

ЦИВІЛЬНА БЕЗПЕКА CIVIL SAFETY

УДК 538.61.331.45

Tetiana Tkachenko¹, D.S., Professor

ORCID ID: 0000-0003-2105-5951 **e-mail:** tkachenko.tm@knuba.edu.ua

Oksana Ilchuk², PhD, Senior Lecturer

ORCID ID: 0000-0001-6352-5320 **e-mail:** oksanailchukpi@gmail.com

Olena Zemlyanska², Senior Lecturer

ORCID ID: 0000-0002-9608-3677 **e-mail:** olenazemlyanska@gmail.com

¹Kyiv National University of Construction and Architecture, Kyiv, Ukraine

²National Technical University of Ukraine «Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute», Kyiv, Ukraine

PRINCIPLES OF DESIGNING ELECTROMAGNETIC SCREENS OF THE RESONANT TYPE BASED ON LIQUID PROTECTIVE COMPOSITIONS

Abstract. *The work explores the possibilities of creating resonance-type electromagnetic shields to protect workers and the population from man-made electromagnetic fields. It is shown that traditional resonant screens are not technological enough to cover large surfaces and are tuned to monochrome or narrow-band electromagnetic fields. Based on the analysis of the experience of using liquid shielding mixtures, the possibility of creating a multilayer structure without fixed layer thicknesses, which will allow protection against the influence of the frequency band, has been proven. At the same time, the wave resistance of the outer layer allows you to minimize the reflection coefficients of electromagnetic waves, which makes the material practically absorbent. A calculator for the preliminary calculation of the electrophysical properties of each layer is presented, which allows rationalizing the required coefficients. For calculations, the formulas of Odelevsky and Debye for the dielectric constant of mixtures are adapted. Experimentally obtained empirical coefficients are presented, which are a component of the ratio for obtaining acceptable screen parameters. To determine the exact concentration of the shielding filler in the matrix, a correction factor is provided. This is associated with errors when determining the volume content of the filler of low dispersion and differences in the morphology of the filler particles, which does not allow for an accurate calculation of the depolarization coefficient of the filler particles. Given the lack of reference data on the electrophysical parameters of the compositions due to their diversity, it is advisable to conduct thorough laboratory studies with different compositions of the compositions. This will make it possible to form a reference database that will speed up the execution of electromagnetic safety work and reduce their cost.*

Keywords: *electromagnetic safety; shielding; resonant absorption; electrophysical properties.*

Т.М. Ткаченко¹, О.С. Ільчук², О.В. Землянська²

¹Київський національний університет будівництва і архітектури, м. Київ, Україна

²Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», м. Київ, Україна

ЗАСАДИ ПРОЄКТУВАННЯ ЕЛЕКТРОМАГНІТНИХ ЕКРАНІВ РЕЗОНАНСНОГО ТИПУ НА ОСНОВІ РІДКИХ ЗАХИСНИХ КОМПОЗИЦІЙ

Анотація. У роботі досліджено можливості створення електромагнітних екранів резонансного типу для захисту працюючих і населення від електромагнітних полів техногенного походження. Показано, що для облицювання поверхонь великих площ традиційні резонансні екрани недостатньо технологічні і налаштовані на монохромні або вузькосмугові електромагнітні поля. На основі аналізу досвіду застосування рідких екрануючих сумішей доведено можливість створення багатошарової структури без фіксованих товщин шарів, яка дозволить реалізувати захист від впливу смуги частот. При цьому хвильовий опір зовнішнього шару дозволяє мінімізувати коефіцієнти відбиття електромагнітних хвиль, що робить матеріал практично поглинальним. Наведено розрахунковий апарат щодо попереднього розрахунку електрофізичних властивостей кожного шару, що дозволяє раціоналізувати потрібні коефіцієнти. Для розрахунків адаптовані формули Оделевського і Дебая для діелектричної проникності сумішей. Представлені експериментально отримані емпіричні коефіцієнти, які є складовою співвідношення для отримання прийнятних параметрів екранів. Для визначення точної концентрації екрануючого наповнювача у матриці надано поправочний коефіцієнт. Це пов'язане з похибками при визначенні об'ємного вмісту наповнювача малої дисперсності та розбіжності у морфології частинок наповнювача, що не дозволяє точно розрахувати коефіцієнт деполаризації частинок наповнювача. Враховуючи відсутність довідкових даних щодо електрофізичних параметрів композицій через їх різноманітність, доцільно провести ґрунтовні лабораторні дослідження за різних складів композицій. Це дозволить сформувати довідкову базу даних, що пришвидшить виконання робіт з електромагнітної безпеки та знизить їх вартість.

Ключові слова: електромагнітна безпека; екранування; резонансне поглинання; електрофізичні властивості.

<https://doi.org/10.32347/2411-4049.2023.1.59-67>

Вступ

Основною тенденцією останніх років у галузі електромагнітної безпеки є розроблення і дослідження захисних властивостей композиційних матеріалів для екранування електромагнітних полів. Це обумовлено тим, що традиційні металеві екрани априорі мають високі коефіцієнти відбиття електромагнітних хвиль. При цьому коефіцієнт відбиття практично не змінюється у діапазонах ультрависоких і вищих частот. У результаті разом з небажаними випромінюваннями блокуються сигнали бездротового зв'язку, що у сучасних умовах неприпустимо. Крім того, відбиття хвиль може відбуватися у небажаних напрямках, додатково погіршуючи електромагнітну обстановку.

Але більшість захисних композицій широкосмугові, принаймні у межах одного частотного діапазону. А у реальних виробничих умовах майже завжди

існують техногенні електромагнітні поля вузької частотної смуги або монохромні. Для захисту від впливу таких полів доцільно застосовувати покриття, призначені для їх екранування, причому переважно за рахунок поглинання електромагнітної енергії. Це потребує розроблення теоретичних та технологічних засад їх проектування.

Стан питання

Створенню та випробуванню захисних властивостей композиційних матеріалів щодо екранування електромагнітних полів широкого частотного діапазону приділяється багато уваги. Особливістю композиції є необхідність використовувати різні складові (екрануючі наповнювачі) для ефективного екранування електромагнітних полів низької частоти (в основному наднизької – 50 Гц та її гармонік) та високої частоти (в основному ультрависоких та вищих частот).

У діапазоні ультрависоких частот ефективність екранування пропорційна питомій провідності матеріалу. Тому наповнювачем матриці повинен бути провідний матеріал. У роботі [1] таким наповнювачем є мідний порошок зі сферичною формою частинок. Різке зростання коефіцієнта екранування відбувається за проявлення перколяційного ефекту – зростання провідності матеріалу. Це відбувається за об'ємного вмісту наповнювача 15–16%. Це великий ваговий вміст, що робить матеріал досить дорогим. При цьому виникає проблема його ізотропності – рівномірності розподілу мідних частинок у матриці. Більш прийнятним є додавання у матрицю електропровідного вуглецю. У дослідженнях [2–7] застосовувався лускоподібний графіт, графітизована сажа та графени. Ці матеріали мають високі ефективності екранування (20 дБ і вище), але вартість наповнювачів обумовлює велику вартість кінцевого продукту, що робить його непридатним для покриття великих площ. Високі коефіцієнти екранування автоматично забезпечують екранування усіх видів бездротового зв'язку, що вкрай небажано. В останні роки багато уваги приділяється наноматеріалам [5]. Але надзвичайно висока для масового використання вартість вироблення наповнювачів нанорозмірів гальмує поширення подібних композицій. Навіть застосування для цілей екранування магнітних рідин, що виробляються у великих кількостях для ущільнювачів електродвигунів та генераторів, з наповнювачем з нанозаліза не вирішує проблеми економічної доцільності їх застосування [6–8]. При цьому екрануються поля дуже широкої смуги, що теж впливає на якість мобільного зв'язку. Але у магнітних рідин є певна перевага через можливість їх застосування для виготовлення захисних конструкцій як від високочастотних полів, так і полів наднизьких частот. Для захисту від впливу магнітних полів наднизької частоти з високою ефективністю застосовувався наповнювач з концентрату залізної руди, головним компонентом якого є магнетит (60–80%) [9, 10]. Такий наповнювач може бути отриманий у результаті очищення промислових стічних вод, що знімає проблему його утилізації [11, 12]. Ефективність екранування електромагнітних полів ультрависоких частот із застосуванням такого наповнювача відносно невисока (коефіцієнти екранування 3–4), але у реальних умовах, з огляду на рівні цих полів навіть поблизу радіотехнічних об'єктів, такі параметри задовільні. Це відкриває можливість підтримати сигнали бездротового зв'язку на належному рівні одночасно з екрануванням полів

небажаних частот. Зазвичай у виробничих умовах існують вузькосмугові електромагнітні поля, які можливо частково знизити прямим поглинанням у захисному матеріалі та екрануванням за рахунок резонансних явищ у багатошаровому матеріалі. Це потребує розроблення методологічних засад та математичного апарату для проєктування захисних конструкцій необхідної ефективності.

Мета роботи – розроблення загальних засад проєктування електромагнітних екранів резонансного типу та надання розрахункового апарату щодо їх максимальної ефективності на визначених частотах або смугах частот.

Виклад основного матеріалу

Резонансні захисні покриття призначені, у першу чергу, для мінімізації коефіцієнтів відбиття електромагнітних хвиль. За спектральними характеристиками поглинальні матеріали поділяються на широкосмугові з перекриттям частотного діапазону (відношення максимальної і мінімальної частоти від 2 до 20 і більше) та вузькосмугові з перекриттям частотного діапазону $\pm 3-10\%$ відносно центральної (резонансної) частоти діапазону (смуги).

Широкосмугові матеріали зазвичай виробляються у вигляді багатошарових градієнтних структур. Мінімально досяжне значення коефіцієнта відбиття визначається діелектричною проникністю поверхневого шару.

Якщо діелектрична проникність поверхневого шару дорівнює ϵ_n (у поверхневого шару вона практично дійсна), то у широкій смузі частот важко зробити коефіцієнт відбиття нижчим за коефіцієнт відбиття на межі розділу повітря і поверхневого шару. Для немагнітних матеріалів за нормального падіння електромагнітної хвилі коефіцієнт відбиття визначається як:

$$K_g = \frac{1 - \sqrt{\epsilon_n}}{1 + \sqrt{\epsilon_n}}. \quad (1)$$

Вузькосмугові поглинальні матеріали у більшості резонансні, у яких на частоті резонансу напруженості поля хвилі, відбитої від зовнішньої поверхні, і напруженості хвилі, відбитої від внутрішнього шару з більшою електропровідністю, перебувають у протифазі. Існуючі підходи до забезпечення мінімальних коефіцієнтів відбиття електромагнітних хвиль передбачають узгодження товщин шарів покриття, що автоматично підвищує загальну товщину екрана та ускладнює його вироблення безпосередньо на місці використання [13]. Потребує розроблення методологія раціоналізації (а за певних умов – оптимізації) параметрів поглинального матеріалу, за яких матеріал має найменші коефіцієнти відбиття на сітці частот у заданому діапазоні. У відповідності до цього залежність коефіцієнта відбиття від частоти падаючої електромагнітної хвилі f надається у вигляді багатопараметричної функції F :

$$K_g(f) = F(f_1, p_1, p_2 \dots p_n), \quad (2)$$

p_i – параметри матеріалу.

Оптимізаційним параметром для кожного шару у випадку багатошарової структури є діелектрична проникність матриці без екрануючого наповнювача, об'ємний вміст наповнювача, товщина шарів за фіксованої (заданої) сумарної товщини, морфологія наповнювача (відношення середньої довжини частинок до їх діаметра).

Це надає змогу раціоналізувати коефіцієнти відбиття переважно за рахунок вмісту наповнювача, електрофізичних показників кожного шару та обирання наповнювача певної морфології і дозволяє уникнути фіксованої товщини шарів. Реалізація такого підходу можлива із застосуванням рідких композицій різного складу. За жорстких умов щодо високого коефіцієнта екранування кількість шарів може збільшуватися до 3–4, але їх нанесення не викликає проблем, якщо не потрібно витримувати товщину кожного шару.

У процесі проектування матеріалу із заданими захисними властивостями використовується залежність діелектричної проникності від частоти, розрахованої з використанням формули Оделевського для сумішей. Для малих концентрацій наповнювача (до 30% за вагою) її можна привести до співвідношення Дебая для діелектричної проникності [14].

Це співвідношення враховує поляризаційні процеси типу релаксацій. Розрахунок діелектричної проникності здійснюється за формулою, аналогічною формулі Дебая із введенням параметричних коефіцієнтів $\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3$.

$$\varepsilon_{екв.} = \varepsilon_m + \frac{D \cdot \alpha_1 \cdot \alpha_2}{1 + (i \frac{\lambda_p}{\lambda})}, \quad (3)$$

де ε_m – відносна діелектрична проникність матриці, λ – довжина хвилі у вільному просторі, λ_p – довжина хвилі релаксації.

$$D = \frac{\varepsilon_m V_n}{F}, \quad (4)$$

де V_n – об'ємна концентрація наповнювача.

Найбільш імовірна довжина хвилі релаксації визначається як:

$$\lambda_p = \frac{\varepsilon_m \rho_n}{60F}, \quad (5)$$

де ρ_n – питомий опір наповнювача.

Коефіцієнт деполіризації визначається зі співвідношення:

$$F = \frac{\ln(2 \frac{l}{d})}{l/d}, \quad (6)$$

де l, d – середні довжина і діаметр частинок наповнювача.

Коефіцієнт α_1 враховує орієнтацію вектора напруженості електричного поля відносно орієнтації частинок $\alpha_1=0,33$ за хаотичної орієнтації частинок, $\alpha_1=1,00$ за орієнтації частинок у напрямку вектора напруженості електричного поля.

Наведене дозволяє керувати цим коефіцієнтом за допомогою впливу електричного поля на орієнтацію частинок наповнювача, як це реалізовано щодо феромагнітного наповнювача, концентрації і орієнтація якого змінюється впливом неоднорідного магнітного поля [15].

Емпіричний коефіцієнт α_2 визначається експериментально для конкретного матеріалу і конкретної технології та враховує необхідність збільшення потрібної реальної концентрації, порівняно з теоретичною. Це викликає певні труднощі у процесі проектування композицій. Але у будь-якому випадку ця робота вимагає лабораторних досліджень через відсутність довідкових даних щодо композиційних матеріалів, які розробляються за гнучкими технологіями. До того ж формула Оделевського дає тільки орієнтовні показники щодо діелектричної проникності суміші. По-перше, вона оперує об'ємним вмістом наповнювача, який для дрібнодисперсної субстанції визначити важко (зазвичай робиться перерахунок вагового вмісту в об'ємний у відповідності зі співвідношеннями питомих густин матеріалу матриці і наповнювача). По-друге, коефіцієнт деполаризації F теж приблизний через відмінності у морфології частинок наповнювача. Досвід свідчить, що для концентрацій наповнювача на межі протікання електроструму (14–16% за об'ємом) коефіцієнт α_2 приблизно дорівнює 0,5. Це ж стосується коефіцієнта α_3 , який доцільно визначити експериментально, враховуючи певний розкид довжини хвилі релаксації. Для наведених вище умов він близький до 0,16–0,17.

Застосування наведеного підходу дозволяє обрати і реалізувати найбільш прийнятні для конкретної електромагнітної обстановки електрофізичні властивості кожного шару багат шарової структури. Але необхідність виконувати попередні лабораторні дослідження значно підвищує час розробки та її вартість. Тому доцільно попередньо виконати дослідницьку роботу щодо параметрів композицій, розроблених на основі різних матриць і наповнювачів різних електрофізичних властивостей, дисперсності, морфології, концентрації для формування бази даних, яка дозволить на основі обстежень електромагнітної обстановки розробляти електромагнітні екрани на принципах розумної достатності.

Висновки

1. Недоліком більшості електромагнітних екранів резонансного типу є складність конструкції (необхідність точного дотримання товщин шарів) і практична монохромність екранованого поля.
2. Показано, що для отримання резонансних захисних покриттів доцільно використовувати рідкі захисні суміші з різними електрофізичними властивостями. Це надає змогу отримати потрібні коефіцієнти екранування у певній смузі частот із забезпеченням мінімальних коефіцієнтів відбиття електромагнітних хвиль.
3. Для прогнозування захисних властивостей матеріалів доцільно використовувати формули Оделевського та Дебая для діелектричної проникності сумішей. Наявність емпіричних коефіцієнтів за необхідності врахування багатьох параметрів композиції і недостатня точність попередніх розрахунків обумовлює необхідність виконання ґрунтовних лабораторних досліджень з метою отримання довідкових даних, які дозволять зменшити час реалізації заходів електромагнітної безпеки та їх вартість.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. O V Panova, G Iu Krasnianskyi and I O Aznaurian. (2021). Evaluation of electromagnetic radiation shielding characteristics of facing building materials. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, Volume 1164, 8th International Scientific Conference 'Actual Problems of Engineering Mechanics' (APEM 2021) 11th-14th May 2021, Odesa, Ukraine. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/1164/1/012057>.
2. Viacheslav Barsukov, Ilona Senyk, Olena Kryukova, Oksana Butenko (2018). Composite Carbon-Polymer Materials for Electromagnetic Radiation. *Shielding Materials Today: Proceedings*, V. 5, No 8, Part 1, pp. 15909-15914.
3. Butenko, O., Boychuk, V., Savchenko, B., Kotsyubynsky V., Khomenko, V., Barsukov, V. (2019). Pure ultrafine magnetite from carbon steel wastes. *Materials Today: Proceedings*, v. 6, pp. 270–278.
4. Senyk, I., Kuryptia, Y., Barsukov, V., Butenko, O., Khomenko, V. (2020). Development and application of thin wide-band screening composite materials. *Physics and Chemistry of Solid State*, 21(4), pp. 771–778.
5. Tudose Ioan Valentin, Mouratis Kyriakos, Ionescu Octavian Narcis, Romanitan Cosmin, Pachiou, Cristina, Popescu Marian, Khomenko Volodymyr, Butenko Oksana, Chernysh Oksana, Kenanakis George, Barsukov Viacheslav Z., Suche Mirela Petruta, Koudoumas Emmanouel, (2022) Novel Water-Based Paints for Composite Materials Used in Electromagnetic Shielding Applications, *Nanomaterials*, 12(3), 487.
6. Glyva V.A., Podoltsev A.D., Bolibrukh B.V., Radionov A.V. (2018) A Thin Electromagnetic Shield of a Composite Structure Made On the Basis of a Magnetic Fluid. *Tekhnichna elektrodynamika*. № 4. P. 14–18. <https://doi.org/10.15407/techned2018.04.014>.
7. Тихенко О. М., Багрій М. М., Левченко Л. О., Ходаковський О. В., Резнік Д. В. (2019). Розроблення та дослідження захисних властивостей металотекстильних електромагнітних екранів. *Вісті Донецького гірничого інституту, Покровськ*. Вип. № 1(44). С. 100–106.
8. Glyva V., Barabash O., Kasatkina N., Katsman M., Levchenko L., Tykhenko O., Nikolaiev K., Panova O., Khalmuradov B., Khodakovskyy O. (2020). Studying the shielding of an electromagnetic field by a textile material containing ferromagnetic nanostructures. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. Iss. 1/10 (103). PP. 26–31.
9. Glyva V., Lyashok J., Matvieieva I., Frolov V., Levchenko L., Tykhenko O., Panova O., Khodakovskyy O., Khalmuradov B., Nikolaiev K. (2018). Development and investigation of protective properties of the electromagnetic and soundproofing screen. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. Iss. 6/5 (96). P. 54–61.
10. Glyva V., Kasatkina N., Nazarenko V., Burdeina N., Karaieva N., Levchenko L., Panova O., Tykhenko O., Khalmuradov B., Khodakovskyy O. (2020). Development and research of protective properties of composite materials for screening electromagnetic fields of a wide frequency range. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. Iss. 2/12 (104). PP. 40–47.
11. Kochetov, G., Prikhna, T., Samchenko, D., Prysiazhna, O., Monastyrov, M., Mosshchil, V., Mamalis, A. (2021). Resource-efficient ferritization treatment for concentrated wastewater from electroplating production with aftertreatment by nanosorbents. *Nanotechnology Perceptions*, 17 (1), 9-18. <https://doi.org/10.4024/N22KO20A.ntp.17.01>.
12. Kochetov, G., Kovalchuk, O., & Samchenko, D. (2020). Development of technology of utilization of products of ferritization processing of galvanic waste in the composition of alkaline cements. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 5(10 (107), 6–13. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2020.215129>.
13. Glyva V., Levchenko L., Panova O., Tykhenko O., Radomska M. (2020). The composite facing material for electromagnetic fields shielding. *Innovative Technology in Architecture and Design (ITAD 2020): IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. Vol. 907. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/907/1/012043>.

14. Касаткіна Н. В., Тихенко О. М., Панова О. В., Бірук Я. І. (2020). Підвищення ефективності композиційних електромагнітних екранів регулюванням морфології ферромагнітного наповнювача. Збірник наукових праць «Системи управління навігації та зв'язку», – 2020. Вип. № 3(61), С. 115–119. <https://doi.org/10.26906/SUNZ.2020.3.115>.
15. Спосіб виготовлення електромагнітного екрана з градієнтом електрофізичних властивостей. Патент 149126, Україна МПК 2021.01. G12B 17/00, G12B 17/02 (2006.01). Винахідники: Бурдейна Н.Б., Бірук Я.І., Колумбет В.П., Левченко Л.О., Панова О.В., Ходаковський О.В. Власник: Бурдейна Н.Б., Бірук Я.І., Колумбет В.П., Левченко Л.О., Панова О.В., Ходаковський О.В.; № у 2021 02561; заявл. 17.05.2021; опубл. 20.10.2021, Бюл. № 42.

Стаття надійшла до редакції 06.12.2022 і прийнята до друку після рецензування 15.03.2023

REFERENCES

1. Panova, O. V., Krasnianskyi, G. I., & Aznaurian, I. O. (2021). Evaluation of electromagnetic radiation shielding characteristics of facing building materials. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 1164(1), 012057. <https://doi.org/10.1088/1757-899x/1164/1/012057>.
2. Barsukov, V., Senyk, I., Kryukova, O., & Butenko, O. (2018). Composite Carbon-Polymer Materials for Electromagnetic Radiation. *Shielding Materials Today: Proceedings*, 5(8), part 1, 15909–15914.
3. Butenko, O., Boychuk, V., Savchenko, B., Kotsyubynsky, V., Khomenko, V., & Barsukov, V. (2019). Pure ultrafine magnetite from carbon steel wastes. *Materials Today: Proceedings*, 6, 270–278.
4. Senyk, I., Kuryptia, Y., Barsukov, V., Butenko, O., & Khomenko, V. (2020). Development and application of thin wide-band screening composite materials. *Physics and Chemistry of Solid State*, 21(4), 771–778.
5. Tudose, I. V., Mouratis, K., Ionescu, O. N., Romanitan, C., Pachi, C., Popescu, M., Khomenko, V., Butenko, O., Chernysh, O., Kenanakis, G., Barsukov, V. Z., Suche, M. P., & Koudoumas, E. (2022). Novel water-based paints for composite materials used in electromagnetic shielding applications. *Nanomaterials*, 12(3), 487. <https://doi.org/10.3390/nano12030487>.
6. Glyva, V. A., Podoltsev, A. D., Bolibruxh, B. V., & Radionov, A. V. (2018). A Thin Electromagnetic Shield of a Composite Structure Made On the Basis of a Magnetic Fluid. *Tekhnichna elektrodynamika*, 4, 14–18. <https://doi.org/10.15407/techned2018.04.014>.
7. Tyhenko, O. M., Bagriy, M. M., Levchenko, L. O., Khodakovskiy, O. V., & Reznik, D. V. (2019). Development and research of protective properties of metal-textile electromagnetic screens. *News of the Donetsk Mining Institute, Pokrovsk*, 1(44), 100–106.
8. Glyva, V., Barabash, O., Kasatkina, N., Katsman, M., Levchenko, L., Tykhenko, O., Nikolaiev, K., Panova, O., Khalmuradov, B., & Khodakovskyy, O. (2020). Studying the shielding of an electromagnetic field by a textile material containing ferromagnetic nanostructures. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 1/10(103), 26–31.
9. Glyva, V., Lyashok, J., Matvieieva, I., Frolov, V., Levchenko, L., Tykhenko, O., Panova, O., Khodakovskyy, O., Khalmuradov, B., & Nikolaiev, K. (2018). Development and investigation of protective properties of the electromagnetic and soundproofing screen. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 6/5(96), 54–61.
10. Glyva, V., Kasatkina, N., Nazarenko, V., Burdeina, N., Karaieva, N., Levchenko, L., Panova, O., Tykhenko, O., Khalmuradov, B., & Khodakovskyy, O. (2020). Development and research of protective properties of composite materials for screening electromagnetic fields of a wide frequency range. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 2/12(104), 40–47.

11. Kochetov, G., Prikhna, T., Samchenko, D., Prysiashna, O., Monastyrov, M., Mosshchil, V., & Mamalis, A. (2021). Resource-efficient ferritization treatment for concentrated wastewater from electroplating production with aftertreatment by nanosorbents. *Nanotechnology Perceptions*, 17(1) 9-18. <https://doi.org/10.4024/N22KO20A.ntp.17.01>.
12. Kochetov, G., Kovalchuk, O., & Samchenko, D. (2020). Development of technology of utilization of products of ferritization processing of galvanic waste in the composition of alkaline cements. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 5(10 (107)), 6–13. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2020.215129>.
13. Glyva, V. A., Levchenko, L. O., Panova, O. V., Tykhenko, O. M., & Radomska, M. M. (2020). The composite facing material for electromagnetic fields shielding. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 907(1), 012043. <https://doi.org/10.1088/1757-899x/907/1/012043>.
14. Kasatkina, N. V., Tykhenko, O. M., Panova, O. V., & Biruk, Y. I. (2020). Increasing the efficiency of composite electromagnetic screens by adjusting the morphology of the ferromagnetic filler. *Collection of scientific works "Navigation and communication management systems"*, 3(61), 115–119. <https://doi.org/10.26906/SUNZ.2020.3.115>.
15. Bourdeina, N. B., Biruk, Y. I., Kolumbet, V. P., Levchenko, L. O., Panova, O. V., & Khodakovskiy, O. V. (20.10.2021). The method of manufacturing an electromagnetic screen with a gradient of electrophysical properties. Patent 149126, Ukraine IPC 2021.01. G12B 17/00, G12B 17/02 (2006.01).

The article was received 06.12.2022 and was accepted after revision 15.03.2023

Ткаченко Тетяна Миколаївна

доктор технічних наук, професор, завідувачка кафедри технологій захисту навколишнього середовища та охорони праці Київського національного університету будівництва і архітектури

Адреса робоча: пр. Повітрофлотський, 31, м. Київ, Україна, 03037

ORCID: 0000-0003-2105-5951 **e-mail:** tkachenkoknuba@gmail.com

Льчук Оксана Степанівна

кандидат технічних наук, старший викладач кафедри охорони праці, промислової та цивільної безпеки Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

Адреса робоча: вул. Борщагівська 115/3, к. 22, м. Київ, Україна, 03056

ORCID: 0000-0001-6352-5320 **e-mail:** oksanailchukkpi@gmail.com

Землянська Олена Василівна

старший викладач кафедри охорони праці, промислової та цивільної безпеки Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

Адреса робоча: вул. Борщагівська 115/3, к. 22, м. Київ, Україна, 03056

ORCID: 0000-0002-9608-3677 **e-mail:** olenazemlyanska@gmail.com