УДК 628.16:66.081.63
DOI https://doi.org/10.15589/znp2026.3(506).9

# CONCENTRATION POLARIZATION PHENOMENON: CURRENT STATE OF THE PROBLEM AND EMERGING RESEARCH DIRECTIONS

# ЯВИЩЕ КОНЦЕНТРАЦІЙНОЇ ПОЛЯРИЗАЦІЇ: СТАН ПРОБЛЕМИ І АКТУАЛЬНІ НАПРЯМКИ ДОСЛІДЖЕНЬ

**Sergii M. Myshkovets**
bonavik@gmail.com
ORCID: 0009-0004-8000-4542

**С. М. Мишковець,**
аспірант

***National Technical University of Ukraine "Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute", Kyiv***
*Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», м. Київ*

**Abstract.** Concentration polarization is one of the key mass transfer phenomena occurring in membrane separation processes, electrochemical systems, heat and mass transfer equipment, and numerous technological processes in power engineering and industrial machinery. The phenomenon is associated with the formation of a concentration boundary layer near the phase interface, where the concentration of dissolved substances differs significantly from that in the bulk solution. This results in additional diffusion resistance, reduced process productivity, increased energy consumption, accelerated membrane fouling, and shortened equipment service life. As the requirements for energy efficiency, operational reliability, and environmental sustainability continue to increase, concentration polarization has become one of the major challenges limiting the performance of modern membrane and mass transfer systems. The aim of this study is to summarize the current state of research on concentration polarization in membrane-based water treatment and desalination processes, to analyze the physical mechanisms responsible for its formation, to review contemporary theoretical, numerical, and experimental approaches to its investigation, and to identify promising directions for minimizing its adverse effects. The study is based on a comprehensive analysis and systematization of recent scientific publications devoted to reverse osmosis, nanofiltration, ultrafiltration, microfiltration, and forward osmosis technologies. Particular attention is given to modern mathematical models describing concentration polarization, computational fluid dynamics (CFD) simulations, and advanced experimental techniques, including digital holographic interferometry and laser-induced fluorescence, which enable direct visualization of concentration boundary layers and local mass transfer phenomena. The influence of membrane structure, channel geometry, hydrodynamic conditions, flow turbulators, and membrane surface properties on the development of concentration polarization is analyzed. Special consideration is also given to internal concentration polarization in forward osmosis membranes and to recent advances in nanocomposite membrane materials designed to reduce concentration polarization and membrane fouling. The review demonstrates that integrating experimental observations with numerical simulations provides new opportunities for understanding and controlling concentration polarization in complex engineering systems. Furthermore, the rapid development of digital twins, artificial intelligence, and machine learning technologies creates new possibilities for predictive modeling, process optimization, and intelligent control of membrane systems. The practical significance of the study lies in the systematization of modern approaches aimed at mitigating concentration polarization and membrane fouling, the results of which can be applied in the design, optimization, and operation of membrane equipment for water treatment, desalination, and other industrial mass transfer processes.
**Key words:** concentration polarization; mass transfer; digital twin; industrial engineering; membrane technologies.

**Анотація.** Концентраційна поляризація є одним із ключових явищ масопереносу, що виникає під час мембранного розділення, у електрохімічних системах, тепло- і масообмінному обладнанні, а також у багатьох технологічних процесах енергетичного машинобудування. Формування поблизу поверхні розділу фаз концентраційного прикордонного шару призводить до збільшення дифузійного опору, зниження продуктивності технологічних систем, зростання енергоспоживання, прискорення процесів мембранного забруднення (фулінгу) та скорочення ресурсу роботи обладнання. У зв'язку зі зростанням вимог до енергоефективності, надійності та екологічної безпеки сучасних технологічних процесів проблема концентраційної поляризації набуває особливої актуальності. Метою роботи є узагальнення сучасного стану досліджень концентраційної поляризації в мембранних процесах очищення та опріснення води, аналіз основних фізичних механізмів її виникнення, сучасних методів математичного моделювання й експериментального дослідження, а також визначення перспективних напрямів

розвитку технологій, спрямованих на мінімізацію негативного впливу цього явища. Методологічною основою дослідження стали аналіз і систематизація сучасних наукових публікацій, присвячених процесам зворотного осмосу, нанофільтрації, ультрафільтрації, мікрофільтрації та прямого осмосу. У роботі розглянуто сучасні теоретичні моделі концентраційної поляризації, можливості використання методів обчислювальної гідродинаміки (CFD), цифрової голографічної інтерферометрії, лазерно-індукованої флуоресценції та інших експериментальних підходів для дослідження локальних процесів масопереносу. Проаналізовано вплив конструктивних параметрів мембранних каналів, гідродинамічних режимів, турбулізаторів потоку, властивостей мембранних матеріалів і внутрішньої концентраційної поляризації на ефективність мембранних процесів. Окрему увагу приділено сучасним тенденціям використання цифрових двійників, методів машинного навчання та штучного інтелекту для прогнозування розвитку концентраційної поляризації й оптимізації режимів роботи обладнання. Показано, що комплексне застосування сучасних експериментальних і чисельних методів дослідження створює передумови для підвищення продуктивності мембранних систем, зменшення енергетичних витрат, уповільнення процесів фулінгу та збільшення терміну експлуатації обладнання. Практичне значення роботи полягає в систематизації сучасних підходів до керування процесами концентраційної поляризації, результати якої можуть бути використані під час проєктування, моделювання та вдосконалення мембранного обладнання для систем водоочищення, водопідготовки й інших процесів енергетичного машинобудування.
**Ключові слова:** концентраційна поляризація; масоперенос; цифровий двійник; галузеве машинобудування; мембрані технології.

## ПОСТАНОВКА ЗАДАЧІ

Сучасний розвиток галузевого машинобудування характеризується широким впровадженням технологічних процесів, які пов'язані з масообміном та розділенням багатокомпонентних середовищ. Особливе значення набувають мембранні технології очищення води, опріснення, концентрування розчинів, паливні елементи, електрохімічні процеси, акумуляторні системи, біореактори та теплообмінне обладнання. Ефективність цих систем значною мірою визначається інтенсивністю перенесення речовин між фазами. Одним із найбільш суттєвих факторів, що обмежують продуктивність зазначених процесів, є явище концентраційної поляризації. Воно виникає внаслідок дисбалансу між конвективним перенесенням речовини до поверхні та її дифузійним відведенням від поверхні. У результаті формується прикордонний шар, у якому концентрація компонентів суттєво відрізняється від концентрації в основному потоці. Проблема концентраційної поляризації є актуальною для галузевого машинобудування через необхідність підвищення енергоефективності технологічного обладнання, збільшення його ресурсу та забезпечення стабільності технологічних процесів. Незважаючи на значну кількість досліджень, універсальних методів прогнозування та усунення концентраційної поляризації поки що не існує.

При цьому необхідно проаналізувати сучасний стан досліджень явища концентраційної поляризації в мембранних процесах очищення та опріснення води, узагальнити сучасні теоретичні, експериментальні й чисельні підходи до її вивчення, а також визначити перспективні напрями вдосконалення мембранних систем шляхом зниження негативного впливу концентраційної поляризації та пов'язаних із нею процесів фулінгу. Для цього необхідно вирішити такі завдання:

а) провести аналіз наукових публікацій, присвячених дослідженню концентраційної поляризації в процесах зворотного осмосу, нанофільтрації, ультрафільтрації, мікрофільтрації та прямого осмосу;

б) розглянути фізичні механізми виникнення концентраційної поляризації та її вплив на ефективність мембранних процесів масопереносу;

в) проаналізувати сучасні математичні моделі та CFD-підходи до прогнозування концентраційної поляризації в мембранних каналах;

г) розглянути можливості сучасних експериментальних методів візуалізації концентраційного прикордонного шару, зокрема цифрової голографічної інтерферометрії (DHI) та лазерно-індукованої флуоресценції;

д) проаналізувати особливості внутрішньої концентраційної поляризації в мембранах прямого осмосу та шляхи її мінімізації;

е) визначити сучасні тенденції розвитку мембранних технологій, спрямованих на зменшення концентраційної поляризації, включаючи використання нанокомпозитних матеріалів, цифрових двійників, CFD-моделювання та методів штучного інтелекту, а також сформувати рекомендації щодо перспективних напрямів подальших досліджень і вдосконалення мембранного обладнання для систем водоочищення та водопідготовки.

При цьому, ***наукова новизна*** роботи полягає в комплексному узагальненні сучасних досліджень концентраційної поляризації, що охоплюють теоретичні моделі, CFD-симуляції, методи оптичної візуалізації та новітні мембранні матеріали, а також у визначенні актуальних тенденцій розвитку мембранних технологій на основі аналізу сучасних публікацій, а практичне значення роботи полягає у систематизації сучасних підходів до зменшення концентраційної поляризації та мембранного фулінгу, результати яких можуть бути

використані при проєктуванні мембранних апаратів, створенні цифрових моделей процесів масопереносу та підвищенні ефективності систем очищення і опріснення води в галузевому машинобудуванні.

## АНАЛІЗ ОСТАННІХ ДОСЛІДЖЕНЬ І ПУБЛІКАЦІЙ

Фундаментальні дослідження концентраційної поляризації були виконані Hoek і Elimelech, які вперше запропонували концепцію Cake-Enhanced Concentration Polarization (CECP) [1, с. 5581]. Автори довели, що осадовий шар на поверхні мембрани виконує роль додаткового дифузійного бар'єра, який різко збільшує локальну концентрацію солей та органічних речовин біля мембрани. Внаслідок цього формується позитивний зворотний зв'язок між концентраційною поляризацією та фулінгом, що призводить до прогресуючого зниження продуктивності мембранної системи. Подальший розвиток теоретичних підходів представлений у роботах Jamal, Khan і Kamil, а також Kim і Hoek, де показано, що традиційна теорія плівки недостатньо точно описує процеси масопереносу в сучасних мембранних каналах [2, с. 29; 3, с. 111]. Було встановлено, що локальна гідродинаміка та структура потоку визначають товщину концентраційного прикордонного шару і ступінь розвитку концентраційної поляризації [4, с. 3353]. Таким чином, уже на початку 2000-х років було сформовано сучасну концепцію концентраційної поляризації як складного багатофакторного процесу, пов'язаного з масопереносом, осмотичними явищами та мембранним забрудненням. З розвитком обчислювальної техніки значного поширення набули методи Computational Fluid Dynamics (CFD). Однією з перших робіт у цьому напрямі стало дослідження Geraldes і Afonso, у якому було побудовано CFD-модель мембранного каналу для аналізу розвитку концентраційного прикордонного шару. Автори показали, що збільшення швидкості потоку зменшує товщину прикордонного шару та підвищує інтенсивність масопереносу.

Подальший розвиток CFD-підходів представлено в роботі Zare, Zokaee Ashtiani та Fouladitajar, де для дослідження мікрофільтрації нафто-водних емульсій використано багатофазну Eulerian-модель [10, с. 37]. Розрахунки дозволили отримати просторові поля концентрації, швидкості та тиску, а також визначити закономірності розвитку концентраційної поляризації в багатокомпонентних системах. Новий етап розвитку моделювання пов'язаний із поєднанням CFD та експериментальної візуалізації. Shang та співавтори створили CFD-модель нанофільтраційного процесу, яка була валідована за допомогою Micro-LIF експериментів [15, с. 1]. Дослідження показало, що мікрорельєф мембрани може суттєво зменшувати концентраційну поляризацію завдяки формуванню локальних вихрових структур та інтенсифікації масопереносу.

Тривалий час концентраційна поляризація вивчалася переважно непрямими методами. Ситуація змінилася після впровадження сучасних оптичних технологій.

Fernández-Sempere та співавтори вперше використали цифрову голографічну інтерферометрію (Digital Holographic Interferometry, DHI) для безконтактного вимірювання концентраційних профілів біля поверхні мембрани [8, с. 36]. Метод дозволив отримати просторовий розподіл концентрації та визначити товщину прикордонного шару в режимі реального часу.

Подальший розвиток цього напряму представлений роботами Shang та співавторів, які застосували метод лазерно-індукованої флуоресценції (Laser Induced Fluorescence, LIF). Вперше було отримано двовимірні карти концентраційних полів і безпосередньо візуалізовано процес утворення фулінгового шару. Встановлено, що розвиток фулінгу починається саме в зонах максимальної концентраційної поляризації.

Сучасні дослідження доводять, що концентраційна поляризація та фулінг є взаємопов'язаними процесами. Subramani, Kim і Hoek встановили, що біофулінг найінтенсивніше розвивається саме в областях із підвищеною концентраційною поляризацією [5, с. 7]. Аналогічні закономірності були підтверджені у роботах Vogel та співавторів, які показали, що CECP впливає не лише на продуктивність мембрани, а й на її селективність щодо органічних забруднювачів [7, с. 256]. Azaïs та співавтори дослідили видалення фармацевтичних препаратів із міських стічних вод і довели, що міжмолекулярні взаємодії між компонентами розчину можуть додатково підсилювати концентраційну поляризацію та погіршувати характеристики мембранного процесу [11, с. 313; 14, с. 156; 18, с. 1]. Особливий інтерес становить робота Ochando-Pulido та співавторів, де було показано, що рециркуляція пермеату дозволяє зменшити концентраційну поляризацію та уповільнити розвиток фулінгу під час очищення стічних вод оливкового виробництва [13, с. 1259].

## МЕТОДИ, ОБ'ЄКТ ТА ПРЕДМЕТ ДОСЛІДЖЕННЯ

Окремий напрямок досліджень пов'язаний із внутрішньою концентраційною поляризацією (Internal Concentration Polarization, ICP), характерною для мембран прямого осмосу. Tang та співавтори довели, що ICP і фулінг взаємно підсилюють один одного, спричиняючи різке зниження потоку пермеату [6, с. 123]. Ма та співавтори показали, що ключовим фактором виникнення ICP є структура пористої підкладки мембрани [9, с. 54]. Розроблені ними нанокомпозитні підкладки дозволили суттєво знизити внутрішню концентраційну поляризацію та підвищити продуктивність мембран прямого осмосу [19, с. 1038; 20, с. 8807].

Дослідження Vyas і Ray продемонструвало, що поверхнева хімія, заряд та мікрорельєф мембрани безпосередньо впливають на формування концентраційного

шару. Було показано, що гладкі поверхні та оптимізовані електростатичні характеристики сприяють зменшенню концентраційної поляризації [12, с. 104].

Подальший розвиток цього напряму підтверджують сучасні дослідження текстурованих та функціоналізованих мембран, які дозволяють керувати локальною гідродинамікою потоку та пригнічувати розвиток концентраційного шару.

Останні оглядові роботи свідчать, що основними напрямами розвитку мембранних технологій є: створення інтелектуальних («smart») мембран із керованими властивостями; використання електрично асистованих процесів RO та NF для зменшення фулінгу й концентраційної поляризації; розроблення нанокомпозитних і каталізатор-активних мембран; впровадження цифрових двійників мембранних систем; поєднання CFD-моделювання з оптичними методами контролю [16, с. 215; 17, с. 223; 19, с. 1038; 21, с. 3]; застосування штучного інтелекту для прогнозування фулінгу та концентраційної поляризації.

Аналіз джерел показав, що концентраційна поляризація є одним із головних факторів, які обмежують ефективність мембранних процесів. За останні два десятиліття відбувся перехід від спрощених теоретичних моделей до комплексних CFD-підходів, підтверджених прямими експериментальними спостереженнями за допомогою цифрової голографічної інтерферометрії та лазерно-індукованої флуоресценції. Особливу увагу сучасні дослідження приділяють взаємозв'язку між концентраційною поляризацією та фулінгом, внутрішній концентраційній поляризації в мембранах прямого осмосу, а також розробленню нових мембранних матеріалів із підвищеною стійкістю до забруднення. Перспективними напрямами подальших досліджень є створення цифрових двійників мембранних систем, використання методів штучного інтелекту для прогнозування масопереносу та впровадження інтелектуальних мембран нового покоління, здатних адаптувати свої властивості до умов експлуатації.

## ОСНОВНИЙ МАТЕРІАЛ

Концентрційна поляризація являє собою локальну зміну концентрації розчиненої речовини біля поверхні мембрани, електрода абао якоїсь іншої поверхні. У випадку мембраних процесів концетрація розчинених речових біля поверхні мембрани може поступово збільшуватись черезер та що, розчинник проходить скрізь мембранцу швидше, ніж розчинені компоненти. Це призводить до накопичення домішок поблизу поверхні рис. 1.

При цьому концентрація на поверхні $C_m$ стає більшою за концентрацією в об'ємі $C_b$:

$$c_m > c_b \tag{1}$$

Інтенсивність концентраційної поляризації визначається співвідношенням між конвективним і дифузним а перенесенням речовини.

Класичний опис концентрації поляризації базується на рівнянні конвективно дифузійного перенесення.

$$\frac{\partial C}{\partial t} + \vec{\upsilon} \cdot \nabla C = D\nabla^2 C, \tag{2}$$

де $C$ – концентрація речовини,
$D$ – коефіцієнт дифузії;
$\vec{\upsilon}$ – вектор швидкості потоку.

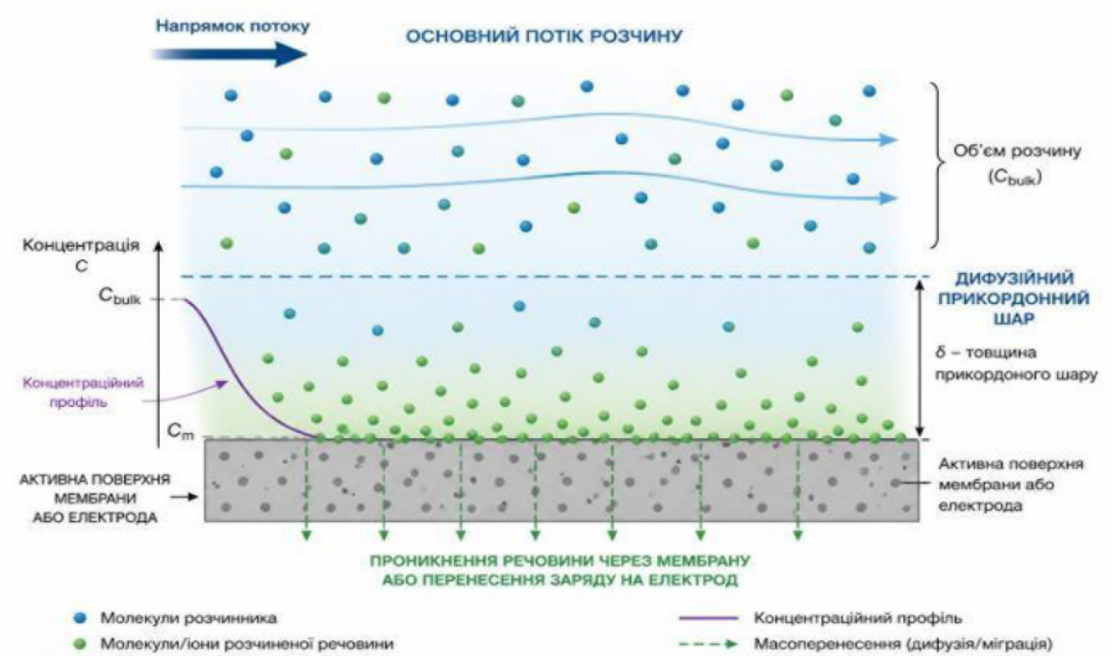



**Рис. 1.** Схематичний процес концентраційної поляризації

Для стаціонарного режиму можна використовувати модель плівки. відповідно до якої потік речовини визначається залежність:

$$J = k(C_m - Cb), \quad (3)$$

де $J$ – густина потоку речовини, а $k$ – коефіцієнт масопередачі.

Товщина прикордонного шару значною мірою визначає рівень концентраційної поляризації. Чим більша товщина дифузійного шару, тим сильніше проявляється дане явище.

Основні наслідки концентраційної поляризації ми можем побачити на рис. 2.

Представлена схема демонструє, що концентраційна поляризація є комплексним фізико-хімічним явищем, яке одночасно впливає на технічні, енергетичні та економічні характеристики обладнання. Первинним наслідком є формування концентраційного прикордонного шару, який обмежує інтенсивність масопереносу. Подальший розвиток цього процесу призводить до збільшення енергетичних витрат і створює умови для утворення різних типів забруднень. Особливо важливим є те, що наведені негативні фактори взаємно підсилюють один одного. Наприклад, утворення відкладень збільшує товщину прикордонного шару, що додатково посилює концентраційну поляризацію та ще більше знижує продуктивність системи. У результаті формується замкнений цикл деградаційних процесів, який призводить до прискореного зношування обладнання. Отже, мінімізація концентраційної поляризації є одним із ключових завдань під час проєктування та експлуатації сучасних мембранних, електрохімічних і масообмінних установок, оскільки дає змогу підвищити ефективність процесів, знизити енерговитрати та збільшити термін служби обладнання. Для наочності методи дослідження наведено у вигляді схеми (рис. 3).

Представлена схема свідчить про суттєву еволюцію підходів до дослідження концентраційної поляризації. Якщо ранні дослідження ґрунтувалися переважно на непрямих вимірюваннях інтегральних характеристик процесу, то сучасні методи дозволяють безпосередньо спостерігати структуру концентраційного прикордонного шару та його динаміку в режимі реального часу. Особливе місце серед експериментальних методів займають цифрова голографічна інтерферометрія та лазерно-індукована флуоресценція, які забезпечують високу точність визначення локальних концентраційних полів. Метод мікро-PIV дозволяє одночасно аналізувати гідродинамічні характеристики потоку, що є важливим для встановлення взаємозв'язку між швидкісними полями та процесами масопереносу. Серед чисельних підходів найбільш універсальним інструментом є CFD-моделювання, яке забезпечує можливість дослідження концентраційної поляризації у складних технічних системах без необхідності проведення великої кількості дорогих експериментів. Методи FEM, FVM та LBM дозволяють деталізувати процеси перенесення речовини




**Рис. 2.** Негативні наслідки концентраційної поляризації


ISSN 3154-8245 (print), 3154-8253 (online)

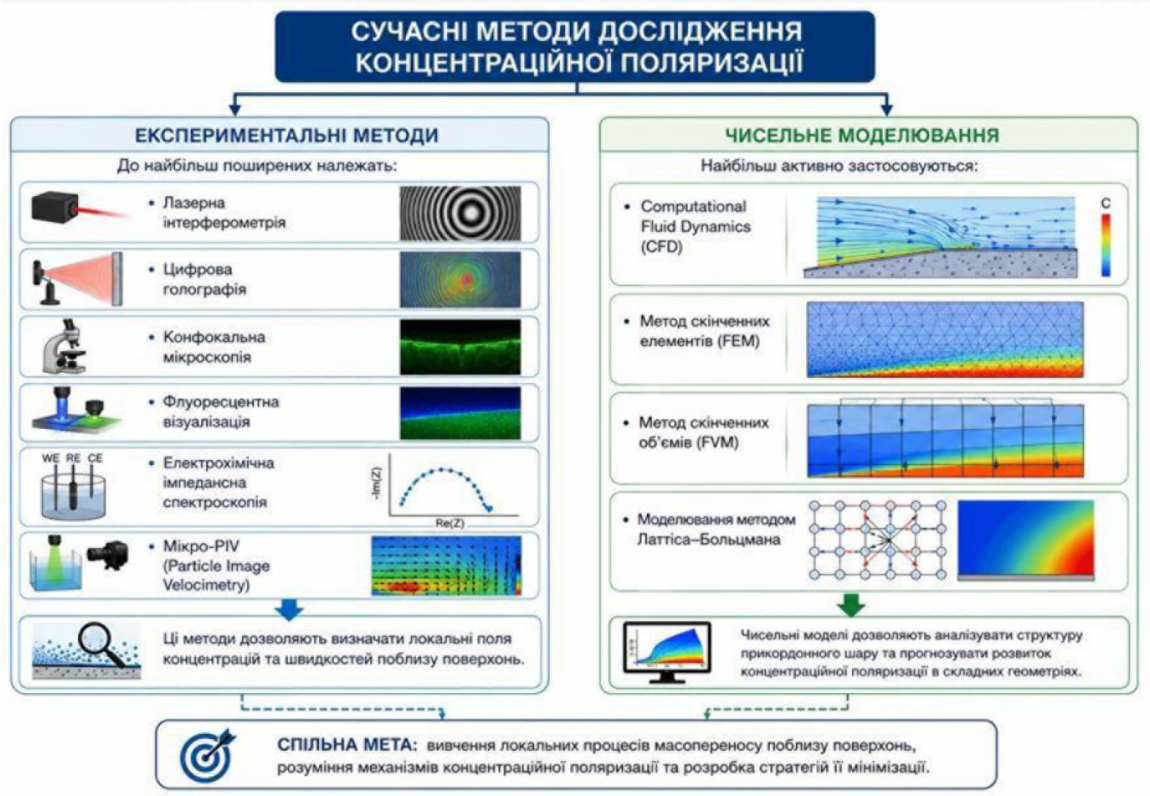



**Рис. 3.** Класифікація сучасних експериментальних і чисельних методів дослідження концентраційної поляризації

та враховувати складні фізико-хімічні механізми, що супроводжують формування концентраційного шару. Таким чином, сучасний рівень розвитку методів дослідження концентраційної поляризації характеризується інтеграцією експериментальних і чисельних технологій, що створює передумови для побудови цифрових двійників мембранних, електрохімічних та масообмінних систем і підвищення ефективності їх проєктування та експлуатації. Як часний випадок дуже цікаве явище цифрової голографічної інтерферометрії (Digital Holographic Interferometry, DHI) (рис. 4), яка використовується для безконтактного високоточного вимірювання деформацій, переміщень, вібрацій та змін форми об'єктів шляхом аналізу фазових характеристик лазерного випромінювання.

У нижній частині рисунка наведено послідовність обробки результатів:

1. Запис голограми.

ПЗЗ-камера реєструє інтерференційну картину, що містить інформацію про фазу та амплітуду світлового поля.

2. Реконструкція.

За допомогою чисельних алгоритмів виконується цифрове відновлення хвильового фронту та просторової структури об'єкта.

3. Карта фаз.

Отримується розподіл фазових зсувів, які характеризують локальні зміни оптичного шляху світла.

4. Карта зміщень.

На основі фазових даних розраховуються поля переміщень або деформацій поверхні досліджуваного об'єкта.

Більш детально показано використання поляризації в об'єктах машинобудування на рис. 5.

На рисунку 5 представлено основні сфери прояву та практичного значення явища концентраційної поляризації в сучасному галузевому машинобудуванні. Центральним елементом схеми є концентраційна поляризація як універсальне явище масопереносу, яке виникає внаслідок накопичення розчинених або дисперсних речовин у прикордонному шарі поблизу робочої поверхні. Представлена схема свідчить про те, що концентраційна поляризація є не лише характерною особливістю мембранних процесів, але й важливим фактором, який визначає ефективність функціонування сучасних енергетичних, хімічних та біотехнологічних установок. Незалежно від типу обладнання, накопичення компонентів у прикордонному шарі призводить до зниження інтенсивності масопереносу, погіршення експлуатаційних характеристик і збільшення енергетичних витрат. Найбільш критичним вплив концентраційної поляризації є для мембранних систем, де вона безпосередньо визначає продуктивність і селективність процесів розділення. Водночас у паливних елементах та електролізерах вона впливає на транспорт реагентів до активних поверхонь,




**Рис. 4.** схема цифрової голографічної інтерферометрії




**Рис. 5.** Основні напрями прояву концентраційної поляризації в об'єктах галузевого машинобудування

а в біотехнологічних процесах може обмежувати швидкість біохімічних реакцій.

## ОБГОВОРЕННЯ ОТРИМАНИХ РЕЗУЛЬТАТІВ

На основі вивчених даних можливо виділення перспективних напрямків, а саме: оптимізацію гідродинаміки потоку, розроблення нових поверхонь, розроблення цифрових двійників, розвиток машинного навчання та штучного інтелекту, та інтенсифікація процесів за допомогою ультразвуків та електромагнітних полів.

Але, були визначені наукові проблеми, що потребують подальшого вивчення:

1. Відсутність універсальних математичних моделей для складних багатокомпонентних систем.

2. Недостатня точність прогнозування концентраційної поляризації у промислових масштабах.

3. Обмежені можливості експериментального контролю в реальному часі.

4. Недостатня інтеграція CFD-моделей із системами автоматизованого керування.

5. Необхідність створення енергоефективних способів руйнування концентраційних шарів.

## ВИСНОВКИ

Концентраційна поляризація є одним із головних факторів, що обмежують ефективність процесів масопереносу в сучасному технологічному обладнанні. Її виникнення супроводжується формуванням прикордонного шару зі зміненою концентрацією речовини, що призводить до зниження продуктивності, підвищення енергоспоживання та прискорення забруднення робочих поверхонь. Для галузевого машинобудування проблема концентраційної поляризації має особливе значення у мембранних технологіях, електрохімічних системах, енергетичному та хімічному обладнанні. Сучасні дослідження спрямовані на вдосконалення математичних моделей масопереносу, застосування CFD-технологій, створення цифрових двійників та використання методів штучного інтелекту для прогнозування і керування процесами. Перспективними напрямками подальших досліджень є розроблення інтелектуальних систем моніторингу концентраційної поляризації, створення нових функціональних поверхонь із підвищеними антифулінговими властивостями та інтеграція цифрових технологій у процеси проєктування і експлуатації обладнання. Реалізація цих підходів сприятиме підвищенню енергоефективності, надійності та довговічності технологічних систем у галузевому машинобудуванні.

## REFERENCES


[1] Hoek E. M. V., Elimelech M. Cake-enhanced concentration polarization: a new fouling mechanism for salt-rejecting membranes. Environmental Science & Technology. 2003;37(24):5581–5588. https://pubs.acs.org/doi/10.1021/es0262636

[2] Jamal K., Khan M. A., Kamil M. Mathematical modeling of concentration polarization in reverse osmosis desalination processes. Desalination. 2004;160(1):29–42. https://www.sciencedirect.com/journal/desalination/vol/160/issue/1

[3] Kim S., Hoek E. M. V. Modeling concentration polarization in reverse osmosis processes. Desalination. 2005;186(1–3): 111–128. https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0011916405006867

[4] Geraldes V., Afonso M. D. CFD modelling of concentration polarization in reverse osmosis systems. AIChE Journal. 2006;52(10):3353–3362. https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0011916405006867

[5] Subramani A., Kim S., Hoek E. M. V. Direct observation of initial microbial deposition onto reverse osmosis and nanofiltration membranes. Journal of Membrane Science. 2006;277(1–2):7–17. https://doi.org/10.1016/j.memsci.2008.03.025

[6] Tang C. Y., She Q., Lay W. C. L., Wang R., Fane A. G. Coupled effects of internal concentration polarization and fouling on flux behavior of forward osmosis membranes during humic acid filtration. Journal of Membrane Science. 2010;354(1–2):123–133. https://doi.org/10.1016/j.memsci.2010.02.059

[7] Vogel D., Simon A., Alturki A. A., Bilitewski B., Price W. E., Nghiem L. D. Effects of fouling and scaling on the retention of trace organic contaminants by a nanofiltration membrane: The role of cake-enhanced concentration polarisation. Separation and Purification Technology. 2010;73(2):256–263. https://doi.org/10.1016/j.seppur.2010.04.010

[8] Fernández-Sempere J., Ruiz-Beviá F., García-Algado P., Salcedo-Díaz R. Experimental study of concentration polarization in a crossflow reverse osmosis system using Digital Holographic Interferometry. Desalination. 2010;257(1–3):36–45. https://doi.org/10.1016/j.desal.2010.03.010

[9] Ma N., Wei J., Qi S., Zhao Y., Gao Y., Tang C. Y. Nanocomposite substrates for controlling internal concentration polarization in forward osmosis membranes. Journal of Membrane Science. 2013;441:54–62. https://doi.org/10.1016/j.memsci.2013.04.004

[10] Zare M., Zokaee Ashtiani F., Fouladitajar A. CFD modeling and simulation of concentration polarization in microfiltration of oil–water emulsions: Application of an Eulerian multiphase model. Desalination. 2013;324:37–47. https://doi.org/10.1016/j.desal.2013.05.022

[11] Azaïs A., Mendret J., Gassara S., Petit E., Deratani A., Brosillon S. Nanofiltration for wastewater reuse: Counteractive effects of fouling and matrix on the rejection of pharmaceutical active compounds. Separation and Purification Technology. 2014;133:313–327. https://doi.org/10.1016/j.seppur.2014.07.007

[12] Vyas B. B., Ray P. Preparation of nanofiltration membranes and relating surface chemistry with potential and topography: Application in separation and desalting of amino acids. Desalination. 2015;362:104–116. https://doi.org/10.1016/j.desal.2015.02.013

[13] Ochando-Pulido J. M., Hodaifa G., Martínez-Férez A. Permeate recirculation impact on concentration polarization and fouling on RO purification of olive mill wastewater. Desalination and Water Treatment. 2015;56(5):1259–1269. https://doi.org/10.1016/j.desal.2014.03.025

[14] Azaïs A., Mendret J., Petit E., Brosillon S. Evidence of solute–solute interactions and cake enhanced concentration polarization during removal of pharmaceuticals from urban wastewater by nanofiltration. Water Research. 2016;104:156–167. https://doi.org/10.1016/j.watres.2016.08.014

[15] Shang W., Wang R., Dong W., Li X., Li M., Zhao L., Yang S., Sun F. Laser induced fluorescence (LIF) technique visualizes and characterizes concentration polarization and fouling layer in the cross-flow nanofiltration. Journal of Membrane Science. 2020;610:118256. https://doi.org/10.1016/j.seppur.2018.11.045

[16] Mahlangu O. T., Mamba B. B. Influence of Membrane Salt Rejection Properties on Cake-Enhanced Concentration Polarization Effects During Colloidal Fouling of Nanofiltration Membranes. Membranes. 2025;15(7):215. https://doi.org/10.3390/membranes15070215

[17] Xiao P., Liu L. A New Method for Quantitative Evaluation of Concentration Polarization Under Different Conditions for the Forward Osmosis Process. Membranes. 2025;15(8):223. https://doi.org/10.3390/membranes15080223

[18] Shi P., et al. $Ca^{2+}$-Mediated Humic Acid Clusters: The Key to Unraveling Neutral Pollutant Rejection in Nanofiltration. Environmental Science & Technology. 2025. https://doi.org/10.1021/acs.est.5c13359

[19] Zhang H., Duan Y., Elimelech M., Wang Y., et al. Scalable Catalytic Nanofiltration Membranes for Advanced Water Treatment. Nature Water. 2025;3:1038–1047. https://www.nature.com/articles/s44221-025-00483-y

[20] Jin P., Yang Z., Ceyssens F., Yang J., Yuan S., Wang H., et al. Nanoimprinted Polyamide Membranes for Ultrafast and Precise Molecular Sieving with Low Fouling. Nature Communications. 2025;16:8807. https://www.nature.com/articles/s41467-025-64262-9

[21] Su M., Zhang Y., Liu S., Wang Y., Li T. Challenges and Solutions for Nanofiltration Membranes in Water Treatment. Frontiers in Chemical Engineering. 2025;7:1695014. https://doi.org/10.3389/fceng.2025.1695014

## СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

[1] Hoek E. M. V., Elimelech M. Посилена осадовим шаром концентраційна поляризація: новий механізм забруднення солевідштовхувальних мембран. Environmental Science & Technology. 2003. Vol. 37(24). P. 5581–5588. URL: https://pubs.acs.org/doi/10.1021/es0262636

[2] Jamal K., Khan M. A., Kamil M. Математичне моделювання концентраційної поляризації в процесах опріснення методом зворотного осмосу. Desalination. 2004. Vol. 160(1). P. 29–42. URL: https://www.sciencedirect.com/journal/desalination/vol/160/issue/1

[3] Kim S., Hoek E. M. V. Моделювання концентраційної поляризації в процесах зворотного осмосу. Desalination. 2005. Vol. 186(1–3). P. 111–128. URL: https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0011916405006867

[4] Geraldes V., Afonso M. D. CFD-моделювання концентраційної поляризації в системах зворотного осмосу. AIChE Journal. 2006. Vol. 52(10). P. 3353–3362. URL: https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0011916405006867

[5] Subramani A., Kim S., Hoek E.M.V. Безпосереднє спостереження початкового осадження мікроорганізмів на мембранах зворотного осмосу та нанофільтрації. Journal of Membrane Science. 2006. Vol. 277(1–2). P. 7–17. URL: https://doi.org/10.1016/j.memsci.2008.03.025

[6] Tang C. Y., She Q., Lay W. C. L., Wang R., Fane A. G. Поєднаний вплив внутрішньої концентраційної поляризації та забруднення на поведінку потоку в мембранах прямого осмосу під час фільтрації гумінової кислоти. Journal of Membrane Science. 2010. Vol. 354(1–2). P. 123–133. URL: https://doi.org/10.1016/j.memsci.2010.02.059

[7] Vogel D., Simon A., Alturki A. A., Bilitewski B., Price W. E., Nghiem L. D. Вплив забруднення та утворення накипу на утримання мікроконцентрацій органічних забруднювачів нанофільтраційною мембраною: роль посиленої осадовим шаром концентраційної поляризації. Separation and Purification Technology. 2010. Vol. 73(2). P. 256–263. URL: https://doi.org/10.1016/j.seppur.2010.04.010

[8] Fernández-Sempere J., Ruiz-Beviá F., García-Algado P., Salcedo-Díaz R. Експериментальне дослідження концентраційної поляризації в системі поперечного потоку зворотного осмосу з використанням цифрової голографічної інтерферометрії. Desalination. 2010. Vol. 257(1–3). P. 36–45. URL: https://doi.org/10.1016/j.desal.2010.03.010

[9] Ma N., Wei J., Qi S., Zhao Y., Gao Y., Tang C. Y. Нанокомпозитні підкладки для контролю внутрішньої концентраційної поляризації в мембранах прямого осмосу. Journal of Membrane Science. 2013. Vol. 441. P. 54–62. URL: https://doi.org/10.1016/j.memsci.2013.04.004

[10] Zare M., Zokaee Ashtiani F., Fouladitajar A. CFD-моделювання та симуляція концентраційної поляризації при мікрофільтрації нафтоводяних емульсій: застосування ейлерової багатофазної моделі. Desalination. 2013. Vol. 324. P. 37–47. URL: https://doi.org/10.1016/j.desal.2013.05.022

[11] Azaïs A., Mendret J., Gassara S., Petit E., Deratani A., Brosillon S. Нанофільтрація для повторного використання стічних вод: протидіючі ефекти забруднення та матриці на затримання фармацевтичних активних сполук. Separation and Purification Technology. 2014. Vol. 133. P. 313–327. URL: https://doi.org/10.1016/j.seppur.2014.07.007

[12] Vyas B. B., Ray P. Виготовлення нанофільтраційних мембран та встановлення зв'язку між хімією поверхні, потенціалом і топографією: застосування для розділення та знесолення амінокислот. Desalination. 2015. Vol. 362. P. 104–116. URL: https://doi.org/10.1016/j.desal.2015.02.013

[13] Ochando-Pulido J. M., Hodaifa G., Martínez-Férez A. Вплив рециркуляції пермеату на концентраційну поляризацію та забруднення під час очищення стічних вод оливкових млинів методом зворотного осмосу. Desalination and Water Treatment. 2015. Vol. 56(5). P. 1259–1269. URL: https://doi.org/10.1016/j.desal.2014.03.025

[14] Azaïs A., Mendret J., Petit E., Brosillon S. Докази взаємодії між розчиненими речовинами та посиленої осадовим шаром концентраційної поляризації під час видалення фармацевтичних препаратів із міських стічних вод методом нанофільтрації. Water Research. 2016. Vol. 104. P. 156–167. URL: https://doi.org/10.1016/j.watres.2016.08.014

[15] Shang W., Wang R., Dong W., Li X., Li M., Zhao L., Yang S., Sun F. Метод лазерно-індукованої флуоресценції (LIF) для візуалізації та характеристики концентраційної поляризації й шару забруднення в умовах поперечнопотокової нанофільтрації. Journal of Membrane Science. 2020. Vol. 610. Article 118256. URL: https://doi.org/10.1016/j.seppur.2018.11.045

[16] Mahlangu O. T., Mamba B. B. Вплив властивостей мембран щодо затримання солей на ефекти посиленої осадовим шаром концентраційної поляризації під час колоїдного забруднення нанофільтраційних мембран. Membranes. 2025. Vol. 15(7). Article 215. URL: https://doi.org/10.3390/membranes15070215

[17] Xiao P., Liu L. Новий метод кількісної оцінки концентраційної поляризації за різних умов у процесі прямого осмосу. Membranes. 2025. Vol. 15(8). Article 223. URL: https://doi.org/10.3390/membranes15080223

[18] Shi P., et al. Кластери гумінової кислоти, опосередковані іонами Ca2+: ключ до розуміння затримання нейтральних забруднювачів у процесах нанофільтрації. Environmental Science & Technology. 2025. URL: https://doi.org/10.1021/acs.est.5c13359

[19] Zhang H., Duan Y., Elimelech M., Wang Y., et al. Масштабовані каталітичні нанофільтраційні мембрани для сучасного очищення води. Nature Water. 2025. Vol. 3. P. 1038–1047. URL: https://www.nature.com/articles/s44221-025-00483-y

[20] Jin P., Yang Z., Ceyssens F., Yang J., Yuan S., Wang H., et al. Наноімпринтовані поліамідні мембрани для надшвидкого та точного молекулярного просіювання з низьким рівнем забруднення. Nature Communications. 2025. Vol. 16. Article 8807. URL: https://www.nature.com/articles/s41467-025-64262-9

[21] Su M., Zhang Y., Liu S., Wang Y., Li T. Проблеми та рішення щодо використання нанофільтраційних мембран у водоочищенні. Frontiers in Chemical Engineering. 2025. Vol. 7. Article 1695014. URL: https://doi.org/10.3389/fceng.2025.1695014

© Мишковець С. М.
Дата першого надходження статті до видання: 07.08.2026
Дата прийняття статті до друку після рецензування: 02.09.2026
Дата публікації (оприлюднення) статті: 02.11.2026



Стаття поширюється на умовах ліцензії відкритого доступу (CC BY 4.0)