

Про вплив сорбції хімічних речовин на процес нелінійної фільтраційної консолидації пористого середовища з геобар'єром

<https://doi.org/10.31713/MCIT.2025.097>

Ольга Мічута

Національний університет водного господарства
та природокористування,
м. Рівне, Україна
o.r.michuta@nuwm.edu.ua

Петро Мартинюк

Національний університет водного господарства
та природокористування,
м. Рівне, Україна
p.m.martyniuk@nuwm.edu.ua

Анотація – у роботі розглянуто особливості функціонування геобар'єрів — інженерних штучних тонких включень, створених на основі глинистих та геосинтетичних матеріалів, які застосовуються у полігонах твердих побутових відходів, хвостосховищах і системах захисту ґрунтових вод. Проаналізовано основні типи геобар'єрів, їхню ефективність та обмеження, пов'язані з хімічною сумісністю, деградацією структури й наявністю дефектів. Визначено основні механізми міграції забруднювачів. Запропоновано математичну модель процесів перенесення рідини, тепла і забруднювачів у пористому середовищі з урахуванням тонкого включення, яке імітує геотехнічний бар'єр. Модель описується системою рівнянь фільтраційної консолидації, теплоперенесення, масоперенесення та сорбції з відповідними умовами спряження на тонких включеннях. Для розв'язання задачі використано метод скінченних елементів. Числові експерименти показали, що врахування процесу сорбції істотно впливає на фільтраційні характеристики та консолидації ґрунтового масиву, що підтверджує необхідність урахування цих ефектів під час проектування довговічних геобар'єрів.

Ключові слова: *геобар'єр, фільтрація, дифузія, сорбція, агресивний фільтрат, математичне моделювання, метод скінченних елементів*

I. ВСТУП

Геобар'єри (інженерні бар'єри на основі глини, геосинтетичних матеріалів або їхніх комбінацій) широко застосовуються як інженерні елементи у полігонах твердих побутових відходів, хвостосховищах та системах захисту ґрунтових вод. Їх головна функція — запобігання потраплянню забруднювачів (або мінімізація таких процесів) із техногенних масивів у навколишнє середовище. Проте довготривала ефективність бар'єрів залежить від гідралічної провідності матеріалу, хімічної сумісності, наявності дефектів у геомембранах та деградації їх (бар'єрів) структури з часом.

Існують наступні основні типи геобар'єрів:

1. Композитні лайнери (GM + GCL + CCL). Це багатошарові системи, де геомембрана виконує

роль первинного бар'єру, а глинисті шари забезпечують опір дифузії. Зокрема в роботі [1] показано, що тришарові системи залишаються ефективними навіть за наявності локальних дефектів у мембрані.

2. Вертикальні протифільтраційні стінки (soil-cement-bentonite). Даний тип геобар'єрів використовується для обмеження бокової міграції забруднювачів. В своїй праці [2] автори відмітили, що їхня (геобар'єрів) ефективність значною мірою визначається хімічною сумісністю з агресивними розчинами.
3. GCL (геосинтетичні глиняні бар'єри). В праці [3] автор встановив, що GCL забезпечують низьку дифузію навіть за зменшеного ущільнення, хоча з часом агресивний компонент фільтрату підвищує їхню провідність.

Основними механізмами міграції забруднювачів є:

- Фільтраційний потік: перенесення забруднювачів разом з потоком рідини при наявності градієнта напору.
- Дифузія: основний механізм за умов низьких швидкостей фільтрації та високої концентрації фільтрату.
- Адсорбція та іонний обмін: глини, зокрема бентоніт, мають високу ємність катіонного обміну, що дозволяє тимчасово утримувати метали та органічні сполуки.
- Десорбція та деградація: з часом забруднювачі можуть знову переходити у рухомі форми через зміни pH, йонного складу або розкладу органіки.

Усі ці процеси можуть призвести до зниження захисної функції геобар'єру або навіть до його «пробивання». Тому на даний час з'являються нові виклики (задачі), які потребують вирішення. Зокрема:

1. Довговічність геобар'єру. З часом глини можуть втрачати здатність до набухання, що знижує бар'єрну функцію
2. Хімічна сумісність. Взаємодія з агресивними компонентами фільтрату змінює гідравлічну провідність [4].
3. Стійкі органічні забруднювачі (PFAS). В праці [5] автори відзначили низьку ефективність традиційних бар'єрів проти PFAS, що вимагає нових або модифікованих матеріалів.

Одним із способів прогнозування перебігу процесів в пористих середовищах з геобар'єрами є математичне та комп'ютерне моделювання. [6, 7] Аналітичні та чисельні моделі дають змогу прогнозувати час «пробивання» бар'єру. Наприклад, в роботі [8] автори запропонували аналітичне рішення для композитної стінки SB–GCL–SB з урахуванням адвенції, дифузії та адсорбції, що є корисним інструментом для довгострокових прогнозів.

II. МАТЕМАТИЧНА МОДЕЛЬ ЗАДАЧІ.

Об'єктом моделювання є обмежена розрахункова область Ω , що складається з двох підобластей Ω_1 та Ω_2 , які представляють шари ґрунту. Ці підобласті розділені тонким включенням Ω товщиною d , яке імітує геотехнічний бар'єр (геобар'єр). Схематичне зображення розрахункової області наведено на рис. 1.

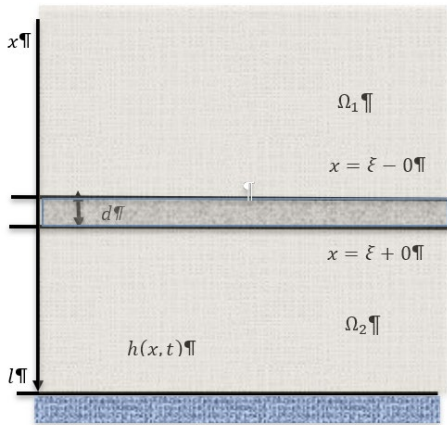


Рис. 1. Шар ґрунту товщиною l з тонким включенням товщиною d

Фізична складність системи полягає у значному контрасті властивостей між основним середовищем і включенням, що призводить до появи стрибків у функціях температури, напору та концентрації. Це вимагає введення відповідних умов спряження. Схожі задачі вже розглядалися нами раніше [9, 10].

Математична модель задачі містить наступні рівняння:

$$\begin{aligned} \frac{\partial h}{\partial t} &= \frac{1+e}{\gamma a} \frac{\partial}{\partial x} \left(k^*(C, h, T) \frac{\partial h}{\partial x} - v \frac{\partial C}{\partial x} - \mu(h) \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \\ &\quad \varepsilon \frac{1+e}{\gamma a \delta} \left[n \frac{\partial C}{\partial t} - e \frac{\partial N}{\partial t} \right], \quad x \in \Omega_1 \cup \Omega_2, t \in (0, t], t > 0 \quad (1) \\ c_s(h) \frac{\partial T}{\partial t} &= \frac{\partial}{\partial x} \left(\lambda(h) \frac{\partial T}{\partial x} \right) - \rho_\omega c_\omega u(h, T) \frac{\partial T}{\partial t}, \quad x \in \Omega_1 \cup \Omega_2, t > 0; \quad (2) \end{aligned}$$

$$n \frac{\partial C}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(D \frac{\partial C}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial x} \left(D_T \frac{\partial T}{\partial x} \right) - u(C, h, T) \frac{\partial C}{\partial x} - \frac{\partial N}{\partial t}, \quad x \in \Omega_1 \cup \Omega_2, t > 0; \quad (3)$$

$$\frac{\partial N}{\partial t} = \gamma_1 (C n_0 - \alpha(T) N), \quad x \in \bar{\Omega}_1 \cup \bar{\Omega}_2, t > 0. \quad (4)$$

Дані рівняння (1)-(4) доповнюються початковими та граничними умовами:

$$\begin{aligned} h(x, 0) &= h_0(x), \quad C(x, 0) = C_0(x), \\ T(x, 0) &= T_0(x), \quad N(x, t)|_{x=0} = N_0(x), \quad x \in \bar{\Omega}_1 \cup \bar{\Omega}_2; \\ h(x, t)|_{x=0} &= h_0(t), \quad t \geq 0; \\ u(x, t)|_{x=l} &= \left(-k^*(C, h, T) \frac{\partial h}{\partial x} + v \frac{\partial C}{\partial x} + \mu(h) \frac{\partial T}{\partial x} \right) |_{x=l} = 0, \quad t \geq 0; \\ T(x, t)|_{x=0} &= T_0(t), \quad t \geq 0 \quad q_T(x, t)|_{x=l} = 0 \\ &= -\lambda(h) \frac{\partial T}{\partial x} |_{x=l} = 0, \quad t \geq 0 \\ C(x, t)|_{x=0} &= C_0(t), \\ q_C(x, t)|_{x=l} &= -D \frac{\partial C}{\partial x} - D_T \frac{\partial T}{\partial x} |_{x=l} = 0 \end{aligned}$$

Умови спряження на тонкому включенні:

- Для напору:

$$\begin{aligned} u^+|_{\xi=d} &= - \int_0^d \frac{\partial \sigma_0(T, \zeta)}{\partial T} \frac{\partial T(\zeta, t)}{\partial t} d\zeta - \\ &\quad \int_0^d \frac{\partial \sigma_0(C, \zeta)}{\partial C} \frac{\partial C(\zeta, t)}{\partial t} d\zeta + \frac{1}{\rho} \int_0^d \frac{\partial N(\zeta, t)}{\partial t} d\zeta - \\ &\quad \frac{1}{\int_0^d \frac{\partial \zeta}{k_h(C, N, T)} d\zeta} \left([h] - \int_0^d \frac{1}{k_h(C, N, T)} \int_0^\zeta \frac{\partial \sigma_0(C, z)}{\partial C} \frac{\partial C(z, t)}{\partial t} dz d\zeta - \right. \\ &\quad \left. \int_0^d \frac{1}{k_h(C, N, T)} \int_0^\zeta \frac{\partial \sigma_0(T, z)}{\partial T} \frac{\partial T(z, t)}{\partial t} dz d\zeta + \int_0^d \frac{1}{k_h(C, N, T)} \cdot \right. \\ &\quad \left. \frac{1}{\rho} \int_0^\zeta \frac{\partial N(z, t)}{\partial t} dz d\zeta - \frac{[C]}{d} \int_0^d \frac{k_C(C, N, T)}{k_h(C, N, T)} d\zeta - \right. \\ &\quad \left. \frac{[T]}{d} \int_0^d \frac{k_T(C, N, T)}{k_h(C, N, T)} d\zeta \right), \\ u^-|_{\xi=0} &= - \frac{1}{\int_0^d \frac{\partial \zeta}{k_h(C, N, T)} d\zeta} \left([h] - \right. \\ &\quad \left. \int_0^d \frac{1}{k_h(C, N, T)} \int_0^\zeta \frac{\partial \sigma_0(C, z)}{\partial C} \frac{\partial C(z, t)}{\partial t} dz d\zeta - \right. \\ &\quad \left. \int_0^d \frac{1}{k_h(C, N, T)} \int_0^\zeta \frac{\partial \sigma_0(T, z)}{\partial T} \frac{\partial T(z, t)}{\partial t} dz d\zeta + \int_0^d \frac{1}{k_h(C, N, T)} \cdot \right. \\ &\quad \left. \frac{1}{\rho} \int_0^\zeta \frac{\partial N(z, t)}{\partial t} dz d\zeta - \frac{[C]}{d} \int_0^d \frac{k_C(C, N)}{k_h(C, N)} \frac{\partial C}{\partial \zeta} d\zeta - \right. \\ &\quad \left. \frac{[T]}{d} \int_0^d \frac{k_T(C, N, T)}{k_h(C, N, T)} d\zeta \right), \end{aligned}$$

- Для температури:

$$q_T^\pm|_{x=\xi} = - \frac{[T]}{\int_0^d \frac{dx}{\lambda_\omega(h)}}$$

- Для концентрації хімічних речовин:

$$q_C^\pm|_{x=\xi} = - \frac{[C]}{\int_0^d \frac{dx}{v_\omega}} - \frac{[T]}{\int_0^d \frac{dx}{D_{T\omega}}}$$

Числовий розв'язок вищенаведеної задачі знайдений методом скінчених елементів. Результати числових експериментів показали, що врахування процесу сорбції має значний вплив на величину просідань масиву ґрунту із геобар'єром.

Література.

1. Li, J. et al. Review of the Anti-Pollution Performance of Triple-Layer Composite Liners. // *Membranes* 2022, 12(10), 922. <https://doi.org/10.3390/membranes12100922>.
2. Cao B, Xu J, Wang F, Zhang Y, O'Connor D. Vertical Barriers for Land Contamination Containment: A Review. *International Journal of Environmental Research and Public Health*. 2021; 18(23):12643. <https://doi.org/10.3390/ijerph182312643>
3. Lake, C.B. Migration of leachate constituents through a geosynthetic clay liner., // *Clay Geosynthetic Barriers*, 2022, DOI: 10.1201/9781003078777-21
4. Bannour, H. (2023). Effect of the durability of GCLs on Contaminants transfer through a composite liner exhibiting a hole in the geomembrane: A numerical approach. Conference Paper // 4th African Regional Conference on Geosynthetics (GeoAfrica 2023) <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202336802001>
5. Gates, W.P. et al. Review on PFAS interactions with landfill liners. // *Applied Clay Science*, 2020, 1(4): 007. doi:10.21926/aecer.2004007.
6. Michuta, O., Ivanchuk, N., Martyniuk, P., Ostapchuk, O. A finite-element study of elastic filtration in soils with thin inclusions // *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 2020, 5(5-107), pp. 41–48 <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2020.215047>
7. Michuta, O., Ivanchuk, N., Martyniuk, P., Ostapchuk, O. A finite-element study of elastic filtration in soils with thin inclusions // *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 2020, 5(5-107), pp. 41–48 <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2020.215047>
8. Peng, X. et al. (2024). Analytical Solution for Contaminant Transport through SB–GCL–SB Composite Walls. *Processes*.]
9. O. Ulianchuk-Martyniuk and O. Michuta Conjugation conditions in the problem of filtering chemical solutions in the case of structural changes to the material and chemical suffusion in the geobarrier // *JP Journal of Heat and Mass Transfer*. 2020, Volume 19, Number 1, 2020, Pages 141-154. <http://dx.doi.org/10.17654/HM019010141>
10. Michuta Olha R., Martyniuk Petro M. Nonlinear Evolutionary Problem of Filtration Consolidation With the Non-Classical Conjugation Condition // *Journal of Optimization, Differential Equations and their Applications*, 2022, 30(1), pp. 71–87. DOI: <http://dx.doi.org/10.15421/142203>