

УДК 621.371+530.145

к.т.н., доцент Човнюк Ю.В.,

yuchovnyuk@ukr.net, ORCID: 0000-0002-0608-0203,

Національного університету біоресурсів і природокористування України,

доцент Чередніченко П.П., petro\_che@ukr.net, ORCID: 0000-0001-7161X,

к.т.н., доцент Остапуценко О.П.,

olga\_ost\_17@ukr.net, ORCID: 0000-0001-8114-349X,

Київський національний університет будівництва і архітектури

## ВИКОРИСТАННЯ ГЕОРАДАРНИХ ТЕХНОЛОГІЙ У ПРОЦЕСАХ МОНІТОРИНГУ ФІЗИЧНОГО СТАНУ КАПІЛЯРНО-ПОРИСТИХ СТРУКТУР ДОРОЖНЬОГО ОДЯГУ

*Запропонована фізико-механічна та математична моделі для аналізу фізичного стану капілярно-пористих структур дорожнього одягу у процесах його моніторингу. Встановлені основні характеристики падаючих та відбитих від пустот та капілярних структур (з наявною у них водою) електромагнітних хвиль.*

*Ключові слова: георадарні технології, моніторинг, фізичний стан, капілярно-пористі структури, дорожній одяг.*

**Актуальність.** Діагностика доріг України, їх фізичного стану є дуже важливим і актуальним питанням сьогодення. Перш за все, вона необхідна для встановлення розрахункових характеристик дорожнього одягу, по-друге, задля проектування ремонтів, підсилення конструкції вказаного одягу, а, по-третє, для забезпечення всіх необхідних транспортно-експлуатаційних характеристик автомобільних доріг. Багато у чому фізичний стан дорожнього одягу, який можна подати у деякому наближенні як капілярно-пористу структуру, залежить від наявності у прошарках вказаного одягу води чи повітряних пустот.

Одними з нових прогресивних методів, які добре відомі й надійні у застосуванні, є георадарні технології, котрі використовують при діагностиці дорожнього одягу електромагнітні хвилі (ЕМХ) певного частотного діапазону, наприклад, міліметрового. Проте встановлення зон дорожнього одягу, у яких наявні пустоти чи капілярні структури зі зв'язаною водою методами електромагнітного зондування, вимагає подальшого дослідження й вдосконалення.

**Аналіз публікацій по темі дослідження.** Методологія моніторингу дорожнього одягу з використанням георадарних технологій викладена у роботах [2-5]. Основні рівняння та властивості відбитих ЕМХ від однорідних та неоднорідних за фізико-механічними властивостями середовищ розглянуті у [6,7]. При цьому використані підходи, розвинуті у [1].

Результати цитованих вище робіт будуть частково використані у даному дослідженні.

**Мета роботи** полягає у обґрунтуванні моделей розповсюдження ЕМХ міліметрового діапазону у капілярно-пористих структурах дорожнього одягу.

**Виклад основного змісту дослідження.** Якщо у капілярно-пористій структурі дорожнього одягу з'являються місця, де наявна зв'язана вода чи пустоти, тоді значення відносної діелектричної проникності середовища ( $\varepsilon$ ) у цих місцях близькі до нуля. Розглянемо взаємодію ЕМХ мм-діапазону з такими неоднорідними елементами капілярно-пористої структури дорожнього одягу. Характер взаємодії ЕМХ з такими елементами структури є доволі своєрідним.

Для компонент ЕМХ (електричної напруженості електромагнітного поля  $E$  та магнітної напруженості  $H$ ) рівняння набувають вигляду:

$$\Delta \vec{E} + \frac{\varepsilon \omega^2}{c^2} \cdot \vec{E} - \text{grad div} \vec{E} = 0; \quad \Delta \vec{H} + \frac{\varepsilon \omega^2}{c^2} \vec{H} + \frac{1}{\varepsilon} [\vec{\nabla} \varepsilon \times \text{rot} \vec{H}] = 0. \quad (1)$$

Тут  $\omega$  – частота ЕМХ,  $c$  – швидкість світла у вакуумі, причому ці рівняння суттєво спрощуються у одновимірному випадку, коли  $\varepsilon$  змінюється лише у одному напрямку у просторі. Оберемо цей напрямок у якості вісі  $z$  й розглядатимемо ЕМХ, напрямок розповсюдження котрої лежить у площині  $xz$ . У такій хвилі всі величини не залежать взагалі від координати  $y$ , а у зв'язку з однорідністю простору вдовж вісі  $x$  можна розглядати залежність від  $x$ , яку дає множник  $\exp(ikx)$ ,  $i^2 = -1$ , з постійною  $k$ . При  $k = 0$  електромагнітне поле залежить тільки від  $z$ , тобто мова йде про нормальне проходження ЕМХ через прошарок речовини з  $\varepsilon = \varepsilon(z)$ . Якщо ж  $k \neq 0$ , тоді мова йде про похиле проходження ЕМХ.

При цьому слід розрізняти (при  $k \neq 0$ ) два незалежних випадки поляризації. У одному з них вектор  $\vec{E}$  перпендикулярний до площини розповсюдження ЕМХ (тобто спрямований вдовж вісі  $y$ ), а магнітне поле  $\vec{H}$  відповідно лежить у цій площині. У іншому випадку вдовж вісі  $y$  спрямований вектор  $\vec{H}$ , а  $\vec{E}$  лежить у площині розповсюдження ЕМХ. Будемо умовно називати ці два типи ЕМХ відповідно  $E$  – та  $H$  – хвилями.

Своєрідна відмінність у поведінці обох типів хвиль виникає при відбитті похило ( $k \neq 0$ ) падаючої ЕМХ від прошарку речовини (дорожнього одягу, котрий має капілярно-пористу структуру), у котрому  $\varepsilon(z) \rightarrow 0$ , або проходить через нуль. (Такі ситуації виникають у капілярно-пористій структурі дорожнього одягу у місцях, де існують пустоти чи капіляри зі зв'язаною водою, котра має дуже мале значення  $\varepsilon$ ). Відбиття ЕМХ відбувається при цьому від площини, на якій  $f(z) = \varepsilon \omega^2 / c^2 - k^2 = 0$ , тобто «не доходячи» до точки  $\varepsilon = 0$ .  $E$  – хвиля проникає за цю площину лише у вигляді експоненціально затухаючого поля. При відбитті ж

$H$  – хвилі на загальному фоні такого затухаючого поля виникає поблизу точки  $\varepsilon = 0$  різке підсилення поля. Розглянемо це явище більш детально.

Нехай  $\varepsilon = 0$  у точці  $z = 0$ . Поблизу цієї точки запишемо:

$$\varepsilon = -a \cdot z, \quad a > 0, \quad (2)$$

й рівняння (1) для  $H$  – хвилі приймає вид:

$$\frac{d^2 H}{dz^2} - \frac{1}{z} \cdot \frac{dH}{dz} - \left( \frac{a\omega^2}{c^2} \cdot z + \kappa^2 \right) \cdot H = 0. \quad (3)$$

Згідно із загальною теорією лінійних диференціальних рівнянь, один із розв'язків цього рівняння (назвемо його  $H_1$ ) не має особливостей при  $z = 0$ , а його розклад при малих значеннях  $z$  починається з  $z^2$ :

$$H_1(z) = z^2 + \dots \quad (4)$$

Другий незалежний розв'язок має логарифмічну особливість і його розклад має вид:

$$H_2(z) = H_1(z) \ln \kappa z + \frac{2}{\kappa^2} + \dots \quad (5)$$

(параметр  $a$  з'являється лише у більш високих членах розкладу). Для визначення поля поблизу точки  $z = 0$  немає необхідності аналізувати питання про вибір лінійної комбінації з  $H_1$  та  $H_2$ , яка задовольняє умовам на нескінченості. Досить зауважити, що вона прямує при  $z \rightarrow 0$  до постійної (позначимо її  $H_0$ ) і має логарифмічну особливість:

$$H \approx H_0 \left( 1 + \frac{\kappa^2}{2} \cdot z^2 \cdot \ln \kappa z \right), \quad (6)$$

де у (6) поряд з постійною виписаний також головний член з особливістю. Електричне поле визначається по полю  $H_y = H$  рівняннями Максвелла:

$$E_x = -\frac{ic}{\varepsilon\omega} \cdot \frac{\partial H}{\partial z}, \quad E_z = \frac{ic}{\varepsilon\omega} \cdot \frac{\partial H}{\partial x}. \quad (7)$$

Згадуючи, що залежність  $H$  від  $x$  дається множником  $\exp(i\kappa x)$ , знаходимо головні члени у  $E_x$  та  $E_z$ :

$$E_x \approx H_0 \cdot \frac{i\kappa^2 c}{a\omega} \cdot \ln \kappa z, \quad E_z \approx H_0 \cdot \frac{\kappa c}{a\omega} \cdot \frac{1}{z}. \quad (8)$$

Вони прямують до нескінченності при  $z \rightarrow 0$ .

Зрозуміло, що у реальній ситуації, завдяки наявності у середовищі хоча б малого поглинання електромагнітне поле досягає лише відносно (у порівнянні з

оточуючим слабким фоном) великих, але скінчених значень. Цікаво зазначити, що, однак вже при навіть малій уявній частині у  $\varepsilon$  виникає скінчена дисипація енергії. Покладемо  $\varepsilon = -az + i\delta$ ,  $\delta \rightarrow +0$ . Тоді аналітичне продовження логарифма у (8) з правої піввісі  $z$  на ліву повинне здійснюватись у комплексній площині  $z$  знизу, й при  $z < 0$  буде:

$$E_x = H_0 \cdot \frac{i\kappa^2 c}{a\omega} \cdot (\ln|\kappa z| - i\pi). \quad (9)$$

Середній (по часу) потік енергії вповдовж вісі  $z$ ,

$$\bar{S}_z = \frac{c}{8\pi} \cdot \operatorname{Re}(E_x \cdot H_y^*), \quad (10)$$

дорівнює нулю (зірочка означає комплексне спряження величини) при  $z > 0$ , а при  $z < 0$  поява у  $E_x$  дійсної частини призводить до відмінного від нуля потоку енергії у напрямку до площини  $z = 0$ , де ця енергія поглинається:

$$\bar{S}_z = \frac{\kappa^2 c^2}{8\omega a} \cdot H_0^2. \quad (11)$$

## ВИСНОВКИ

1. Обґрунтована фізико-механічна і математична моделі розповсюдження падаючих/відбитих ЕМХ (мм-діапазону) у системах аерокосмічної зйомки при використанні георадарних технологій у процесах моніторингу капілярно-пористих структур дорожнього одягу.

2. Встановлені основні закономірності взаємодії ЕМХ різної поляризації з капілярно-пористими структурами дорожнього одягу дозволяють визначати місця, де у останньому наявні пустоти й капіляри, насичені зв'язаною водою.

3. Результати даного дослідження можуть бути у подальшому використані для уточнення і вдосконалення існуючих інженерних методів розрахунку параметрів георадарних пристроїв, що використовуються для моніторингу капілярно-пористих структур дорожнього одягу як на стадіях їх проектування/конструювання, так і у режимах реальної експлуатації.

## СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Борн М. основы оптики/М. Борн, Э. Вольф. – М.: Наука, 1973. – 720 с.
2. Батракова А.Г. Методология мониторинга дорожных одежд нежесткого типа с применением георадарных технологий [Текст]: диссертация на соискание степени докт. техн. наук/ А.Г. Батракова. – Харьков, 2014. – 397 с.
3. Батракова О.Г. Моделі розповсюдження хвиль у системах аерокосмічної геодезії/А.Г. Батракова//Науковий вісник будівництва. – 2017. – Т. 89. - №3. – С. 117-121.
4. Batrakov D.O. Solution of a General Inverse Scattering Problem Using the Distorted Born Approximation and Iterative Technique [Text]/D.O. Batrakov, N.P. Zyuck//Inverse Problems. – 1994. – Vol. 10. – No.1. – P. 39-54.

5. Zyuck N.P. Determination of electro physical properties of a layered structure with a statistically rough surface via an inversion method [Text]/N.P. Zyuck, D.O. Batrakov//Physical Review B. – 1995. – Vol. 51. – No.23. – P. 17073-17080.

6. Вайнштейн Л.А. Электромагнитные волны/Л.А. Вайнштейн. – М.: Радио и связь, 1988. – 440 с.

7. Ландау Л.Д. Электродинамика сплошных сред/Л.Д. Ландау, Е.М. Лифшиц. – М.: Наука, 1982. – 624 с.

к.т.н., доцент Човнюк Ю.В.,

Национальный университет биоресурсов и природопользования Украины,

доцент Чередниченко П.П., к.т.н., доцент Остапущенко О.П.,

Киевский национальный университет строительства и архитектуры

## **ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ГЕОРАДАРНЫХ ТЕХНОЛОГИЙ У ПРОЦЕССАХ МОНИТОРИНГА ФИЗИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ КАПИЛЯРНО- ПОРИСТЫХ СТРУКТУР ДОРОЖНОЙ ОДЕЖДЫ**

Предложена фізико-механическая и математическая модели для анализа физического состояния капілярно-пористых структур дорожній одежды в процессах его мониторинга. Определены основные характеристики падающих и отраженных от пустот и капиллярных структур (з наличием в них воды) электромагнитных волн.

Ключевые слова: георадарные технологии, мониторинг, физическое состояние, капілярно-пористые структуры, дорожная одежда.

Ph.D., associated Professor Chovnyuk Y.V.,

National University of Life and Environmental Sciences of Ukraine,

Associate Professor Cherednichenko P.P., Ph.D., Associate Professor

Ostapushchenko O.P., Kyiv National University of Construction and Architecture

## **THE GEORADAR TECHNOLOGIES' APPLICATION FOR THE PHYSICAL STATE'S MONITORING OF THE CAPILLARY-POROUS ROAD PAVEMENT'S STRUCTURES**

The physical state analysis mathematical model for the capillary-porous road pavement structures' monitoring is represented. The basic capillary-porous structures' reflection characteristics of the electromagnetic waves are determined.

Key words: georadar technologies, monitoring, physical state, capillary-porous structures, road clothing.