

Н.Б. Бурдейна  
В.А. Глива  
Я.І. Бірук  
Т.Б. Петруньок  
І.О. Азнаурян

## ЗАСАДИ ЗАСТОСУВАННЯ НАДТОНКИХ ПОКРИТТІВ ДЛЯ ЕКРАНУВАННЯ ЕЛЕКТРОМАГНІТНИХ ВИПРОМІНЮВАНЬ ТЕХНОГЕННОГО ПОХОДЖЕННЯ

**Мета.** Розробити засади застосування надтонких металізованих покриттів для екранування електромагнітних випромінювань техногенного походження.

**Методика.** Теоретичне обґрунтування отримання надтонких металевих покриттів для оптимального екранування електромагнітних полів ультрависоких і вищих частот. Емпіричне підтвердження того, що напилення тонкого металевого шару на скло забезпечує захист від впливу електромагнітних випромінювань і не знижує суттєво проникнення денного світла.

**Результати.** Встановлено, що коефіцієнт відбиття для покриттів товщиною до 10 нм може забезпечити коефіцієнти відбиття електромагнітних хвиль до 25 дБ. Надано розрахункові співвідношення для визначення провідності металеві плівки, яка суттєво відрізняється від об'ємної електропровідності і визначає значення коефіцієнта екранування. Надані залежності коефіцієнтів відбиття напилення у поширених металах від товщини плівки. Встановлено ефект досягнення максимуму коефіцієнта відбиття за певної товщини плівки. Розрахунково показано, що відбувається за товщини плівки, яка дорівнює товщині скін-шару для даної частоти випромінювання. Це надає можливість оптимізувати товщину металевих напилення як з точки зору електромагнітної безпеки, так і виходячи з потреб освітлення.

**Новизна.** На основі розрахунків встановлено, що стабільне значення коефіцієнта відбиття електромагнітних хвиль досягається на визначеній частоті електромагнітного поля за умови, коли товщина плівки досягає товщини скін-шару у металі.

**Практична значимість.** Встановлено, що у діапазонах ультрависоких і надвисокої частот коефіцієнт відбиття електромагнітних хвиль для фіксованої товщини плівки практично не залежить від частоти випромінювання. Для підвищення ефективності екранування скла з металевим напиленням металізований шар бажано заземлити.

**Ключові слова:** електромагнітне випромінювання, екранування, напилення, коефіцієнт відбиття

### Вступ.

Найбільш ефективним засобом захисту від електромагнітних полів і випромінювань є екранування. На сьогодні це є окрема частина галузі електромагнітної безпеки. Різноманітність екрануючих матеріалів та методик їх застосування обумовлена різними фізичними механізмами екранування низькочастотних електромагнітних полів та високочастотних випромінювань. При цьому у багатьох випадках відрізняються задачі екранування, наприклад, необхідність максимального поглинання електромагнітної енергії з мінімізацією відбиття електромагнітних хвиль. Існують задачі, коли достатньо високого коефіцієнта відбиття. Розроблено і впроваджено велику кількість композиційних екрануючих матеріалів. При цьому більшість з них має досить велику товщину, від 1 мм. Такі композиції

здебільшого є продуктом нанотехнологій, що призводить до їх вкрай високої вартості. Тому доцільно розглянути можливості отримання тонких захисних покриттів за простими технологіями виготовлення, що мають прийнятну вартість виробництва.

### Аналіз останніх досліджень і публікацій.

Застосування екрануючих матеріалів і конструкцій регламентовано міжнародними та національними нормативними актами, зокрема директивою [1]. Більшість уваги приділяється розробленню та дослідженню захисних властивостей композиційних матеріалів [2, 3]. Перевагою композитів є можливість керування їх захисними властивостями за рахунок складу, товщини тощо. Для забезпечення захисту у широкому діапазоні частот такі матеріали повинні мати магнітні та провідні компоненти і товщину, більшу за еквівалентну глибину

проникнення електромагнітного поля. Тонкі покриття з прийнятною частотною смугою ефективності мають зовсім велику вартість через наявність наноструктур і кількох компонентів [4, 5]. Навіть однокомпонентний наноматеріал на основі магнітних рідин має високу вартість і недостатню ефективність [6]. Перевагою композитів є можливість мінімізації відбиття електромагнітних хвиль, що надає змогу уникнути підвищення електромагнітного фону внаслідок перевідбиття [7], що можна добре передбачити розрахунковими методами [8]. Сучасний стан розвитку мобільного зв'язку характеризується підвищенням робочих частот і переходом на стандарт 5G. Внаслідок цього підвищуються гранично допустимі рівні електромагнітних випромінювань. Це обумовлено високими згасаннями у просторі високочастотних випромінювань. Сучасні облицювальні матеріали надійно екранують будівлі цивільного призначення [9]. Але значна кількість випромінювань може потрапляти у будівлю крізь віконні прорізи. При цьому їх площа відносно загальної площі поверхні будівлі невелика. Тому високі відбиття поверхнями вікон електромагнітних випромінювань технологічного походження не впливають на зміни електромагнітної обстановки у навколишньому просторі. На сьогодні багато уваги приділяється проблематиці енергоефективності будівель. Частково це досягається напиленням на склопакети покриттів для блокування інфрачервоних випромінювань. Тому доцільно дослідити можливості зниження рівнів електромагнітних випромінювань радіочастот за рахунок металевих напилень.

#### **Мета статті (постановка завдання).**

Розроблення засад застосування надтонких металізованих покриттів для екранування електромагнітних випромінювань техногенного походження.

#### **Методи дослідження.**

Теоретичне обґрунтування отримання надтонких металевих покриттів для оптимального екранування електромагнітних полів ультрависоких і вищих частот. Емпіричне підтвердження того, що напилення тонкого металевого шару на скло забезпечує захист від впливу

електромагнітних випромінювань і не знижує суттєво проникнення денного світла.

#### **Виклад основного матеріалу.**

Процес металізації діелектричних поверхонь, зокрема скла, добре розроблений. Для віконного скла завжди існує необхідність пошуку компромісного рішення – забезпечення оптичної прозорості та екранування електромагнітного випромінювання радіочастот або інфрачервоного спектру. Підвищення товщини металевієї плівки призводить до збільшення коефіцієнта екранування електромагнітного випромінювання, але знижує прозорість скла. Найбільш ефективними металами для напилення на поверхні скла є мідь, срібло, золото через високі значення питомої провідності. Слід враховувати, що на оптичні властивості скла крім напиленого металевого шару впливають власне поглинання скла та границя розділу скло-метал.

Захисні властивості металізованих скляних поверхонь обумовлені загальними закономірностями розсіювання електромагнітних хвиль:

$$T + A + R = 1,$$

де  $T$  – коефіцієнт проходження електромагнітного випромінювання,  $A$  – коефіцієнт поглинання,  $R$  – коефіцієнт відбиття.

Для надтонких металевих поверхонь подвійними відбиттями від границь розділів можна нехтувати. Тим більше, головний внесок у відбиття дає гладенька металева поверхня.

З електродинаміки суцільних середовищ відомо, що коефіцієнт відбиття функціонально залежить від електропровідності поверхні матеріалу. Поверхневий опір тонких плівок суттєво вищий за об'ємний опір таких матеріалів. Якщо товщина плівки порівняна з довжиною вільного пробігу електрона, головну роль у поверхневому опорі має розсіювання електронів у плівці.

Провідність тонкої плівки  $\sigma_s$  можна визначити з емпіричного співвідношення:

$$\sigma_s = \frac{3d\sigma_0 \left( \ln \frac{l_0}{d} + 0,4 \right)}{4l_0}.$$

де  $\sigma_0$  – об’ємна електропровідність металу,  $d$  – товщина плівки,  $l_0$  – довжина вільного пробігу електрона.

Для більшості металів об’ємні провідності та довжини вільного пробігу електронів відомі (табл. 1).

**Таблиця 1.**

Об’ємні провідності та довжини вільного пробігу електронів у металах, що використовуються для напилення

| Матеріал | $\sigma_0$ , 1/мкОм·л | $l_0$ , нм |
|----------|-----------------------|------------|
| Алюміній | 38                    | 16         |
| Залізо   | 41                    | 57         |
| Мідь     | 58                    | 42         |
| Олово    | 8                     | 10         |
| Срібло   | 62                    | 57         |

Опір провідного зразка прямокутного перерізу площею  $S$ :

$$r = \frac{\rho l}{S},$$

де  $\rho$  – питомий опір матеріалу,  $\rho = 1/\sigma_s$ ,  $l$  – довжина зразка,  $S$  – площа перерізу зразка.

Якщо прийняти ширину зразка такою, що дорівнює довжині, то значення поверхневого електричного опору не залежить від площі зразка:

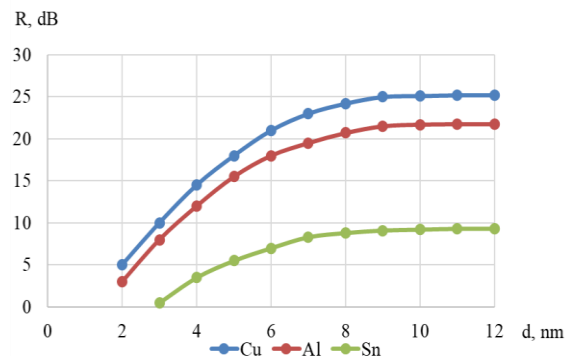
$$r_s = \frac{\rho}{d} = \frac{1}{\sigma_s d},$$

За наявності металевого покриття високої провідності основний внесок у екранування електромагнітних випромінювань дає відбиття електромагнітних хвиль. При цьому втрати на відбиття електромагнітних випромінювань  $R$  визначаються коефіцієнтами проходження на границях «повітря-метал» та «метал-скло»:

$$R = 88 + 20 \lg \left( \sqrt{\frac{\sigma_s}{f}} \right),$$

де  $f$  – частота падаючого електромагнітного випромінювання.

Залежності коефіцієнтів відбиття електромагнітного випромінювання від товщин металевих плівок з міді, алюмінію та олова наведено на рис. 1.



**Рис. 1.** Залежність коефіцієнта відбиття електромагнітного випромінювання від товщини металевих плівок

Аналіз даних рис. 1 свідчить, що олово найменш придатне для напилення з метою екранування електромагнітних випромінювань. Це пояснюється меншою електропровідністю олова. Можна помітити, що усі криві досягають максимумів за певних товщин плівки. Наприклад, для міді ця товщина 8–9 нм. Було розраховано еквівалентну глибину проникнення електромагнітного поля у матеріал, яка вважається товщиною скін-шару. Розрахунки здійснювалися для частоти 5 ГГц:

$$\delta = \sqrt{\frac{\rho}{\pi f \mu_0}},$$

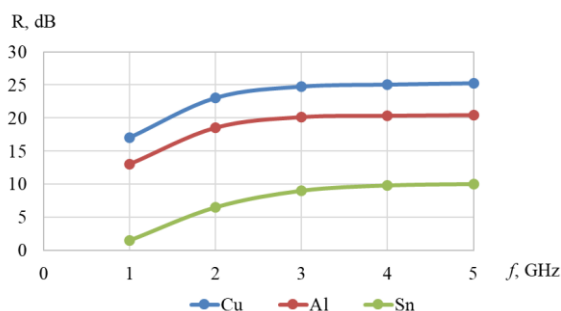
де  $\delta$  – еквівалентна глибина проникнення поля у матеріал,  $\rho$  – питомий електричний опір матеріалу,  $f$  – частота екранованого електромагнітного поля.

Для міді  $\rho \approx 0,017$  мкОм,  $f = 5 \cdot 10^9$  ГГц,  $\mu_0 = 12,6 \cdot 10^{-6}$  Гн/м. За таких умов глибина скін-шару складає 8,6 нм.

Таким чином, коли товщина металевих плівок досягає товщини скін-шару коефіцієнт відбиття електромагнітних хвиль стабілізується й подальше зростання

товщини напilenня не є доцільним. Врахування цього факту дозволяє мінімізувати товщини напilenого металу й забезпечити максимальну оптичну прозорість скла.

Визначено, що коефіцієнт відбиття електромагнітного випромінювання від напilenих плівок практично не залежить від частоти у діапазонах ультрависоких і надзвичайно високих частот (рис. 2).



**Рис. 2.** Залежність коефіцієнта відбиття електромагнітного випромінювання від частоти падаючого випромінювання. Товщина плівки – 10 нм

#### Обговорення результатів.

Отже, в результаті дослідження встановлено, що у діапазонах ультрависоких і надвисокої частот коефіцієнт відбиття електромагнітних хвиль для фіксованої товщини плівки практично не залежить від частоти випромінювання.

Стабільність значення коефіцієнта відбиття електромагнітного випромінювання обумовлена тим, що разом із частотою електромагнітного випромінювання змінюється й глибина скін-шару, що впливає на поверхневу електропровідність матеріалу.

У реальній діяльності слід враховувати, що для підвищення загального коефіцієнта екранування металізованим шаром бажано металізований шар заземлити на природні заземлювачі. Таким заземлювачем може бути арматура стінових панелей.

#### Висновок.

Застосування металізованого скла дозволяє підвищити екранування електромагнітних випромінювань ультрависоких та вищих частот до 25 дБ. Це досягається за рахунок відбиття електромагнітних хвиль. Значення коефіцієнта відбиття функціонально залежить від електропровідності металевих плівок.

Показано, що електропровідність металевих шарів дещо відрізняється від об'ємної електропровідності цього матеріалу. Для коректного визначення коефіцієнта відбиття попередньо розраховується поверхнева електропровідність з урахуванням товщини плівки та дожини вільного пробігу електронів у цьому матеріалі.

Розрахунково встановлено, що стабільне значення коефіцієнта відбиття електромагнітних хвиль досягається на визначеній частоті електромагнітного поля за умови, коли товщина плівки досягає товщини скін-шару у металі.

#### Список літератури

1. Directive 2013/35/EU of the European Parliament and of the Council of 26 June 2013 on the minimum health and safety requirements regarding the exposure of workers to the risks arising from physical agents (electromagnetic fields) (20th individual Directive within the meaning of Article 16(1) of Directive 89/391/EEC) and repealing Directive 2004/40/EC. URL: <https://eur-lex.europa.eu/eli/dir/2013/35/oj>
2. Kolcunová I., Zbojovský J., Pavlík M., Bucko S., Labun J., Hegedus M., Vavra M., Cimbala R., Kurimský J., Dolník B., Petráš J., Džmura J. Shielding Effectiveness of Electromagnetic Field by Specially Developed Shielding Coating. *Acta Physica Polonica*, A. May 2020, Vol. 137 Issue 5, p. 711-713. <http://doi.org/10.12693/APhysPolA.137.711>

3. Nansha Gao, Xinyu Guo, Jie Deng, Baozhu Cheng, Design and study of a hybrid composite structure that improves electromagnetic shielding and sound absorption simultaneously, *Composite Structures*, Volume 280, 2022, <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2021.114924>
4. Butenko O., Boychuk V., Savchenko B., Kotsyubynsky V., Khomenko V., Barsukov V. Pure ultrafine magnetite from carbon steel wastes. *Materials Today: Proceedings*. 2019. V. 6, pp. 270–278. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2018.10.104>
5. 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>

6. Glyva V.A., Podoltsev A.D., Bolibrukh B.V., Radionov A.V. A Thin Electromagnetic Shield of a Composite Structure Made On the Basis of a Magnetic Fluid. *Tekhnichna elektrodynamika*. 2018. № 4. P.14–18. <https://doi.org/10.15407/techned2018.04.014>

7. Glyva V., Levchenko L., Burdeina N., Biruk Ya., Tykhenko O. Composite Gradient Coatings Design for Ensuring Electromagnetic Compatibility of on-board and Ground Electronic Equipment. International Symposium on Electric Aviation & Autonomous Systems (ISEAS 23). Warsaw University of Technology & Air Force Institute of Technology. 5th-7th July, 2023. Warsaw-Poland. P. 33

8. G. Krasnianskyi, V. Glyva, N. Burdeina, Y. Biruk, L. Levchenko, O. Tykhenko. Methodology For Designing Facing Building Materials with Electromagnetic Radiation Shielding Functions. *International Journal of Conservation Science*. Volume 15, Special Issue 1, 2024. Pp. 53-62. <https://doi.org/10.36868/IJCS.2024.si.05>

9. Glyva, V., Bakharev, V., Kasatkina, N., Levchenko, O., Levchenko, L., Burdeina, N., Guzii, S., Panova, O., Tykhenko, O., Biruk, Y. Design of liquid composite materials for shielding electromagnetic fields. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 2021, 3(6-111) pp. 25–31. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2021.231479>

### References

1. Directive 2013/35/EU of the European Parliament and of the Council of 26 June 2013 on the minimum health and safety requirements regarding the exposure of workers to the risks arising from physical agents (electromagnetic fields) (20th individual Directive within the meaning of Article 16(1) of Directive 89/391/EEC) and repealing Directive 2004/40/EC. URL: <https://eur-lex.europa.eu/eli/dir/2013/35/oj>

2. Kolcunová, I., Zbojovský, J., Pavlík, M., Bucko, S., Labun, J., Hegedus, M., Vavra, M., Cimbala, R., Kurimský, J., Dolník, B., Petráš, J., & Džmura, J. (2020). Shielding Effectiveness of Electromagnetic Field by Specially Developed Shielding Coating. *Acta Physica Polonica A*, 137(5), 711–713. <https://doi.org/10.12693/aphyspola.137.711>

3. Gao, N., Guo, X., Deng, J., & Cheng, B. (2022). Design and study of a hybrid composite structure that improves electromagnetic shielding and sound absorption simultaneously. *Composite Structures*, 280, 114924. <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2021.114924>

4. 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. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2018.10.104>

5. S. Senyk, I. V., Kuryptya, Y. A., Barsukov, V. Z., Butenko, O. O., & Khomenko, V. G. (2020). Development and Application of Thin Wide-Band Screening Composite Materials. *Physics and Chemistry of Solid State*, 21(4), 771–778. <https://doi.org/10.15330/pcss.21.4.771-778>

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*, 2018(4), 14–18. <https://doi.org/10.15407/techned2018.04.014>

7. Glyva V., Levchenko L., Burdeina N., Biruk Ya., Tykhenko O. (2023). Composite Gradient Coatings Design for Ensuring Electromagnetic Compatibility of on-board and Ground Electronic Equipment. International Symposium on Electric Aviation & Autonomous Systems (ISEAS 23). Warsaw University of Technology & Air Force Institute of Technology. 5th-7th July, 2023. Warsaw-Poland. P. 33

8. G. Krasnianskyi, V. Glyva, N. Burdeina, Y. Biruk, L. Levchenko, O. Tykhenko. (2024). Methodology For Designing Facing Building Materials with Electromagnetic Radiation Shielding Functions. *International Journal of Conservation Science*. Volume 15, Special Issue 1, Pp. 53-62. <https://doi.org/10.36868/IJCS.2024.si.05>

9. Glyva, V., Bakharev, V., Kasatkina, N., Levchenko, O., Levchenko, L., Burdeina, N., Guzii, S., Panova, O., Tykhenko, O., & Biruk, Y. (2021). Design of liquid composite materials for shielding electromagnetic fields. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 3(6 (111)), 25–31. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2021.231479>

**Бурдейна Наталія Борисівна** - доктор технічних наук, доцент, професор кафедри фізики, Київський національний університет будівництва і архітектури, (пр. Повітряних сил, 31, м. Київ, Україна, 03037).

ID ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2812-1387> E-mail: [burdeina.nb@knuba.edu.ua](mailto:burdeina.nb@knuba.edu.ua).

**Глива Валентин Анатолійович** - доктор технічних наук, професор, завідувач кафедри фізики, Київський національний університет будівництва і архітектури, (пр. Повітряних сил, 31, м. Київ, Україна, 03037). ID

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-1257-3351> E-mail: [hlyva.va@knuba.edu.ua](mailto:hlyva.va@knuba.edu.ua)

**Бірук Яна Ігорівна** - доктор філософії, доцент, доцент кафедри фізики, Київський національний університет будівництва і архітектури, (пр. Повітряних сил, 31, м. Київ, Україна, 03037).

ID ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3669-9744> E-mail: [biruk.iai@knuba.edu.ua](mailto:biruk.iai@knuba.edu.ua)

**Петрунюк Тетяна Броніславівна** - кандидат педагогічних наук, доцент, доцент кафедри фізики, Київський національний університет будівництва і архітектури, (пр. Повітряних сил, 31, м. Київ, Україна, 03037). ID

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3261-3296>

E-mail: [petrunok.tb@knuba.edu.ua](mailto:petrunok.tb@knuba.edu.ua)

**Азнаурян Ірина Олександрівна** - доцент кафедри фізики, Київський національний університет будівництва і архітектури, (пр. Повітряних сил, 31, м. Київ, Україна, 03037).

ID ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7085-7291> E-mail: [aznaurian.io@knuba.edu.ua](mailto:aznaurian.io@knuba.edu.ua)

## PRINCIPLES OF APPLICATION OF ULTRATHIN COATINGS FOR SHIELDING ELECTROMAGNETIC RADIATION OF MAN-MADE ORIGIN

**Purpose.** To develop the principles of using ultrathin metallized coatings for shielding electromagnetic radiation of technogenic origin.

**Methods.** Theoretical justification of obtaining ultrathin metal coatings for optimal shielding of electromagnetic fields of ultrahigh and higher frequencies. Empirical confirmation that sputtering a thin metal layer on glass provides protection from the effects of electromagnetic radiation and does not significantly reduce the penetration of daylight.

**Results.** It was established that the reflection coefficient for coatings up to 10 nm thick can provide reflection coefficients of electromagnetic waves up to 25 dB. Calculation relations are provided for determining the conductivity of a metal film, which is significantly different from the bulk conductivity and determines the value of the shielding coefficient. The dependences of the reflection coefficients of sputtering in common metals on the film thickness are provided. The effect of achieving a maximum reflection coefficient at a certain film thickness is established. It is calculated to show what happens when the film thickness is equal to the skin layer thickness for a given radiation frequency. This makes it possible to optimize the thickness of the metal coating both from the point of view of electromagnetic safety and based on lighting needs.

**Novelty.** Based on calculations, it was established that a stable value of the reflection coefficient of electromagnetic waves is achieved at a certain frequency of the electromagnetic field, provided that the film thickness reaches the thickness of the skin layer in the metal.

**Practical significance.** It was established that in the ultrahigh and ultrahigh frequency ranges, the reflection coefficient of electromagnetic waves for a fixed film thickness practically does not depend on the radiation frequency. To increase the shielding efficiency of glass with metal coating, it is desirable to ground the metallized layer.

**Keywords:** electromagnetic radiation, shielding, coating, reflection coefficient

**Natalia Burdeina**, Doctor of Technical Sciences, Associate Professor, Professor of the Department of Physics, Kyiv National University of Civil Engineering and Architecture, Air Force Ave., 31, Kyiv, Ukraine, 03037.

ID ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2812-1387> E-mail: [burdeina.nb@knuba.edu.ua](mailto:burdeina.nb@knuba.edu.ua)

**Valentyn Glyva**, Doctor of Technical Sciences, Professor, Head of the Department of Physics, Kyiv National University of Civil Engineering and Architecture, Air Force Ave., 31, Kyiv, Ukraine, 03037. ID ORCID:

<https://orcid.org/0000-0003-1257-3351> E-mail: [hlyva.va@knuba.edu.ua](mailto:hlyva.va@knuba.edu.ua)

**Yana Biruk**, Doctor of Philosophy, Associate Professor, Associate Professor of the Department of Physics, Kyiv National University of Civil Engineering and Architecture, 31 Povitryanykh Sil Ave., Kyiv, Ukraine, 03037.

ID ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3669-9744> E-mail: [biruk.iai@knuba.edu.ua](mailto:biruk.iai@knuba.edu.ua)

**Tetiana Petrunok**, Candidate of Pedagogical Sciences Air Force, 31, Kyiv, Ukraine, 03037.

ID ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3261-3296> E-mail: [petrunok.tb@knuba.edu.ua](mailto:petrunok.tb@knuba.edu.ua)

**Iryna Aznaurian**, Associate Professor, Department of Physics, Kyiv National University of Civil Engineering and Architecture, Air Force Ave., 31, Kyiv, Ukraine, 03037.

ID ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7085-7291> E-mail: [aznaurian.io@knuba.edu.ua](mailto:aznaurian.io@knuba.edu.ua)