

В. М. Гусев¹, С. В. Зозуля², Р. М. Левківський¹

¹ Херсонська державна морська академія, Херсон, Україна;

² ДУ «Київський Авіаційний Інститут», Київ, Україна

ЗАСОБИ ПІДВИЩЕННЯ ЕНЕРГОЕФЕКТИВНОСТІ ТА ЗАХИСТУ ВІД ВПЛИВУ ФІЗИЧНИХ ПОЛІВ У ПРОЦЕСІ ВІДНОВЛЕННЯ БУДІВЕЛЬ

Анотація. Досліджено можливості створення композиційного матеріалу для одночасного блокування інфрачервоного випромінювання та екранування електромагнітних та акустичних полів широких частотних діапазонів. Модельний матеріал зроблено на основі латексу (матриці) та дрібнодисперсних наповнювачів з базальту та лускатого графіту. Базальтова компонента містить феромагнетики у кількості 18–20 %, що забезпечує екранування магнітної складової електромагнітного поля. Наведено розрахунковий апарат, який дозволяє попередньо визначити магнітні та електрофізичні показники композиції та оцінити термічний опір. Експериментально встановлено, що для блокування інфрачервоного випромінювання доцільно застосовувати матеріал завтовшки 10 мм. За такої товщини його термічний опір наближається до опору мінеральної вати товщиною 50 мм. Показано, що за товщини матеріалу від 4 мм спостерігається різке підвищення коефіцієнта екранування магнітної складової електромагнітного поля промислової частоти. Підвищення коефіцієнта екранування електромагнітного поля частотою 2,45 ГГц зі збільшенням товщини матеріалу відбувається більш монотонно. За товщини, більшої за 4 мм ефективність екранування достатня для будь-якої інтенсивності зовнішнього поля. Досліджено індекси зниження шуму у октавних смугах частот. Для низьких частот звукового спектра вони складають 4–20 дБ, для середніх і високих частот – 34–46 дБ. Цей результат наближається до ефективності пористих шумозахисних матеріалів. Для розроблення промислової технології вироблення захисного композиційного матеріалу із забезпеченням досягнутих показників у якості матриці необхідно обрати матеріал з відносною діелектричною проникністю 34–40, яка відповідає діелектричним проникностям латексів.

Ключові слова: інфрачервоне випромінювання, електромагнітне поле, акустичний шум, екранування.

Вступ

Внаслідок бойових дій та терористичних атак значна кількість будівель і споруд в Україні зазнала ушкоджень та потребує відновлення. Частина таких будівель має великі терміни експлуатації та споруджувалася без урахування сучасних вимог до енергозбереження, захисту від впливу шуму, електромагнітних полів техногенного походження тощо. Тому, у разі економічної доцільності відбудови таких об'єктів або коли вони є об'єктами історичної спадщини доцільно забезпечити у процесі їх відновлення високу енергоефективність та захист від впливу фізичних полів. На сьогодні існує багато матеріалів і виробів, призначених для термоізоляції об'єктів, шумопоглинання, екранування електромагнітних полів широкого частотного діапазону. Але забезпечення захисту від окремих впливів та блокування інфрачервоного випромінювання призводить до збільшення масогабаритних параметрів облицювання будівлі й може мати високу вартість. Тому доцільним є дослідження можливості застосування для цілей підвищення енергоефективності реконструйованої будівлі та захисту внутрішнього середовища, принаймні від шуму та електромагнітних полів й випромінювань одним універсальним матеріалом.

Огляд літературних джерел. Сучасною тенденцією у галузі підвищення енергоефективності будівель і споруд є застосування фазозмінних матеріалів, які спроможні циклічно накопичувати та віддавати теплову енергію [1, 2]. Головним наслідком такого підходу є доцільність застосування у новому будівництві. Це обумовлене необхідністю закладення таких конструкцій у проєктні рішення. Значна частина досліджень спрямована на розроблення матеріалів малої товщини для цілей інфрачервоного камуфляжу

[3, 4]. Такі матеріали мають дуже високу ефективність, але й велику вартість. Через це вони неприйнятні у цивільному будівництві. Стандартні теплоізолюючі матеріали на основі мінеральної вати мають велику товщину. Це ускладнює їх застосування для облицювання поверхонь будівель старої забудови. У оглядовій роботі [5] показано, що можливо забезпечити зберігання тепла більш тонкими матеріалами, зокрема на основі базальтових волокон. На сьогодні базальтові волокна, сітки, арматура розглядаються як перспективні складові будівельних матеріалів. У дослідженні [6] показано, що застосування регулярних базальтових структур сприяє екрануванню електромагнітних полів та збереженню тепла. У роботах [7, 8] здійснене моделювання теплопереносу крізь шарувату структуру, головною компонентою якої є базальтова тканина. Дослідження [9] надає огляд усіх композицій для екранування електромагнітних полів на основі базальтових волокон. Наведені у роботі провідні компоненти, які додаються до базальту, мають високу вартість, тому доцільно дослідити можливість забезпечення достатніх коефіцієнтів екранування електромагнітних полів іншими композиціями на основі базальту, які містять більш дешеві наповнювачі, лускатий графіт, терморозширений графіт тощо.

Мета роботи – розроблення й дослідження захисних властивостей матеріалу для блокування інфрачервоного випромінювання та екранування акустичних і електромагнітних полів.

Викладення основного матеріалу

На сьогодні вироби з базальтових волокон широко застосовуються для вироблення утеплювачів будівель. Вони мають товщини 50 мм та 100 мм, що не завжди зручно для облицювання поверхонь

складних форм. Доцільно розглянути можливість використання базальту у вигляді частинок різної дисперсності. Це пояснюється низькою теплопровідністю базальту, 1,3–1,5 Вт/мК, порівняно з іншими магматичними матеріалами. При цьому в Україні існує родовище базальту з великим вмістом сполук заліза (18–20 %), що обумовлює його магнітні властивості. Це спрощує застосування такого базальту для екранування електромагнітних полів. Для виготовлення зразків використовувався базальт з розмірами частинок 50–100 мкм. Для забезпечення екранування електромагнітного поля використовувався лускатий графіт з розмірами луски до 10 мкм. Для виготовлення модельних зразків використовувався рідкий латекс, який слугував матрицею.

Вимірювання теплоізолюючих властивостей матеріалів здійснювалося з використанням тепловізора UNI-T UTi120S. Вимірювання коефіцієнтів екранування магнітного поля промислової частоти здійснювалося вимірювачем напруженості електричного та магнітного поля ПЗ-50, коефіцієнтів екранування електромагнітного поля ультрависокої частоти – ПЗ-31. Індекси зниження шуму визначалися за допомогою стаціонарної апаратури Брюль і К'єр у ревербераційній камері.

Оцінка теплоізолюючих властивостей матеріалу визначалася зі співвідношень:

$$Q = -\lambda \frac{dT}{dx} = \frac{\lambda}{d}(T_1 - T_2),$$

де Q – кількість тепла, x – напрямок розповсюдження тепла, λ – коефіцієнт теплопровідності матеріалу, d – товщина матеріалу, T_1 , T_2 – температури зовнішньої та внутрішньої поверхонь матеріалу. При цьому:

$$Q = \frac{1}{R}(T_1 - T_2),$$

де R – тепловий опір матеріалу.

Попередню оцінку ефективності екранування можна здійснити, розрахувавши електрофізичні властивості композиції за співвідношеннями Лорентца та Максвелла-Гарнета:

$$\mu = 1 + \frac{v_m(\mu_m - 1)}{1 + \frac{1 - v_m}{3}(\mu_m - 1)},$$

де μ – ефективна магнітна проникність магнітодіелектрика, μ_m – магнітна проникність наповнювача, v_m – об'ємний вміст наповнювача у матеріалі.

$$\frac{\varepsilon - \varepsilon_d}{\varepsilon + 2\varepsilon_d} = v_m \frac{\varepsilon_m - \varepsilon_d}{\varepsilon_m + 2\varepsilon_d},$$

де ε_d , ε_m – діелектричні проникності матриці та наповнювача, v_m – об'ємна доля наповнювача у діелектричній матриці.

$$\varepsilon = \varepsilon' + i\varepsilon'' = \varepsilon' + 4\pi\sigma/\omega,$$

де ε' , ε'' – дійсна та уявна складові комплексної діелектричної проникності матеріалу, σ – питома провідність матеріалу, ω – колова частота електромагнітного поля.

Еквівалентна глибина проникнення поля у матеріал δ визначається як:

$$\delta = \sqrt{2/(\omega\mu_a\sigma)},$$

де μ_a – абсолютна магнітна проникність матеріалу ($\mu_a = \mu_0\mu$).

Слід враховувати, що така оцінка має велику похибку й може слугувати тільки для приблизної оцінки потрібного вмісту наповнювача у матриці.

Попереднє оцінювання поглинання шуму суцільним матеріалом недоцільне через вкрай високу залежність індексів зниження шуму від його частоти.

Дослідні зразки містили 20 % базальту (масових) та 3 % лускатого графіту.

Питома теплопровідність матеріалу не у певному обсязі характеризує термоізолюючі властивості у реальних умовах використання.

Ефективність захисту залежить від товщини матеріалу та теплообміну його поверхонь з оточуючим середовищем. Тому досліджувалася залежність теплового опору матеріалу від його товщини у стандартних умовах (рис. 1).

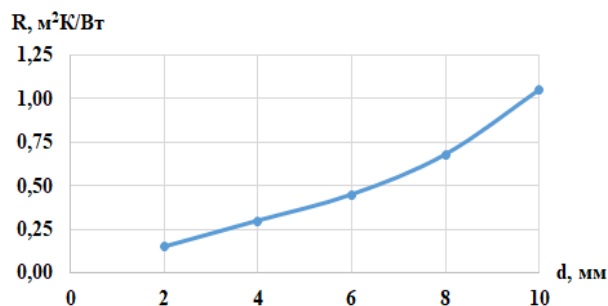


Рис. 1. Залежність теплового опору композиційного матеріалу від товщини

Отриманий результат свідчить, що матеріали малої товщини недостатньо ефективні. Але за товщини 10 мм тепловий опір наближається до опору мінеральної вати завтовшки 50 мм.

Згідно ДБН В.2.6-31:2021 «Теплова ізоляція» тепловий опір стін у температурній зоні I повинен бути 3,3 м²К/Вт, а у зоні II – 2,8 м²К/Вт. Але крім облицювання, тепловий опір забезпечують й будівельні конструкції. Тому значення 1,1–1,2 м²К/Вт для облицювального матеріалу завтовшки 10 мм можна вважати задовільним.

Проблематика забезпечення електромагнітної безпеки має дві складові – захист від електричних і магнітних складових електромагнітного поля промислової частоти та екранування електромагнітних полів ультрависоких і вищих частот. Останнє актуальне через поступове впровадження мобільного зв'язку 5G. Електрична складова електромагнітного поля промислової частоти екрануються досить просто будь-яким електропровідним матеріалом навіть малої електропровідності. Магнітна складова екранується матеріалами, які мають магнітні властивості. Було досліджено ефективність екранування магнітного поля промислової частоти розробленими матеріалами (рис. 2).

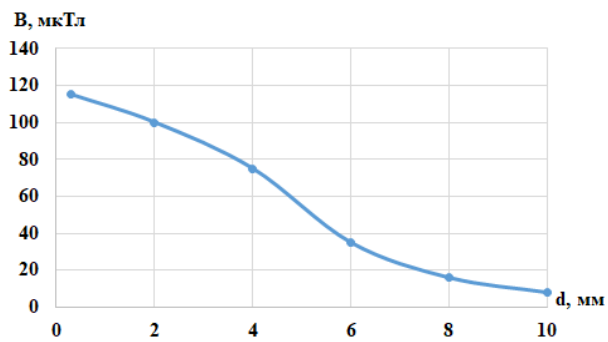


Рис. 2. Залежність індукції магнітного поля промислової частоти від товщини захисного композиційного матеріалу

Враховуючи, що джерелом магнітного поля був силовий трансформатор найбільш поширеного типу, ступінь екранування магнітного поля є прийнятним. Це випливає з того, що згідно з тимчасовими нормативами [10], індукція магнітного поля промислової частоти у житлових приміщеннях не повинна перевищувати 0,5 мкТл, на території житлової забудови – 10 мкТл. Аналогічні випробування були проведені

щодо електромагнітного поля ультрависокої частоти. Джерелом поля був магнетрон мікрохвильової печі. Частота – 2,45 ГГц (рис. 3).

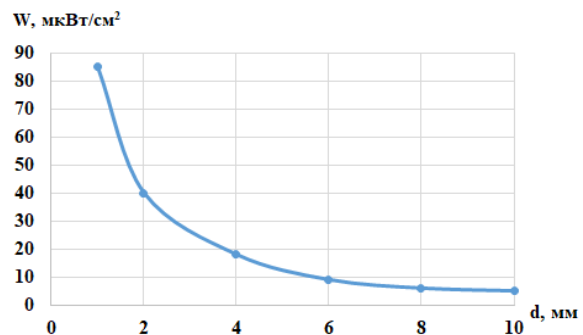


Рис. 3. Залежність щільності потоку енергії від товщини захисного композиційного матеріалу

Враховуючи, що прийнятий тепловий опір має матеріал завтовшки 10 мм, визначення індексів зниження шуму було проведено саме для такого матеріалу (табл. 1).

Таблиця 1 – Зниження шуму композиційним захисним матеріалом

Октавні смуги частот, Гц	Індекси зниження шуму, дБ									
	31,5	63	125	250	500	1K	2K	4K	8K	16K
Пінолатекс 10 мм	8	26	27	28	37	44	41	43	44	32

Індекс зниження шуму у низькочастотній області звукового спектра очікувано невеликий, що пов'язане з низьким згасанням низькочастотних коливань у будь-якому середовищі. Але захисні властивості щодо звуку середніх та високих частот задовільні. Цей результат практично збігається з наведеним у [11], де суттєве зниження рівнів шуму забезпечувалося неоднорідними матеріалами на основі пінолатексу та пінополістиролу, які не придатні для зовнішніх облицювань будівель. У процесі проектування захисту від впливу розглянутих фізичних чинників слід враховувати реальні потреби у термоізоляції конкретної будівлі та амплітудно-частотні характеристики шуму та електромагнітних полів за межами будівлі. Це дозволить обрати пріоритети щодо зниження впливу кожного чинника на стан внутрішнього середовища будівлі. Наприклад, згідно вимог міжнародного стандарту MPR II з безпечної експлуатації комп'ютерної техніки рівні магнітних полів у частотній смузі 5 Гц – 2 кГц не повинні перевищувати 250 нТл, а у смузі 2 кГц – 400 кГц – 20 нТл. Тому для приміщень і будівель з великою кількістю комп'ютеризованих робочих місць пріоритетом є зниження рівнів магнітних полів. Розроблений матеріал є модельним. Обрання латексу у якості матриці композиції обумовлене зручністю виготовлення зразків. У процесі розроблення промислової технології для прийнятного збігу показників з показниками дослідних матеріалів слід обрати матеріал матриці з відносною діелектричною проникністю 30–40, яка відповідає діелектричній проникності латексів.

Висновки

1. Розроблено композиційний матеріал для одночасного блокування інфрачервоного випромінювання, екранування електромагнітних та акустичних полів. Такий матеріал призначений для нормалізації рівнів фізичних чинників усередині будівель у процесі їх відновлення та реконструкції. Мала товщина покриття, до 10 мм, дозволяє облицювати поверхні складних конфігурацій без змін зовнішнього вигляду будівель.

2. Визначено залежності теплового опору матеріалу від його товщини. Встановлено, що за товщини 10 мм тепловий опір матеріалу наближається до опору пористої мінеральної вати завтовшки 50 мм. Досліджено залежність ступенів екранування магнітних полів промислової частоти й електромагнітних полів ультрависокої частоти від товщини матеріалу. Встановлено, що товщини матеріалу більше 4 мм відбувається значне підвищення коефіцієнта екранування магнітного поля промислової частоти й електромагнітного поля ультрависокої частоти.

3. Досліджено індекси зниження шуму у октавних смугах частот матеріалом завтовшки 10 мм. Встановлено, що у низькочастотній області звукового спектра індекси зниження шуму складають 4–20 дБ, а для середніх і високих частот – 34–46 дБ. Отримані індекси наближаються до індексів зниження шуму пористих матеріалів непридатних для облицювання зовнішніх поверхонь будівель.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Yahya Sheikh, Mohammad O. Hamdan, Said Sakhi, A review on micro-encapsulated phase change materials (EPCM) used for thermal management and energy storage systems: Fundamentals, materials, synthesis and applications, Journal of Energy Storage, V. 72, Part C, 2023, 108472, <https://doi.org/10.1016/j.est.2023.108472>.

2. Łach Ł., Svyetlichnyy D. 3D Model of Heat Flow during Diffusional Phase Transformations. *Materials*. 2023; 16(13):4865. <https://doi.org/10.3390/ma16134865>
3. Ho Kun Woo, Kai Zhou, Su-Kyung Kim, Adrian Manjarrez, Muhammad Jahidul Hoque, Tae-Yeon Seong, Lili Cai (2022). Visibly Transparent and Infrared Reflective Coatings for Personal Thermal Management and Thermal Camouflage. *Advanced Functional Materials*. V. 32, (38). <https://doi.org/10.1002/adfm.202201432>
4. Jeong, SM., Ahn, J., Choi, Y.K. et al. Development of a wearable infrared shield based on a polyurethane–antimony tin oxide composite fiber. *NPG Asia Mater* 12, 32 (2020). <https://doi.org/10.1038/s41427-020-0213-z>
5. Qudama Al-Yasiri, Márta Szabó. Incorporation of phase change materials into building envelope for thermal comfort and energy saving: A comprehensive analysis. *Journal of Building Engineering*, Volume 36, 2021, 102122, <https://doi.org/10.1016/j.jobbe.2020.102122>
6. Burdeina, N., Levchenko, L., Korduba, I., Shamanskyi, S., Biruk, Y., M., Zozulya, S., Klymchuk, A., Nikolaiev, K., & Osadchyi, D. (2024). Applying heterogeneous building materials for the protection of people against electromagnetic radiation. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 5(10 (131), 45–52. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2024.313629>
7. V. Glyva, N. Burdeina, L. Levchenko, G. Krasnianskyi, Y. Biruk, M. Dovhanovsky. (2024). Modelling the thermal resistance of layered structures for blocking infrared radiation. *Strength of Materials and Theory of Structures*, (113), pp. 329–336, DOI: <https://doi.org/10.32347/2410-2547.2024.113.329-336>
8. Levchenko, L., Bolibrukh, B., Kovalenko, O., Myshchenko, I., & Asieieva, L. (2025). MODELING OF INFRARED RADIATION PROPAGATION THROUGH THERMAL INSULATION SURFACES. *Advanced Information Systems*, 9(1), 43–48. <https://doi.org/10.20998/2522-9052.2025.1.05>
9. Sule Selcuk, Ubey Ahmetoglu, Emine Canbay Gokce. Basalt Fiber Reinforced Polymer Composites (BFRP) other than rebars: A review. *Materials Today Communications*. Volume 37, 2023, 107359, <https://doi.org/10.1016/j.mtcomm.2023.107359>
10. СОУ-Н ЕЕ 20.179:2008 Розрахунок електричного і магнітного полів ліній електропередавання. Методика. Зі змінами. Київ. Науково-технічний центр електроенергетики «НЕК «Укренерго», 2016
11. V. Glyva, O. Zaporozhets, L. Levchenko, N. Burdeina, V. Nazarenko. Methodological Foundations Protective Structures Development For Shielding Electromagnetic And Acoustic Fields. *Strength of Materials and Theory of Structures*. 2023. Issue No. 110. PP. 245-255. <https://doi.org/10.32347/2410-2547.2023.110.245-255>

Received (Надійшла) 27.05.2025

Accepted for publication (Прийнята до друку) 13.08.2025

ВІДОМОСТІ ПРО АВТОРІВ / ABOUT THE AUTHORS

Гусєв Віктор Миколайович – кандидат технічних наук, професор, професор кафедри безпеки життєдіяльності та професійно-прикладної фізичної підготовки, Херсонська державна морська академія, Херсон, Україна;

Viktor Gusev – Candidate of Engineering Sciences, Professor, Professor Department of Health and Safety, Professional and Applied Physical Training, Kherson State Maritime Academy, Kherson, Ukraine;

e-mail: v.n.gusev73@gmail.com, ORCID Author ID: <https://orcid.org/0000-0001-7775-2276>;

Scopus Author ID: <https://www.scopus.com/authid/detail.uri?authorId=57207470263>.

Зозуля Сергій Васильович – кандидат технічних наук, доцент, декан факультету екологічної безпеки, інженерії та технології, ДУ «Київський авіаційний інститут», Київ, Україна;

Serhii Zozulya – Candidate of Engineering Sciences, Associate Professor, Dean of the Faculty of Environmental Safety, Engineering and Technology, State Institution "Kyiv Aviation Institute", Kyiv, Ukraine;

e-mail: SERGEYZOZ@ukr.net, ORCID Author ID: <https://orcid.org/0000-0002-1192-8088>;

Scopus Author ID: <https://www.scopus.com/authid/detail.uri?authorId=57479434000>.

Руслан Миколайович Левківський – кандидат технічних наук, старший викладач кафедри судноводіння, Херсонська державна морська академія, Херсон, Україна;

Ruslan Levkivskyi – Candidate of Engineering Sciences, senior teacher Department of Navigation, Kherson State Maritime Academy, Kherson, Ukraine;

e-mail: levka.ru55555@gmail.com, ORCID Author ID: <https://orcid.org/0000-0003-3114-179X>;

Scopus Author ID: <https://www.scopus.com/authid/detail.uri?authorId=55918403200>.

**Means of improving energy efficiency and protection
from the effects of physical fields in the process of building restoration**

Viktor Gusev, Serhii Zozulya, Ruslan Levkivskyi

Abstract. The possibilities of creating a composite material for simultaneous blocking of infrared radiation and shielding of electromagnetic and acoustic fields of wide frequency ranges have been investigated. The model material is made on the basis of latex (matrix) and finely dispersed fillers of basalt and flaky graphite. The basalt component contains 18–20 % ferromagnets, which provides shielding of the magnetic component of the electromagnetic field. A calculation tool is provided that allows preliminary determination of the magnetic and electrophysical properties of the composition and assessment of thermal resistance. It has been experimentally established that a material with a thickness of 10 mm is suitable for blocking infrared radiation. At this thickness, its thermal resistance is close to that of mineral wool with a thickness of 50 mm. It has been shown that with a material thickness of 4 mm, there is a sharp increase in the shielding coefficient of the magnetic component of the industrial frequency electromagnetic field. The increase in the shielding coefficient of the 2.45 GHz electromagnetic field with increasing material thickness is more monotonous. At thicknesses greater than 4 mm, the shielding efficiency is sufficient for any external field intensity. Noise reduction indices in octave frequency bands were investigated. For low frequencies of the sound spectrum, they are 4–20 dB, for medium and high frequencies – 34–46 dB. This result is close to the efficiency of porous noise-reducing materials. To develop industrial technology for the production of protective composite material with the achieved quality indicators, it is necessary to select a material with a relative dielectric permeability of 34–40, which corresponds to the dielectric permeabilities of latexes.

Keywords: infrared radiation, electromagnetic field, acoustic noise, shielding.