

Н.М. Гулієва, Л.М. Самчук, Т.Є. Божко

Луцький національний технічний університет

ДОСЛІДЖЕННЯ ГІДРАВЛІЧНОЇ ПРОНИКНОСТІ САПОНІТ – ТИТАНОВИХ ФІЛЬТРІВ

У статті представлено результати експериментальних досліджень гідравлічної проникності сапоніт – титанових фільтрів. Фільтрувальний матеріал отримано методом гідравлічного сухого пресування із наступним спіканням на основі сапоніту як природного алюмосилікатного адсорбенту та титану як структуроутворюючого компонента.

Проведено аналіз пористості матеріалу та встановлено залежність коефіцієнта проникності від гранулометричного складу. Виявлено оптимальні параметри мікроструктури, що забезпечують ефективне поєднання механічної міцності та високої фільтраційної здатності. Отримані результати можуть бути використані при створенні нових типів керамічних фільтрів для очищення рідин і газів у хімічній, екологічній та енергетичній галузях.

Ключові слова: сапоніт–титанові композиційні фільтри, гідравлічна проникність, порова структура, пористість, гранулометричний склад, мікроструктурні характеристики.

Н.М. Hulieva, L.M. Samchuk, T.Ye. Bozhko

STUDY OF HYDRAULIC PERMEABILITY OF SAPONITE – TITANIUM FILTERS

The paper presents the results of experimental studies of the hydraulic permeability of saponite – titanium filters. The filtering material was obtained by the method of hydraulic dry pressing with subsequent sintering based on saponite as a natural aluminosilicate adsorbent and titanium as a structure-forming component.

The porosity of the material was analyzed and the dependence of the permeability coefficient on the particle size distribution was established. The optimal microstructure parameters were identified, which provide an effective combination of mechanical strength and high filtration capacity. The results obtained can be used in the creation of new types of ceramic filters for the purification of liquids and gases in the chemical, environmental and energy industries.

Keywords: saponite–titanium composite filters, hydraulic permeability, pore structure, porosity, particle size distribution, microstructural characteristics.

Постановка проблеми. Сучасний розвиток промисловості, сільського господарства та комунального господарства супроводжується зростанням потреби в ефективних системах очищення рідин, зокрема води. Однією з головних вимог до таких систем є поєднання високої фільтрувальної здатності, хімічної та механічної стійкості, а також довговічності фільтрувальних матеріалів. У цій проблематиці особливу увагу привертають композиційні фільтрувальні матеріали на основі природних мінералів та металів.

Сапоніт, як представник шаруватих силікатів, характеризується високою сорбційною здатністю, розвиненою питомою поверхнею та екологічною безпечністю [1]. Титан і титанові сполуки, у свою чергу, відзначаються високою корозійною стійкістю, механічною міцністю та стабільністю в агресивних середовищах [2]. Поєднання сапоніту з титановою матрицею дає змогу створювати перспективні фільтрувальні матеріали з покращеними експлуатаційними характеристиками [3].

Однією з найважливіших характеристик фільтрів є їх гідравлічна проникність, яка визначає здатність матеріалу пропускати рідину під дією перепаду тиску. Саме цей параметр суттєво впливає на продуктивність фільтра, енерговитрати процесу фільтрації та ефективність очищення. Тому дослідження гідравлічної проникності сапоніт–титанових фільтрів є актуальним науково-практичним завданням.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. За останнє десятиліття інтерес до композитів на основі глин (бентоніту, сапоніту) і титанових добавок (TiO₂ або металевий титан) зріс через поєднання адсорбційних, каталізаційних властивостей таких матеріалів. Дослідження охоплюють як експериментальні роботи з отримання і випробування фільтрів, так і моделювання гідродинаміки в реалістичній мікроструктурі пористих матеріалів [4].

Наведені експериментальні дані щодо проникності та порової структури сапоніту як мінерального наповнювача, що забезпечує високу питому поверхню, розвинену мікропористість і значну водовбирну здатність та впливає на формування фільтраційного шару, що змінює ефективну гідравлічну проникність [5].

Досліджена інтеграція титану або TiO₂ у матрицю, яка може мати подвійний ефект: з однієї сторони – покращує міцність, гідрофільність і антифуалінгові (фотокаталітичні) властивості,

з іншої – при певних умовах зменшує середній розмір пор і, як наслідок, знижує прохідність. Кількісні ефекти залежать від форми (наночастинки, плівка, нитки), локалізації в структурі та концентрації добавки [6–8].

Сучасні роботи застосовують поєднання мікроструктурної цифрової обробки (мікро-СТ, SEM) з чисельними рішеннями (Нав'є Стока) для обчислення ефективної гідравлічної провідності матеріалів з необхідною пористістю. Такі підходи вже були успішно застосовані для подібних глиняних композитів [9].

Результати показують, що сапоніт–титанові композити перспективні для фільтрації питної та стічної води (комбінація адсорбції домішок та фотокаталітичного знезараження TiO_2), а також для створення керамічних або мембранних матеріалів з підвищеною стійкістю до забруднення. Проте межа між проникністю (продуктивністю) і ступенем очищення/адсорбцією залишається головним при проектуванні [10].

Актуальність дослідження полягає в перспективності сапоніт – титанових композитів як фільтруючих матеріалів із корисними адсорбційно-каталітичними властивостями, проте кількісні дослідження саме гідравлічної проникності таких систем поки що фрагментарні. Щоб перейти від лабораторних демонстрацій до інженерного застосування, необхідно провести стандартизовані експерименти із серією зразків із мікроструктурним моделюванням та дослідженням експлуатаційної властивостей фільтрів.

Метою даного дослідження є визначення закономірностей формування порової структури та кількісна оцінка гідравлічної проникності сапоніт–титанових фільтрів залежно від складу, умов виготовлення та структурних характеристик.

Викладення основного матеріалу. Для науково-експериментального дослідження використовували сапоніт-титанові фільтри [11] з різною поровою прохідністю фільтрувального матеріалу (табл. 1). Товщина фільтрувального шару становила $L=50$ мм із в'язкістю води $\mu=1,0 \times 10^{-3}$ Па·с та щільністю $\rho=1000$ кг/м³.

Табл. 1

Порова прохідність фільтрувального матеріалу

Велика, (режим А)	Середня, (режим Б)	Тонка, (режим В)
к, м ²		
$1,0 \times 10^{-10}$	$1,0 \times 10^{-11}$	$1,0 \times 10^{-12}$

Для оцінки напору використовували закон Дарсі для фільтрації:

$$\Delta P = \mu \frac{V}{k} L \quad (1)$$

де V – швидкість потоку, м/с.

Обчислення в метрах водяного стовпчика:

$$h = \frac{\Delta P}{\rho g} \quad (2)$$

При режимі А, великій прохідності пористого фільтрувального матеріалу та середньому розмірі пор $\approx 50\text{--}100$ μm спостерігається висока пропускна здатність, переважно поверхневе очищення. Де швидкість фільтрування V становить $0,0013888889$ м/с.

За формулою (1) визначаємо напір для режиму Б:

$$\Delta P = 1,0 \times 10^{-3} \times \frac{0,0013888889}{1,0 \times 10^{-10}} \times 0,05 = 694,444 \text{ Па.}$$

За формулою (2) проводиться обчислення для режиму Б в метрах водяного стовпчика:

$$h = \frac{694,444}{1000 \times 9,81} \approx 0,071 \text{ м.в.ст.}$$

Сапоніт – титановий фільтр великої прохідності має такі технічні характеристики:

- велику пропускну здатність, малу ймовірність забруднення дрібними колоїдами;
- видалення частинок розміром $> \sim 50$ μm ;
- високу ефективність (> 95 %);
- не дуже ефективний для дрібних колоїдів (розчинених домішок) – може знадобитися коагуляція (адсорбція).
- рідке промивання;
- перепад тиску на допустимому рівні ($\sim < 0,2 - 0,5$ м) довший час.

При режимі *B*, середній прохідності пористого фільтрувального матеріалу для середнього розміру пор $\approx 5\text{--}20\ \mu\text{m}$ спостерігається менша пропускна здатність, переважно поверхнєве очищення. Де швидкість фільтрування V становить $0,00027777778\ \text{м/с}$.

За формулою (1) визначаємо напір для режиму *B*:

$$\Delta P = 1,0 \times 10^{-3} \times \frac{0,00027777778}{1,0 \times 10^{-11}} \times 0,05 = 1388,8889\ \text{Па.}$$

За формулою (2) проводиться обчислення для режиму *B* в метрах водяного стовпчика:

$$h = \frac{1388,8889}{1000 \times 9,81} \approx 0,142\ \text{м.в.ст.}$$

Сапоніт – титановий фільт середньої прохідності має такі властивості:

- видалення частинок середнього розміру ($\geq 5\ \mu\text{m}$);
- дуже добре очищення (80–98 % залежно від розподілу частинок).
- частинки $< 1\text{--}2\ \mu\text{m}$ частково захоплюються в глибині, але ефективність нижча;
- для поліпшення необхідно застосовувати коагулянти або тонкопористий верхній шар.
- частіше обслуговування, ніж у великопористому режимі;
- важливий контроль ΔP ,
- необхідно планувати коагуляцію при досягненні порогу (наприклад, $+0,2\text{--}0,3\ \text{м}$).

При режимі *B*, тонкопоровій прохідності пористого фільтрувального матеріалу при середньому розмірі пор $\approx 0,5\text{--}2\ \mu\text{m}$ спостерігається низька пропускна здатність та високоефективне фільтрування. Де поверхнєва швидкість фільтрування V становить $5,5555556 \times 10^{-5}\ \text{м/с}$.

За формулою (1) визначаємо напір для режиму *B*:

$$\Delta P = 1,0 \times 10^{-3} \times \frac{5,5555556 \times 10^{-5}}{1,0 \times 10^{-12}} \times 0,05 = 2777,7778\ \text{Па;}$$

За формулою (2) проводиться обчислення для режиму *B* в метрах водяного стовпчика:

$$h = \frac{2777,7778}{1000 \times 9,81} \approx 0,283\ \text{м.в.ст.}$$

Сапоніт – титановий фільт тонкої прохідності має такі технічні властивості:

- високу ефективність видалення дрібних частинок та значне зменшення мутності;
- може затримувати частинки розміром $\sim 1\ \mu\text{m}$ і більші;
- значно більший перепад тиску при тій же товщині шару;
- потребує нижчих швидкостей, частішого промивання або більшої насосної потужності.
- краща адсорбційність сапоніту;
- видалення важких іонів та органічних речовин.

Для збереження пропускної здатності зазвичай виготовляють градієнтні фільтри [12] з декількох шарів: верхній тонкопористий шар для тонкого освітлення та внутрішній шар для механічної очистки.

За результатами науково-експериментальних встановлено, що гідравлічна проникність сапоніт – титанових фільтрів суттєво залежить від гранулометричного складу та співвідношення композиту, що визначають формування мікроструктури матеріалу. Для трьох експериментальних режимів виготовлення фільтрів (табл. 1) коефіцієнт проникності k змінювався в межах від $1,0 \times 10^{-10}\ \text{м}^2$ до $1,0 \times 10^{-12}\ \text{м}^2$, що відповідає переходу від крупнопористої до тонкопористої структури.

У зразках режиму *A*, де переважають макропори розміром $50\text{--}100\ \mu\text{m}$, спостерігалася висока пропускна здатність при швидкості фільтрування близько $5\ \text{м/год}$. Такі фільтри характеризуються мінімальним гідравлічним опором і забезпечують ефективне видалення механічних домішок розміром понад $50\ \mu\text{m}$. Проте через переважно поверхнєве затримання домішок їх ефективність щодо дрібнодисперсних частинок є обмеженою. Це свідчить про те, що в макропористих структурах основним механізмом є грубе фільтрування, тоді як адсорбційна складова сапоніту практично не реалізується.

Для середньопористих зразків (режим *B*) зі середнім розміром пор $5\text{--}20\ \mu\text{m}$ коефіцієнт проникності $k=1,0 \times 10^{-11}\ \text{м}^2$. Швидкість фільтрування становить близько $1\ \text{м/год}$, що забезпечує видалення частинок середнього розміру ($\geq 5\ \mu\text{m}$) із загальною ефективністю очищення 80–98 %. У таких композитах відбувається комбінований механізм фільтрації – поверхнєве осідання частинок поєднується з їх частковим захопленням у глибині пор. Це забезпечує стабільну роботу фільтра при

помірних витратах енергії, проте вимагає періодичного промивання для запобігання росту гідравлічного опору.

Найменший коефіцієнт проникності ($1,0 \times 10^{-12} \text{ м}^2$) спостерігався у зразках режиму *B*, де середній розмір пор становить $0,5\text{--}2 \text{ мкм}$. Відповідно, швидкість фільтрування знижується до $0,2 \text{ м/год}$, але ефективність видалення частинок підвищується до майже 100% . Підвищений перепад тиску на фільтрі свідчить про необхідність роботи при менших швидкостях або застосування градієнтної системи фільтрації (рис. 1). В даних зразках чітко проявляється адсорбційна здатність сапоніту – завдяки кращій пористості спостерігалось помітне зниження кольоровості та мутності води, що вказує на додаткове видалення розчинених органічних речовин та іонів важких металів.

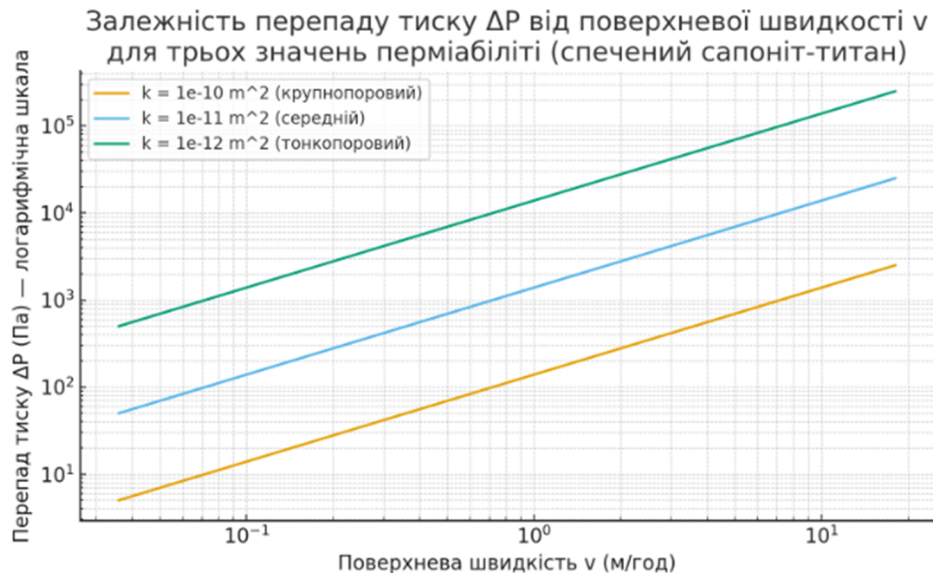


Рис.1. Градієнтна система фільтрації

Порівняння результатів експерименту з літературними даними [2–6] показало узгодженість отриманих значень коефіцієнтів проникності з відомими моделями пористих алюмосилікатних композитів. Спостерігається типовий степеневий зв'язок між коефіцієнтом проникності k та середнім діаметром пор d виду $k \sim d^{2,5-3,0}$, що підтверджує переваги ламінарного режиму течії (закон Дарсі). Додатково встановлено, що збільшення частки титану у композиції (більше 30%) спричиняє часткове ущільнення структури та зменшення ефективної пористості на $10\text{--}15 \%$, що знижує проникність, але підвищує механічну міцність фільтра.

Мікроструктурний аналіз показав, що наявність титанових включень сприяє формуванню стійкої зв'язаної сітки пор, яка забезпечує рівномірний розподіл потоків і зменшує ризик локального засмічення. Це особливо важливо для довготривалого використання фільтрів у динамічних умовах. Визначені оптимальні співвідношення параметрів пористості ($30\text{--}35 \%$) і проникності (10^{-11} м^2), що забезпечують баланс між продуктивністю та якістю очищення.

Отже, результати експерименту свідчать, що сапоніт–титанові фільтри можуть бути ефективно використані для попереднього й тонкого очищення води, а також як базові елементи в багатошарових мембранних системах. Наступні дослідження доцільно спрямувати на вивчення впливу тривалого циклічного навантаження на стабільність гідравлічної проникності та кореляцію між мікроструктурою та адсорбційною активністю матеріалу.

Висновки.

1. Проведені експериментальні дослідження показали, що гідравлічна проникність сапоніт – титанових фільтрів суттєво залежить від гранулометричного складу та співвідношення компонентів композиту. Зменшення середнього розміру пор із $50\text{--}100 \text{ мкм}$ до $0,5\text{--}2 \text{ мкм}$ супроводжується зниженням коефіцієнта проникності з $1,0 \times 10^{-10}$ до $1,0 \times 10^{-12} \text{ м}^2$ та підвищенням ефективності фільтрації від 90 до $99\text{--}100 \%$.

2. Оптимальні фільтраційні властивості досягаються при середньопористій структурі (режим *B*) із коефіцієнтом проникності $k \approx 1,0 \times 10^{-11} \text{ м}^2$, де забезпечується баланс між пропускною здатністю, якістю очищення та енергетичними витратами.

3. Встановлено, що титанові включення виконують функцію структуроутворюючого компонента, який підвищує механічну міцність і стабільність мікропористої структури. При вмісті

титану понад 30 % спостерігається ущільнення матриці, зменшення ефективної пористості на 10–15 % та відповідне зниження проникності.

4. У зразках із дрібнопористою структурою (режим *B*) чітко проявляється адсорбційна активність сапоніту, що забезпечує додаткове видалення розчинених органічних речовин і важких іонів. Це вказує на можливість поєднання механічної та сорбційної фільтрації в одному матеріалі.

5. Порівняння експериментальних результатів із відомими літературними даними підтвердило відповідність отриманих коефіцієнтів проникності класичним закономірностям Дарсі та степеневій залежності $k \sim d^{2,5-3,0}$, характерній для пористих алюмосилікатних композитів.

6. Отримані результати свідчать про перспективність використання сапоніт – титанових композитів для створення ефективних фільтраційних елементів у системах очищення рідин і газів. Наступні дослідження доцільно спрямувати на аналіз довготривалої стабільності проникності, впливу температурних режимів і циклічних навантажень на експлуатаційні характеристики фільтрів.

Список використаних джерел

1. Huliieva N.M., Somov D.O., Pasternak V.V., Samchuk L.M., Chetverzhuk T.I. The selection of boron nitride circles for grinding saponite – titanium composites using non-parametric method. *Latvian Journal of Physics and Technical Sciences*. 2020. Vol. 57(6). P. 36-47. DOI: 10.2478/lpts-2020-0033
2. Bouchelaghem F., Pusch R. Fluid flow and effective conductivity calculations on numerical images of bentonite microstructure. *Applied Clay Science*. 2017. Vol. 144. P. 9-18. DOI: 10.1016/j.clay.2017.04.023
3. Brochard L. Swelling of montmorillonite from molecular simulations: hydration diagram and confined water properties. *Phys. Chem*. 2021. Vol. 125 P. 15527-15543. Режим доступу – <https://pubs.acs.org/doi/10.1021/acs.jpcc.1c02659>
4. Kageshima Yo., Yagawa K., Teshima K., Nishikiori H. Photoinduced cooling effect of water-retentive composite of TiO₂ and saponite. *Applied Clay Science*. 2025, Vol. 267. P. 107712. DOI: 10.1016/j.clay.2025.107712
5. Sokol H., Sprynskyy M., Ganzyuk A., Raks V. Buszewski B. Structural, Mineral and Elemental Composition Features of Iron-Rich Saponite Clay from Tashkiv Deposit (Ukraine). *Colloids and Interfaces*. 2019. Vol. 3(1). P. 10. DOI: 10.3390/colloids3010010
6. Birsan Iu.-G., Pintilie S.C., Pintilie L.G., Lazar A.L., CIRCUMARU A., Balt S. New Understanding of the Difference in Filtration Performance between Anatase and Rutile TiO₂ Nanoparticles through Blending into Ultrafiltration PSF Membranes. *Membranes*, 2021. Vol. 11 P. 841. Режим доступу – <https://www.mdpi.com/2077-0375/11/11/841>
7. Pasternak, V., Samchuk, L., Huliieva, N., Andrushchak, I., Ruban, A. Investigation of the Properties of Powder Materials Using Computer Modeling. *Materials Science: Forum* is disabled. 2021, 1038 MSF, P. 33–39. DOI: 10.4028/www.scientific.net/MSF.1038.33
8. Viccione G., Evangelista S., De Marinis G. Experimental Analysis of the Hydraulic Performance of Filtering Cartridges in Drinking Water Networks. *Water*. 2018. Vol. 10(5). P. 629. DOI: 10.3390/w10050629
9. Coelho Jo.S.T., P'erez-Sanchez M., Coronado-Hernandez O.E., Besharat M., Feng R.-L., Tasca E., Zhou L., Ramos H.M. Hydropneumatic storage methodology towards a new era of hybrid energy system's efficiency and flexibility. *Results in Engineering*. 2024. Vol. 24. P. 103117. DOI: 10.1016/j.rineng.2024.103117
10. Matei S., Stoicanescu M., Bela V., Tiron E., Crisan A. Bentonite-based composites with ceramic and metallic powders additions for use as filters. *Advances in Mechanical Engineering*. 2021. Vol. 13(4). P. 15. DOI: 10.1177/16878140211011888
11. Huliieva N.M., Pasternak V.V. Isothermal mechanical Cycling of Saponite–Titanium Composites in Conditions of Complex Stressed State. *Latvian Journal of Physics and Technical Sciences*. 2022. Vol. 59(6). P. 12–21. DOI: 10.2478/lpts-2022-0043.
12. Zabolotnyi O., Sychuk V.A., Povstyanoi O. Yu., Somov D. Slabkyi A. Obtaining of Highly Efficient Powdered Filtering Materials for Cleaning Liquids and Gases. *Management of Manufacturing Systems: 3rd EAI International Conference. MMS 2018, November 06-08, Dubrovnik, Croatia*. P. 1-10. DOI: 10.4108/eai.6-11-2018.2279607