УДК 628.35:66.081.6
DOI https://doi.org/10.15589/znp2026.3(506).8

MEMBRANE FOULING: CURRENT RESEARCH TRENDS IN REVERSE OSMOSIS, FORWARD OSMOSIS, AND NANOFILTRATION PROCESSES

ЗАБРУДНЕННЯ МЕМБРАН: СУЧАСНІ НАПРЯМИ ДОСЛІДЖЕНЬ У ПРОЦЕСАХ ЗВОРОТНОГО ОСМОСУ, ПРЯМОГО ОСМОСУ ТА НАНОФІЛЬТРАЦІЇ

Dmytro I. Menko
diimamenko@gmail.com
ORCID: 0009-0005-1667-3482
Serhii V. Huliienko
sergiiguliienko@gmail.com
ORCID: 0000-0002-9042-870X

Д. І. Менько,
аспірант
С. В. Гулієнко,
канд. техн. наук, доцент

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

Abstract. Membrane technologies are now part of the normal architecture of water treatment, desalination, wastewater reuse and the polishing of difficult industrial streams. Their usefulness, however, is never separated from the way the membrane surface changes during operation. Fouling lowers permeate flux, increases energy demand, shortens the useful life of modules and makes cleaning a routine operational decision rather than an occasional correction. In practice, this problem is rarely caused by one isolated foulant. Organic matter, salts, colloids and microbial communities usually form mixed layers, and these layers differ in density, reversibility and effect on selectivity. This is why recent work pays less attention to single-component descriptions and more to interfacial interactions, feed-water chemistry, surface properties and operating conditions. *Purpose*. The article reviews recent research on membrane fouling in reverse osmosis, forward osmosis and nanofiltration. The comparison is focused on layer formation, prevention, cleaning, monitoring and prediction, with particular attention to cases where laboratory mechanisms do not transfer neatly to real water matrices. *Results*. In reverse osmosis, the most consequential processes are concentrated at the dense polyamide surface, where organic adsorption, scaling and biological growth may build a composite layer rather than three separate deposits. Forward osmosis follows a different logic: the draw solution, reverse salt diffusion, concentration polarization and the water state inside gel-like deposits can be as important as the amount of material attached to the membrane. In nanofiltration, membrane charge, pH, ionic strength, multivalent cations and organic-inorganic complexes often decide whether a loose deposit remains removable or becomes persistent. The reviewed studies do not support a single antifouling recipe. Pretreatment is useful when feed chemistry drives irreversible deposition; surface modification matters when early adhesion dominates; cleaning and monitoring become more valuable when they capture the transition from a reversible layer to a stable one. *Practical importance*. Membrane fouling is better understood as a changing interfacial process than as simple accumulation of impurities. Reverse osmosis, forward osmosis and nanofiltration have different weak points, so control strategies have to be mechanism-based. The field now needs longer tests with real waters and wastewaters, including seasonal variation, microbial shifts, salinity changes and mixed organic-inorganic loads. Without that step, many promising laboratory results will remain difficult to use in operational systems.
Key words: membrane; membrane fouling; cleaning; reverse osmosis; forward osmosis; nanofiltration; biofouling; organic fouling; inorganic scaling; membrane modification.

Анотація. Мембранні технології добре закріпилися у водоочищенні не тому, що вони однаково придатні для будь-якого потоку, а тому, що дають змогу працювати з тонким розділенням там, де звичайні схеми вже не дають потрібної стабільності. Їх використовують в опрісненні, повторному використанні стічних вод, доочищенні промислових середовищ. Разом із цим майже кожна практична система рано чи пізно стикається з проблемою, яку не вирішує сама заміна мембрани на дорожчу або новішу. Забруднення змінює умови перенесення крізь мембрану, знижує потік пермеату, підвищує енергетичні витрати, прискорює зношування елементів і фактично перетворює очищення на регулярну частину експлуатації, а не на допоміжну процедуру. У реальних водах

цей процес рідко має просту будову. Мембрана контактує не з одним модельним компонентом, а з органікою, солями, колоїдами, мікробними угрупованнями та продуктами їхньої взаємодії. Частина цих речовин лише відкладається на поверхні, інші змінюють заряд, щільність або гідратацію шару. У результаті виникає не просто осад, а рухома за складом структура: іноді пухка й відносно легко змивна, іноді щільна, гелева або майже необоротна. Тому сучасний аналіз забруднення мембран усе менше зосереджується на пошуку одного «головного» забруднювача. Набагато продуктивніше з'ясовувати, за яких умов різні компоненти водної матриці починають працювати разом і чому однакова мембрана в іншому потоці поводиться вже зовсім не так. *Мета*. У статті узагальнено сучасні дослідження забруднення мембран у зворотному осмосі, прямому осмосі та нанофільтрації. Основну увагу приділено не формальному переліку типів забруднення, а тому, як формується забруднювальний шар, чому він переходить в необоротний стан і які підходи до попередження, очищення, моніторингу та прогнозування мають практичний сенс у різних процесах. *Результати*. Огляд показує, що у зворотному осмосі ключова частина процесу розгортається на щільному поліамідному шарі: органічна адсорбція, мінеральне осадження й біологічне розростання часто накладаються одне на одне, а не діють окремо. У прямому осмосі картина інша. На стабільність процесу впливають осмотичний розчин, зворотна дифузія солей, концентраційна поляризація та стан зв'язаної води в гелеподібних відкладах. Для нанофільтрації особливо чутливими виявляються заряд мембрани, кислотність середовища, іонна сила, багатовалентні катіони та органічно-неорганічні комплекси. Через ці чинники навіть порівняно слабке початкове накопичення може перейти в шар, який уже погано відмивається. Розглянуті роботи також показують, що попередня обробка води, коагуляція, флокуляція, регулювання гідрофільності та заряду поверхні, м'якші протоколи очищення й ранній моніторинг працюють не як універсальний набір заходів, а лише тоді, коли вони прив'язані до домінантного механізму утворення шару. *Практична значимість*. Забруднення мембран варто описувати як динамічний міжфазний процес. Просте уявлення про накопичення домішок на поверхні тут не пояснює ані різної оборотності шару, ані відмінностей між RO, FO та NF. Для кожного з цих процесів існує своя зона нестабільності: у зворотному осмосі вона пов'язана переважно з поліамідною поверхнею і змішаними шарами, у прямому осмосі – з осмотично керованим масопереносом, у нанофільтрації – із зарядово-іонними взаємодіями. Подальші дослідження мають частіше виходити за межі коротких лабораторних тестів і працювати з реальними водами, де одночасно змінюються органічний склад, солоність, мікробна активність і сезонні умови.

Ключові слова: мембрана; забруднення мембран; очищення; зворотний осмос; прямий осмос; нанофільтрація; біозабруднення; органічне забруднення; неорганічне осадження; модифікація мембран.

ПОСТАНОВКА ЗАДАЧІ

Поширення мембранних технологій змінило саму логіку водоочищення: вони вже не доповнюють традиційні схеми, а дедалі частіше визначають їхню структуру. Зворотний осмос у цьому процесі займає центральне місце, адже на нього припадає основна частка мембранного опріснення, особливо в регіонах і галузях, де зростає залежність від нетрадиційних джерел води [28, с. 2]. Однак така концентрація уваги на RO не повинна звужувати аналіз. Сучасні мембранні системи працюють як сукупність взаємодоповнювальних процесів: мікрофільтрація й ультрафільтрація забезпечують попереднє вилучення завислих та колоїдних компонентів, нанофільтрація використовується для селективного розділення, прямий осмос і мембранна дистиляція відкривають окремі можливості для роботи зі складними або високосолоними потоками [19, с. 2; 26, с. 2]. У таких умовах забруднення мембран перетворюється на системну проблему. Воно впливає не лише на потік чи частоту очищення, а й на вибір конфігурації процесу, витрати енергії, тривалість роботи мембрани та загальну економіку технології.

Проблема забруднення мембран не зводиться до самого падіння потоку. На поверхні або в приповерхневій зоні поступово формується додатковий бар'єр, причому його склад і структура не залишаються сталими. Він змінює гідравлічний опір, може впливати на селективність і зрештою визначає, наскільки стабільно працюватиме процес. У зворотному осмосі це видно особливо чітко. Органічні речовини, неорганічні солі й біологічні компоненти в реальному потоці не існують окремо: вони одночасно присутні у водній матриці, адсорбуються на поліамідній поверхні, відкладаються, створюють умови для біологічного розростання і разом формують композитний забруднювальний шар. Тому такий шар некоректно описувати лише як осад або лише як біоплівку. Його властивості виникають не з одного механізму, а з накладання кількох процесів, і саме це робить RO-забруднення складним для прогнозування та контролю.

АНАЛІЗ ОСТАННІХ ДОСЛІДЖЕНЬ І ПУБЛІКАЦІЙ

Останні дослідження дедалі частіше відмовляються від уявлення про забруднення мембран як про стабільний шар із наперед заданими властивостями. У роботі У на матеріалі шахтних вод показано, що висока іонна сила, натрій і кальцій формують неорганічну складову, тоді як органічне навантаження й поліакриламідні компоненти перебудовують мікробну спільноту; автори пов'язують еволюцію Pseudomonadota з кінетикою забруднення і робочими

показниками RO-системи [17, с. 1–2]. Цей підхід важливий для оглядової статті, бо пояснює, чому однакова мембрана в різних водах може демонструвати різні сценарії втрати продуктивності.

Помітний напрям останніх років – перехід від післяфактумної діагностики до раннього моніторингу й прогнозування. Стайн показує, що LSPR-сенсинг дає змогу кількісно фіксувати адсорбцію забруднювачів у реальному часі й краще узгоджується з фактичним RO-забрудненням, ніж SDI [23, с. 1]. У моделюванні подібну роль відіграє поєднання фізичних закономірностей і машинного навчання. Саїді Гаракані критикує класичні закони Hermia за те, що вони описують ідеалізовані одиничні механізми, тоді як у реальних процесах відбуваються переходи між повним блокуванням пор, проміжним блокуванням, звуженням пор і cake filtration [9, с. 1]. Запропонована авторами physics-informed neural network інтегрує ці механізми в єдину модель і дозволяє визначати перехід між домінантними стадіями забруднення [9, с. 1–2].

МЕТА ДОСЛІДЖЕННЯ

Метою статті є узагальнення сучасних напрямів дослідження забруднення мембран у процесах зворотного осмосу, прямого осмосу та нанофільтрації з урахуванням відмінностей між органічним, неорганічним, біологічним, колоїдним і композитним забрудненням. Для досягнення цієї мети стаття порівнює механізми формування забруднювального шару в RO, FO та NF; аналізує підходи до попередження й очищення мембран; оцінює роль моніторингу, математичного моделювання та машинного навчання у прогнозуванні забруднення; визначає напрями, у яких лабораторні результати потребують перевірки на реальних водах, складних стічних водах і довготривалих експлуатаційних режимах.

МЕТОДИ, ОБ'ЄКТ ТА ПРЕДМЕТ ДОСЛІДЖЕННЯ

Забруднення мембран формує на межі водної матриці й мембранної поверхні окрему динамічну зону. У цій зоні домішки контактують із матеріалом мембрани, змінюють поведінку одна одної і реагують на локальний режим потоку біля поверхні. Через це поділ на органічне, неорганічне, колоїдне та біологічне забруднення працює радше як аналітична схема, а не як точний опис реального процесу. Така класифікація допомагає розвести механізми, але не скасовує того, що в робочій системі вони часто накладаються. Го показує це на прикладі нанофільтрації: органічні, неорганічні, мікробні та колоїдні компоненти можуть взаємодіяти між собою і переходити в композитний забруднений шар. Саме такий шар здатний різко знижувати потік, підвищувати трансмембранний тиск і збільшувати експлуатаційні витрати [8, с. 2]. Подібну логіку розвивають Лі та Лю. Вони розмежовують мінеральний осад, органічне забруднення, частинково-колоїдне забруднення та формування біоплівки, але не зводять проблему до самої класифікації. Усі ці процеси, попри різне походження, ведуть до близького практичного результату: мембрана втрачає проникність, селективність і робочий ресурс [19, с. 3].

ОСНОВНИЙ МАТЕРІАЛ

Практична класифікація забруднення має враховувати не тільки хімічну природу забруднювачів. Не менш важливими є механізм накопичення, місце формування шару і те, чи можна цей шар видалити без істотної втрати продуктивності. Поверхневий осадовий шар часто частково знімається промиванням. Натомість гелеві структури, внутрішнє блокування пор і органо-мінеральні комплекси швидше переходять у стійкий, майже необоротний стан. Ван показує це на системах із Sr^{2+} та природною органічною речовиною: Sr^{2+} разом з альгінатом натрію формував щільний альгінатний гелевий шар із низьким відновленням потоку, тоді як за наявності бичачого сироваткового альбуміну забруднення більше залежало від електростатичних взаємодій і краще видалялося деіонізованою водою [16, с. 1]. Тому для подальшого аналізу зворотного осмосу, прямого осмосу та нанофільтрації доцільно використовувати комбіновану класифікацію: за хімічною природою забруднювача, механізмом формування шару, оборотністю, місцем накопичення та участю у змішаному забрудненні. Така рамка дає змогу пояснити, чому однакові класи речовин у різних мембранних процесах дають різні експлуатаційні наслідки [29, с. 2].

У зворотному осмосі забруднення формується переважно на поверхні щільного поліамідного шару. Це пов'язано з будовою PA-TFC-мембран: активний шар має субнанометровий вільний об'єм і безпосередньо контактує зі складною водною матрицею. Її нерівний рельєф із виступами та западинами, гідрофобні ділянки і карбоксильні групи створюють умови для накопичення органіки, солей та біологічних компонентів у мікронерівностях [30, с. 2].

Для зворотного осмосу найкраще проблему видно на прикладі змішаного забруднення. У дослідженні шахтних вод У показує, що серед неорганічних відкладень переважали іони Na^+ і Ca^{2+}, тоді як за наявності поліакриламіду або гумінової кислоти органічна частка сягала 54,1 % загального забруднення. Одночасно змінювалася й мікробна спільнота, зокрема частка представників типу Pseudomonadota [23, с. 1]. Такі результати важливі методологічно: неорганічне осадження, органічна адсорбція та біозабруднення не просто співіснують, а взаємно підсилюють одне одного. Іони ущільнюють органічний шар, органіка створює кондиціонувальну плівку для мікроорганізмів, а біоплівка змінює локальний масоперенос і хімію поверхні [24, с. 2].

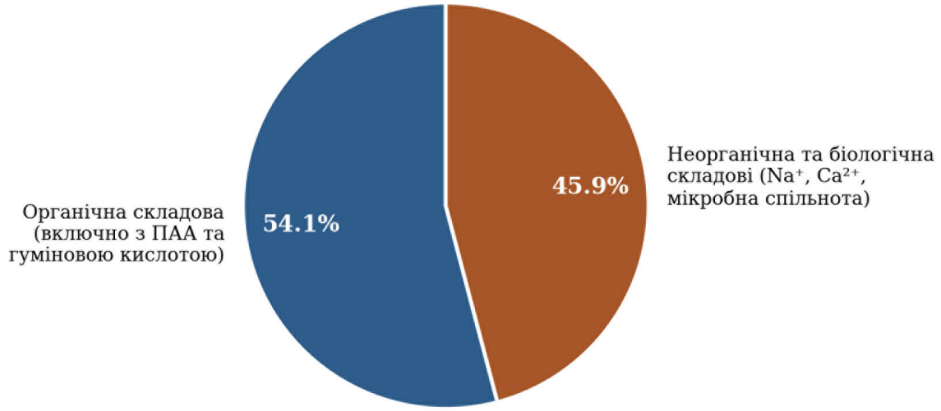


Рис. 1. Структура забруднення RO-мембрани у шахтних водах

Кількісну структуру такого змішаного забруднення наочно ілюструє розподіл частки органічної та решти складових у досліді з шахтними водами.

У багатокомпонентному середовищі органічна частка може переважати над сумою неорганічних і біологічних відкладень. Це добре показує, чому забруднення у зворотному осмосі не варто описувати як одиничний процес. Ідеться радше про композитний шар, у якому різні складники не просто присутні поруч, а змінюють умови накопичення одне одного.

Забруднення у зворотному осмосі має ще й виразну часову динаміку. Зареї та Кіблавей показують, що сезонні зміни температури, солоності, розчиненої органічної речовини й мікробної активності формують різні режими забруднення. В аридних прибережних системах літнє біологічне забруднення може посилюватися гіпсовим мінеральним осадженням. У помірних водних системах узимку помітнішою стає роль гумінових речовин. У тропічних водозаборах мусонні імпульси різко підвищують колоїдне й органічне навантаження [18, с. 1]. Такі відмінності важливі для експлуатації, бо одна й та сама мембранна технологія фактично працює в різних режимах забруднення залежно від сезону й водної матриці.

Окремо треба враховувати здатність забруднювального шару накопичувати стійкі мікрозабруднювачі. Еканде виявив довголанцюгові пер- і поліфторалкільні речовини та їхні прекурсори в біоорганічних шарах на відпрацьованих елементах зворотного осмосу в повномасштабній системі повторного використання води для питних потреб [7, с. 1]. Через це своєчасне очищення й ранній моніторинг мають значення не тільки для підтримання продуктивності. Вони також зменшують ризик незворотного забруднення, обмежують накопичення стійких домішок і подовжують життєвий цикл модулів зворотного осмосу [22, с. 1].

Прямий осмос нерідко подають як процес, менш схильний до забруднення, бо його рушійною силою є не гідравлічний тиск, а різниця осмотичних потенціалів. Але це пояснення працює лише до певної межі. Умови осадження справді можуть бути м'якшими, ніж у зворотному осмосі, проте стабільність прямого осмосу залежить від складу осмотичного розчину, орієнтації мембрани, концентраційної поляризації та зворотної дифузії солей. Wang показує, що за низького вмісту загального органічного вуглецю переважають взаємодії між забруднювачем і мембраною. Коли ж концентрація органіки зростає, процес зміщується до взаємодій між самими забруднювачами. Бичачий сироватковий альбумін і танінова кислота виявляли вищу схильність до забруднення, ніж альгінат натрію [21, с. 1]. Через це забруднення у прямому осмосі не варто вважати просто слабшою версією забруднення у зворотному осмосі. Воно має власну логіку прикріплення, ущільнення шару й масопереносу.

Специфіка прямого осмосу найвиразніше проявляється там, де починає діяти зворотна дифузія солей. У системі альгінату натрію з Cu(II) Ю показує, що хлорид натрію, який дифундує у зворотному напрямі, змінює іонну силу живильного розчину. Через це комплекси альгінату з Cu(II) переходять від зшитої сітчастої структури до флокульованих частинок, а вода всередині забруднювального шару розподіляється інакше [26, с. 1]. Для фільтраційного опору тут важлива вже не тільки товщина шару. Вирішальним стає те, яка частка води залишається міжструктурно або приповерхнево зв'язаною. Інше дослідження забруднення альгінатом, індукованого Cu(II), це підтверджує: зв'язана вода, тобто сукупність міжструктурної та приповерхневої води, була головним чинником зміни опору, а різниця водного потенціалу, зумовлена зв'язаною водою, пояснювала 91,9 % цього опору [13, с. 1]. Такий результат зміщує аналіз від простої геометрії осадового шару до фізико-хімічного стану води всередині забруднення.

Кількісну вагу цього механізму у формуванні фільтраційного опору унаочнює діаграма за даними Ю.



Рис. 2. Декомпозиція фільтраційного опору у CU(II)-індукованому альгінатному забрудненні FO

У системі альгінат–Cu(II) майже дев'ять десятих опору мембрани прямого осмосу припадає саме на стан зв'язаної води. Решта чинників на цьому тлі вже не визначає поведінку процесу настільки суттєво.

У нанофільтрації забруднення також не зводиться до механічного накопичення домішок на поверхні. Тут одночасно працюють заряд мембрани, кислотність середовища, іонна сила та склад природної органічної речовини. Через це нанофільтрація займає проміжне, але не просте місце між ультрафільтрацією і зворотним осмосом. Вона працює за нижчого тиску, ніж зворотний осмос, проте дуже чутлива до взаємодій між багатовалентними іонами, гуміновими речовинами, білками, полісахаридами та колоїдами. Го та співавтори на матеріалі питного водопостачання описують забруднення нанофільтраційних мембран як багатофакторний процес. Органічні, неорганічні, мікробні й колоїдні компоненти тут можуть не просто накопичуватися паралельно, а посилювати дію одне одного. Показовий результат дала повна попередня обробка: кінцеве падіння потоку зменшилося з 90,1 % до 8,6 %, а домінування змістилося від необоротного забруднення до більш оборотного [12, с. 1].

Масштаб цього впливу добре видно через порівняння двох сценаріїв – роботи мембрани без повної попередньої обробки і після її застосування.

Різниця у понад вісімдесят процентних пунктів засвідчує, що визначальним є не сам факт фільтрації, а попереднє формування властивостей подачі, які зменшують ризик переходу шару в необоротний стан.

Запобігання забрудненню мембран нині розглядається не як окреме вилучення домішок перед мембранним блоком, а як керування умовами, за яких забруднювальний шар формується повільніше й легше

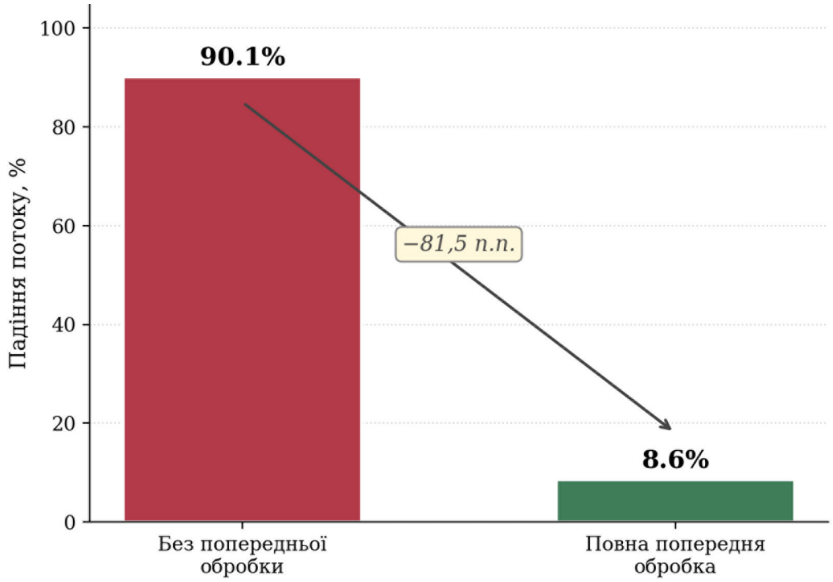


Рис. 3. Падіння потоку нанофільтраційної мембрани до та після впровадження повної попередньої обробки

видаляється. Для нанофільтрації питної води повний ланцюг попередньої обробки зменшив падіння потоку з 90,1 % до 8,6 %, а саме забруднення змістилося від переважно необоротного до більш оборотного [11, с. 1]. У зворотному осмосі близький ефект дала титанова попередня коагуляція. Вона послаблювала адгезію початкового шару, знижувала мінеральне осадження через менший залишковий вміст металів і стримувала біологічне забруднення [25, с. 1]. Тому вирішальним стає не сам факт коагуляції чи флокуляції, а те, як після них змінюються заряд, агрегування, мінеральний склад і біологічна активність середовища.

Другий напрям пов'язаний із поверхнею мембрани та режимом роботи. Для поліамідних мембран зворотного осмосу хвиляста будова селективного шару, гідрофобні ділянки й карбоксильні групи сприяють початковій адсорбції [30, с. 2]. Звідси інтерес до гідрофілізації, регулювання заряду, гідратованих шарів і функціональних нанокомпонентів. Цвітеріонна модифікація ультрафільтраційних мембран, наприклад, зменшувала необоротне забруднення приблизно до 10 % і давала відновлення потоку на рівні 80 %. Аніонна модифікація виглядала привабливішою за початковою продуктивністю, але після роботи така мембрана очищалася гірше [24, с. 1]. Тобто вищий стартовий потік сам по собі ще не означає кращої експлуатаційної поведінки.

Гідродинамічне проєктування працює в тому самому напрямі: структурування керамічних мембран у дискових модулях зменшує застійні зони й підсилює самоочищення поверхні [20, с. 1]. Пілотні дослідження ультрафільтрації також показують, що коефіцієнт вилучення 97,5 % може формувати пухкий шар осаду, який діє як попередній фільтр [27, с. 1]. Отже, сучасне попередження забруднення поєднує підготовку води, властивості поверхні та режим, за якого шар не переходить у щільний і дорогий для видалення стан.

Кількісний ефект гідрофілізаційної модифікації поверхні зручно подати у вигляді поряд розташованих індикаторів фолінгу та відновлення потоку.

Поєднання низької частки необоротного забруднення з високим відновленням потоку показує, чому цвіттеріонна модифікація розглядається як один із перспективних маршрутів керування поверхневими взаємодіями у мембранних процесах.

Очищення мембран дедалі важче розглядати лише як спосіб повернути втрачений потік. У реальній експлуатації це частина життєвого циклу системи, причому досить дорога частина. Кожен цикл промивання означає реагенти, простої обладнання, додатковий екологічний слід і певне навантаження на сам матеріал мембрани. Лі та Лю пояснюють появу нових фізичних методів саме обмеженнями хімічного очищення: воно добре працює проти частини забруднень, але водночас збільшує витрати, подовжує зупинки й створює проблему відпрацьованих реагентів [19, с. 2; 20]. Через це очищення нині логічніше будувати як послідовність втручань. Спочатку – м'які фізичні або гідравлічні дії, які не дають шару швидко ущільнитися. Далі, якщо шар уже став стійким і погано знімається, – хімічне очищення. Такий підхід не скасовує реагентні методи, але обмежує їх до тих ситуацій, де вони справді потрібні.

Вибір реагентів має залежати від складу шару, а не від універсальної технологічної звички. Важить те, який шар утворився на мембрані. Якщо переважають органічні або гелеподібні відкладення, логічнішими є лужні розчини. Для мінерального осадження потрібні кислотні режими, для біологічних нашарувань – окиснювальні. Водночас сильніше очищення не завжди означає кращу експлуатацію: агресивні реагенти можуть відновити проникність, але разом із цим пришвидшити деградацію мембранного матеріалу. У дослідженні Гарібіана з нанофільтрації

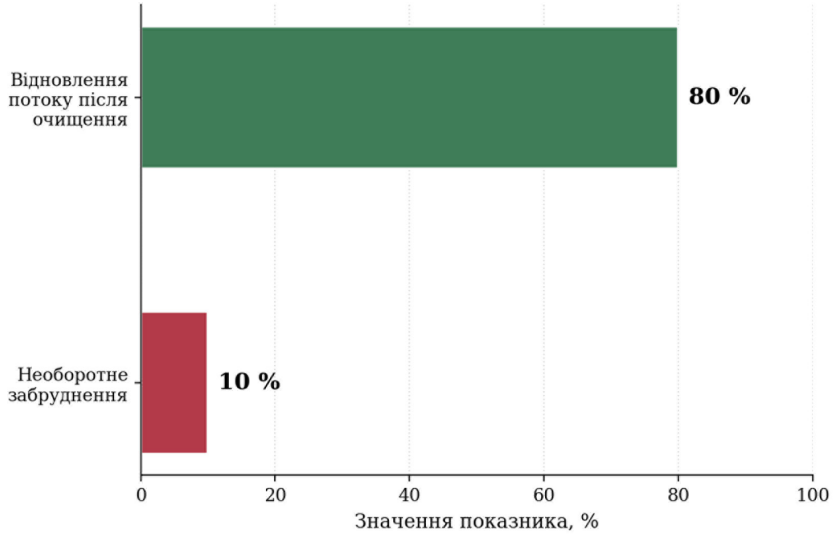


Рис. 4. Показники цвіттеріонно модифікованої UF-мембрани

синтетичної водної фази гідротермального зрідження частина фільтраційного опору була оборотною і знімалася водним промиванням. Інша частина – стійкі адсорбовані забруднювачі та блокування пор – потребувала вже лужного очищення [10, с. 1]. Отже, очищення тут – це спосіб реагувати на конкретний механізм забруднення, поки він ще не перетворився на стійку втрату ресурсу мембрани.

ОБГОВОРЕННЯ ОТРИМАНИХ РЕЗУЛЬТАТІВ

У моніторингу забруднення головне питання поступово зміщується: важливо не тільки виміряти втрату продуктивності, а й зрозуміти, коли саме починає формуватися шар. Потік, трансмембранний тиск і загальний фільтраційний опір залишаються базовими експлуатаційними параметрами. Проблема в тому, що вони часто спрацьовують тоді, коли мембрана вже працює через додатковий забруднювальний бар'єр. Абдулсалам та співавтори наголошують, що для аналізу динаміки потрібні методи прямішого спостереження за шаром у реальному часі. До таких інструментів належить оптична когерентна томографія, а також її поєднання з цифровою обробкою зображень [1, с. 2]. Це змінює саму логіку контролю: система має не просто повідомляти про втрату потоку, а показувати ранній етап, коли забруднення ще можна утримати в оборотному режимі.

Моделювання має сенс тоді, коли воно не підміняє фізику процесу красивою статистичною кривою. Класичні моделі корисні для опису блокування пор, звуження порового простору та формування шару осаду, але їхня слабкість проявляється в системах, де домінантний механізм змінюється в часі. Саїді Гаракані пропонує фізично інформовану нейронну мережу, яка поєднує чотири механізми Гермії та визначає переходи між ними без ручного вибору стадії [9, с. 1–2]. На рівні модуля Huang показує іншу межу спрощення: деформація мембрани у спірально-навитих елементах змінює локальне зсувне напруження і може зменшувати падіння потоку, тому гідродинаміку не варто зводити до плоскої лабораторної комірки [15, с. 1–2]. Практичну цінність раннього підходу підтверджує Вей: контроль ділянок переважного накопичення домішок в RO-елементах давав змогу раніше запускати очищення, зменшувати необоротне забруднення і водночас отримувати екологічні переваги за результатами оцінювання життєвого циклу [22, с. 1].

Порівняння RO, FO та NF не зводиться до питання, який процес «кращий». У кожного з них своя вразлива ділянка. У зворотному осмосі забруднення концентрується на щільному поліамідному шарі й посилюється через поєднання органічних, сольових і біологічних компонентів [2, с. 1–2; 27, с. 1–2]. У прямому осмосі критичними стають осмотичний розчин, зворотна дифузія солей і стан води в шарі осаду [20, с. 1–2; 28, с. 1–2]. У нанофільтрації найсильніше працюють заряд мембрани, кислотність середовища, іонна сила та взаємодія органіки з багатовалентними іонами [6, с. 1–2; 25, с. 1–2; 23, с. 1–2].

Щоб це зіставлення не залишалося лише описовим, критичні чинники варто подати одночасно для трьох процесів. На діаграмі використано якісну оцінку впливовості.

Діаграма показує, що універсального домінантного механізму немає. У RO, FO та NF різними є і місце формування шару, і рушійна сила, і спосіб переходу від оборотного накопичення до стійкого забруднення. Звідси випливає потреба не в одному «найкращому» методі, а в спеціалізованих стратегіях для кожного процесу.

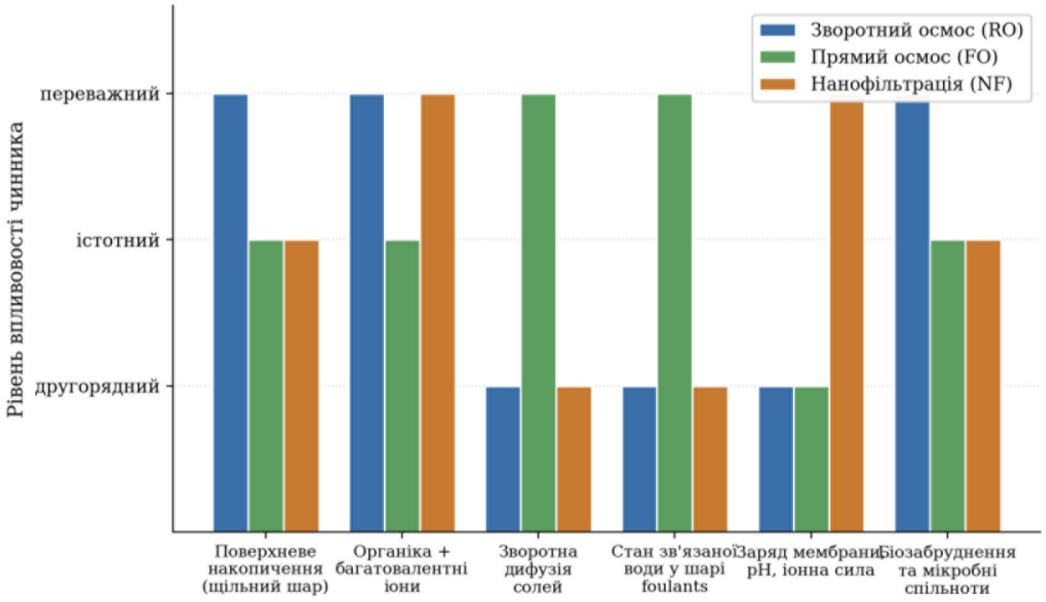


Рис. 5. Порівняння впливовості чинників забруднення у процесах RO, FO та NF

У муніципальному повторному використанні води провідним механізмом часто стає адсорбція органічної речовини стічних вод. Стайн пов'язує органічне забруднення RO з природною органікою, синтетичними побутовими сполуками, розчинними мікробними продуктами та EPS біоплівок [32, с. 2]. Такий шар зменшує потік, але цим його дія не обмежується: він може підготувати поверхню до подальшої колонізації. Через це традиційний SDI, зорієнтований на закупорювання пористого фільтра колоїдами й завислими частинками, не завжди коректно передбачає поведінку щільної RO-мембрани. Сенсорні підходи на зразок LSPR цінні саме тим, що націлені на ранню органічну адсорбцію, ще до виразного падіння продуктивності [32, с. 1–2].

Реальні стічні потоки добре показують, де закінчується оптимістичне уявлення про FO. У дослідженні концентрування реальної сечі Тшиманге фільтрована гідролізована сеча давала нижче падіння потоку, тоді як нефільтрована гідролізована сеча спричиняла значно сильніше забруднення. Автопсія мембрани засвідчила домінування біологічного забруднення, а послідовне фізико-хімічне очищення відновлювало 91–98 % потоку, хоча залишкові забруднювачі все ж вказували на часткову необоротність [5, с. 1]. Для FO це означає, що контроль не можна звести до промивання поверхні. Потрібно одночасно регулювати частинкове навантаження, мікробну активність, іонну силу та склад осмотичного розчину [4, с. 2].

Результат послідовного очищення доцільно подати як діапазон відновлення потоку, бо нефільтрована матриця не дає однозначної реакції на промивання.

Незважаючи на високий рівень відновлення (91–98 %), залишковий дефіцит у 2–9 п.п. вказує на часткову незворотність біоорганічного шару й підкреслює необхідність комбінування цільового очищення з контролем подачі.

Для нанофільтрації особливо показові ті дослідження, де мембрану перевіряють не на спрощених модельних розчинах, а на складних водних матрицях. Танг та співавтори добре показують цю різницю на реальних текстильних стічних водах. Результати, отримані на однотипних модельних барвниках, можуть завищувати ефективність процесу, бо в реальному потоці працює не один компонент. Низькомолекулярна гідрофільна органіка, солоність і кислотність середовища змінюють і затримання речовин, і характер забруднення. За лужних умов вищий ступінь затримання також не завжди означає кращу селективність мембрани. Він може виникати через звуження пор унаслідок забруднення та металоорганічного місткоутворення [3, с. 1].

Подібна неоднозначність простежується і в дослідженнях органічно-неорганічного забруднення. Гумінова кислота в системах із гіпсом може частково пригнічувати кристалізацію, але одночасно формує кальцій-гуміновий шар. Такий шар підвищує гідравлічний опір і погіршує відновлення потоку після очищення [14, с. 1]. У багатокомпонентних системах із Ca^{2+}, Mg^{2+}, Sr^{2+} і фульвокислотою вирішальним стає вже не сама присутність іонів, а їхнє співвідношення. Надлишок Ca^{2+} сприяє формуванню щільного кристалічного шару й переходу забруднення в необоротний стан, тоді як збалансоване співвідношення Ca^{2+}/Mg^{2+} підтримує стабільніший потік [8, с. 1]. Тому для нанофільтрації ключовою проблемою залишається не окремий тип забруднювача, а те, як у конкретній водній матриці складаються міжфазні взаємодії.

Кожен із трьох процесів має свою слабку ділянку. У зворотному осмосі вона пов'язана із поверхневим накопиченням під тиском, у прямому



Рис. 6. Відновлення потоку FO-мембрани після послідовного фізико-хімічного очищення

Таблиця 1. Порівняння проявів забруднення у мембранних процесах

Процес	Найчутливіша зона	Переважні чинники	Головний спосіб контролю
Зворотний осмос	Поверхня щільного поліамідного шару	Органіка, солі, мікробні спільноти, сезонна зміна складу води	Попередня обробка, керування складом води, ранній контроль стану мембрани
Прямий осмос	Активний і підтримувальний шари біля осмотичного градієнта	Розчинена органіка, полісахариди з металами, зворотна дифузія солей, біологічне забруднення	Добір осмотичного розчину, обмеження зворотної дифузії, вилучення завислих частинок
Нанофільтрація	Заряджена поверхня та приповерхневий шар розділення	Природна органіка, багатовалентні іони, барвники, солі жорсткості, органічно-неорганічні комплекси	Регулювання кислотності, флокуляція або адсорбція перед мембраною, добір заряду й гідрофільності поверхні

осмосі – з осмотично зумовленою зміною складу середовища, у нанофільтрації – із зарядово-іонними взаємодіями в складних водних матрицях.

ВИСНОВКИ ТА ПЕРСПЕКТИВИ ПОДАЛЬШИХ ДОСЛІДЖЕНЬ

Забруднення мембран у сучасних дослідженнях постає як процес із кількома одночасними причинами. Це не лише домішки, які накопичилися на поверхні. Значення мають склад води, заряд і гідрофільність мембрани, режим потоку, активність мікроорганізмів, а також те, як органічні речовини взаємодіють з іонами металів. У зворотному осмосі ця взаємодія особливо помітна на поліамідному шарі. Саме там органічне, сольове й біологічне забруднення можуть накладатися, ущільнюватися і формувати шар, який уже впливає не тільки на потік, а й на економіку роботи системи. Для нанофільтрації вирішальними стають інші акценти: кислотність, іонна сила, багатокомпонентні органічно-неорганічні комплекси. Від них залежить, наскільки стійким буде осад і чи залишиться очищення передбачуваним.

Подальші дослідження мають змістити акцент із реактивного очищення на прогнозне керування забрудненням. Значно важливіше зрозуміти, коли шар ще можна втримати в оборотному стані і не довести систему до агресивного промивання. Для цього потрібні моделі, які поєднують фізику перенесення, формування забруднювального шару та дані реальної експлуатації. Такі моделі краще показують, як змінюється механізм забруднення в часі: від початкової адсорбції до ущільнення шару, блокування пор або переходу в стійкий композитний осад. Але їхня цінність буде обмеженою, якщо перевіряти їх лише на модельних розчинах. Реальні води й стічні потоки змінюються за органічним складом, солоністю, мікробною активністю і сезонними умовами. Саме тому тривалі випробування, аналіз відпрацьованих мембран і ресурсоефективне проєктування мають стати основою переходу від опису забруднення до керування ресурсом мембранної системи.

REFERENCES

[1] Abdulsalam A., Le T. P. P., Nguyen T. S., Ali J. K., Abubasha M. Y., Jouini M. S., Alhseinat E.. A review of fouling prediction techniques in membrane desalination: From empirical to intelligent models. Desalination. 2025. Vol. 616. Article 119363. DOI: 10.1016/j.desal.2025.119363

[2] Stein N., Halakarni M., Bernstein R., Herzberg M.. Nano-plasmonic sensing for predicting fouling on a reverse osmosis membrane. Desalination. 2026. Vol. 618. Article 119480. DOI: 10.1016/j.desal.2025.119480

[3] Wang Q., Sun L., Ulbricht M., Fischer L., Yang H., Liu X.-Y., Ren Z., Kraslawski A., Kubota K., Li Y.-Y.. Moderate oxidation-coagulation pretreatment for mitigating ultrafiltration membrane fouling by algae-laden water: Performance and mechanisms. Desalination. 2026. Vol. 619. Article 119522. DOI: 10.1016/j.desal.2025.119522

[4] Guo C., Wang Y., Kang X., Zhu J., Cao J., Xu D., Wu D., Wang F., Lu X., Zhu X.. From irreversible to reversible: Systematic pretreatment strategies mitigate nanofiltration membrane fouling in drinking water production by altering fouling mechanisms. Desalination. 2026. Vol. 620. Article 119620. DOI: 10.1016/j.desal.2025.119620

[5] Li Y.-Q., Liu Y.-Q.. A critical review of electromagnetic fields, ultrasound, and nanobubbles for membrane fouling control and cleaning: Mechanisms, applications, challenges and opportunities. Desalination. 2026. Vol. 623. Article 119828. DOI: 10.1016/j.desal.2025.119828

[6] Shen J., Shi A., Nian W., Lin Z., Wu R., Shen H., Yan Z., Zhang H., Zhang Z., Fan G., Jiang Z.. Hybrid NiFe-LDH/SnO_2 modified ceramic membrane with dual-functional enhancement in catalytic ozonation and synergistic anti-fouling for efficient wastewater decontamination. Desalination. 2026. Vol. 630. Article 120160. DOI: 10.1016/j.desal.2026.120160

[7] Wu X., Zhang Y., Ye C., Hu T., Fang Y., Zhang J., Feng M., Yu X., He X., Ou R.. Combined fouling mechanisms in mine water reverse osmosis concentration: Factors driving microbial community evolution. Desalination. 2026. Vol. 632. Article 120256. DOI: 10.1016/j.desal.2026.120256

[8] Shen J., Yang M., Mao Z., Xing J.. A new linear growth theoretical model of protein reversible fouling layer in protein wastewater ultrafiltration: Fouling mechanism prediction for different proteins and pressures. Water Research. 2026. Vol. 289. Article 124866. DOI: 10.1016/j.watres.2025.124866

[9] Zafar R., Arshad Z., Lee Y. K., Kim M.-S., Hur J.. Unveiling the hidden roles of microplastic-derived dissolved organic matter in membrane fouling using fluorescence and stable carbon isotope tracers. Water Research. 2026. Vol. 291. Article 125165. DOI: 10.1016/j.watres.2025.125165

[10] Gharibian S., Christensen K. V., Bahij R., Simonsen M. E., Errico M.. Nanofiltration of synthetic HTL-AP: Rejection, fouling analysis, and membrane autopsy. Journal of Membrane Science. 2026. Vol. 744. Article 125178. DOI: 10.1016/j.memsci.2026.125178

[11] Wang Y., Arixin Y., Liu D., Yang H.. Cationically branched starch-based flocculants for synergistic flocculation-ultrafiltration treatment of dye wastewaters: Performance enhancement and efficient membrane fouling mitigation. Journal of Membrane Science. 2026. Vol. 745. Article 125232. DOI: 10.1016/j.memsci.2026.125232

[12] Huang J., Lu Q., Lu X., Fan R., Chen G., Wan Y., Zhao G., Luo J.. Multiphysics coupling simulations reveal how membrane deformation regulates shear stress and fouling evolution. Journal of Membrane Science. 2026. Vol. 752. Article 125623. DOI: 10.1016/j.memsci.2026.125623

[13] Wang Q., Yang X., Liu D., Sun X., Zhang Z., Wang D., Li X., Zhang Z., Yan F.. Zwitterionic PVDF/NWF composite membrane with anti-fouling and antibacterial properties for high-efficiency oil-water separation. Journal of Membrane Science. 2026. Vol. 753. Article 125641. DOI: 10.1016/j.memsci.2026.125641

[14] Lu Q., Zhang H., Du J., Huang J., Fan R., Zhou W., Na X., Wang C., Wan Y., Luo J.. Process-oriented strategies for mitigating protein fouling in ultrafiltration: In-situ growth of microspheres on membrane surfaces. Separation and Purification Technology. 2026. Vol. 385. Article 136418. DOI: 10.1016/j.seppur.2025.136418

[15] You X., Zhang H., Lin H.. Copper(II)-induced alginate fouling in forward osmosis: A novel water-state perspective using low-field nuclear magnetic resonance (NMR). Separation and Purification Technology. 2026. Vol. 393. Article 137247. DOI: 10.1016/j.seppur.2026.137247

[16] Wang H., Liu X., Duan X., Ren Y.. Investigation of membrane fouling of NF membranes by Sr2+ and natural organisms: Interaction between proteins and polysaccharides. Separation and Purification Technology. 2026. Vol. 399. Article 138401. DOI: 10.1016/j.seppur.2026.138401

[17] Fang K., He W., Fu D., Wang W., Zhu X., Xu L., Xu S.. Diverse cations significantly affect ballasted floc development and membrane fouling behaviors: Role of Na^{+}, Ca^{2+} and Fe^{3+} in ultrafiltration of kaolin-humic acid flocculating system. Separation and Purification Technology. 2026. Vol. 400. Article 138482. DOI: 10.1016/j.seppur.2026.138482

[18] Qin J., Xiong B.. Novel self-assembled nanocellulose coating on microfiltration membranes for pathogen inactivation and fouling mitigation. Chemical Engineering Journal. 2025. Vol. 526. Article 170921. DOI: 10.1016/j.cej.2025.170921

[19] Cifuentes-Araya N., Sepulveda B., Areche C.. Red onion nanofiltration as a green recovery of gallic acid, quercetin and rutin: Study of membrane fouling occurring by these three phenolics. Chemical Engineering Journal. 2026. Vol. 529. Article 172429. DOI: 10.1016/j.cej.2025.172429

[20] Xin Y., Ding H., Gao R., Gu M., Tian A., Xue T., Liang S., Huang X.. Tuning solution chemistry via titanium-based pre-coagulation suppresses reverse osmosis membrane fouling. Chemical Engineering Journal. 2026. Vol. 534. Article 175027. DOI: 10.1016/j.cej.2026.175027

[21] Huang X., Xiong S., Zhao S., Zhang G.. Side-chain tertiary amine membranes with enhanced antibacterial and anti-fouling separation. Chemical Engineering Journal. 2026. Vol. 536. Article 176031. DOI: 10.1016/j.cej.2026.176031

[22] Le T. M. H., Sairiam S.. Mechanistic analysis of membrane fouling induced by microplastic and inorganic salts in dye wastewater treatment. Journal of Environmental Chemical Engineering. 2025. Vol. 13. Article 119325. DOI: 10.1016/j.jece.2025.119325

[23] Ma C., Yu M., Xu J., Kong X.. Comparing the effects of pre-deposited and pre-mixed anion exchange resin on algal fouling during ultrafiltration. Journal of Environmental Chemical Engineering. 2025. Vol. 13. Article 119984. DOI: 10.1016/j.jece.2025.119984

[24] Chen X., Chuah C. Y., Cao Y., Zhang M., Ramanathan S., Liang J., Bao Y.. Advanced fouling-resistant ceramic membranes for oily wastewater: Mechanisms and mitigation strategies. Journal of Environmental Chemical Engineering. 2026. Vol. 14. Article 120881. DOI: 10.1016/j.jece.2025.120881

[25] Wang S., He X., Zhang X., Wu X.. Direct filtration of mine water using wide flow channel PolyCera membranes: Membrane fouling and optimization of cleaning. Journal of Environmental Chemical Engineering. 2026. Vol. 14. Article 121814. DOI: 10.1016/j.jece.2026.121814

[26] Tshimange M., Enos S. N., Xabela S., Stringel S. S., Liu Y.-Q., Getahun S. T., Lee J., Gadkari S.. Fouling dynamics of forward osmosis membrane during multi-cycle concentration of hydrolysed and stabilized real human urine. Journal of Environmental Chemical Engineering. 2026. Article 122325. DOI: 10.1016/j.jece.2026.122325

[27] Song X., Ma Q., Zhang M., Zhang R., Wang H., Duan X., Ren Y.. Research on the fouling mechanism of nanofiltration membranes under multi-component coexistence: Synergistic effect of alkaline earth metals and fulvic acid. Journal of Environmental Chemical Engineering. 2026. Vol. 14. Article 122881. DOI: 10.1016/j.jece.2026.122881

[28] Nayeri D., Mousavi S. A., Jafari A., Mohammadi P., Almasi A.. Novel tubular ceramic microfiltration membranes: Fabrication, filtration performance, and fouling mechanisms. Journal of Water Process Engineering. 2026. Vol. 81. Article 109294. DOI: 10.1016/j.jwpe.2025.109294

[29] Zhou X., Xie J., Qin H., Guo W., Gao P., Xiao H., Liu J.. Numerical investigation of shear stress-enhanced anti-fouling mechanisms in patterned alumina ceramic membranes. Journal of Water Process Engineering. 2026. Vol. 85. Article 109783. DOI: 10.1016/j.jwpe.2026.109783

[30] Mkpuma V. O., Najafi M., Farahbakhsh J., Zargar M., Moheimani N. R., Ennaceri H.. Zwitterionic and anionic ultrafiltration membrane modification for efficient, fouling-resistant microalgae harvesting. Journal of Water Process Engineering. 2026. Vol. 85. Article 109784. DOI: 10.1016/j.jwpe.2026.109784

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

[1] Abdulsalam A., Le T. P. P., Nguyen T. S., Ali J. K., Abubasha M. Y., Jouini M. S., Alhseinat E. Огляд методів прогнозування забруднення мембран в опрісненні: від емпіричних до інтелектуальних моделей. Desalination. 2025. Vol. 616. Article 119363. DOI: 10.1016/j.desal.2025.119363

[2] Stein N., Halakarni M., Bernstein R., Herzberg M. Наноплазмонне сенсування для прогнозування забруднення мембрани зворотного осмосу. Desalination. 2026. Vol. 618. Article 119480. DOI: 10.1016/j.desal.2025.119480

[3] Wang Q., Sun L., Ulbricht M., Fischer L., Yang H., Liu X.-Y., Ren Z., Kraslawski A., Kubota K., Li Y.-Y. Помірна окиснювально-коагуляційна попередня обробка для зменшення забруднення ультрафільтраційних мембран водою з високим вмістом водоростей: ефективність і механізми. Desalination. 2026. Vol. 619. Article 119522. DOI: 10.1016/j.desal.2025.119522

[4] Guo C., Wang Y., Kang X., Zhu J., Cao J., Xu D., Wu D., Wang F., Lu X., Zhu X. Від необоротного до оборотного: систематичні стратегії попередньої обробки зменшують забруднення нанофільтраційних мембран у виробництві питної води шляхом зміни механізмів забруднення. Desalination. 2026. Vol. 620. Article 119620. DOI: 10.1016/j.desal.2025.119620

[5] Li Y.-Q., Liu Y.-Q. Критичний огляд застосування електромагнітних полів, ультразвуку та нанобульбашок для контролю та очищення забруднених мембран: механізми, застосування, проблеми та перспективи. Desalination. 2026. Vol. 623. Article 119828. DOI: 10.1016/j.desal.2025.119828

[6] Shen J., Shi A., Nian W., Lin Z., Wu R., Shen H., Yan Z., Zhang H., Zhang Z., Fan G., Jiang Z. Гібридна керамічна мембрана NiFe-LDH/SnO2 з подвійним функціональним посиленням каталітичного озонування та синергічними антизабруднювальними властивостями для ефективного очищення стічних вод. Desalination. 2026. Vol. 630. Article 120160. DOI: 10.1016/j.desal.2026.120160

[7] Wu X., Zhang Y., Ye C., Hu T., Fang Y., Zhang J., Feng M., Yu X., He X., Ou R. Комбіновані механізми забруднення при концентруванні шахтних вод методом зворотного осмосу: чинники, що визначають еволюцію мікробних угруповань. Desalination. 2026. Vol. 632. Article 120256. DOI: 10.1016/j.desal.2026.120256

[8] Shen J., Yang M., Mao Z., Xing J. Нова теоретична модель лінійного росту оборотного шару білкового забруднення при ультрафільтрації білкових стічних вод: прогнозування механізмів забруднення для різних білків і тисків. Water Research. 2026. Vol. 289. Article 124866. DOI: 10.1016/j.watres.2025.124866

[9] Zafar R., Arshad Z., Lee Y. K., Kim M.-S., Hur J. Виявлення прихованої ролі розчиненої органічної речовини, що походить із мікропластику, у забрудненні мембран із використанням флуоресцентних та стабільних ізотопних трасерів вуглецю. Water Research. 2026. Vol. 291. Article 125165. DOI: 10.1016/j.watres.2025.125165

[10] Gharibian S., Christensen K. V., Bahij R., Simonsen M. E., Errico M. Нанофільтрація синтетичного HTL-AP: селективність, аналіз забруднення та автопсія мембран. Journal of Membrane Science. 2026. Vol. 744. Article 125178. DOI: 10.1016/j.memsci.2026.125178

[11] Wang Y., Arixin Y., Liu D., Yang H. Катіонні флокулянти на основі розгалуженого крохмалю для синергічного поєднання флокуляції та ультрафільтрації під час очищення барвникових стічних вод: підвищення ефективності та зменшення забруднення мембран. Journal of Membrane Science. 2026. Vol. 745. Article 125232. DOI: 10.1016/j.memsci.2026.125232

[12] Huang J., Lu Q., Lu X., Fan R., Chen G., Wan Y., Zhao G., Luo J. Багатофізичне моделювання показує, як деформація мембрани регулює напруження зсуву та еволюцію забруднення. Journal of Membrane Science. 2026. Vol. 752. Article 125623. DOI: 10.1016/j.memsci.2026.125623

[13] Wang Q., Yang X., Liu D., Sun X., Zhang Z., Wang D., Li X., Zhang Z., Yan F. Композитна мембрана PVDF/NWF із цвітеріонними властивостями та антибактеріальною активністю для високоефективного розділення нафтоводяних емульсій. Journal of Membrane Science. 2026. Vol. 753. Article 125641. DOI: 10.1016/j.memsci.2026.125641

[14] Lu Q., Zhang H., Du J., Huang J., Fan R., Zhou W., Na X., Wang C., Wan Y., Luo J. Процесно-орієнтовані стратегії зменшення білкового забруднення при ультрафільтрації: in situ ріст мікросфер на поверхні мембран. Separation and Purification Technology. 2026. Vol. 385. Article 136418. DOI: 10.1016/j.seppur.2025.136418

[15] You X., Zhang H., Lin H. Забруднення альгінатом у прямому осмосі, індуковане Cu(II): новий підхід до оцінки стану води з використанням низькопольового ядерного магнітного резонансу. Separation and Purification Technology. 2026. Vol. 393. Article 137247. DOI: 10.1016/j.seppur.2026.137247

[16] Wang H., Liu X., Duan X., Ren Y. Дослідження забруднення нанофільтраційних мембран іонами Sr2+ та природними органічними речовинами: взаємодія між білками та полісахаридами. Separation and Purification Technology. 2026. Vol. 399. Article 138401. DOI: 10.1016/j.seppur.2026.138401

[17] Fang K., He W., Fu D., Wang W., Zhu X., Xu L., Xu S. Вплив різних катіонів на формування флокул і поведінку забруднення мембран: роль Na^{+}, Ca^{2+} та Fe^{3+} в ультрафільтрації системи каолін–гумінова кислота. Separation and Purification Technology. 2026. Vol. 400. Article 138482. DOI: 10.1016/j.seppur.2026.138482

[18] Qin J., Xiong B. Нове самозібране наноцелюлозне покриття для мембран мікрофільтрації з метою інактивації патогенів та зменшення забруднення. Chemical Engineering Journal. 2025. Vol. 526. Article 170921. DOI: 10.1016/j.cej.2025.170921

[19] Cifuentes-Araya N., Sepulveda B., Areche C. Нанофільтрація екстрактів червоної цибулі як екологічний метод вилучення галової кислоти, кверцетину та рутину: дослідження забруднення мембран цими фенольними сполуками. Chemical Engineering Journal. 2026. Vol. 529. Article 172429. DOI: 10.1016/j.cej.2025.172429

[20] Xin Y., Ding H., Gao R., Gu M., Tian A., Xue T., Liang S., Huang X. Регулювання хімічного складу розчину шляхом попередньої коагуляції на основі титану для пригнічення забруднення мембран зворотного осмосу. Chemical Engineering Journal. 2026. Vol. 534. Article 175027. DOI: 10.1016/j.cej.2026.175027

[21] Huang X., Xiong S., Zhao S., Zhang G. Мембрани з третинними аміногрупами в бічних ланцюгах із покращеними антибактеріальними та антизабруднювальними властивостями. Chemical Engineering Journal. 2026. Vol. 536. Article 176031. DOI: 10.1016/j.cej.2026.176031

[22] Le T. M. H., Sairiam S. Механістичний аналіз забруднення мембран, спричиненого мікропластиком та неорганічними солями, під час очищення барвникових стічних вод. Journal of Environmental Chemical Engineering. 2025. Vol. 13. Article 119325. DOI: 10.1016/j.jece.2025.119325

[23] Ma C., Yu M., Xu J., Kong X. Порівняння впливу попередньо нанесеної та попередньо змішаної аніонообмінної смоли на водоростеве забруднення під час ультрафільтрації. Journal of Environmental Chemical Engineering. 2025. Vol. 13. Article 119984. DOI: 10.1016/j.jece.2025.119984

[24] Chen X., Chuah C. Y., Cao Y., Zhang M., Ramanathan S., Liang J., Bao Y. Сучасні керамічні мембрани, стійкі до забруднення, для очищення нафтовмісних стічних вод: механізми та стратегії запобігання забрудненню. Journal of Environmental Chemical Engineering. 2026. Vol. 14. Article 120881. DOI: 10.1016/j.jece.2025.120881

[25] Wang S., He X., Zhang X., Wu X. Пряме фільтрування шахтних вод із використанням мембран PolyCera із широкими каналами потоку: забруднення мембран та оптимізація очищення. Journal of Environmental Chemical Engineering. 2026. Vol. 14. Article 121814. DOI: 10.1016/j.jece.2026.121814

[26] Tshimange M., Enos S. N., Xabela S., Stringel S. S., Liu Y.-Q., Getahun S. T., Lee J., Gadkari S. Динаміка забруднення мембран прямого осмосу під час багатоциклового концентрування гідролізованої та стабілізованої реальної людської сечі. Journal of Environmental Chemical Engineering. 2026. Article 122325. DOI: 10.1016/j.jece.2026.122325

[27] Song X., Ma Q., Zhang M., Zhang R., Wang H., Duan X., Ren Y. Дослідження механізмів забруднення нанофільтраційних мембран за співіснування багатьох компонентів: синергічний ефект лужноземельних металів та фульвокислоти. Journal of Environmental Chemical Engineering. 2026. Vol. 14. Article 122881. DOI: 10.1016/j.jece.2026.122881

[28] Nayeri D., Mousavi S. A., Jafari A., Mohammadi P., Almasi A. Нові трубчасті керамічні мембрани для мікрофільтрації: виготовлення, фільтраційні характеристики та механізми забруднення. Journal of Water Process Engineering. 2026. Vol. 81. Article 109294. DOI: 10.1016/j.jwpe.2025.109294

[29] Zhou X., Xie J., Qin H., Guo W., Gao P., Xiao H., Liu J. Чисельне дослідження антизабруднювальних механізмів, посилених напруженням зсуву, у структурованих керамічних мембранах з оксиду алюмінію. Journal of Water Process Engineering. 2026. Vol. 85. Article 109783. DOI: 10.1016/j.jwpe.2026.109783

[30] Mkpuma V. O., Najafi M., Farahbakhsh J., Zargar M., Moheimani N. R., Ennaceri H. Модифікація ультрафільтраційних мембран цвітеріонними та аніонними групами для ефективного вилучення мікроводоростей зі стійкістю до забруднення. Journal of Water Process Engineering. 2026. Vol. 85. Article 109784. DOI: 10.1016/j.jwpe.2026.109784

© Менько Д. І., Гулієнко С. В.
Дата першого надходження статті до видання: 12.08.2026
Дата прийняття статті до друку після рецензування: 07.09.2026
Дата публікації (оприлюднення) статті: 02.11.2026



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