chemistry*. Volume 183. 2021. 109386. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.radphyschem.2021.109386>.
- Глива В., Матвєєва І., Левченко Л., Кічата Н. Проектування композитних матеріалів на основі дрібнодисперсної залізвмісної субстанції для екранування іонізуючих випромінювань. *Системи управління, навігації та зв'язку*. 2020. 2 (60). С. 110-113. DOI: <https://doi.org/10.26906/SUNZ.2020.2.110>.
- Самченко Д. М., Тихенко О. М., Зозуля Л. А., Цибульник Н. Н. Проектування електромагнітних екранів гарантованої ефективності для галузей цивільної безпеки та електромагнітної сумісності. *Системи управління, навігації та зв'язку*. 2021. 3(73). С. 167–170.
- Glyva V., Podkopaev S., Levchenko L., Karaieva N., Nikolaiev K., Tykhenko O., Khodakovskyy O., Khalmuradov B. Design and study of protective properties of electromagnetic screens based on iron ore dust. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2018. Iss. 1/5 (91). P. 10–17.

Received (Надійшла) 29.11.2023

Accepted for publication (Прийнята до друку) 31.01.2024

Basics of the development of lead-free materials for shielding ionizing and non-ionizing electromagnetic radiation

L. Zozulia

Abstracts. The current trends in the field of protection of the population and workers from the effects of ionizing and non-ionizing electromagnetic radiation are the development of lead-free protective materials. Existing lead-free protective materials are expensive and unacceptable for mass use and for covering large surfaces. The possibility of shielding radiation with composite materials made of latex (matrix) and magnetite (filler) is considered. The expediency of this approach is due to the prevalence of latexes (including in the liquid state) and the high content of magnetite in iron ore concentrate (more than 80%), which is produced in large volumes by mining and processing plants. It has been shown theoretically that the mass attenuation coefficients of iron-containing materials, at least for low-energy radiation, do not differ critically from those of lead. Tests were performed on a latex-based composite material with 60% magnetite content (by weight). The radiation source was a radioactive isotope of cobalt used in medical equipment. The results show that the shielding coefficients (multiples of radiation intensity reduction) for a composite thickness of 1-5 mm are 1.2-3.2; the corresponding figure for lead of the same thickness is 1.5-3.9. This result can be considered quite acceptable given the low cost and environmental friendliness of the composite. The advantage of the composite is the high efficiency of the material in the ranges of ultra-high, ultra-high, and extremely high frequencies of electromagnetic radiation. The presence of ferromagnetic properties in magnetite provides high shielding coefficients for alternating magnetic fields of industrial frequency and stationary magnetic fields of diagnostic equipment. The expediency of determining the possibility of using industrial wastewater treatment products (heavy metal compounds) as shielding fillers is shown. The possibility of degradation of the polymer matrix under the influence of ionizing radiation requires research.

Keywords: ionizing radiation, shielding, composite material.