

Кондрат В. Ф.

*Національна Академія  
сухопутних військ імені  
гетьмана Петра  
Сагайдачного*

Лопушанський Я. Й.

*Львівський державний  
університет безпеки  
життєдіяльності*

Kondrat V. F.

*Hetman Petro  
Sahaidachny National  
Army Academy*

Lopushanskyu Y. Y.

*Lviv State University of  
Life Safety*

**УДК 534.14:532.546**

## **ВПЛИВ МЕХАНІЧНИХ КОЛИВАНЬ НА ФІЛЬТРАЦІЙНИЙ ПЕРЕНОС МАСИ В ПОРИСТИХ ТІЛАХ**

*У роботі вивчається вплив механічних коливань на фільтраційні властивості насиченого полярною рідиною або тіксотропним колоїдним розчином пористого середовища, його ефективну пористість. Досліджувані вібраційні ефекти пов'язуються з наявністю і особливими властивостями структурованої (зв'язаної) рідини в околі поверхні скелету або вібраційними переходами гель-золь у разі насичення середовища колоїдним тіксотропним розчином. У рамках моделі гетеропористого тіла, вздовж каналів якого поширюється поздовжня пружна хвиля, вивчено залежність досліджуваних ефектів від параметрів коливань та структурних характеристик середовища. Отримані результати якісно добре узгоджуються з відомими експериментальними. Встановлено, зокрема, що вібраційна зміна досліджуваних ефектів може бути суттєвою і важливою для практики інтенсифікації масоперенесення в пористих тілах.*

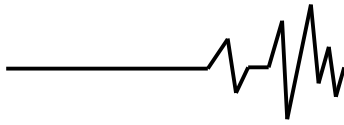
***Ключові слова:** вібрація, пористий матеріал, полярна рідина, тіксотропний колоїдний розчин, фільтрація, зв'язана рідина.*

**1. Вступ.** Інтенсифікацію процесу переносу маси в пористих середовищах механічними коливаннями необхідно враховувати при вивченні міграції забруднень у ґрунтах, у практиці видобутку нафти, насиченні матеріалів спеціальними розчинами, зокрема, для потреб медицини, тощо [1,2].

Вплив механічних коливань на дифузію нейтральних частинок, який пов'язаний з вібраційною зміною властивостей зв'язаної зі скелетом води, вивчався у роботі [3]. При цьому пористе середовище моделювалося сукупністю паралельних щілин, поперечні розміри яких є випадковою величиною (модель гетеропористого тіла). В загальному випадку приймалося, що перший шар води товщиною  $\Delta h$ , яка безпосередньо примикає до поверхні щілини, знаходиться у сильно зв'язаному (адсорбованому) стані. При випадковому розподілі поперечного розміру щілин в частині з них вода знаходиться виключно в адсорбованому стані і при механічних коливаннях не змінює його, в частині – в адсорбованому і слабозв'язаному станах, а в решті реалізується загальний випадок. Коефіцієнти дифузії в зазначених шарах відрізняються на порядки (найбільший коефіцієнт дифузії у вільній або гравітаційно

рухомій воді). Механічні коливання змінюють стан слабо зв'язаної води, що спричинює зміну коефіцієнта дифузії частинок, які знаходяться у цьому шарі. Остільки в багатьох практично цікавих випадках концентрація домішкових частинок у слабо зв'язаній воді найбільша, то це приводить до значного збільшення потоку частинок та ефективного коефіцієнта дифузії. Дослідження проводилися для стаціонарних коливань, при заданій сталій концентрації на поверхнях гетеропористого шару. При цьому бралось, що поперечні розміри щілин розподілені за нормальним законом.

У цій роботі в рамках аналогічних модельних уявлень розглядається вплив поздовжних механічних хвиль на фільтрацію полярної рідини, в якості якої будемо брати зазвичай воду, та колоїдного тіксотропного розчину. При цьому приймається до уваги, що унаслідок зв'язування (структурування) рідини в околі поверхні скелету та коагуляції колоїдного розчину зменшується прохідність каналів (коефіцієнт проникності) і ефективна пористість середовища. Механічні коливання за певних умов спричинюють відновлення вихідного стану рідини і колоїдного розчину, що приводить до збільшення ефективної пористості та коефіцієнта проникності тіла.



**2. Фізична модель.** Об'єктом розгляду є пружне тверде тіло, яке містить сукупність паралельно орієнтованих каналів – щілин або круглих пор, заповнених рідиною (рис.1). Поперечні розміри таких каналів є випадковою величиною. Будемо розглядати два типи рідин – воду і колоїдний розчин, здатний до гелеутворення та самовідновлення структури (тіксотропії) [4]. Вода в приконтатній з твердою фазою області за рахунок поверхневих взаємодій набуває нових властивостей і характеризується зсувною жорсткістю, більшою густиною маси тощо [5,6,7]. Таку воду називають зв'язаною і при постійній температурі вона утворює пристінкову плівку товщини  $h$ . В деяких моделях [5,6] також виділяють шар міцнозв'язаної води, товщина якого  $\Delta h \ll h$ . Решту води, будемо називати її вільною, а також колоїдний розчин в рідкому стані (золь) будемо описувати моделлю ньютонівської рідини.

Зв'язана вода та гель є структурованими [6-9]. За певних умов, наприклад під дією механічних коливань, може відбуватися їх деструктування і набуття властивостей вільної рідини та золь відповідно. Такий перехід [2,6,8,9] відбувається, коли максимальні зсувні

напруження  $\tau$  стають більшими чи дорівнюють критичному значенню  $\tau_*$

$$\tau \geq \tau_* \quad (1)$$

Якщо напруження  $\tau$  стають меншими за  $\tau_*$ , то знову відбувається утворення зв'язаної води та гелю. Експерименти [2] показують, що характерний час такого утворення, звичайно, набагато більший за характерний час руйнування. Надалі руйнування структурованого стану будемо вважати миттєвим.

Приймемо, що в кожній внутрішній області тіла за заданих зовнішніх дій на його поверхні створено вздовж кожного з каналів сталій градієнт тиску, який викликає ламінарний фільтраційний потік рідини, а також викликано поширення поздовжньої пружної хвилі, довжина якої значно більша за можливий поперечний розмір каналів, який значно менший за товщину прилеглої фази [10,11]. За таких умов нехтуємо рухом рідини перпендикулярно до поверхонь каналу [12], стінки яких гармонічно коливаються з певною швидкістю.

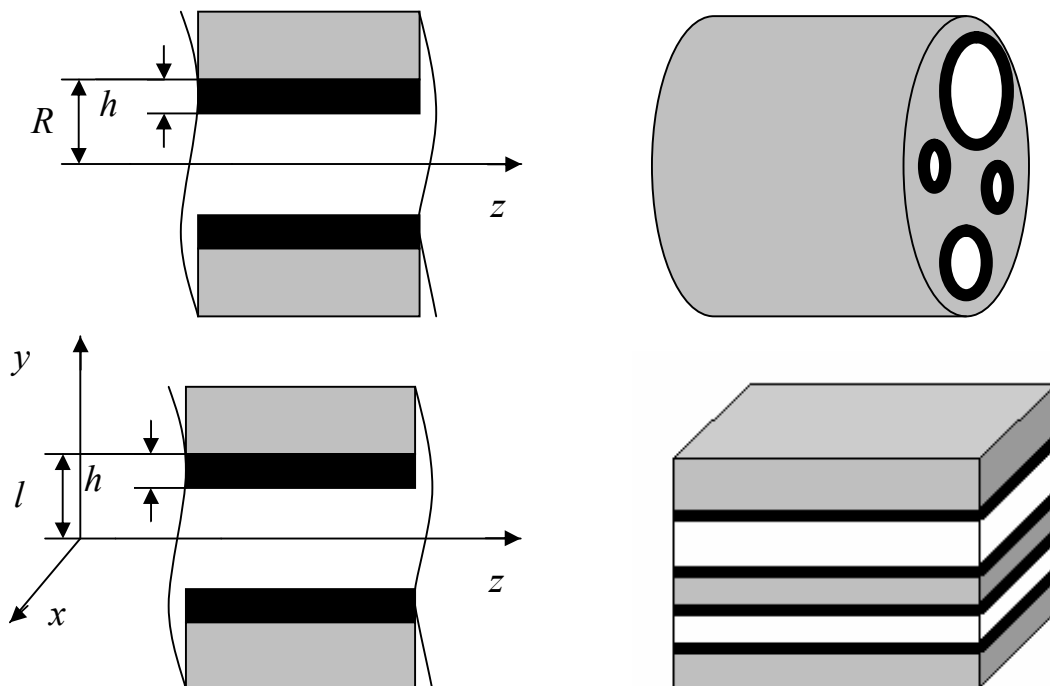
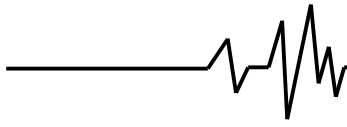


Рис. 1

**3. Протікання рідини в одному каналі та умова деструктування.** При описі руху рідини в каналах щілину будемо відносити до декартової системи координат  $(x, y, z)$ , вісь  $OZ$  якої співпадає з напрямом руху рідини, а вісь

$OY$  перпендикулярна до її стінок (щілина займає область  $y \in (-l, l)$ , де  $l$  – її півширина), круглу пору – до циліндричної системи координат  $(r, \varphi, z)$ , вісь  $OZ$  якої теж



спрямована за напрямом фільтрації (пора займає область  $r \in [0, R)$ ) (рис.1). Шар зв'язаної води товщини  $h < l, h < R$  займає область  $y \in (-l, -l + h) \cup (l - h, l)$  у щілині і  $r \in (R - h, R)$  у порі. Колоїдний розчин, який набув консистенції гелю, а також зв'язана вода при  $h \geq l, h \geq R$  займають всю область каналу.

Зупинимось на випадку щілини. За умови ламінарності потоку води в щілині рівняння її руху можна записати у вигляді

$$\rho_j \frac{\partial v_z^j}{\partial t} = \frac{\partial \sigma_{zz}^j}{\partial z} + \frac{\partial \sigma_{zy}^j}{\partial y}, \quad (2)$$

$$\sigma_{zz}^f = -p + (\eta_1 + 2\eta_2) \frac{\partial v_z^f}{\partial z}, \sigma_{zy}^f = 2\eta_2 \frac{\partial v_z^f}{\partial y}; \quad (3)$$

$$\sigma_{zz}^b = \left( K_b + \frac{4}{3} G_b \right) \frac{\partial u_z^b}{\partial z}, \sigma_{zy}^b = 2G_b \frac{\partial u_z^b}{\partial y}. \quad (4)$$

Тут  $\sigma_{zz}^j, \sigma_{zy}^j$  - компоненти тензорів напружень;  $p$  - тиск;  $v_z^j, u_z^j$  - компоненти векторів швидкостей та переміщень відповідно;  $\rho_j$  - густина;  $j = f$  для вільної води, яка займає область  $y \in (-l + h, 0) \cup (0, l - h)$ ,  $j = b$  для зв'язаної води, яка займає область  $y \in (-l, -l + h) \cup (l - h, l)$ ;  $\eta_1, \eta_2$  - коефіцієнти в'язкості вільної, а  $K_b, G_b$  - модулі стиску і зсуву зв'язаної води. Співвідношення (4) записані без врахування ефектів повзучості зв'язаної води.

Крайові умови на поверхні щілини

$$v_z^b = v_z^s \quad \text{при} \quad y = \pm l, \quad (5)$$

а на поверхні розділу структурованої та вільної води

$$v_z^f = v_z^b, \quad \sigma_{zy}^f = \sigma_{zy}^b \quad \text{при} \quad y = \pm(l - h). \quad (6)$$

При цьому з умов симетрії маємо, що

$$\sigma_{zy}^f = 0 \quad \text{при} \quad y = 0. \quad (7)$$

Тут  $v_z^s(t) = v_0^s \exp(i\omega t)$  -  $z$  - компонента вектора  $\vec{v}^s = (0, 0, v_z^s)$  коливної швидкості стінок щілини,  $v_0^s$  - амплітуда,  $\omega$  - циклічна частота.

У випадку колоїдного розчину за виконання умови (1) на поверхні щілини приймаються справедливі рівняння (2) при  $j = f$ , (3), (7) та умови  $v_z^f = v_z^s$  при  $y = \pm l$ ; за невиконання умови (1) - рівняння (2) при  $j = b$ , (4), умова (5), а також  $\sigma_{zy}^b = 0$  при  $y = 0$ .

Для врахування впливу механічних коливань на рух води умову (1) запишемо через критичний розмір щілини. Розглянемо окремо щілини, в яких є лише зв'язана вода ( $l \leq h$ ), і щілини, в яких є зв'язана і вільна вода ( $l > h$ ). Представимо зсувні напруження у зв'язаній воді сумою осередненої по періоду коливань ( $\bar{f} = \frac{1}{T} \int_t^{t+T} f(\tau) d\tau$ ) та коливної ( $\tilde{f} = f - \bar{f}$ ) складових

$$\sigma_{zy}^j = \bar{\sigma}_{zy}^j + \tilde{\sigma}_{zy}^j, \quad (j = f, b). \quad (8)$$

З умов рівноваги для води у щілині, які полягають у зрівноваженні сил тиску та сил, зумовлених зсувними напруженнями на поверхнях  $y = \pm l$ , випливає, що для обох типів щілин

$$\bar{\sigma}_{zy}^b(l) = l \bar{p}_{,z}, \quad \bar{p}_{,z} = \frac{\partial \bar{p}}{\partial z}. \quad (9)$$

Коливний рух води в щілині відбувається під дією поздовжніх коливань її стінок. За взятої умови малості товщини щілин по відношенню до довжини поздовжньої хвилі та товщини примежового шару можна знехтувати несинфазністю коливань води та стінок щілини і записати, що

$$\tilde{\sigma}_{zy}^b(l) = l \rho^b \frac{\partial \tilde{v}_z^s}{\partial t} \quad \text{при} \quad l \leq h,$$

$$\tilde{\sigma}_{zy}^b(l) = l \rho^f \frac{\partial \tilde{v}_z^s}{\partial t} + h(\rho^b - \rho^f) \frac{\partial \tilde{v}_z^s}{\partial t} \quad \text{при} \quad l > h. \quad (10)$$

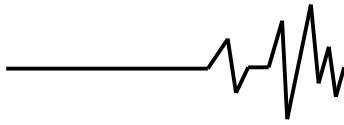
Позначаючи  $\tau = \sup_t \sigma_{zy}^b(l)$ , зі

співвідношень (1), (8)-(10) отримуємо умову деструктуризації зв'язаної води, записану відносно поперечних розмірів щілин, яку подамо у вигляді

$$l \geq l_*^{(n)} \quad (n = 1, 2), \quad (11)$$

де

$$l_*^{(1)} = \frac{\tau_*}{P_{bs}} \quad (l \leq h), \quad l_*^{(2)} = \frac{T_*}{P_{fs}} \quad (l > h),$$



$$P_{js} = |\bar{p}_{,z}| + W_{js} \kappa v \sqrt{I}, \quad W_{js} = \rho^j / \rho^s \quad (j = f, b)$$

$$, \quad W_{\Delta s} = (\rho^b - \rho^f) / \rho^s,$$

$T_* = \tau_* - h W_{\Delta s} \kappa v \sqrt{I}$ ,  $\kappa = 2\pi \sqrt{2\rho^s / c}$ ,  
 $c$  – швидкість хвилі у твердій фазі,  
 $I = 0,5 \rho^s \omega v_a^2 c$  – інтенсивність хвилі,  $v$  – частота.

Для колоїдного розчину за взятої схеми деструктуризації (структура розчину в каналі руйнується при виконанні (1) на поверхні щілини) чинна умова (11) при  $n = 1$ .

Аналогічним чином для круглих пор, заповнених водою, отримуємо

$$R \geq R_*^{(n)} \quad (n = 1, 2), \quad (12)$$

де

$$R_*^{(1)} = \frac{\tau_*}{P_{bs}} \quad (R \leq h),$$

$$R_*^{(2)} = \frac{T_* + \sqrt{T_*^2 + 2h^2 W_{\Delta s} \kappa v \sqrt{I} P_{fs}}}{P_{fs}} \quad (R > h).$$

Для колоїдного розчину чинна умова (12) при  $n = 1$ .

**4. Осереднена швидкість протікання рідини і проникність середовища.** Осереднимо рівняння (2) по періоду коливань. Використовуючи визначальні співвідношення (3) та покладаючи нулю осереднену силу інерції, отримуємо

$$-\frac{\partial \bar{p}}{\partial z} + (\eta_1 + 2\eta_2) \frac{\partial^2 \bar{v}_z^f}{\partial z^2} + \eta_2 \frac{\partial^2 \bar{v}_z^f}{\partial y^2} = 0, \quad (13)$$

Враховуючи, що  $\partial^2 \bar{v}_z^f / \partial z^2 = 0$ , після інтегрування рівняння (13) по змінній  $y$  з використанням умов

$$\bar{v}_z^f = 0 \quad \text{при} \quad z = l - h \quad \text{і} \quad \frac{\partial \bar{v}_z^f}{\partial y} = 0$$

$$\text{при} \quad y = 0,$$

знайдемо

$$k = \frac{1}{3} \left\{ \theta (h - l_*^{(1)}) \int_{l_*^{(1)}}^h f(l) l^2 dl + \theta (l_*^{(2)} - h) \left[ \int_h^{l_*^{(2)}} f(l) (l - h)^2 dl + \int_{l_*^{(2)}}^\infty f(l) l^2 dl \right] + \theta (h - l_*^{(2)}) \int_h^{l_*^{(2)}} f(l) l^2 dl \right\}. \quad (18)$$

Аналогічний розгляд для колоїдного розчину дає

$$k = \frac{1}{3} \int_{l_*^{(1)}}^\infty f(l) l^2 dl \quad (19)$$

$$\bar{v}_z^f = -\frac{1}{2\eta_2} \bar{p}_{,z} [y^2 - (l - h)^2]$$

для  $y \in (0, l - h)$

Осереднюючи швидкість  $\bar{v}_z^f$  по перерізу щілини  $\left( \bar{\bar{v}}_z^f = l^{-1} \int_0^l \bar{v}_z^f(y) dy \right)$ , отримаємо

вираз для середньої швидкості води у щілині

$$\bar{\bar{v}}_z^f = \frac{(l - h)^2}{3\eta_2} \bar{p}_{,z} \quad \text{для} \quad l > h. \quad (14)$$

Тут враховано, що осереднена за часом складова тиску не залежить від координати  $y$ . При  $l \leq h$ , тобто відсутності вільної рідини у щілині,  $\bar{\bar{v}}_z^f = 0$ .

При виконанні умови деструктуризації (11) середня швидкість води у щілині буде

$$\bar{\bar{v}}_z^f = \frac{l^2}{3\eta_2} \bar{p}_{,z}. \quad (15)$$

Середня швидкість  $\bar{\bar{v}}_z^f$  залежить від ширини щілини  $l$ . Тому для знаходження середньої швидкості  $\langle v_z^f \rangle$  фільтрації води в середовищі проведемо осереднення  $\bar{\bar{v}}_z^f(l)$  за розмірами щілин

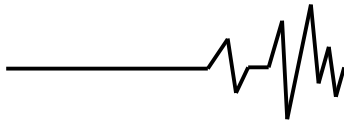
$$\langle v_z^f \rangle = \int_0^\infty \bar{\bar{v}}_z^f(l) f(l) dl, \quad (16)$$

де  $f(l)$  - густина розподілу ймовірності поперечних розмірів щілин. Використовуючи рівняння (14), (15), вираз (16) для середньої швидкості фільтрації води можна записати

$$\langle v_z^f \rangle = -\frac{k}{\alpha \eta_2} \bar{p}_{,z}, \quad (17)$$

де  $\alpha$  - абсолютна пористість,  $k$  - коефіцієнт проникності середовища

У випадку круглих пор для коефіцієнта проникності води та колоїдного розчину отримуємо



$$k = \frac{1}{8} \left\{ \theta(h - R_*^{(1)}) \int_{R_*^{(1)}}^h f(R) R^2 dR + \theta(R_*^{(2)} - h) \left[ \int_h^{R_*^{(2)}} f(R) (R - h)^2 dR + \int_{R_*^{(2)}}^{\infty} f(R) R^2 dR \right] + \theta(h - R_*^{(2)}) \int_h^{\infty} f(R) R^2 dR \right\}, \quad (20)$$

$$k = \frac{1}{8} \int_{R_*^{(1)}}^{\infty} f(R) R^2 dR. \quad (21)$$

Зауважимо, що формули (18)-(21) для коефіцієнта проникності будуть такими самими і при відсутності коливань, однак в умовах деструктування (11), (12) не будуть фігурувати складові, зумовлені коливаннями.

Проведемо кількісний аналіз отриманих результатів. Густину розподілу ймовірності виберемо у вигляді

$$f(\xi) = B \exp \left[ -(\xi - \bar{\xi})^2 / (2\zeta^2) \right] \theta(\xi), \quad (22)$$

де  $\theta(\xi)$  - функція Гевісайда,  $\bar{\xi}$  - середнє значення,  $\zeta^2$  - дисперсія,

$$B = \left\{ \sqrt{2\zeta} F(\bar{\xi} / \sqrt{2\zeta}) \right\}^{-1}, \quad F(z) = \int_{-\infty}^z \exp(-u^2) du.$$

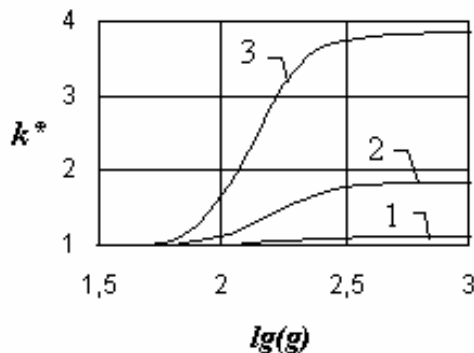


Рис. 2. Залежність відносного коефіцієнта проникності від параметра  $g$  для середовища зі щілинами, заповненими водою, при  $|\bar{p}_{,z}| = 100 \text{ Па} / \text{м}$ ,  $\tau_* = 10^{-3} \text{ Па}$ ,

$$\zeta = \bar{\xi}, \quad \bar{\xi} = 10^{-6} \text{ м}, \quad h = 0.1\bar{\xi}, 0.5\bar{\xi}, \bar{\xi} \text{ (криві 1,2,3)}.$$

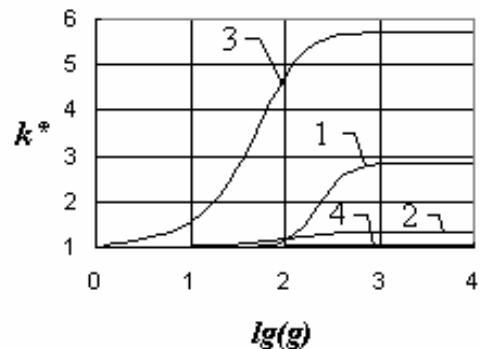
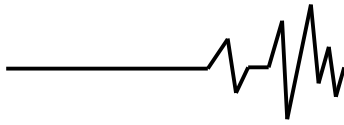


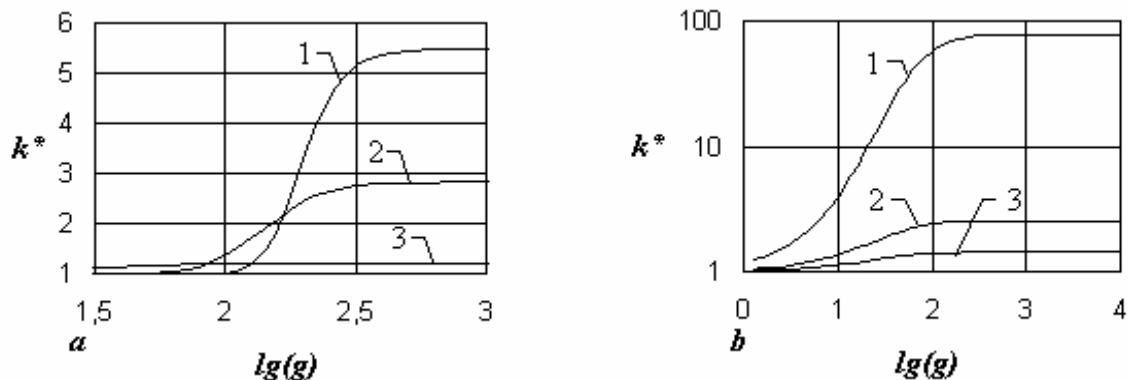
Рис. 3. Залежність відносного коефіцієнта проникності від параметра  $g$  для середовища з круглими порами, заповненими водою (криві 1,2) та колоїдним розчином (криві 3,4), при  $|\bar{p}_{,z}| = 100 \text{ Па} / \text{м}$ ,  $\tau_* = 10^{-3} \text{ Па}$ ,  $h = 0.8\bar{\xi}$ ,  $\zeta = \bar{\xi}$ ,  $\bar{\xi} = 10^{-6} \text{ м}$ ,

$$|\bar{p}_{,z}| = 350 \text{ Па} / \text{м} \text{ (криві 1,3)}, \quad |\bar{p}_{,z}| = 1200 \text{ Па} / \text{м} \text{ (криві 2,4)}$$



Бачимо, що віброфільтраційний ефект чутливіший як до природи насичуючої рідини (рис.3,4), відносної товщини верстви зв'язаної води (рис.2), так і до геометричних характеристик порового простору (рис.4) та градієнта тиску (рис.3). При цьому модель з колоїдним розчином більш чутлива до зміни параметрів, ніж модель з водою. А залежність коефіцієнта проникності цих моделей від дисперсії поперечних розмірів каналів  $\zeta^2$  якісно відмінна (рис.4). З ростом градієнта тиску вібраційний ефект меншає (рис.3). Для обох моделей він зростає зі зменшенням дисперсії розподілу каналів за розмірами (рис. 4). Вібраційний ефект збільшується з ростом відносної товщини шару зв'язаної води (тобто, зменшенням середнього розміру каналів при

незмінному  $h$ ) (рис.2). Відносно збільшення коефіцієнта проникності середовища може досягати десятків разів (рис.4), що підтверджується експериментальними даними [2]. Коефіцієнт проникності пористого середовища (за взятих умов, при відсутності резонансних ефектів) зростає як зі збільшенням частоти коливань, так і їх інтенсивності. Залежність ця суттєво проявляється в певній області зміни параметра  $g$ , ширина якої збільшується з ростом дисперсії розмірів каналів, а розташування визначається, в основному, градієнтом тиску, критичним напруженням для зв'язаної рідини та середніми розмірами пор. Поза цією областю вібраційні зміни коефіцієнта проникності незначні.



**Рис. 4. Залежність відносного коефіцієнта проникності від параметра  $g$  для середовища зі щілинами, заповненими водою (а) та колоїдним розчином (б) при  $|\bar{p}_z| = 250 \text{ Па/м}$ ,  $\tau_* = 10^{-3} \text{ Па}$ ,  $\bar{\xi} = 10^{-6} \text{ м}$ ,  $h = 0.8\bar{\xi}$  (а),  $\zeta = 0,5\bar{\xi}$ ,  $\bar{\xi}$ ,  $5\bar{\xi}$  (криві 1,2,3)**

**5. Вібраційна зміна ефективної пористості.** При механічних коливаннях насиченого пористого середовища деструктування шарів зв'язаної води чи колоїду приведе до збільшення об'єму вільного порового простору, тобто, до зростання ефективної [13] пористості. Кількісне дослідження цього ефекту проведемо для середовища, насиченого водою.

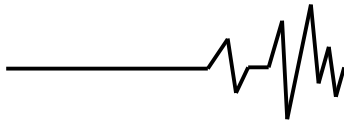
Ефективний коефіцієнт пористості [13] а визначається формулою

$$a = \frac{V_p}{V}, \quad (23)$$

де  $V_p$  – об'єм, який займає вільна рідина,  $V$  – об'єм тіла. Тоді коефіцієнт

$$a^* = \frac{a}{a_0} = \frac{V_{pv}}{V_{p0}}, \quad (24)$$

визначає вплив коливань на ефективну пористість середовища. Тут  $a$ ,  $V_{pv}$  – ефективний коефіцієнт пористості і об'єм порового простору, зайнятого вільною рідиною при дії вібрації в усталеній ситуації, а  $a_0$ ,  $V_{p0}$  – їх значення при відсутності коливань. При цьому  $V_{pv}$  для середовищ зі щілинами та круглими порами визначаються, відповідно, виразами



$$V_{pv} = 2NLb \left\{ \theta(h - l_*^{(1)}) \int_{l_*^{(1)}}^h f(l) dl + \theta(l_*^{(2)} - h) \left[ \int_h^{l_*^{(2)}} f(l)(l - h) dl + \int_{l_*^{(2)}}^{\infty} f(l) dl \right] + \theta(h - l_*^{(2)}) \int_h^{\infty} f(l) dl \right\}; \quad (25)$$

$$V_{pv} = \pi NL \left\{ \theta(h - R_*^{(1)}) \int_{R_*^{(1)}}^h f(R) R^2 dR + \theta(R_*^{(2)} - h) \left[ \int_h^{R_*^{(2)}} f(R)(R - h)^2 dR + \int_{R_*^{(2)}}^{\infty} f(R) R^2 dR \right] + \theta(h - R_*^{(2)}) \int_h^{\infty} f(R) R^2 dR \right\}. \quad (26)$$

Тут  $L$  – довжина пор чи щілин,  $b$  – розмір щілини вздовж осі  $OZ$ ,  $N$  – число каналів в об'ємі  $V$ . За відсутності коливань об'єм  $V_{p0} = V_{pv}(I = 0)$ .

Проводився кількісний аналіз параметра  $a^* = a/a_0$  в залежності від параметра вібрації  $g$  для різних значень дисперсії розмірів пор та товщини пристінкового шару, типу каналів і градієнта тиску. Функція розподілу розмірів каналів бралась у вигляді (22). Встановлено, що вібраційна зміна ефективної пористості може становити десятки і навіть сотні відсотків (рис.5). Вона більша для середовищ, у яких

більше відношення товщини пристінкового шару до середнього розміру пор (рис.5а) та менше розсіяння розмірів пор навколо середнього значення (рис.5b). За однакових умов відносна зміна пористості більша для середовища з круглими порами (рис.6). З ростом градієнта тиску вібраційний ефект зменшується (рис.6). Як і для коефіцієнта проникності, ріст пористості суттєво проявляється лише у певній області зміни параметра  $g$ , поза якою зміною ефективної пористості можна нехтувати.

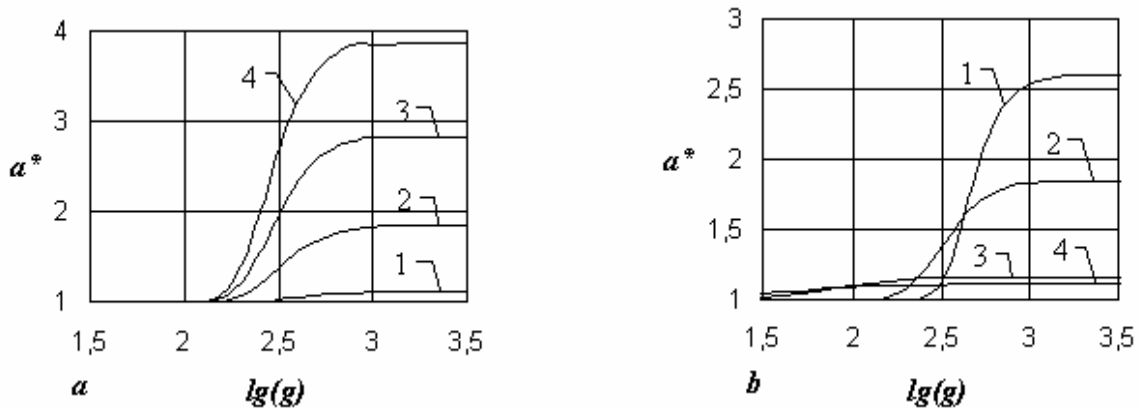
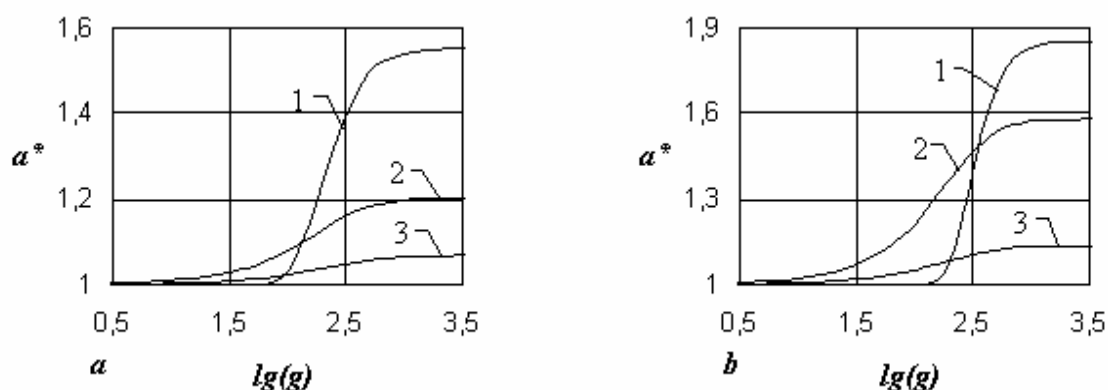
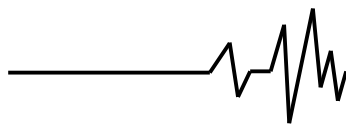


Рис. 5. Залежність ефективної пористості від параметра  $g$  для середовища з круглими порами при  $\tau_* = 10^{-3} Pa$ ,  $\bar{\xi} = 10^{-6} m$ ,  $|\bar{p}_{,z}| = 100 Pa/m$ ,  $\zeta = \bar{\xi}$ ,  $h = 0.1\bar{\xi}, 0.5\bar{\xi}, 0.8\bar{\xi}, \bar{\xi}$  (а, криві 1,2,3,4);  $h = 0.5\bar{\xi}, \zeta = 0.5\bar{\xi}, \bar{\xi}, 5\bar{\xi}, 8\bar{\xi}$  (б, криві 1,2,3,4)



**Рис. 6. Залежність ефективної пористості від параметра  $g$  для середовища зі щілинами (а) та круглими порами (б) при  $\tau_* = 10^{-3} Pa$ ,  $\bar{\xi} = 10^{-6} m$ ,  $h = 0.5\bar{\xi}$ ,  $\zeta = \bar{\xi}$ ,**

$$|\bar{p}_{,z}| = 100 Pa / m, 800 Pa / m, 1500 Pa / m, \text{ (криві 1,2,3)}$$

Відзначимо, що, оскільки коефіцієнт проникності тісно пов'язаний з актуальною ефективною пористістю (динамічною пористістю) [13], то можна було очікувати подібності закономірностей вібраційного впливу на обидва параметри.

**6. Висновки.** Проведені в рамках моделі гетеропористого тіла дослідження фільтрації води та тіксотропного колоїдного розчину в умовах дії механічних коливань показали, що така дія, зумовлюючи перетворення зв'язаної води та гелю у вільну воду і золь, може приводити до суттєвої зміни коефіцієнта проникності середовища, його ефективної пористості. При цьому у випадку фільтрації колоїдного розчину коефіцієнт проникності більш чутливий до зміни параметрів коливань, ніж у випадку фільтрації води. З ростом градієнта тиску вібраційний ефект меншає. Для обох типів рідин він зростає зі зменшенням дисперсії розподілу каналів за розмірами. Вібраційний ефект збільшується з ростом відносної товщини шару зв'язаної води (зменшенням середнього розміру каналів). Відносне збільшення ефективної пористості середовища може становити сотні відсотків, а коефіцієнта проникності - десятки разів, що підтверджується експериментальними даними [2]. Коефіцієнт проникності пористого середовища та ефективна пористість (за взятих умов, при відсутності резонансних ефектів) зростають як зі збільшенням частоти коливань, так і їх інтенсивності. Залежність ця суттєво проявляється в певній області зміни параметра

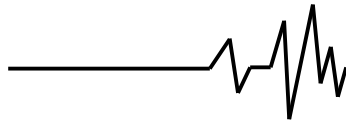
$g = v\sqrt{I}$ , ширина якої збільшується з ростом дисперсії розмірів каналів, а розташування визначається, в основному, градієнтом тиску,

критичним напруженням для зв'язаної рідини та середніми розмірами пор. Поза цією областю вібраційні зміни коефіцієнта проникності незначні.

**Список використаних джерел**

1. Physical Principles of Medical Ultrasonics / Ed. C.R.Hill. - Chichester: Ellis Harwood Limited Publishers, 1986. -
2. Кузнецов О.Л. Преобразование и взаимодействие геофизических полей в литосфере / О.Л. Кузнецов, Е.М. Симкин - Москва: Недра, 1990. - 269 с.
3. Kubik J. Modelling of diffusive transport of chemicals in porous media accounting for solid matrix vibrations / J. Kubik, V. Kondrat, Ye. Chaplia / Studia Geotechnica et Mechanica - 1999. - XXI, No 3-4. - P. 21-29.
4. Фридрихсберг Д.А. Курс коллоидной химии / Д.А. Фридрихсберг - Ленинград: Химия, 1974. - 352 с.
5. Грунтоведение / Под ред. Е.М. Сергеева - Москва: Изд-во Моск. ун-та, 1983. - 392 с.
6. Дерягин Б.В. Поверхностные силы / Б.В. Дерягин, Н.В. Чураев, В.М. Муллер - Москва: Наука, 1985. - 398 с.
7. Королев В.А. Связанная вода в горных породах: новые факты и проблемы / В.А. Королев // Соросовский образовательный журнал, 1996, № 9. - С. 79-85.
8. Овчинников П.Ф. Виброреология / П.Ф. Овчинников - Киев: Наук. думка, 1983. - 272 с.
9. Стебновский С.В. О сдвиговой прочности структурированной воды / С.В. Стебновский // Журнал технической физики, 2004, т. 74, вып. 1. - С. 21-23.





10. Бреховских Л.М. Введение в механику сплошных сред / Л.М. Бреховских, В.В. Гончаров – Москва: Наука, 1982. – 335с.

11. Ландау Л.Д. Теоретическая физика: Учебное пособие. В 10 т. Т. VI. Гидродинамика / Л.Д. Ландау, Е.М. Лифшиц – Москва: Наука, 1986. – 736 с.

12. Biot M.A. Theory of propagation of elastic waves in a fluid-saturated porous solid. II. Higher frequency range / M.A. Biot / J. Acoust. Soc. Of Amer. - 1956. - 28, No 2. – P. 179-191.

13. Кобранова В.Н. Петрофизика / В. Н. Кобранова. - Москва: Недра, 1986. - 392 с.

#### **Список джерел в транслітерації**

1. Physical Principles of Medical Ultrasonics / Ed. C.R.Hill. - Chichester: Ellis Harwood Limited Publishers, 1986. -

2. Kuznetsov O.L. Preobrazovanie i vzaimodijstviye geofizicheskikh polej v litosfere / O.L.Kuznetsov, E.M.Simkin - Moskva: Nedra, 1990. - 269 s.

3. Kubik J. Modelling of diffusive transport of chemicals in porous media accounting for solid matrix vibrations / J. Kubik, V. Kondrat, Ye. Chaplia / Studia Geotechnica et Mechanica. - 1999. - XXI, No 3-4. - P. 21-29.

4. Fridrikhsberg D.A. Kurs kolloidnoi khimii / D.A.Fridrikhsberg - Leningrad: Khimiya, 1974. - 352 s.

5. Gruntovedenie / Pod red. E.M.Sergeeva - Moskva: Izd-vo Mosk. un-ta, 1983. - 392 s.

6. Deriagin B.V. Poverkhnostnyie sily / B.V.Deriagin, N.V.Churaev, V.M.Muller - Moskva: Nauka, 1985. - 398 s.

7. Korolev V.A. Svyazannaya voda v gornykh porodakh: novyie fakty i problemy / V.A. Korolev // Sorosovskyy obrazovatelnyy zhurnal, 1996, № 9. – S. 79-85.

8. Ovchinnikov P.F. Vibroreologiya / Kiev: Naukova dumka, 1983. - 272 s.

9. Stebnovskyy S.V. O sdvigovoy prochnosti strukturirovannoy vody / S.V. Stebnovskyy // Zhurnal tekhnicheskoy fiziki, 2004, t. 74, vyp. 1. – S. 21-23.

10. Brekhovskikh L.M. Vvedenie v mekhaniku sploshnykh sred / L.M.Brekhovskikh, V.V.Honcharov - Moskva: Nauka, 1982. - 335 s.

11. Landau L.D. Teoreticheskaya fizika: Uchebnoie posobie. V 10 t. T. VI. Hidrodinamika / L.D. Landau, E.M. Lifshits - Moskva: Nauka, 1986. - 736 s.

12. Biot M.A. Theory of propagation of elastic waves in a fluid-saturated porous solid. II. Higher frequency range. / M.A. Biot / J. Acoust. Soc. Of Amer. - 1956. - 28, No 2. – P. 179-191.

13. Kobranova V.N. Petrofizika / V.N. Kobranova - Moskva: Nedra, 1986. - 392 s.

## **ВЛИЯНИЕ МЕХАНИЧЕСКИХ КОЛЕБАНИЙ НА ФИЛЬТРАЦИОННЫЙ ПЕРЕНОС МАССЫ В ПОРИСТЫХ ТЕЛАХ**

**Аннотация.** В работе изучается влияние механических колебаний на фильтрационные свойства насыщенной полярной жидкостью или тиксотропным коллоидным раствором пористой среды, его эффективную пористость. Исследуемые вибрационные эффекты связаны с наличием и особыми свойствами структурированной (связанной) жидкости в окрестности поверхности скелета или вибрационными преобразованиями гель-золь в случае насыщения среды коллоидным тиксотропным раствором. С использованием модели гетеропористой среды, вдоль каналов которой распространяется продольная упругая волна, изучено зависимость исследуемых эффектов от параметров колебаний и структурных характеристик среды. Полученные результаты хорошо качественно согласуются с известными экспериментальными. Установлено, в частности, что вибрационное изменение исследуемых эффектов может быть существенным и важным для практики интенсификации массопереноса в пористых телах.

**Ключевые слова:** вибрация, пористый материал, полярная жидкость, тиксотропный коллоидный раствор, фильтрация, связанная жидкость.

## **INFLUENCE OF MECHANICAL VIBRATIONS IN FILTRATION MASS TRANSFER IN POROUS BODIES**

**Annotation.** In this paper we study the influence of mechanical vibrations on the filtration properties of porous medium saturated polar liquid or colloidal tiksotropy solution, its effective porosity. Investigated the effects of vibration associated with the presence and specific properties structured (bounded) liquids in the vicinity of the surface of the skeleton or vibration gel-sol transitions in the case saturation of medium of tiksotropy colloidal solution. For the model heteroporous body along channels which cover the longitudinal elastic wave studied dependent parameters studied effects of vibrations and structural characteristics of the medium. The results are in good agreement with known experimental. Established in particular that the change of the vibrational effects can be significant and important for the practice of intensifying mass transfer in porous bodies.

**Key words:** vibration, porous material, polar liquid, tiksotropy colloidal solution, filtration, bounded liquid.