

DOI: <https://doi.org/10.32347/2077-3455.2020.57.352-364>

УДК 539.217.691+66.021.3:691.32:624.012.4

**Човнюк Юрій Васильович,**

*к.т.н., доцент кафедри сільськогосподарських машин системотехніки,  
Національний університет біоресурсів і природокористування України*

*uchovnyuk@ukr.net, <http://orcid.org/0000-0002-0608-0203>*

**Чердніченко Петро Петрович,**

*доцент кафедри міського будівництва*

*petro\_che@ukr.net, <http://orcid.org/000-0001-7161X>*

**Кравчук Володимир Тимофійович,**

*к.т.н., доцент кафедри охорони праці та навколишнього середовища*

*vtk1@ukr.net, <http://orcid.org/0000-0002-5213-3644>*

**Остапущенко Ольга Павлівна,**

*к.т.н., доцент кафедри електротехніки*

*olga\_ost\_17@ukr.net, <http://orcid.org/0000-0001-8114-349X>*

*Київський національний університет будівництва і архітектури*

## **ВПЛИВ ХВИЛЬОВИХ ПРОЦЕСІВ НА РУЙНУВАННЯ ВОЛОГОНАСИЧЕНИХ ПОРИСТИХ СЕРЕДОВИЩ, КОРОЗІЙНУ ДЕСТРУКЦІЮ БЕТОНІВ ДОРОЖНІХ ТА АЕРОДРОМНИХ ПОКРИТТІВ**

Анотація: вивчаються дисипативні процеси при гармонічному деформуванні пружних вологонасичених пористих середовищ, заданих комплексними модулями пружності й комплексними модулями, які залежать від пористості та стискуваності рідини. Отримані формули для визначення швидкостей розповсюдження та коефіцієнтів затухання поздовжніх звукових хвиль. Побудована залежність відношення уявної частини модуля пружності до дійсної. Розглянуті різновиди корозійних процесів при впливі на цементні бетони різноманітних агресивних середовищ у межах класифікації за В.М.Москвіним й описані їх відмінні ознаки. У роботі зазначено, що руйнування цементних бетонів визначаються процесами масопереносу й хімічних реакцій. Проблема забезпечення безпеки й довговічності споруд, будівель, дорожніх та аеродромних покриттів обумовлює необхідність розробки ефективних рекомендацій на основі математичного моделювання, які дозволять попередити руйнування конструкції від корозії та хвильових навантажень. Математичне моделювання, виконане на основі теорії пружності та консолідації пористих анізотропних середовищ Біо (Biot M.A.) , післядії динамічних навантажень на матеріал середовища, і, зокрема, на цементобетонне покриття автомобільних доріг та аеродромів, дозволяє прогнозувати й покращувати їх експлуатаційні характеристики. Аналітичне

дослідження розповсюдження пружних хвиль у матеріалі аеродромного покриття при силовому впливі повітряних суден буде у значній мірі сприяти розв'язку проблеми діагностики поточного експлуатаційного їх стану і у наступному обчисленню залишкового ресурсу безвідмовної роботи.

Отримані в роботі результати можна в подальшому використати для вдосконалення і уточнення інженерних методів розрахунку параметрів діагностичної апаратури, яка застосовується для визначення експлуатаційного стану бетонів дорожніх и аеродромних покриттів, як на стадії конструювання подібних приладів, так і в умовах їх реальної експлуатації.

**Ключові слова:** звукова хвиля, пористість, комплексне число, коефіцієнт затухання, швидкість розповсюдження, математичне моделювання, корозія, цементний бетон, руйнування, деструкція.

**Постановка проблеми.** Вивченням хвильових процесів займаються дослідники дуже давно. У цьому напрямку опубліковано багато робіт, накопичений величезний досвід і наявні значні наробки. Дослідження впливу хвильових процесів на різноманітні середовища продовжуються й зараз. Однією з цілей дослідження є вивчення й прогнозування поведінки матеріалів при обробці їх хвилями різної фізичної природи. Будь-які матеріали, котрі зустрічаються у природі і застосовуються у різних процесах господарства, представляють собою насичені рідиною чи газом пористі середовища. До вологонасичених пористих середовищ можна віднести і бетон, й цементобетон, і матеріал злітно-посадкових смуг аеродромних покриттів, та й самі аеродромні покриття.

Сучасні вимоги, які пред'являються до бетону як найбільш широко вживаному будівельному матеріалу, визначають необхідність розробки фізично та математично обгрунтованої теорії процесів його руйнування у різноманітних умовах експлуатації (у т.ч. внаслідок корозії). Великого значення набувають явища утворення, розповсюдження тріщин при дії навантажень й оточуючого середовища. Дослідження причин виникнення руйнування бетону створює фізичну основу для встановлення максимально припустимих механічних навантажень на конструкції.

Підвищення безпеки та довговічності споруд та будівель є однією з найважливіших задач будівництва. Розв'язок цієї задачі вимагає знання сутності процесів, які протікають при експлуатації будівельних конструкцій, у першу чергу сутності процесів корозії.

У сучасному промисловому, цивільному і транспортному будівництві основним матеріалом для побудови відповідальних споруд та будівель є бетон. Висока міцність і доволі простий цикл будівельних робіт визначили широку область його застосування, але вплив агресивних середовищ здатний з плином

часу послабляти міцність бетону, знижуючи тим самим безпеку й довговічність споруд та будівель.

#### **Аналіз публікацій по темі дослідження.**

Як відомо [1-7], твердіння бетону характеризується хімічними реакціями гідратації аліта та беліта. В результаті в твердіючому бетоні утворюється вільний гідроксид кальцію, вміст котрого досягає (10...15)% (у перерахунку на СаО), і котрий може вимиватись з конструкції під впливом оточуючого середовища. Зменшення вмісту вільного гідроксиду кальцію у результаті “вимивання” його з бетону рідиною, викликає зміну фазової та термодинамічної рівноваги у системі, призводить до розкладання основних складових цементного клінкера, таких як напівгідрат сульфату кальцію, гіпс, трикальцієвий алюмінат, аліт, беліт, гіллебрандит, ксоноліт, тоберморіт, що у свою чергу призводить до незворотної втрати міцнісних властивостей бетону. Встановлено, що при втраті 10% СаО зниження міцності цементного каменю досягає 10%, при втраті 20% СаО – вже 25%, а при втраті 33% СаО настає повне руйнування бетону.

Розробка математичних моделей процесів корозії бетону базується на фізичних моделях дифузії перенесених компонентів у пористій структурі бетону.

Масоперенос речовин у тілі бетону здійснюється шляхом фільтрації рідини чи газу при наявності градієнту тиску і/або дифузії речовин при наявності різниці концентрацій.

Москвіним В.М. [4] була запропонована класифікація основних видів корозії бетону. На основі отриманих експериментальних даних та накопиченого досвіду експлуатації конструкцій процеси, які протікають при корозії бетону, були розділені на три основні види.

Варто зазначити, що у природних умовах зазвичай має місце одночасний прояв кількох видів корозії бетону, але один з них є ведучим [2].

Гідратовані матеріали, які складають цементний камінь, мають розчинність у воді різного ступеню. Руйнування бетону внаслідок розчинення й виносу з його структури компонентів цементного каменю назване корозією I виду. Найбільш розчинним компонентом портландцементного каменю є гідроксид кальцію. Гідросилікати й гідроалюмінати кальцію також піддаються розчиненню у воді. Вилужування гідроксиду кальцію з бетону призводить до втрати міцності бетону.

Корозія II виду відрізняється від корозії I виду тим, що псування бетону визначається розчиненням компонентів цементного каменю та їх взаємодією з агресивними компонентами, які є у воді, з утворенням розчинних продуктів корозії або з виділенням важко розчинних з'єднань у вигляді крихких

новоутворень, які не мають міцністних властивостей. Важливим у цьому випадку є тип кислоти та її вміст у водному розчині. Чітко за ступенем агресивності розділяють органічні кислоти, агресивність котрих для цементних бетонів визначається розчинністю їх кальцієвих солей. Так, наприклад, оцтова, лимонна, молочна кислоти є сильно агресивними, а щавелева – слабкої агресивності.

До III виду корозії відносяться процеси, за яких руйнування – зниження міцності обумовлене виникненням внутрішніх напружень у результаті утворення у цементному камені нових з'єднань зі збільшенням об'єму твердої фази чи кристалізації з'єднань з оточуючого водного розчину.

На цементнобетонні аеродромні покриття суттєвий вплив справляють динамічні навантаження, котрі обумовлені безпосереднім контактом/взаємодією з шасі повітряних суден. Аеродромне покриття, від стану якого залежить безпека і регулярність польотів, постійно знаходиться під впливом й руйнується, як показує багаторічний досвід, раніше встановленого терміну експлуатації.

При інженерних розрахунках міцністних характеристик покриття враховуються коефіцієнти розвантаження, які супроводжують хвильові процеси, виникаючі при русі повітряних суден впродовж аеродромного покриття. Для прогнозування впливу хвильових процесів на характеристики й властивості аеродромних покриттів одних інженерних розрахунків недостатньо, необхідне ще й створення математичних моделей. Математично досить складно описати фізичні процеси, які відбуваються у тих чи інших матеріалах під впливом навантаження, тому будуються моделі, здатні більш чи менш адекватно відображати особливості поведінки матеріалу у певних обставинах. При цьому моделюється процес деформування й реологічні властивості пористих середовищ.

Створення математичних моделей, які найбільш точно описують процес впливу опори коліс повітряних суден на аеродромне покриття, завжди є актуальним і необхідним.

**Мета роботи** полягає у обґрунтуванні математичної моделі, за допомогою якої вивчаються дисипативні процеси при гармонічному деформуванні пружних вологонасичених пористих середовищ (бетонів), котрі задані комплексними модулями пружності й комплексними модулями, що залежать від пористості й стискуваності рідини.

Подібний підхід дозволяє отримати формули для визначення швидкостей розповсюдження та коефіцієнтів затухання поздовжніх звукових хвиль, а також побудувати залежність відношення уявної частини модуля пружності до дійсної.

### Виклад основного змісту дослідження.

Розглянемо розповсюдження звукових хвиль у насиченому рідиною пористому середовищі. Знайдемо характеристики розповсюдження поздовжніх звукових хвиль (хвиль стискування).

Пористість розуміємо як “ефективну” пористість, що враховує лише ті пори, які сполучаються між собою. Ізольовані пори розглядаються як елементи твердої частини пористого скелету [8]. Будемо вважати, що компоненти пористого середовища є суцільними (розміри пор малі) й у кожній точці середовища існує два вектори переміщення: вектор переміщення скелету пористого середовища й вектор переміщення рідини.

Співвідношення між вектором переміщення [8] та рівняннями руху [9] деформованого вологонасиченого пористого середовища можна записати у вигляді [10, 11]:

$$\begin{cases} \lambda^* \frac{\partial^2 u_j^{(1)}}{\partial x_i \partial x_j} + \mu^* \frac{\partial}{\partial x_j} \left( \frac{\partial u_j^{(1)}}{\partial x_i} + \frac{\partial u_i^{(1)}}{\partial x_j} \right) + Q^* \frac{\partial^2 u_j^{(2)}}{\partial x_i \partial x_j} = \rho_{11} \frac{\partial^2 u_i^{(1)}}{\partial t^2} + \rho_{12} \frac{\partial^2 u_i^{(2)}}{\partial t^2}, \\ Q^* \frac{\partial^2 u_j^{(1)}}{\partial x_i \partial x_j} + R^* \frac{\partial^2 u_j^{(2)}}{\partial x_i \partial x_j} = \rho_{12} \frac{\partial^2 u_i^{(1)}}{\partial t^2} + \rho_{22} \frac{\partial^2 u_i^{(2)}}{\partial t^2}, \quad (i, j) = \overline{(1,3)}. \end{cases} \quad (1)$$

Тут  $u_i^{(1)}$  компоненти вектора переміщення пружного середовища (скелету твердої фази);  $u_i^{(2)}$  компоненти вектора переміщення рідини;  $(\lambda^*, \mu^*)$  комплексні модулі коефіцієнтів пружності Ламе ( $\lambda^* = \lambda_1 + i\lambda_2, \mu^* = \mu_1 + i\mu_2, i^2 = -1$ );  $Q^*, R^*$  комплексні модулі, які залежать від пористості й стискуваності рідини ( $Q^* = Q_1 + iQ_2, R^* = R_1 + iR_2, i^2 = -1$ );  $\rho_{12}$  інтенсивність переходу маси з рідкої фази у тверду;  $(\rho_1, \rho_2)$  маси твердої фази й рідини у одиниці об'єму середовища ( $\rho_{11} = \rho_1 - \rho_{12}, \rho_{22} = \rho_2 - \rho_{12}$ );  $(\rho_{11}, \rho_{12})$  ефективні маси твердої фази й рідини у порах ( $\rho_{11} = \rho_1 / v_1, \rho_{22} = \rho_2 / v_2$ );  $v_1, v_2$  долі/частини кожної фази у об'ємі середовища, причому  $v_1 + v_2 = 1$  й  $(v_1, v_2) > 0$ .

Розв'язок системи (1) будемо шукати у вигляді затухаючої хвилі [12]:

$$\begin{cases} u_j^{(\gamma)} = A_j^{(\gamma)} \exp[i\omega t - (\alpha + i\beta)x_k v_k], \quad \beta = \omega / c, \quad \gamma = \overline{(1,2)}, \quad j = \overline{(1,3)}, \\ i^2 = -1, \quad k = \overline{(1,3)}, \end{cases} \quad (2)$$

де  $v_k$  координати одиничного вектора у напрямку швидкості розповсюдження хвилі,  $c > 0$  швидкість хвилі,  $\alpha > 0$  коефіцієнт затухання хвилі,  $\omega > 0$  кругова частота,  $\beta$  фазова постійна,  $A_j^{(\gamma)}$  амплітуди коливань фаз,  $x_k$   $k$ -а координата (просторова).

Після перетворень отримаємо:

$$\begin{cases} \left[ (\lambda^* + \mu^*) A_j^{(1)} v_i v_j + \mu^* A_i^{(1)} \right] (\alpha + i\beta)^2 + \rho_{11} \omega^2 A_i^{(1)} + \\ + Q^* A_j^{(2)} v_i v_j (\alpha + i\beta)^2 + \rho_{12} \omega^2 A_i^{(2)} = 0; \\ Q^* A_j^{(1)} v_i v_j (\alpha + i\beta)^2 + \rho_{12} \omega^2 A_i^{(1)} + R^* A_j^{(2)} v_i v_j (\alpha + i\beta)^2 + \rho_{22} \omega^2 A_i^{(2)} = 0. \end{cases} \quad (3)$$

Для визначення характеристик поздовжніх хвиль (швидкості розповсюдження й коефіцієнту затухання) обидві частини (3) помножимо на  $v_i$ , знайдемо потім суму по індексу  $i$  й припустимо, що  $A_i^{(1)} v_i = A_j^{(1)} v_j = N_1 \neq 0$  й  $A_i^{(2)} v_i = A_j^{(2)} v_j = N_2 \neq 0$ ,  $(i, j) = \overline{(1, 3)}$ .

В результаті матимемо однорідну систему рівнянь з комплексними коефіцієнтами:

$$\begin{cases} \left[ (\lambda^* + 2\mu^*) (\alpha + i\beta)^2 + \rho_{11} \omega^2 \right] N_1 + \left[ Q^* (\alpha + i\beta)^2 + \rho_{12} \omega^2 \right] N_2 = 0, \\ \left[ Q^* (\alpha + i\beta)^2 + \rho_{12} \omega^2 \right] N_1 + \left[ R^* (\alpha + i\beta)^2 + \rho_{22} \omega^2 \right] N_2 = 0. \end{cases} \quad (4)$$

Розв'язуючи систему рівнянь (4), отримаємо біквдратне алгебраїчне рівняння відносно  $(\alpha + i\beta)$ :

$$\begin{aligned} & \left[ (\lambda^* + 2\mu^*) R^* - (Q^*)^2 \right] (\alpha + i\beta)^4 + \left[ \rho_{11} R^* + \rho_{22} (\lambda^* + 2\mu^*) - 2\rho_{12} Q^* \right] \times \\ & \times \omega^2 (\alpha + i\beta)^2 + (\rho_{11} \rho_{22} - \rho_{12}^2) \omega^4 = 0. \end{aligned} \quad (4^*)$$

Розділимо це рівняння на  $(\alpha + i\beta)^4$  й виразимо  $\frac{1}{(\alpha + i\beta)^2}$  через  $z^*$ ,

$(\rho_{11} \rho_{22} - \rho_{12}^2)$  через  $K$ ,  $(\lambda^* + 2\mu^*)$  через  $L^*$ , де  $L^* = L_1 + iL_2$ .

Оскільки  $Q^*$ ,  $R^*$ ,  $L^*$  комплексні числа, введемо наступні позначення:

$$\Gamma_1 = \rho_{11} R_1 + \rho_{22} L_1 - 2\rho_{12} Q_1, \quad \Gamma_2 = \rho_{11} R_2 + \rho_{22} L_2 - 2\rho_{12} Q_2,$$

$$E_1 = L_1 R_1 - L_2 R_2 - Q_1^2 + Q_2^2, \quad E_2 = L_2 R_1 + L_1 R_2 - 2Q_1 Q_2.$$

Тоді алгебраїчне рівняння (4<sup>\*</sup>) можна записати у вигляді:

$$K \omega^4 (z^*)^2 + (\Gamma_1 + i\Gamma_2) \omega^2 z^* + (E_1 + iE_2) = 0. \quad (5)$$

Рівняння (5) можна розв'язати відносно дійсної  $(\alpha^2 - \beta^2)$  й уявної частин  $(\alpha \cdot \beta)$ :

$$\left\{ \begin{array}{l} \alpha^2 - \beta^2 = -\frac{2K\omega^2 \left( \Gamma_1 \pm \sqrt{r} \cos \frac{\Phi_1}{2} \right)}{\left( \Gamma_1 \pm \sqrt{r} \cos \frac{\Phi_1}{2} \right)^2 + \left( \Gamma_2 \pm \sqrt{r} \sin \frac{\Phi_1}{2} \right)^2}, \\ \alpha \cdot \beta = \frac{K\omega^2 \left( \Gamma_2 \pm \sqrt{r} \sin \frac{\Phi_1}{2} \right)}{\left( \Gamma_1 \pm \sqrt{r} \cos \frac{\Phi_1}{2} \right)^2 + \left( \Gamma_2 \pm \sqrt{r} \sin \frac{\Phi_1}{2} \right)^2}, \end{array} \right. \quad (6)$$

де:

$$r = \sqrt{q_1^2 + q_2^2}, \quad q_1 = \Gamma_1^2 - \Gamma_2^2 - 4KE_1, \quad q_2 = 2\Gamma_1\Gamma_2 - 4KE_2, \quad \operatorname{tg}\Phi_1 = q_2 / q_1 \quad \text{при} \\ 0 \leq \Phi_1 \leq \pi / 2.$$

Позначимо:

$$d_1 = \Gamma_1 \pm \sqrt{r} \cos \left( \frac{\Phi_1}{2} \right), \quad d_2 = \Gamma_2 \pm \sqrt{r} \sin \left( \frac{\Phi_1}{2} \right).$$

Зі співвідношень (6) та введених позначень отримаємо коефіцієнт затування  $\alpha$ :

$$\alpha = \sqrt{\frac{K\omega^2 (d_1 + \sqrt{d_1^2 + d_2^2})}{(d_1^2 + d_2^2)}}, \quad (7)$$

а також фазову постійну  $\beta$ :

$$\beta = \omega \sqrt{\frac{Kd_2^2}{(d_1^2 + d_2^2)(d_1 + \sqrt{d_1^2 + d_2^2})}}. \quad (8)$$

Швидкість поздовжньої хвилі  $C_l$ , враховуючи, що  $\beta = \omega / C_l$ , дорівнює:

$$C_{l,2} = \sqrt{\frac{(d_1^2 + d_2^2)(d_1 + \sqrt{d_1^2 + d_2^2})}{Kd_2^2}}. \quad (9)$$

Оскільки величини  $d_1$  й  $d_2$  мають знаки “ $\pm$ ”, тоді у вологонасичених пористих середовищах існує 2 типи поздовжніх хвиль  $C_{l,2}$  й два типи коефіцієнтів затування  $\alpha_{1,2}$ , котрі обчислюються за формулами (9) та (7) відповідно.

Після нескладних перетворень формули (9) можна отримати:

$$C_{l,2} = \sqrt{\frac{\left\{ \left[ 1 + \left( \frac{d_2}{d_1} \right)^2 \right] \cdot d_1 \cdot \left[ 1 + \left( \frac{d_2}{d_1} \right)^2 \right] \right\}}{\left( \frac{d_2}{d_1} \right)^2 \cdot K}}. \quad (10)$$

Із урахуванням позначення  $\eta = \sqrt{1 + \left(\frac{d_2}{d_1}\right)^2}$ , швидкості розповсюдження

поздовжніх звукових хвиль будуть мати наступний вид:

$$C_{l,2} = \sqrt{\frac{d_1 \eta^2 (1 + \eta)}{K(\eta^2 - 1)}} = \sqrt{\frac{d_1 \eta^2}{K(\eta - 1)}}. \quad (11)$$

Коефіцієнти затухання розповсюдження поздовжніх звукових хвиль при цьому можна буде подати у наступній формі:

$$\alpha = \sqrt{\frac{K \omega^2 (1 + \eta)}{d_1 \eta^2}}. \quad (12)$$

Отже, знаючи комплексні модулі пружності, можна визначити коефіцієнти затухання й швидкості розповсюдження поздовжніх хвиль у пружних вологонасичених пористих середовищах.

Нижче, у таблиці наведені чисельні результати розрахунків на ПЕОМ залежності параметру  $\eta$  від співвідношення  $d_2 / d_1$ , причому  $d_1$  характеризує дійсну частину модулів пружності пористого середовища, а  $d_2$  уявну частину.

Таблиця.

Залежність  $\eta$  від співвідношення уявної частини модуля пружності до дійсної

$\eta$	$d_2 / d_1$	$\eta$	$d_2 / d_1$	$\eta$	$d_2 / d_1$
1,02	0,28	1,13	0,52	1,26	0,76
1,05	0,35	1,16	0,59	1,31	0,81
1,08	0,41	1,19	0,66	1,34	0,88
1,10	0,47	1,22	0,72	1,38	0,95
1,12	0,50	1,24	0,74	1,41	1,00

## ВИСНОВКИ

1. Знаючи коефіцієнти затухання та швидкості розповсюдження поздовжніх хвиль у вологонасичених пористих середовищах, можна визначити кількісно їх вплив на фізико-механічні характеристики цих середовищ. Процес проходження різного роду хвилями будь-якого середовища справляє вплив на його руйнування та деформування.

2. Математичне моделювання наслідків динамічних навантажень на матеріал середовища, зокрема, на цементобетонне покриття, дозволяє прогнозувати й покращувати його експлуатаційні характеристики.

3. Аналітичне дослідження розповсюдження пружних хвиль у матеріалі аеродромного покриття при силовому впливі повітряних суден буде у значній



мірі сприяти розв'язку проблеми діагностики поточного експлуатаційного їх стану і у наступному обчисленню залишкового ресурсу безвідмовної роботи.

#### Список літератури

1. Федосов С. В., Румянцева В. Е., Федосова Н. Л., Смельцов В. Л. Моделирование массопереноса в процессах жидкостной коррозии бетона первого вида. Строительные материалы. 2005. № 7. С. 60 -62.
2. Федосов С. В., Румянцева В. Е., Хрунов В. А., Аксаковская Л. Н. Моделирование массопереноса в процессах коррозии бетонов первого вида (малые значения числа Фурье). Строительные материалы. 2007. № 5. С. 70-71.
3. Федосов С. В., Румянцева В. Е., Касьяненко Н. С. Математическое моделирование массопереноса в процессах коррозии бетона второго вида. Строительные материалы. 2008. № 7. С. 35-39.
4. Москвин В.М. Коррозия бетона. М.: Госстройиздат, 1952. 342с.
5. Федосов С.В., Румянцева В.Е., Румянцева К.Е., Хрунов В.А. Моделирование пограничного слоя в процессах массопереноса при жидкостной коррозии железобетонных конструкций. Известия высших учебных заведений. Серия: Химия и химическая технология. 2011. Т.54. № 6. С.96-100.
6. Федосов С.В., Румянцева В.Е., Хрунов В.А., Касьяненко Н.С., Смельцов В.Л. Прогнозирование долговечности строительных конструкций с позиций расчетного и экспериментального исследования процессов коррозии бетона. Вестник Волгоградского ГАСУ, серия "Строительство и архитектура", раздел "Строительные материалы и изделия". 2009. № 14(33). С. 117-122.
7. Федосов С.В., Румянцева В.Е., Хрунов В.А., Шестеркин М.Е. О некоторых проблемах технологии безопасности и долговечности зданий, сооружений и инженерной инфраструктуры. Строительные материалы. 2015. № 3. С. 8-11.
8. Biot M.A. Theory of elasticity and consolidation for a porous anisotropic solid. Journal of Applied Physics. 1955. V.26. № 2. P. 182-185.
9. Biot M.A. Theory propagation of elastic waves in fluid-saturated porous solid I. Low-Frequency Range. J. Acoust. Soc. of America. 1956. V.28. № 2. P. 168-178.
10. Косачевский Л.Я. О распространении упругих волн в двухкомпонентных средах. Прикладная математика и механика. 1959. Т.23. Вып. 6. С. 1115 -1 123.
11. Поленов В.С., Чигарев А.В. Распространение волн в насыщенной жидкостью неоднородной пористой среде. Изв. РАН. ПММ. 2010. Т.74. Вып. 2. С. 276-284.
12. Мешков С.И., Россихин Ю.А. О распространении звуковых волн в наследственно упругой среде. Прикладная механика и техническая физика. 1968. №5. С.89-93.

## References

1. Fedosov S.V., Rumiantseva V.E., Fedosova N.L., Smeltsov V.L. Modelyrovanye massoperenosa v protsessakh zhydkostnoi korrozii betona pervoho vyda. Stroytelnye materyaly. 2005. №7. S. 60-62. (in Russian)
2. Fedosov S.V., Rumiantseva V.E., Khrunov V.A., Aksakovskaia L.N. Modelyrovanye massoperenosa v protsessakh korrozii betonov pervoho vyda (malye znacheniya chysla Fure). Stroytelnye materyaly. 2007. №5. S. 70-71. (in Russian)
3. Fedosov S.V., Rumiantseva V.E., Kasianenko N.S. Matematycheskoe modelyrovanye massoperenosa v protsessakh korrozii betona vtoroho vyda. Stroytelnye materyaly. 2008. №7. S.35-39. (in Russian)
4. Moskvyn V.M. Korroziya betona. M.: Hosstroizdat, 1952. 342 s. (in Russian)
5. Fedosov S.V., Rumiantseva V.E., Rumiantseva K.E., Khrunov V.A. Modelyrovanye pohranychnogo sloia v protsessakh massoperenosa pry zhydkostnoi korrozii zhelezobetonnykh konstruktsyi. Yzvestiya vysshykh uchebnykh zavedenyi. Seryia: Khymiya y khymycheskaia tekhnolohiya. 2011. T.54. №6. S. 96-100. (in Russian)
6. Fedosov S.V., Rumiantseva V.E., Khrunov V.A., Kasianenko N.S., Smeltsov V.L. Prohnozyrovanye dolhovechnosti stroytelnykh konstruktsyi s pozytsiyi raschetnoho y eksperymentalnoho yssledovaniya protsessov korrozii betona. Vestnyk Volhogradskoho HASU, seryia "Stroytelstvo y arkhytektura", razdel "Stroytelnye materyaly y yzdelyia". 2009. №14(33). S. 117-122. (in Russian)
7. Fedosov S.V., Rumiantseva V.E., Khrunov V.A., Shesterkyn M.E. O nekotorykh problemakh tekhnolohyy bezopasnosti y dolhovechnosti zdaniy, sooruzheniy y ynzhenernoi ynfrastruktury. Stroytelnye materyaly. 2015. №3. S. 8-11. (in Russian)
8. Biot M.A. Theory of elasticity and consolidation for a porous anisotropic solid. Journal of Applied Physics. 1955. V.26.№2. P. 182-185. (in English)
9. Biot M.A. Theory propagation of elastic waves in fluid-saturated porous solid I. Low-Frequency Range. J. Acoust. Soc. of America. 1956. V.28. №2. P. 168-178. (in English)
10. Kosachevskiy L.Ia. O rasprostranenyi upruhykh voln v dvukhkomponentnykh sredakh. Prikladnaia matematyka y mekhanika. 1959. T.23. Выр.6. S. 1115-1123. (in Russian)
11. Polenov V.S., Chyharev A.V. Rasprostraneniye voln v nasыshchennoi zhydkosti neodnorodnoi porystoi srede. Yzv. RAN. PMM. 2010. T.74. Выр.2. S. 276-284. (in Russian)

12. Meshkov S.Y., Rossykhyn Yu.A. O rasprostranenyu zvukovykh voln v nasledstvenno upruhoi srede. Prykladnaia mekhanyka y tekhnicheskaya fizyka. 1968. №5. S. 89-93. (in Russian)

#### Аннотация

К.т.н., доцент **Човнюк Ю. В.**, Национальный университет биоресурсов и природопользования Украины;

Доцент **Чередниченко П. П.**, Киевский Национальный университет строительства и архитектуры;

К. т.н., доцент **Кравчук В.Т.**, Киевский Национальный университет строительства и архитектуры;

К.т.н., доцент **Остапущенко О.П.**, Киевский Национальный университет строительства и архитектуры.

#### **Влияние волновых процессов на разрушение влагонасыщенных пористых сред, коррозионную деструкцию бетонов дорожных и аэродромных покрытий.**

Изучаются диссипативные процессы при гармоничном деформировании упругих влагонасыщенных пористых сред, заданных комплексными модулями упругости и комплексными модулями, которые зависят от пористости и сжатости жидкости. Получены формулы для определения скоростей распространения и коэффициентов затухания продольных звуковых волн. Построена зависимость отношения мнимой части модуля упругости к действительной. Рассмотрены разновидности коррозионных процессов при влиянии на цементные бетоны разнообразных агрессивных сред в границах классификации по В.М.Москвину и описаны их отличительные признаки. В работе отмечено, что разрушения цементных бетонов определяются процессами массопереноса и химических реакций. Проблема обеспечения безопасности и долговечности сооружений, строений, дорожных и аэродромных покрытий обуславливает необходимость разработки эффективных рекомендаций на основе математического моделирования, которые позволят предупредить разрушение конструкций от коррозии и волновых нагрузок. Математическое моделирование, выполненное на базе теории упругости и консолидации пористых анизотропных сред Био (Biot M.A.), последствием динамических нагрузок на материал среды, и, в частности, на цементнобетонное покрытие автомобильных дорог и аэродромов, позволяет прогнозировать и улучшать их эксплуатационные характеристики. Аналитическое исследование распространения упругих волн в материале аэродромного покрытия при силовом воздействии воздушных суден будет в

значительной степени содействовать решению проблемы диагностики текущего эксплуатационного их состояния и в последующем подсчету остаточного ресурса безотказной работы.

Полученные в работе результаты можно в дальнейшем использовать для усовершенствования и уточнения инженерных методов расчета параметров диагностического оборудования, которое применяется для определения эксплуатационного состояния бетонов дорожных и аэродромных покрытий, как на стадии проектирования и конструирования подобных приборов, так и в условиях их реальной эксплуатации.

Ключевые слова: звуковая волна, пористость, комплексное число, коэффициент затухания, скорость распространения, математическое моделирование, коррозия, цементный бетон, разрушение, деструкция.

#### Abstract

Ph.D Associate Professor **Chovnyuk Yuriy**, National University of Life and Environmental Sciences of Ukraine;

Associate Professor **Cherednichenko Petro**, Kyiv National University of Construction and Architecture;

Ph.D., Associate Professor **Kravchuk Vladimir**, Kyiv National University of Construction and Architecture;

Ph.D., Associate Professor **Ostapushchenko Olga**, Kyiv National University of Construction and Architecture.

#### **Influence of wave processes on destruction of moisture-saturated porous environments, corrosion destruction of concretes of road and airfield coverings.**

The object of this study are the dissipative processes in the harmonious deformation of the elastic moisture-saturated porous media specified by complex modulus of elasticity and complex modules dependent on the porosity and density of the fluid. Formulas for determining the propagation velocities and attenuation coefficients of longitudinal sound waves have been obtained. The relationship between the imaginary part of elastic modulus and the actual part is constructed. Varieties of corrosive processes under the influence of various aggressive media within the V.M.Moskvin classification boundaries on cement concretes are considered and their distinctive features are described. It is noted in the paper that the destruction of cement concretes is determined by the processes of mass transfer and chemical reactions. The problem of ensuring safety and durability of structures, buildings, road and airfield surfaces necessitates the development of effective recommendations based on mathematical modeling, which will prevent the destruction of structures from corrosion and wave loads. Mathematical modeling

based on the theory of elasticity and consolidation of porous anisotropic media (Biot M.A.), the effect of dynamic loads on the medium material, and, in particular, the cement concrete coating of roads and airfields allows forecasting and improving their performance. Analytical study of elastic wave propagation in the airfield coating material under the force of aircraft will be contribute significantly towards solving the problem of diagnostics of the current their operational condition and in the subsequent calculation of the residual reliable exploitation lifespan.

The results obtained in this work can be further used to improve and refine engineering methods for calculating the parameters of diagnostic equipment used to determine operational state of concretes of road and airfield coverings, both at the stage of design and construction of such devices and in their actual operation.

Key words: acoustic wave, porosity, complex number, attenuation coefficient, dissemination speed, mathematical modeling, corrosion, cement concrete, destruction.