

Ідентифікація домішкових компонент у процесі магнітного фільтрування рідких середовищ

<https://doi.org/10.31713/MCIT.2024.098>

Андрій Сафоник
Національний університет водного
господарства та природокористування
м. Рівне, Україна
a.p.safonyk@nuwm.edu.ua

Сергій Полухович
Національний університет водного господарства
та природокористування
м. Рівне, Україна
s.o.polyukhovych@nuwm.edu.ua

Володимир Грицюк
Надслучанський інститут
Національний університет водного господарства та природокористування
м. Березне, Україна
v.v.hrytsiuk@nuwm.edu.ua

Анотація – модель процесу магнітного осадження домішок у пористих фільтрувальних насадках, яка враховує зворотний вплив характеристик процесу (концентрації осаду) на параметри фільтрації. Розроблено алгоритм розв'язку нелінійної оберненої задачі для визначення масообмінного коефіцієнта, що дозволяє суттєво наблизити числові результати до експериментальних даних. Модель дає змогу точніше прогнозувати ефективність очищення рідких середовищ у водно-дисперсних системах.

Ключові слова – модель магнітного осадження, обернена задача, ідентифікація, умова перевизначення, асимптотичний розв'язок, збурення.

I. ВСТУП

У сучасних умовах якісне очищення рідких середовищ від домішок є вкрай важливим для різних галузей, таких як водоочистення, хімічна і фармацевтична промисловість, а також екологічний захист. Це завдання є особливо актуальним для промислових процесів, де навіть незначні домішки можуть негативно впливати на кінцевий продукт або процес, наприклад, у виробництві фармацевтичних препаратів або очищенні стічних вод.

Серед багатьох технологій для очищення рідин, магнітне фільтрування виявляється ефективним завдяки здатності видаляти дрібні частинки домішок за допомогою намагнічених фільтрувальних насадок. Ці фільтрувальні насадки мають особливу структуру пор, через які проходить рідина. Під дією магнітного поля, дрібні частинки, наявні в рідині, осаджуються на стінках цих пор або залишаються всередині них. Такий підхід дозволяє значно покращити очищення, оскільки більшість частинок, що могли б пройти через традиційні фільтри, утримуються магнітним полем.

Однак, існуючі математичні моделі, які описують процеси магнітного осадження домішок,

мають обмеження. Більшість аналітичних моделей (як зазначено у джерелах [1-4]) не враховують повністю зворотного впливу характеристик самого процесу на систему. Наприклад, у процесі фільтрації змінюється пористість середовища, а накопичення осаду впливає на швидкість фільтрації. Крім того, концентрація домішок, які осаджуються, змінює характеристики процесу, що ускладнює точність прогнозування. Відсутність цих корекцій в моделях призводить до значної похибки у розрахунках ефективності фільтрації.

Особливу увагу також варто приділити масообмінним коефіцієнтам, які визначають інтенсивність переносу частинок домішок у пористому середовищі фільтру. Експериментальні дані, наведені у деяких роботах ([3, 4]), дають загальне уявлення про цей процес, але не розкривають всіх деталей. Наявність цих прогалів вимагає створення нових підходів для математичного моделювання процесів осадження домішок.

Запропонована нелінійна модель магнітного осадження домішок у фільтрувальних насадках враховує зворотний вплив характеристик процесу (таких як зміна пористості середовища або концентрація осаду) на його параметри. Такий підхід дозволяє наблизити модель до реальних умов фільтрації. Окрім цього, важливим аспектом є точне визначення масообмінних коефіцієнтів за допомогою вирішення нелінійних обернених задач. Це забезпечує не тільки підвищення точності розрахунків, але й покращує прогнозування ефективності процесу очищення, що є надзвичайно важливим у промислових системах водопідготовки та очищення рідин.

Таким чином, розробка такої моделі дозволяє значно підвищити ефективність технологічних систем очищення рідких середовищ, що є ключовим для багатьох галузей промисловості. Це відкриває

нові можливості для оптимізації процесів фільтрації і забезпечення високої якості очищення.

II. ПОСТАНОВКА ЗАДАЧІ

Розглянемо просторово-одномірний процес очищення рідини шляхом фільтрації у фільтрі-шарі товщиною L , який ототожнюється з відрізком $[0, L]$ осі x . Припустимо [3], що частинки забруднення можуть переходити з одного стану в інший (процеси захоплення-відриву, сорбції-десорбції), при цьому відбувається вплив відповідних концентрацій на характеристики шару, що розглядається. Відповідний процес фільтрації, з урахуванням зворотного впливу характеристик процесу (концентрації забруднення рідини та осаду) на параметри середовища (коефіцієнти пористості, фільтрації, масообміну тощо за аналогією з [3, 4]), опишемо наступною модельною задачею:

$$\begin{cases} \frac{\partial(\sigma(\rho)c(x,t))}{\partial t} + \frac{\partial\rho(x,t)}{\partial t} + v\frac{\partial c(x,t)}{\partial x} = 0, \\ \frac{\partial\rho(x,t)}{\partial t} = \beta c(x,t) - \varepsilon\alpha(t)\rho(x,t), \end{cases} \quad (1)$$

$$c|_{x=0} = c^*(t), \quad c|_{x=L} = 0, \quad \rho|_{t=0} = 0, \quad (2)$$

$$\alpha(t) \int_0^L \rho(\tilde{x}, t) d\tilde{x} = \mu(t), \quad (3)$$

де $c(x, t)$ – концентрація домішок в рідкому середовищі в точці x та момент часу t , $\rho(x, t)$ – концентрація домішок, які осіли у фільтрі-насадці, β – коефіцієнт, що характеризує масові обсяги осадження домішок за одиницю часу, $\alpha(t)$ – шуканий коефіцієнт, який характеризує масові об'єми відірваних від гранул засипки частинок, $\mu(t)$ – функція, що характеризує масовий розподіл осаду з часом (знаходиться дослідним шляхом

умова перевизначення (3) – призначена для знаходження $\alpha(t)$), $v = \kappa(\rho) \cdot \text{grad } p$ – швидкість фільтрування, $c^*(t)$ – концентрації домішок на вході фільтра, $\sigma(x, t)$ – пористість насадки (σ_0 – вихідна пористість насадки $\sigma(\rho) = \sigma_0 - \varepsilon\sigma_s\rho(x, t)$), $\kappa(\rho)$ – коефіцієнт фільтрування $\kappa(\rho) = \kappa_0 - \varepsilon\gamma\rho(x, t)$ [3], $\sigma_s, \kappa_0, \gamma, \varepsilon$ – жорсткі параметри (вони характеризують відповідні коефіцієнти $\sigma(\rho), \kappa(\rho)$ – м'які параметри, знаходять експериментальним шляхом), ε – малий параметр, що характеризує відповідні збурення, p – тиск.

III. ВИРІШЕННЯ ПОСТАВЛЕНОЇ ЗАДАЧІ

Згідно з [4], коефіцієнт захоплення частинок домішки обчислюється за формулою $\beta = \frac{\beta_0 H^{0.75}}{vd^2}$, де β_0 – вільний параметр, v – швидкість фільтрування, d – діаметр гранульованої насадки фільтра.

Наведемо результати розрахунків за $c^*(t) = 1.7$ мг/л, $\beta = 64 \text{ c}^{-1}$, $v = 180 \text{ м/год}$, $L = 1 \text{ м}$. У результаті інтерполяції експериментальних даних [4] нами отримано масовий розподіл осаду з часом (рис. 1а). Тимчасову залежність відповідного масообмінного коефіцієнта $\alpha(t)$ зображено на рисунку 1б. Зростання масообмінного коефіцієнта з часом пояснюється тим, що (для даного випадку за отриманого експериментально значення $\mu(t)$) у процесі осадження частинок гранули пористої засипки максимально насичуються домішковими частками і під дією гідравлічного напору вірогідність відриву частинок від гранул зростає до часу τ_s ефективної роботи фільтра.

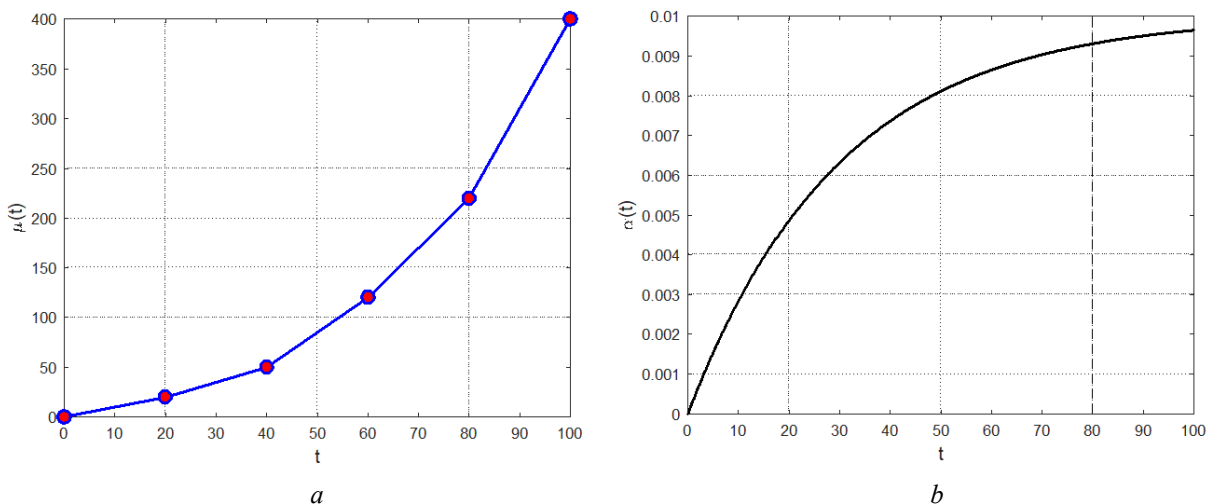


Рис.1. Масовий розподіл осаду $\mu(t)$ – (a) і відповідного масообмінного коефіцієнта $\alpha(t)$ – (b) з часом

На рисунку 2 показано розподіл концентрації домішок у рідині та осаді в різні моменти часу, що дозволяє оцінити процеси фільтрації та накопичення осаду у фільтрі. Припускаючи, що на виході фільтра (при $L=1$) концентрація не перевищує допустимі $c=c_{кр}=0.6$ мг/л, можемо визначити тривалість ефективної роботи фільтра, яка становить приблизно $t=\tau_3=70$ годин. Цей показник відрізняється на 4 години від результатів, отриманих експериментальним шляхом, згаданих у джерелі [4]. Це може свідчити про різницю між теоретичними розрахунками та практичними умовами експерименту.

Протягом цього часу фільтр накопичить близько 230 г осаду, що підтверджує ефективність його роботи. Однак важливо враховувати зміну

характеристик фільтрації протягом часу. Зокрема, коефіцієнти пористості та фільтрації поступово зменшуються зі зростанням часу. Це пов'язано з фізичними процесами прилипання твердих частинок до стінок пір у фільтрі, що ускладнює подальше фільтрування і знижує ефективність системи. Тому зменшення цих коефіцієнтів варто враховувати при прогнозуванні тривалості роботи фільтра та його експлуатаційних властивостей.

Подальші дослідження можуть бути спрямовані на оптимізацію конструкції фільтра та дослідження інших параметрів, що впливають на зменшення пористості та швидкість фільтрації, щоб збільшити загальний час захисної дії фільтра.

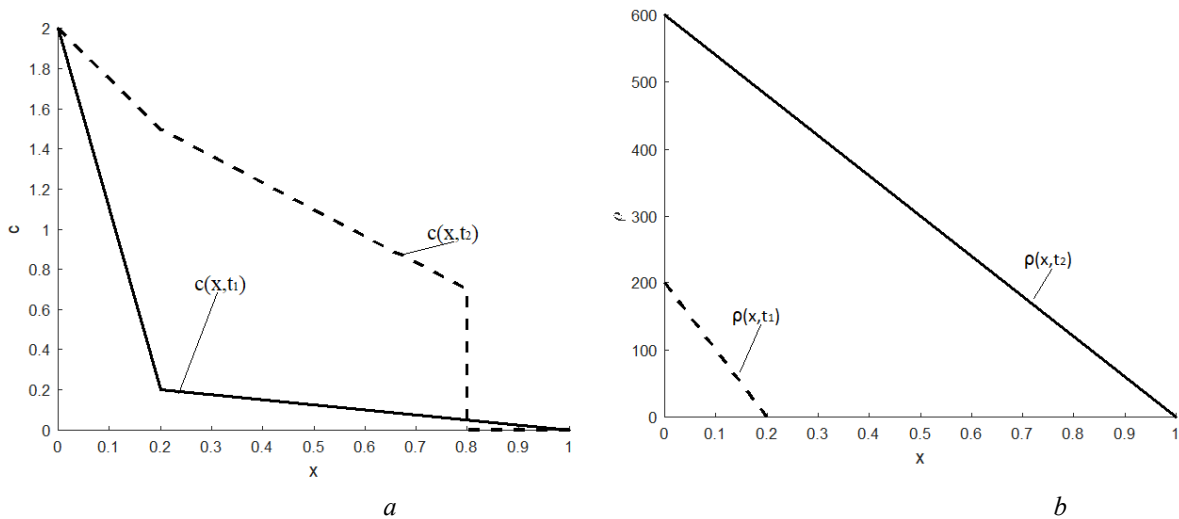


Рис. 2 – Розподіл $c(x, t)$ – (a) і $\rho(x, t)$ – (b) в момент часу $t_1 = 25$ ч, $t_2 = 75$ ч

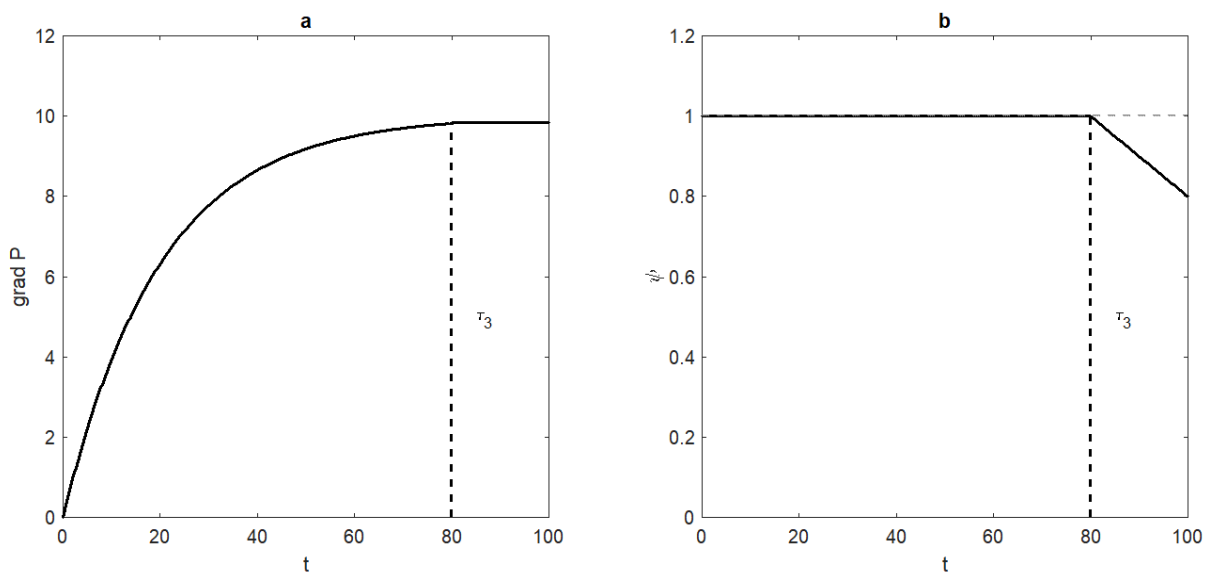


Рис.3 - Залежність $\text{grad } p$ на виході фільтру – (a) ефективність фільтру $(\psi(t) = (c_s^*(t) - c(L, t)) / c_s^*(t))$ – (b) від часу

У припущенні заданої швидкості потоку $v = const$, за формулою для градієнта тиску $grad\ p = \frac{v}{\kappa(\rho)}$, можна розрахувати відповідну

величину цього градієнта. Це дозволяє приймати рішення щодо зміни потужності двигуна насоса, який подає рідину до фільтра, для підтримання оптимального рівня фільтрації. Зокрема, контроль за градієнтом тиску є важливим аспектом автоматизації процесу фільтрації, оскільки дозволяє оперативно реагувати на зміну параметрів системи та забезпечувати постійну ефективність очищення.

Також можна визначити час досягнення критичного значення градієнта тиску. Це часовий момент, після якого фільтр починає втрачати свою ефективність через накопичення осаду, що перешкоджає проходженню рідини. Автоматизована система, орієнтуючись на це значення, може своєчасно коригувати параметри роботи фільтра або вимагати його очищення або заміни. Такий підхід значно підвищує надійність і тривалість роботи фільтраційної установки.

На рисунку 3а показано зміну градієнта тиску $grad\ p$ з часом. Як видно з графіка на рисунку 3б, при певному значенні швидкості $c_*(t) = c_* = const$ величина ψ градієнта тиску практично не змінюється до моменту часу τ_* , а це свідчить про стабільну роботу фільтра в початковий період, що підтверджує відомий факт, що ефективність фільтра залишається на високому рівні на ранніх етапах його експлуатації. Після деякого проміжку спостерігається значне збільшення градієнта тиску, що сигналізує про зниження пористості фільтра і збільшення опору потоку рідини [5].

IV. ВИСНОВКИ

У представлений роботі створено математичну модель, яка детально описує процес магнітного осадження і накопичення домішок у пористій фільтрувальній насадці. Ця модель враховує важливі аспекти, зокрема зворотний вплив характеристик процесу, таких як концентрація осаду, на параметри середовища. Зміни в концентрації домішок безпосередньо впливають на пористість фільтру, його фільтраційні властивості, а також на інтенсивність масообміну, що має вирішальне значення для точного прогнозування ефективності фільтрації.

Модель також пропонує метод визначення невідомого масообмінного коефіцієнта, який характеризує інтенсивність переносу частинок домішок у фільтраційній системі. Знання цього коефіцієнта дозволяє суттєво покращити точність моделювання та наблизити числові результати до реальних експериментальних даних. Важливою складовою є розроблений алгоритм розв'язку

відповідної збуреної задачі, що дозволяє не тільки отримати точні результати, але й визначити час захисної дії фільтра, тобто час, протягом якого фільтр зберігає свою ефективність у процесі очищення.

Отримані в результаті моделювання дані дозволяють будувати розподіли питомої концентрації домішок та масового об'єму забруднень уздовж фільтрувальної пористої насадки для різних моментів часу. Це надає можливість детального аналізу процесу накопичення осаду і його впливу на роботу фільтра з плином часу. Такий підхід допомагає визначити критичні моменти, коли ефективність фільтра починає знижуватися через накопичення забруднень.

Окрім того, модель передбачає можливість автоматизованого контролю процесу осадження домішок у намагніченій фільтрувальній насадці на основі вхідних даних про забруднену водну систему. Така автоматизація дозволяє в режимі реального часу оцінювати ефективність процесу і приймати відповідні рішення щодо корекції роботи системи. Наприклад, на основі аналізу даних можна змінювати потужність насоса для подачі рідини у фільтр, що оптимізує процес фільтрації залежно від поточного рівня забруднення рідини і стану фільтраційного середовища.

Перспективним напрямом розвитку цієї моделі є моделювання процесів фільтрації в умовах неповних даних з урахуванням дифузії. Такий підхід дозволить ще точніше враховувати процеси переносу домішок у фільтрувальному середовищі, особливо коли недостатньо даних для повного опису системи. Врахування дифузії, яка відіграє ключову роль у випадках дрібнодисперсних домішок, допоможе більш точно описати процеси фільтрації у реальних умовах.

ЛІТЕРАТУРА

- [1] Petosa A.R., Jaisi, D.P., Quevedo, I.R., Elimelech, M., and Tufenkji, N. "Aggregation and Deposition of Engineered Nanomaterials in Aquatic Environments: Role of Physicochemical Interactions", *Environmental Science & Technology*, Volume 44, September 2020, pages 6532-6549.
- [2] Zubarev, Nikolay & Zubарева, O & Kochurin, Evgeny & Krakov, M.. (2019). Численное и аналитическое исследование неустойчивостей поверхности раздела жидкостей в электрическом и магнитном полях. 10.13140/RG.2.2.27128.80648.
- [3] Бомба А. Я. Нелінійні сингулярно-збурені задачі типу "конвекція – дифузія" / Бомба А. Я., Барановський С. В., Присяжнюк І. М. – Рівне : НУВГП, 2008. – 252 с.
- [4] Бомба А.Я. Нелінійні задачі типу фільтрація-конвекція-дифузія-масообмін за умов неповних даних / Бомба А. Я., Гаврилук В.І., Сафоник А.П., Фурсачик О.А. // Монографія. – Рівне : НУВГП, 2011. – 276 с.
- [5] Сергиенко І.В., Дейнека В.С. Идентификация градиентными методами параметров задач диффузии вещества в нанопористой среде // Проблемы управления и информатики. – 2010. – №6. С. – 5-18.
- [6] Осипов, Г.С & Вашакидзе, Н.С & Филиппова, Г.В & Рауш, Н.Л. (2023). Теория обратных задач на нечетких соответствиях. 10.17513/np.545.