

О. М. Тихенко, Л. А. Зозуля, С. В. Зозуля

Національний авіаційний університет, Київ, Україна

## КОМПОЗИЦІЙНІ БЕЗСВИНЦЕВІ МАТЕРІАЛИ ДЛЯ ЗАХИСТУ ВІД ІОНІЗУЮЧИХ ТА НЕІОНІЗУЮЧИХ ЕЛЕКТРОМАГНІТНИХ ПОЛІВ ТА ВИПРОМІНЮВАНЬ

**Анотація.** Розроблено й досліджено захисні властивості матеріалів для екранування неіонізуючих та іонізуючих електромагнітних полів і випромінювань, притаманних медичному обладнанню. Показано, що стаціонарні магнітні поля доцільно екранувати аморфними кобальтовими та кристалічними залізо-нікелевими сплавами малої товщини. Їх комбінація дозволяє уникати залежності коефіцієнта екранування від напруженості магнітного поля. Розроблено й досліджено захисні властивості композицій на основі латексу та сульфату барію для екранування рентгенівського випромінювання. Встановлено, що за товщини матеріалу 5 мм можливо отримати коефіцієнти екранування 1,4 – 5,8 у залежності від вмісту наповнювача. Розроблено й досліджено захисні властивості композицій на основі латексу й оксиду вольфраму для екранування гама-випромінювань. Визначено, що за товщини матеріалу 5 мм можливо отримати коефіцієнти екранування 1,1 – 3,8 у залежності від вмісту екрануючої субстанції. Вміст сульфату барію та оксиду вольфраму у 30 % за масою не впливає на однорідність матеріалів після висихання. Розтріскування поверхонь не виявлено. Перевагою отриманих композицій є можливість їх нанесення у рідкому стані. Випробування адгезивних властивостей сумішей при нанесенні на бетон та гіпсокартон свідчать про їх відповідність вимогам ДСТУ ISO 2409:2019. Це дозволяє наносити суміші на поверхні будь-якої форми у кілька шарів, що дає змогу регулювати коефіцієнти екранування у залежності від радіаційної та електромагнітної обстановки.

**Ключові слова:** композиційний матеріал, іонізуюче, неіонізуюче випромінювання, коефіцієнт екранування.

### Вступ

У сучасних умовах багато уваги приділяється розробленню й дослідженню ефективності захисту від впливу іонізуючих та неіонізуючих електромагнітних полів та випромінювань композиційними матеріалами. Це пояснюється, у першу чергу тим, що джерела таких випромінювань широко застосовуються у діагностичному та лікувальному обладнанні закладів охорони здоров'я. При цьому спектр таких полів та випромінювань дуже широкий – від магнітних полів нульової частоти (магнітно-резонансні томографи) до частот гамма-променів (променева терапія). При цьому у багатьох медичних пристроях використовується одночасно кілька джерел електромагнітних полів та випромінювань. Особливістю будь-якого медичного обладнання є те, що частина випромінювання є паразитним, тобто таким, що поширюється у середовищі поза функціональною зоною. Багато лікувальних та діагностичних установ розташовані у житлових будинках, де застосування матеріалів із вмістом свинцю заборонено. Крім того, захисні свинцеві конструкції мають великі масогабаритні параметри, що ускладнює технології їх монтажу. Враховуючи високу токсичність свинцю, існує тенденція розроблення захисних матеріалів без його вмісту. Наведене зумовлює актуальність теми дослідження.

### Сучасний стан питання

У якості матеріалів для виготовлення захисних екранів від іонізуючого та неіонізуючого випромінювання дедалі більше науковці звертають увагу на композиційні матеріали, які складаються з матриці й наповнювача, що визначає ефективність екранування, та є достатньо ефективними при помірних матеріальних затратах. Додавання до полімерної матриці спеціальних наповнювачів, таких як  $BaBi_5O$  [1],

$Bi_2O_3$  [2],  $BaTiO_3$  та  $CaWO_4$  [3],  $PbCl_2$  [4],  $CdTe$  [5],  $WC$  [6],  $WO_2$  [7],  $Gd_2(SO_4)_3$  [8],  $BaSO_4$ ,  $Bi_2O_3$  та  $WO_3$  [9] покращує захисні властивості композиційних матеріалів для екранування іонізуючого випромінювання. Але більшість з таких композитів мають високу собівартість, подекуди мають низьку механічну міцність та ефективні лише для захисту від гамма-випромінювання низьких енергій.

Щодо екранування електромагнітних випромінювань неіонізуючих енергій, особлива увага науковцями приділяється композиційним матеріалам на основі полімерних матриць наповнених дисперсними вуглецевими наноструктурами [10], зокрема такими як шунгіт та технічний вуглець [11], дрібнодисперсним графітом і графітизованою сажею [12], графітовими пластиками [13]. Ефективність таких захисних композиційних матеріалів вважається цілком прийнятною для захисту від неіонізуючого випромінювання, однак зі зменшенням товщини захисного покриття, захисні властивості таких композитів зменшуються. Також зазначені матеріали є неефективними для поглинання електромагнітних випромінювань іонізуючих енергій.

Зважаючи на те, що електромагнітні випромінювання неіонізуючих та іонізуючих енергій часто синхронно супроводжують нас у різних сферах життя, зокрема у медичній галузі, доцільним стає завдання виготовлення екрануючих матеріалів для захисту одночасно від неіонізуючого та іонізуючого електромагнітного випромінювання. Досягнення зазначеної мети запропоновано у дослідженнях [14, 15], де у якості захисного матеріалу застосовувались полієфірні композити, армовані ферохромом та ніобієм. Для прискорення реакції полімеризації у вихідні компоненти необхідно вводити додаткові хімічні сполуки (прискорювачі, ініціатори, допанти), що ускладнює технологію виготовлення та є досить дорогавартісним.

**Мета роботи** – розроблення й дослідження захисних властивостей композиційних матеріалів для екранування неіонізуючих та іонізуючих електромагнітних полів та випромінювань.

### Виклад основного матеріалу

Дослідження захисних властивостей матеріалів виконувалося за допомогою повіреної вимірювальної апаратури.

Вимірювання стаціонарних магнітних полів здійснювалося приладом МТМ-01. Вимірювання щільності потоку енергії електромагнітних полів ультрависоких частот здійснювалося вимірювачем напруженості електричних та магнітних полів ПЗ-31. Вимірювання інтенсивності рентгенівського та гамма-випромінювання здійснювалося приладом СРП-88.

Джерелами рентгенівського випромінювання були стандартні рентгенівські трубки медичного призначення з напругами на трубі 60–150 кВ (50–150 кеВ). Джерелами гамма-випромінювання були лабораторна установка з джерелом  $^{60}\text{Co}$  (2,82 МеВ) та промисловий дефектоскоп «Гамарід» з джерелом  $^{192}\text{Ir}$  (0,38 МеВ). Джерелом стаціонарного магнітного поля була дослідницька установка з максимальною індукцією магнітного поля 0,98 Тл. Методики вимірювань виключали проникнення полів та випромінювань поза захисним екраном. Дослідження виконувалися послідовно для стаціонарного магнітного поля, змінних електромагнітних полів та іонізуючих випромінювань. Коефіцієнтами екранування вважалися відношення значення поля або випромінювання джерела до показника у захищеній зоні. З методичної точки зору найбільш складною задачею є захист від

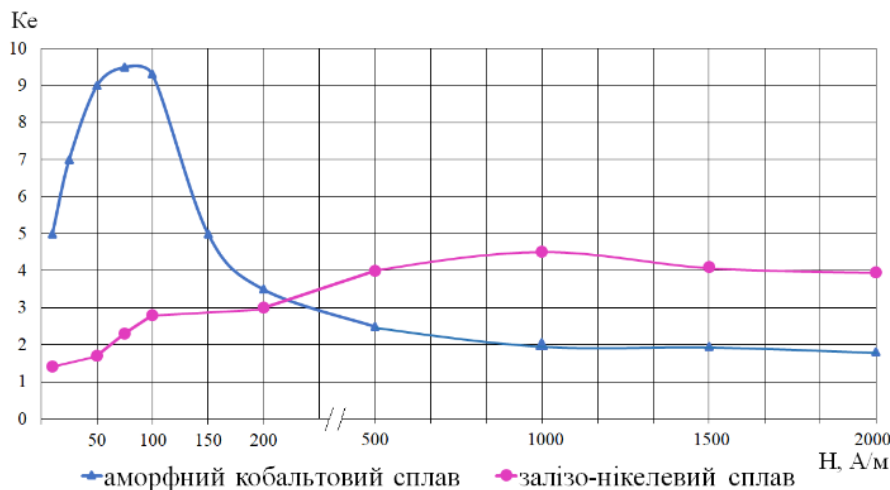
впливу стаціонарного магнітного поля. Такі поля генеруються обладнанням медичного призначення (магніторезонансний томограф та ін.) і міським електричним транспортом. Магнітостатичний захист полягає у шунтуванні магнітного поля феромагнітним матеріалом. Воно полягає у замиканні силових ліній у матеріалі з низьким опором магнітному потоку. Тобто ефективність екранування прямо пропорційна магнітній проникності матеріала екрана та зворотно пропорційна площі поперечного перерізу. За фіксованої площі екрана критичною є його товщина.

У загальному випадку екран повинен бути геометрично замкненим. Це ж стосується квазістаціонарних полів промислової частоти. Але значне екранування досягається й без виконання цієї умови, що обумовлене виникнення градієнту магнітної проникності по товщині матеріалу у зовнішньому магнітному полі.

Головною умовою ефективності захисту є великі значення вихідної магнітної проникності. Такій умові відповідають пермалої та аморфні феромагнітні сплави.

Недоліком пермалоїв є критична залежність магнітної проникності від деформації. Аморфні сплави позбавлені цього недоліка. У багатьох випадках магнітна проникність критично залежить від напруженості зовнішнього магнітного поля. Тому для експериментів було обрано аморфний сплав на основі кобальту (вміст кобальту – до 80 %, ТОВ «Мелта», Україна) та сплав нікелю і заліза (80 % та 20 % відповідно).

Було визначено захисні властивості наведених сплавів у залежності від напруженості зовнішнього магнітного поля (рис. 1).



**Рис. 1.** Залежність коефіцієнта екранування аморфного кобальтового та залізо-нікелевого сплаву від напруженості стаціонарного магнітного поля. Товщина екранів 200–250 мкм

Наведені на рис. 1 захисні залежності обумовлені залежністю магнітних проникностей від напруженості екранованого поля.

Вихідні магнітні проникності кобальтових сплавів складають 9000-10000, залізо-нікелевого сплаву – 800-900. Тому застосування металоолімерних композитів для екранування стаціонарних магнітних полів проблематичне.

Враховуючи, що магнітна проникність композиту на основі магнетиту (вміст 60 % за масою у полімерній матриці) не перевищує 3,0-3,2, для екранування таких полів товщина захисту повинна бути меншою за 1,5- 2,0 см.

Захисні властивості композиту на основі магнетиту та полімеру у області наднизьких та ультрависоких частот достатні для екранування електромагнітних

полів, зареєстрованих на робочих місцях персоналу з обслуговування медичного обладнання. Випробування матеріалів на основі магнетиту товщинами 5 та 10 мм з вмістом магнетиту 60 % у полімерній матриці наведено у табл. 1.

**Таблиця 1 – Залежність коефіцієнтів екранування магнітного поля промислової частоти і електромагнітного поля ультрависокої частоти від товщини металополімерного матеріалу (вміст магнетиту 60% (мас.))**

Товщина, мм	Коефіцієнт екранування, в.од.	
	50 Гц	2,6 ГГц
5	14 – 16	22 – 24
10	28 – 30	24 – 26

Як видно з табл. 1, коефіцієнти екранування достатньо високі, але незначна залежність ефективності екранування електромагнітного поля ультрависокої частоти від товщини екрана свідчить про переважний внесок у захисні властивості відбиття електромагнітних хвиль. Незважаючи на малу електропровідність магнетиту, коефіцієнт відбиття високий через великий вміст металеві субстанції.

Для розроблення матеріалів, що екранують рентгенівське випромінювання малих інтенсивностей у якості наповнювача використовувався сульфат барію, а матриці – рідкий латекс.

Перевагами цих матеріалів є їхня екологічність, тобто відсутня необхідність визначення можливості їх застосування у житлових будівлях для внутрішнього облицювання окремих приміщень, а також у закладах охорони здоров'я. Було виготовлено зразки завтовшки 5 мм із масовим вмістом сульфату барію 10, 20, 30 % за масою. Результати випробувань наведені у табл. 2.

**Таблиця 2 – Залежність коефіцієнта екранування рентгенівського випромінювання від вмісту сульфату барію у полімерній матриці**

Вміст наповнювача, % (мас.)	Коефіцієнт екранування, в.од.
10	1,4 – 1,6
20	2,8 – 3,0
30	5,6 – 5,8

Для захисту від гама-випромінювань було виготовлено композиційний матеріал на основі рідкого латексу та технічного окису вольфраму. Окис вольфраму додався у рідкий латекс у кількості 10, 20, 30 % за масою. Після цього суміш висушувалася. Товщина зразків складала 5 мм.

Результати випробувань захисних властивостей наведено у табл. 3.

Враховуючи малий об'ємний вміст наповнювача у матриці, отримані захисні властивості можна вважати прийнятними.

**Таблиця 3 – Залежність коефіцієнта екранування гама-випромінювання від вмісту окису вольфраму**

Вміст наповнювача, % (мас.)	Коефіцієнт екранування, в.од.
10	1,1 – 1,2
20	2,4 – 2,5
30	3,7 – 3,8

За такого об'ємного вмісту у процесі висихання не порушується однорідність матеріалу й відсутні ознаки розтріскування. Тобто є можливість збільшити масовий вміст окису вольфраму у матриці, що автоматично призводить до підвищення коефіцієнта екранування.

Враховуючи задовільні однорідності сумішей латексу і магнетиту, сульфату барію та окису вольфраму, відкриваються можливості отримання матеріалів для одночасного захисту від іонізуючих та неіонізуючих випромінювань та полів.

Пропорції вмісту компонентів у полімері визначаються фактичними рівнями полів і випромінювань, які потребують екранування.

Було досліджено зчеплення рідких металополімерних сумішей з бетонними та гіпсополімерними покриттями. Випробування згідно ДСТУ ISO 2409:2019 вказують, що покриття відповідають класу 1. Це свідчить про достатні адгезивні властивості композицій.

Таким чином, розроблені композиції можна наносити на поверхні у вигляді листових матеріалів та у рідкому стані. Це значно спрощує впровадження заходів радіаційної та електромагнітної безпеки. Такі суміші можна наносити на поверхні будь-яких конфігурацій у кілька шарів, що дозволяє забезпечити потрібні коефіцієнти екранування електромагнітних полів неіонізуючих та іонізуючих випромінювань.

## Висновки

1. Захист від впливу стаціонарних магнітних полів доцільно здійснювати аморфними кобальтовими сплавами та залізо-нікелевими сплавами. Їх комбінація дозволяє уникнути зниження коефіцієнтів екранування внаслідок амплітудної залежності магнітних проникностей обох матеріалів.

2. Розроблений матеріал для екранування рентгенівського випромінювання на основі латексу та сульфату барію має достатні коефіцієнти екранування принаймні для екранування паразитарних випромінювань (1,4 – 5,8 у залежності від вмісту наповнювача).

3. Розроблений матеріал для екранування гама-випромінювань на основі латексу та окису вольфраму має достатні коефіцієнти екранування, принаймні для випромінювань, притаманних лікувальній та дефектоскопічній апаратурі (1,1 – 3,8 у залежності від вмісту окису вольфраму).

4. Отримані результати свідчать, що розроблені композиції можливо застосовувати у рідкому стані, що дозволяє вкривати поверхні складних форм

у кілька шарів. Це забезпечує можливість отримання конкретної радіаційної або електромагнітної обстановки. потрібних коефіцієнтів екранування у залежності від новки.

## СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Gürel Özdemir H., Kaçal M.R., Akman F., Polat H., Agar O. Investigation of gamma radiation shielding characteristics of bismuth reinforced ternary composites in wide photon energy region. *Radiation Physics and Chemistry*. 2023. Volume 208. 110924. <https://doi.org/10.1016/j.radphyschem.2023.110924>.
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. Doi: 10.1002/app.44657.
3. Akman F., Kaçal M.R., Almousa N., Sayyed M.I., Polat H. Gamma-ray attenuation parameters for polymer composites reinforced with BaTiO<sub>3</sub> and CaWO<sub>4</sub> compounds. *Progress in Nuclear Energy*. 2020. Volume 121. 103257. <https://doi.org/10.1016/j.pnucene.2020.103257>.
4. Özkalaycı F. Lead(II) chloride effects on nuclear shielding capabilities of polymer composites. *Journal of Physics and Chemistry of Solids*. 2020. Volume 145. 109543. <https://doi.org/10.1016/j.jpcs.2020.109543>.
5. Akman F., Ogul H., Kaçal M.R., Polat H., Dilsiz K., Agar O. Gamma attenuation characteristics of CdTe-Doped polyester composites. *Progress in Nuclear Energy*. 2021. Volume 131. 103608. <https://doi.org/10.1016/j.pnucene.2021.103608>.
6. Nadin Jamal AbuAlRoos, Mira Natasha Azmana, Noorfatin Aida Baharul Amina, Rafidah Zainon. Tungsten-based material as promising new lead-free gamma radiation shielding material in nuclear medicine. *Physica Medica*. 2020. Volume 78. Pages 48-57. <https://doi.org/10.1016/j.ejmp.2020.08.017>.
7. Cherkashina N.I., Pavlenko V.I., Noskov A.V., Sirota V.V., Zaitsev S.V., Prokhorenkov D.S., Sidelnikov R.V. Gamma radiation attenuation characteristics of polyimide composite with WO<sub>2</sub>. *Progress in Nuclear Energy*. 2021. Volume 137. 103795. <https://doi.org/10.1016/j.pnucene.2021.103795>.
8. Erkoyuncu İ., Akman F., Ogul H., Kaçal M.R., Polat H., Demirkol İ., Dilsiz K., Ertuğral B. A detailed investigation of gamma and neutron shielding capabilities of ternary composites doped with polyacrylonitrile and gadolinium (III) sulfate. *Applied Radiation and Isotopes*. 2023. Volume 196. 110789. <https://doi.org/10.1016/j.apradiso.2023.110789>.
9. Seon-Chil Kim, Sung-Hyoun Cho. Analysis of the Correlation between Shielding Material Blending Characteristics and Porosity for Radiation Shielding Films. *Journals Applied Sciences*. 2019. 9(9). 1765. <https://doi.org/10.3390/app9091765>.
10. Senyk I., Kuryptia Y., Barsukov V., Butenko O., Khomenko V. Development and application of thin wide-band screening composite materials *Physics and Chemistry of Solid State*. 2020. 21(4). pp. 771–778. <https://doi.org/10.15330/pcss.21.4.771-778>.
11. Білоусова Є.С., Мохамед А.М.А., Линьков Л.М., Борботько Т.В. Електромагнітні екрани на основі наноструктурованих вуглецевісних матеріалів: монографія. 2018. 317 с.
12. Barsukov Viacheslav, Senyk Ilona, Kryukova Olena, Butenko Oksana. Composite Carbon-Polymer Materials for Electromagnetic Radiation Shielding. *Materials Today: Proceedings*. 2018. V. 5. No 8.Part 1. 15909-15914. DOI: 10.1016/j.matpr.2018.06.063.
13. Halder Krishna Kamal, Tomar Monika, Sachdev V.K., Gupta Vinay. Development of polyvinylidene fluoride–graphite composites as an alternate material for electromagnetic shielding applications. *Materials Research Express*. Volume 6. № 7. 075324. DOI: 10.1088/2053-1591/ab13dd.
14. 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*. 2021. Volume 167. 109470. <https://doi.org/10.1016/j.apradiso.2020.109470>.
15. Akman Ferdi, Ogul H., Ozkan I., Kaçal M.R., Agar O., Polat H., Dilsiz K. Study on gamma radiation attenuation and non-ionizing shielding effectiveness of niobium-reinforced novel polymer composite. *Nuclear Engineering and Technology*. 2022. Volume 54. Issue 1, Pages 283-292. <https://doi.org/10.1016/j.net.2021.07.006>.

Received (Надійшла) 26.02.2024

Accepted for publication (Прийнята до друку) 17.04.2024

**Composite lead-free materials  
for protection against ionizing and non-ionizing electromagnetic fields and radiation**

O. Tykhenko, L. Zozulia, S. Zozulia

**Abstract.** The protective properties of materials for shielding non-ionizing and ionizing electromagnetic fields and radiations inherent in medical equipment have been developed and studied. It has been shown that it is advisable to shield stationary magnetic fields with amorphous cobalt and crystalline iron-nickel alloys of small thickness. Their combination avoids the dependence of the shielding coefficient on the magnetic field strength. The protective properties of compositions based on latex and barium sulfate for shielding X-rays have been developed and studied. It was found that at a material thickness of 5 mm, shielding coefficients of 1.4-5.8 can be obtained, depending on the filler content. The protective properties of compositions based on latex and tungsten oxide for shielding gamma radiation have been developed and studied. It was determined that with a material thickness of 5 mm, it is possible to obtain shielding coefficients of 1.1-3.8, depending on the content of the shielding substance. The content of barium sulfate and tungsten oxide at 30 % by weight does not affect the homogeneity of the materials after drying. No surface cracking was detected. The advantage of the obtained compositions is the possibility of their application in a liquid state. Tests of the adhesive properties of the mixtures when applied to concrete and drywall show that they meet the requirements of State Standard ISO 2409:2019. This makes it possible to apply the mixtures to surfaces of any shape in several layers, which makes it possible to adjust the shielding coefficients depending on the radiation and electromagnetic environment.

**Keywords:** composite material, ionizing, non-ionizing radiation, shielding factor.