

УДК 66.081.6

DOI: 10.31498/2225-6733.53.1.2026.359808

НОВІТНІ ДОСЯГНЕННЯ В ДОСЛІДЖЕННІ ГІДРОДИНАМІКИ МЕМБРАННИХ КАНАЛІВ:
КРИТИЧНИЙ ОГЛЯД

- Ясеньчук В.В.** аспірант, Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», м. Київ, ORCID: <https://orcid.org/0009-0006-1012-9475>, e-mail: Ivitaliy10@ukr.net;
- Гулієнко С.В.** канд. техн. наук, доцент, Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», м. Київ, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-9042-870X>, e-mail: sergiigulienko@gmail.com

У цій оглядовій роботі систематизовано результати наукових досліджень 2015–2025 років, присвячених впливу геометричних параметрів спейсерів на експлуатаційні характеристики спіральних мембранних модулів зворотного осмосу. Проаналізовано сучасні підходи до оптимізації конструкції спейсерів, зокрема застосування адитивних технологій (3D-друку), методів обчислювальної гідродинаміки (CFD) та експериментальних методик дослідження гідродинаміки, масопереносу й біообростання. Розглянуто вплив діаметра нитки, кута орієнтації сітки, висоти каналу, форми вузлів і просторової конфігурації (зокрема TPMS) на розподіл швидкостей, напружень зсуву та перепаду тиску. Підкреслено важливість пошуку компромісу між інтенсифікацією масопереносу та мінімізацією гідравлічних втрат. Особливу увагу приділено моделюванню процесів біообростання, яке є домінуючим типом забруднення мембран і тісно пов'язане з локальними гідродинамічними умовами в каналі, зокрема наявністю застійних зон. Узагальнено результати CFD-досліджень з проникними та непроникними граничними умовами, а також підходи до валідації чисельних моделей за допомогою експериментальних методів високої роздільної здатності (ОКТ, PIV). Показано перспективність використання 3D-друкованих і функціоналізованих спейсерів (антибактеріальні покриття, гідрофільні матеріали) для зменшення інтенсивності забруднення та підвищення енергоефективності мембранних систем. Також розглянуто активні методи контролю забруднення, такі як вібрація та обертання спейсерів, які дозволяють індукувати вторинні течії. Визначено ключові напрями подальших досліджень, зокрема багатомасштабне моделювання, комплексний опис взаємодії різних типів забруднення, оптимізацію геометрії з урахуванням енергетичних обмежень, а також розробку нових матеріалів і активних методів контролю біообростання. Отримані узагальнення формують наукову основу для створення енергоефективних і стійких до забруднення мембранних технологій нового покоління.

Ключові слова: мембрана біообростання; спейсер; 3D-друк; CFD-моделювання; зворотний осмос; концентраційна поляризація.

Постановка проблеми

Останніми роками популярність процесів зворотного осмосу (ЗО) стрімко зростає у зв'язку з глобальним дефіцитом прісної води, зростанням чисельності населення та посиленням нормативних вимог до якості води. Технології ЗО широко застосовуються для опріснення морської води, очищення стічних вод [1, 2], а також у харчовій промисловості, зокрема для концентрування харчових розчинів [3, 4].

У більшості промислових установок зворотного осмосу основною робочою одиницею є спіральний мембранний модуль. Ефективність та продуктивність таких модулів значною мірою обмежуються гідродинамікою каналів живлення, умовами масообміну, розвитком концентраційної поляризації, а також процесами забруднення мембран, включаючи неорганічне, органічне та біологічне обростання [5]. Одним із найбільш перспективних інженерних підходів до мінімізації зазначених негативних явищ є оптимізація геометрії спейсерів [6, 7].

Спейсер є ключовим конструктивним елементом спіральних мембранних модулів і відіграє визначальну роль у формуванні гідродинамічного режиму потоку, інтенсивності масообміну, величини

гідравлічного опору та характеру процесів забруднення [8, 9]. Конструктивно спейсер являє собою сітку, розміщену між двома мембранними листами, яка забезпечує формування міжмембранного каналу для руху розділювального розчину та сприяє турбулізації потоку, що, у свою чергу, зменшує прояви концентраційної поляризації. Водночас некоректно спроектована геометрія спейсера може призводити до істотного зростання гідравлічного опору, формування застійних зон і, як наслідок, інтенсифікації біообростання.

Таким чином, дослідження, присвячені конструкції та геометрії спейсерів, є критично важливими для підвищення ефективності мембранних ЗО-процесів.

Мета статті

Метою цієї оглядової роботи є аналіз сучасних наукових публікацій, присвячених дослідженню характеристик спейсерів та їх впливу на гідродинаміку, масоперенос, концентраційну поляризацію і процеси забруднення мембран у системах зворотного осмосу. Особливу увагу приділено впливу геометрії та розмірних параметрів спейсерів, а також застосуванню методів обчислювальної гідродинаміки (CFD) і адитивних технологій у проектуванні мембранних модулів. У роботі

проаналізовано дослідження, опубліковані в період з 2015 по 2025 роки.

Матеріали та методи

Під час проведення огляду наукові публікації було систематизовано та згруповано відповідно до основної досліджуваної проблематики. Слід зазначити, що в окремих роботах одночасно розглядалося декілька підходів або аспектів впливу спейсерів на характеристики мембранних процесів, що унеможливило віднесення таких досліджень до однієї категорії. Такий підхід до класифікації дозволив структурувати наявні наукові результати, виокремити основні тенденції розвитку досліджень у галузі технологій спейсерів, а також ідентифікувати ключові наукові прогалини.

Для кращого розуміння функціональної ролі спейсерів доцільно коротко описати будову модуля. Спірально-намотаний мембранний модуль складається з мембранного пакету, який включає мембрани та дренажний матеріал для пермеату, а також спейсерів, що знаходяться між двома шарами мембран. Згорнуті шари утворюють канал для проходження вихідного розчину; пермеат видаляється через центральну трубку, а ретентат виходить з протилежного кінця модуля [10-12].

У живильних каналах зворотного-осмотичного мембранного модуля наявність спейсерів відіграє ключову роль у формуванні гідродинамічного режиму потоку. За рахунок інтенсифікації перемішування рідини спейсери сприяють покращенню масообміну та зменшенню проявів концентраційної поляризації поблизу поверхні мембрани [13], що робить їх невід'ємною складовою сучасних RO-модулів. Водночас застосування спейсерів неминуче супроводжується зростанням гідравлічних втрат і перепадом тиску вздовж модуля, що безпосередньо впливає на енергоспоживання процесу [14]. Таким чином, конструкція спейсера визначає компроміс між інтенсифікацією масопереносу та допустимими енергетичними витратами.

З огляду на суттєвий вплив геометрії спейсерів на структуру течії та масопереносні характеристики, модифікація їх конструкції залишається активним і перспективним напрямом наукових досліджень. Основні зусилля в цій галузі зосереджені на вирішенні трьох взаємопов'язаних завдань: підвищенні питомого потоку пермеату [15], зменшенні втрат тиску та енергоспоживання мембранних систем [16], а також зниженні інтенсивності забруднення мембран, індукованого спейсерами, зокрема у зонах з недостатнім перемішуванням рідини та формуванням застійних областей [17].

Виклад основного матеріалу

3D-моделювання та адитивні технології. 3D-моделювання та адитивні технології є одними з найбільш прогресивних інструментів у галузі мембранних технологій. Останніми роками спостерігається стрімке

зростання інтересу до тривимірного друку завдяки його значному потенціалу у проєктуванні та виготовленні спейсерів складної геометрії. На відміну від традиційних методів виробництва, 3D-друк дозволяє створювати як прості, так і високоскладні геометричні конфігурації, які практично неможливо реалізувати стандартними технологіями [18]. Це забезпечує точний контроль розміру пор, товщини елементів, шорсткості поверхні та конфігурації каналів, що безпосередньо впливає на проникність, селективність і протиобростаючі властивості мембранних систем. Додатковою перевагою 3D-друку є зменшення виробничих відходів під час виготовлення спейсерів [19], що відповідає сучасним вимогам сталого розвитку.

Удосконалення технологій 3D-друку призвело до появи швидших і точніших принтерів із мікророзмірною роздільною здатністю (>1 мкм) [20]. Згідно з результатами, наведеними у [7, 9], 3D-друковані спейсери у ряді випадків перевершували комерційні аналоги, демонструючи інтенсифікований масообмін і знижену схильність до забруднення. Такі конструкції мають потенціал для зменшення енергоспоживання мембранних процесів за рахунок оптимізації гідродинаміки потоку.

Існує декілька підходів до моделювання та виготовлення тривимірної мікроструктури волокнистих середовищ. Зокрема, в роботі [21] розглядається метод електропрядіння, який є одноетапною технологією формування волокнистих матеріалів шляхом розчинення полімеру в хімічному розчиннику та подальшої електризації розчину під час подачі через голку. У статті [19] описано чотири основні технології 3D-друку, які застосовуються для виготовлення мембранних елементів: FDM (Fused Deposition Modeling), Selective Laser Sintering (SLS), Vat Photopolymerization та Sheet Lamination.

Технологія FDM широко використовується для виготовлення полімерних спейсерів завдяки простоті експлуатації та широкому вибору матеріалів, однак вона характеризується обмеженою роздільною здатністю та вираженою механічною анізотропією. SLS, у свою чергу, є придатною для створення складних полімерних і керамічних конструкцій без використання допоміжних матеріалів, проте потребує дорогого обладнання та тривалішого часу друку. Фотополімеризація в чанах (DLP, SLA) забезпечує мікронний рівень роздільної здатності, що є критично важливим для виготовлення детальних мембранних модулів, однак супроводжується проблемами механічної стійкості та обмеженою можливістю багатоматеріального друку. Розуміння зазначених технологічних компромісів є ключовим для вибору оптимального методу виготовлення спейсерів для конкретних застосувань.

Практичний потенціал 3D-друку продемонстровано, зокрема, у роботі [22], де за допомогою оптимізованої геометрії спейсера вдалося досягти більш рівномірного розподілу напруження зсуву на поверхні мембрани. Це сприяло зменшенню концентраційної

поляризації, інтенсивності забруднення та підвищенню ступеня відторгнення солей.

З урахуванням сучасного прогресу в галузі обчислювальної гідродинаміки та технологій 3D-друку значну частину обмежень, пов'язаних із проектуванням і виготовленням спейсерів складної геометрії, вже було подолано. Водночас на сьогодні зберігається помітна прогалина у дослідженнях, спрямованих на розробку спейсерів зі складними просторовими конфігураціями з використанням адитивних технологій. Подібні високоскладні прототипи, як правило, не можуть бути виготовлені у промислових масштабах традиційними методами виробництва. Це зумовлено тим, що 3D-друк спейсерних сіток вимагає надзвичайно високої роздільної здатності, зазвичай на рівні сотень мікронів [23], що призводить до значного зростання виробничих витрат і обмежує можливості масштабування.

З огляду на зазначені технологічні та економічні обмеження адитивного виробництва, CFD-моделювання часто є більш доцільним інструментом порівняно з експериментальними дослідженнями для прогнозування ефективності нових геометричних конфігурацій спейсерів. У зв'язку з цим у науковій літературі широко представлені числові дослідження складних геометрій спейсерів, зокрема структур на основі тричі періодичних мінімальних поверхонь (triple periodic minimal surfaces, TPMS) [24-28], перфорованих геометрій спейсерів [14], а також занурених спейсерів з колоноподібними вузлами [16, 17]. Застосування CFD-підходів у таких дослідженнях дозволяє детально аналізувати структуру течії, розподіли напружень зсуву та концентраційні поля, що є критично важливим для оцінки потенціалу нових конструктивних рішень.

Однією зі стратегій удосконалення геометрії спейсера є перфорація його ниток [14], яка може сприяти інтенсифікації потоку пермеату за одночасного зменшення перепаду тиску. Такий підхід наочно демонструє, що раціональна модифікація геометрії спейсера має безпосередній вплив на гідродинаміку каналу подачі, забезпечуючи не лише зниження гідравлічних втрат, але й покращення масообміну та потенційне зменшення схильності до забруднення.

В іншому дослідженні Алі та співавт. [16] показали, що занурена конструкція спейсера з колоноподібними вузлами має потенціал зменшення перепаду тиску приблизно до третини від значень, характерних для спейсерів із більшим діаметром ниток. Водночас базовий випадок, використаний у цьому дослідженні для порівняння, не відповідає типовій двошаровій геометрії спейсера, яка широко застосовується в комерційних спіральних-намотаних мембранних модулях. У зв'язку з цим ефективність запропонованої зануреної геометрії з колоноподібними вузлами у порівнянні зі стандартними промисловими конфігураціями спейсерів залишається відкритим науковим питанням.

Під час CFD-моделювання процесів мембранного розділення найчастіше застосовується програмне забезпечення ANSYS CFX [5, 6, 29-32], водночас

значного поширення в наукових дослідженнях набула і опенсорсна платформа OpenFOAM [33], яка забезпечує високу гнучкість у реалізації складних фізичних моделей.

Розвиток 3D-друку створює підґрунтя для переходу до 4D-друку, який передбачає введення часової компоненти та формування динамічних мембранних структур, здатних змінювати форму або поверхневі властивості у відповідь на зовнішні подразники, такі як температура, рН або світлове випромінювання. Подібні підходи потенційно можуть революціонізувати контроль забруднення, створення самоочисних мембран і адаптивних фільтраційних процесів. Водночас обмеження у виборі матеріалів, доступності обладнання та високої вартості технологій зумовлюють необхідність подальших фундаментальних і прикладних досліджень перед їх широким промисловим впровадженням [19].

Чисельне моделювання гідродинаміки методом CFD. Обчислювальна гідродинаміка (CFD) є перевіреним і широко застосовуваним інструментом для систематичного вивчення гідродинаміки та явищ масопереносу всередині живильних каналів спіральних-намотаних мембранних модулів і використовується для аналізу потоків масообміну на мікроскопічному рівні [34]. CFD-моделювання пропонує зручний та інформативний спосіб візуалізації полів швидкостей, напружень зсуву та концентраційних градієнтів у мембранних каналах, заповнених спейсерами, що безпосередньо сприяє подальшому вдосконаленню конструкції модулів спіральних-намотаних мембранних модулів [35]. Типові CFD-моделі мембранних каналів розглядають довжинні масштаби порядку міліметрів, що дозволяє екстраполювати отримані результати для прогнозування продуктивності повномасштабних мембранних модулів.

Основними перешкодами до підвищення продуктивності мембранних систем залишаються тині потоку, індуквані спейсерами, а також обмежена механічна стабільність, зумовлена конструкцією та геометрією модуля [36-38]. Додатково, через залежність процесів біообростання від гідродинамічних умов, температури та складу подачі, для підтримки стабільної продуктивності мембран необхідні часті цикли очищення [39-41]. Одним із підходів до зменшення забруднення є підвищення швидкості перехресного потоку i , відповідно, напруження зсуву стінки, оскільки це сприяє пригніченню накопичення забруднювальних відкладень [42, 43]. Проте максимально допустимі швидкості потоку в спіральних-намотаних мембранних модулях істотно обмежені геометрією каналу та конструктивними особливостями модуля, що знижує ефективність такого підходу з точки зору контролю забруднення та очищення. З точки зору геометрії мембрани, інтенсивність забруднення залежить від довжини мембранного елемента та змінюється вздовж осі модуля. Внаслідок тертя потоку індукується осьова втрата тиску, що призводить до зниження трансмембранного тиску від входу

до виходу модуля і, відповідно, до зменшення інтенсивності забруднення вздовж довжини мембрани [44].

На відміну від традиційних спейсерів, нові геометричні конфігурації, навіть за умов незначного зменшення зазору між каналами, можуть не формувати застійних зон і забезпечувати відносно високі напруження зсуву як на поверхні мембрани, так і на нитках спейсера. Це призводить до бажаного зменшення концентраційної поляризації та інтенсивності забруднення, а також впливає на поширені експлуатаційні проблеми забруднення та накипу [45, 46].

Для розв'язання математичної моделі складаються рівняння нерозривності, імпульсу та масопередачі всередині заповненого мембранного каналу [47]. У CFD-моделюванні мембранних процесів широко застосовуються як моделі проникної, так і непроникної стінки. Деякі дослідники використовували граничні умови непроникної стінки для отримання прийнятних результатів [48-52]. Така модель є односторонньо зв'язаною та суттєво зменшує нелінійні ефекти порівняно з моделлю проникної стінки. Джеральдес та Афонсо [53] запропонували узагальнений поправочний коефіцієнт для корекції коефіцієнтів масопереносу, отриманих у моделі непроникної стінки, із середньою похибкою 3,6% відносно повноцінних CFD-прогнозів. Результати добре узгоджуються з експериментальними даними [48, 49], демонструючи похибку на рівні близько 10%. Тох та ін. [52] запропонували багатомасштабну модель, яка поєднує локальне CFD-моделювання з великомасштабною моделлю RO-процесу. Окрема робота також присвячена порівняльному аналізу моделей проникної та непроникної стінки [54]. Показано, що обидва підходи здатні з високою точністю відтворювати основні фізичні параметри процесу (швидкість, тиск, масоперенос) з похибками в межах 2–9%.

З метою зменшення обчислювальних витрат CFD-дослідження процесів RO зазвичай обмежуються аналізом сторони подачі без явного врахування каналу пермеату. Такий підхід є обґрунтованим, оскільки в каналі пермеату спостерігається дуже малий перепад тиску, а концентраційна поляризація є незначною. Тиск пермеату зазвичай приймається близьким до атмосферного, тому більшість CFD-досліджень зосереджуються на моделюванні течії та перенесення розчинених речовин на стороні подачі мембрани. У більшості робіт CFD-аналіз виконується для обмеженої частини модуля – однієї або декількох періодичних комірок. Для такого моделювання поля потоку та масообміну використовуються періодичні граничні умови в поєднанні з детальними обчисленнями на рівні елементарної комірки. Водночас у [55] було розроблено повноцінну 3D CFD-модель, яка дозволяє оцінити роль спейсерів подачі у повномасштабних спіральних-намотаних RO-модулях.

Зустрічаються наукові роботи, у яких для аналізу гідродинаміки в мембранних каналах використовується двовимірне CFD-моделювання. Так, у роботах [56-58] виконано 2D CFD-дослідження трьох типових

конфігурацій спейсерів. Двовимірні (2D) моделі відзначаються високою обчислювальною ефективністю та широко застосовуються на початкових етапах аналізу, однак вони суттєво обмежені у відтворенні реальної просторової геометрії спейсерів і не дозволяють коректно описувати тривимірні ефекти потоку, зокрема вторинні течії, вихрові структури та локальні зони інтенсифікації масопереносу. На відміну від цього, тривимірне (3D) CFD-моделювання забезпечує можливість урахування складних геометрій спейсерів, перетинів ниток, осьових елементів та локальних зон інтенсифікації турбулентності.

На момент написання роботи CFD-дослідження процесів зворотного осмосу були зосереджені переважно або на двовимірних нестационарних моделях [59-63], або на тривимірних стаціонарних моделях [64, 65]. Зокрема Швінге та Вайлі та ін. [58] провели 2D-моделювання і виявили, що напруження зсуву на стінці збільшується або шляхом зменшення відстані між спейсерами, або шляхом збільшення числа Рейнольдса. При тому ж числі Рейнольдса турбулентні сліди з'являлися легше шляхом зменшення критичного числа Рейнольдса (Re_{CR}), що було корисним для зменшення накопичення забруднюючих речовин на поверхні мембрани та для пом'якшення явища концентраційної поляризації ціною збільшення перепаду тиску на мембранному модулі, що додатково спричиняло збільшення споживання енергії. Ахмад та ін. [66] виконали CFD-моделювання спейсерних ниток круглого, трикутного та прямокутного перерізів за однакового трансмембранного тиску. Було встановлено, що круглі та трикутні нитки здатні генерувати вихрові структури за нижчих чисел Рейнольдса порівняно з прямокутними, а також характеризуються нижчим коефіцієнтом концентраційної поляризації за однакових гідродинамічних умов. Куцу та ін. [67] застосували нестационарну ламінарну модель потоку для CFD-моделювання гідродинаміки та масопереносу в діапазоні чисел Рейнольдса 70–740, зосередивши увагу на впливі внутрішніх кутів та кута нахилу ниток у різних конфігураціях спейсерів на структуру потоку в мембранному каналі. Руїс-Гарсія та Пестана [68] розробили двовимірну модель для опису концентраційної поляризації в мембранних елементах зворотного осмосу, однак у цій моделі не враховувався просторовий розподіл солей на поверхні мембрани в спіральній-намотаній модулі.

Для детальнішого аналізу впливу геометричних характеристик спейсерів на продуктивність мембран зворотного осмосу були розроблені тривимірні CFD-моделі. Абдельбакі та ін. [69] виконали CFD-аналіз мембранних модулів RO зі спейсерами постійного та змінного діаметра за різних значень вхідної солоності та чисел Рейнольдса, продемонструвавши, що використання спейсерів змінного діаметра сприяє зменшенню концентраційної поляризації. Тох та ін. [70] дослідили вплив перфорацій різного діаметра, кількості та розташування на традиційних живильних спейсерах на гідродинамічні та масопереносні характеристики каналу.

В статті [15] було досліджено чотири основних види спейсерів і їх вплив на водопроникність, концентраційну поляризацію та перепад тиску. На основі отриманих результатів можна зробити висновок, що спейсери нетканного типу є ефективними для забезпечення високої продуктивності та зменшення ефекту концентраційної поляризації, проте характеризуються нижчою механічною міцністю, що обмежує їх застосування в умовах підвищених навантажень. Частково ткани структури демонструють збалансоване поєднання гідродинамічних і механічних характеристик, однак потребують ретельного індивідуального підбору залежно від конкретних умов експлуатації. Спейсери із середнім шаром доцільно застосовувати у випадках, де пріоритетом є мінімізація водного потоку та концентраційної поляризації, однак вони характеризуються нижчою гідравлічною ефективністю. Повністю ткани спейсери є оптимальними для роботи в режимах з високими потоками та низьким рівнем концентраційної поляризації, однак їх застосування обмежується високою вартістю та складністю технологічної обробки.

Також на динаміку рідин та масообмін має великий вплив зменшення зазору у вузьких мембранних каналах, заповнених новими спейсерами [71]. Дослідження та розробка спейсерів передусім включають їх детальні геометричні характеристики, які критично впливають на поле потоку та основні параметри процесу (тобто падіння тиску, поляризація концентрації). У дослідженні [72] чисельно проаналізовано чотири типи спейсерів подачі з однаковою товщиною, але різною шириною зазору між спейсером і мембраною. Отримані результати підтвердили визначальний вплив ширини зазору на розподіл напружень зсуву, структуру потоку та потенціал розвитку забруднення. У роботі [73] була зроблена спроба отримати уявлення про схеми потоку, створені в каналі живлення модулів із просторовими перешкодами, та їхній кінцевий вплив на напругу зсуву, масопередачу та відносну схильність до забруднення поверхонь двох мембран шляхом зміни відстані спейсера.

Для дослідження поведінки потоку в тривимірних живильних каналах, сформованих спейсерами [74], поряд із CFD застосовувалися експериментальні методи, зокрема велосиметрія зображення частинок [75] та мікроскопічні спостереження. Окремі дослідження також зосереджені на енергетичній оптимізації зворотно-осмотичних систем.

Біологічне забруднення та методи його контролю. Біологічне забруднення мембрани є однією з основних проблем у застосуванні зворотного осмосу (ЗО). Контроль забруднення мембран є ключовим фактором підтримки стабільної роботи ЗО-модулів [76]. Вплив геометрії спейсерів на гідродинамічний стан та утворення біообростання досі не повністю з'ясований, хоча існує багато досліджень у цій області. Серед усіх механізмів забруднення біообростання має найбільший вплив на продуктивність мембран через накопичення біомаси на їхній поверхні [77-79]. Забруднення

мембран традиційно класифікують на три типи: неорганічне (мінеральне), органічне та біологічне (біообростання) [72], проте саме біозабруднення суттєво впливає на експлуатаційні характеристики, зокрема на гідравлічний опір та зниження пермеатного потоку.

У чисельному моделюванні каналів РО-мембран особливу увагу приділяють різним типам моделей біообростання [77, 78, 80, 81]. Більшість двовимірних і тривимірних CFD-досліджень біообростання підтверджені експериментально [82-84], що підвищує довіру до прогнозів моделей. Механічні властивості біоплівки часто визначають поєднанням числового моделювання та експериментальних даних, отриманих за допомогою оптичної когерентної томографії (ОКТ). Експериментальні дослідження біомаси в каналах подачі мембранних модулів низького тиску були проведені з використанням ОКТ [85-86]. Цей метод забезпечує високоточну просторово-структурну інформацію щодо розподілу біомаси. Тривимірна реконструкція, виконана шляхом віднімання нульового часу сканування, дозволяє ізолювати виключно накопичену біомасу, що робить ОКТ ефективним інструментом для кількісної оцінки біообростання та перевірки ефективності стратегій його пом'якшення.

Окрім біообростання, у реальних умовах експлуатації систем зворотного осмосу інші типи забруднень, зокрема утворення накипу, твердофазні частинки та органічні відкладення, можуть виникати одночасно та взаємодіяти між собою [87]. Робота Раду та ін. [88] присвячена чисельному моделюванню взаємодії між процесами утворення накипу та біообростання. Слід зазначити, що моделювання взаємодії між різними механізмами забруднення, а також впливу взаємодії між гідродинамікою та масообміном на ці процеси, є надзвичайно складним завданням. Основною причиною цього є обмежене розуміння фундаментальних механізмів, що лежать в основі таких взаємодій. У зв'язку з цим необхідні подальші дослідження в цьому напрямку.

Вплив на продуктивність мембрани залежить також від діаметра нитки спейсера: більший діаметр та менша товщина розпірки погіршують протиобростаючі характеристики, оскільки менший зазор між спейсером і мембраною може стимулювати локальне накопичення біомаси [89]. У роботі [72] наведено результати довготривалих (20-денних) експериментів з біообростання ЗО-мембран, що виконувалися за умов низького бактеріального навантаження та контрольованого дозування поживних речовин, імітуючи очищені міські стічні води. Було порівняно чотири спейсери однакової товщини, але різного діаметра ниток (0,40; 0,45; 0,55 та 0,60 мм). Відмінності в зазорі між спейсером і мембраною та пористості каналу подачі впливали на характер розвитку біообростання. Оптимізація геометрії спейсерів є критичною: підвищення напруження зсуву може зменшити початкове прикріплення мікроорганізмів, проте не гарантує контролю біообростання на пізніх стадіях. Геометрії, ефективні для контролю

неорганічного накипу, можуть бути недостатніми для обмеження біообростання. Важливими є попередня обробка живильного потоку, контроль бактеріального й поживного навантаження та моніторинг перепаду тиску для раннього виявлення прогресування біообростання. У роботі [90] показано, що інтенсифікація турбулентності потоку в каналах подачі сприяє зменшенню утворення неорганічних відкладень за рахунок скорочення часу перебування іонів поблизу мембранної поверхні та пригнічення росту кристалів. Водночас підкреслюється, що конструкція спейсера подачі повинна забезпечувати компроміс між зменшенням забруднення та зростанням гідравлічного опору, оскільки збільшення турбулентності неминує супроводжуватися підвищенням перепаду тиску і, відповідно, енергоспоживання.

Кількісна оцінка інтенсивності біообростання може здійснюватися різними методами. Наприклад, у роботах [91] індекс біообростання визначено як обернений час, необхідний для досягнення 100% відносного зростання перепаду тиску, що дозволяє інтерпретувати його як швидкість забруднення або частоту необхідного очищення. При цьому забруднення розглядається як надлишкове збільшення перепаду тиску, зумовлене зміною геометрії каналу внаслідок накопичення відкладень. Надмірне зростання перепаду тиску може призводити до витягування мембранних елементів та їх механічного пошкодження. Показано, що індекс біообростання безпосередньо корелює з об'ємом біомаси та є практично незалежним від прикладеної швидкості поперечного потоку, що робить його зручним інструментом для кількісного порівняння швидкості біообростання.

Ефективні стратегії зменшення забруднення включають:

- підвищення гідрофільності мембрани та спейсерів [92-94];
- використання функціоналізованих поверхонь, ковалентне прищеплення лігандів pQAs [95];
- активні методи контролю: обертання спейсерів [76], вібрація [96];
- барботування газу для інтенсифікації турбулентності та зменшення товщини прикордонного шару [97].

Окрім оптимізації геометрії спейсерів, ефективним підходом до зменшення забруднення є підвищення гідрофільності поверхні мембрани [98]. У низці робіт [99-101] описано модифікацію спейсерів за допомогою різних покриттів, зокрема ваніліну, pSBM, ZnO та срібла. Такі модифікації демонструють покращені антибактеріальні властивості, що пов'язують із підвищенням гідрофільності поверхні та кворум-гасильними (quorum quenching) ефектами. Важливу роль відіграють матеріали мембран: наприклад, мембрани з оксиду графену (GO) демонструють надзвичайну проникність і можуть зменшувати енергоспоживання процесу [102].

Для дослідження механізмів біообростання на мікрорівні також застосовуються методи молекулярної динаміки, які дозволяють моделювати процеси фазового розділення, адгезії та формування біоплівки. Серед активних методів контролю особливу увагу приділено динамічній механічній фільтрації. У роботі [76] запропоновано використання ротаційної спейсерної системи як активного методу контролю забруднення мембран. Ефективність запропонованого підходу було оцінено за допомогою моделювання обчислювальної гідродинаміки (CFD). Результати чисельного аналізу показали, що обертання спейсера індукує вторинні течії поблизу поверхні мембрани, що призводить до зростання напруження зсуву та виникнення підйомних сил, які сприяють пригніченню адгезії забруднювальних частинок і видаленню відкладень з мембранної поверхні. Загалом досягнення динамічної механічної фільтрації можливе різними способами, зокрема шляхом обертання елементів модуля [103], вібрації [104] або зворотно-поступального руху мембранних модулів [105]. Серед зазначених підходів ротаційна спейсерна система розглядається як ефективний та енергоефективний метод контролю забруднення під час мембранної фільтрації. Обертання прокладки, розташованої між двома суміжними мембранними панелями, формує вторинний потік живильної рідини, який накладає додаткові зсувні та підйомні сили на забруднення, забезпечуючи очищення мембранної поверхні.

Аналіз досліджень, присвячених вібраційним 3D-спейсерам, дозволяє виділити три ключові аспекти. По-перше, як геометрія, так і орієнтація спейсерів істотно впливають на ефективність пом'якшення забруднення, як показано в [104]. Зокрема, хвилеподібні структури демонструють кращі характеристики порівняно з пагорбоподібними, а хвилеподібні виступи, орієнтовані перпендикулярно до напрямку вібрації, є ефективнішими, ніж паралельно орієнтовані. По-друге, наявність перфорацій у 3D-спейсерах не забезпечувала помітного покращення продуктивності за низьких потоків пермеату. Це пояснюється тим, що за умов помірного забруднення неперфорований спейсер уже забезпечує достатній гідродинамічний вплив, і додаткові перфорації не призводять до суттєвого посилення ефекту очищення. По-третє, за вищих потоків пермеату розмір та щільність перфорацій відіграють визначальну роль. Було показано, що менші перфорації забезпечують найкращу ефективність пом'якшення забруднення за інтенсивніших режимів фільтрації, тоді як спейсери з більшими перфораціями не демонстрували переваг порівняно з неперфорованими конструкціями в усьому дослідженому діапазоні потоків. Загалом отримані результати свідчать про те, що вібраційні 3D-спейсери є перспективним рішенням для енергоефективного контролю забруднення мембран, особливо за високих потоків пермеату. Як зазначено в [106], на експлуатаційні характеристики таких систем додатково впливають частота та амплітуда вібрацій, а також режим їх переривчастості. Покращення продуктивності

мембран у цьому випадку пояснюється комбінованим ефектом підвищення кінетичної енергії турбулентності, що сприяє зворотному транспорту забруднення від мембранної поверхні, та збільшенням напруження зсуву на межі «мембрана–розчин».

Висновки

Проведений аналіз сучасних експериментальних і чисельних досліджень свідчить, що геометрія, матеріал та функціональні властивості спейсерів відіграють визначальну роль у формуванні гідродинаміки, масопереносу, концентраційної поляризації та процесів забруднення в спіральні-навитих мембранних модулях зворотного осмосу. Застосування CFD-моделювання дозволило детально охарактеризувати локальні структури потоку, розподіл напружень зсуву та зони застою, які безпосередньо пов'язані з інтенсифікацією біообростання та зростанням гідравлічних витрат.

Аналіз літературних джерел показав, що оптимізація геометрії спейсерів (діаметр ниток, зазор між мембраною та спейсером, орієнтація сітки, форма вузлів) дозволяє суттєво підвищити питомий потік пермату та зменшити прояви концентраційної поляризації, однак зазвичай супроводжується зростанням перепаду тиску. Біообростання є домінуючим типом забруднення мембран RO і найбільш чутливе до локальних гідродинамічних умов, зокрема напружень зсуву та наявності зон застою. CFD-моделі з проникною та непроникною стінкою здатні з високою точністю відтворювати основні гідродинамічні та масообмінні характеристики, причому модель непроникної стінки залишається ефективним інструментом для зниження обчислювальних витрат. Новітні 3D-друковані та функціоналізовані спейсери демонструють значний потенціал щодо зменшення забруднення та енергоспоживання, особливо за рахунок складних просторових геометрій і цілеспрямованого керування турбулентністю.

На основі огляду можна виділити такі пріоритетні напрями майбутніх досліджень:

- Багатомасштабне CFD-моделювання, яке поєднує локальні (мікрометрові) процеси біообростання з повномасштабною гідродинамікою спіральні-навитих модулів.

- Комплексне моделювання забруднення, що враховує одночасну взаємодію біообростання, неорганічного накипу та органічних відкладень у реальних умовах експлуатації.

- Оптимізація геометрії спейсерів із урахуванням компромісу між зменшенням забруднення та мінімізацією гідравлічних витрат і енергоспоживання.

- Розробка та валідація нових матеріалів і покриттів спейсерів, зокрема антибактеріальних, гідрофільних та нанокompозитних, із довготривалою стабільністю властивостей.

- Інтеграція активних методів контролю забруднення (вібрація, обертання, барботування газу) з оптимізованими конструкціями спейсерів.

Попри значний прогрес у цій галузі, низка важливих питань залишається відкритою. Зокрема: фундаментальні механізми взаємодії між різними типами забруднення та їх зв'язок із локальною гідродинамікою все ще недостатньо зрозумілі; більшість CFD-досліджень обмежується моделями окремих комірок, що ускладнює пряме перенесення результатів на повномасштабні модулі; існує дефіцит довготривалих експериментальних даних, придатних для валідації чисельних моделей біообростання та деградації спейсерів; довготривала механічна та хімічна стабільність функціоналізованих і 3D-друкованих спейсерів у реальних умовах експлуатації залишається недостатньо дослідженою.

Узагальнюючи, подальший розвиток мембранних систем зворотного осмосу потребує міждисциплінарного підходу, що поєднує CFD-моделювання, експериментальні методи високої роздільної здатності та інженерну оптимізацію матеріалів і конструкцій спейсерів. Саме такий підхід є ключем до створення енергоефективних, стійких до забруднення та економічно конкурентоспроможних мембранних технологій нового покоління.

Фінансування та подяки

Автори висловлюють подяку Збройним Силам України, Національній гвардії, Територіальній обороні та добровольцям за забезпечення безпеки під час виконання цієї роботи. Ця робота стала можливою лише завдяки стійкості та мужності Української армії. Ми також хотіли б подякувати міжнародним партнерам України, які не залишають Україну наодинці перед обличчям російської агресії.

Перелік використаних джерел

- [1] Najdawi F. Z., Neptune K. T. Optimizing Reverse Osmosis Membrane Parameters through the Use of the Solution-Diffusion Model: A Review. *Engineering*. 2022. Vol. 14. Pp. 9–32. DOI: <https://doi.org/10.4236/eng.2022.141002>.
- [2] Supercomputing and Machine Learning-Aided Optimal Design of High Permeability Seawater Reverse Osmosis Membrane Systems/ Luo J., Li M., Hoek E. M. V., Heng Y. *Science Bulletin*. 2023. Vol. 68, iss. 4. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.scib.2023.01.039>.
- [3] Bhattacharjee C., Saxena V.K., Dutta S. Fruit Juice Processing Using Membrane Technology: A Review. *Innovative Food Science & Emerging Technologies*. 2017. Vol. 43. Pp. 136–153. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ifset.2017.08.002>.
- [4] Sarbatly R., Sariau J., Krishnaiah D. Recent Developments of Membrane Technology in the Clarification and Concentration of Fruit Juices. *Food Engineering Reviews*. 2023. Vol. 15. Pp. 420–437. DOI: <https://doi.org/10.1007/s12393-023-09346-2>.

- [5] Foo K., Liang Y. Y., Weihs G. A. F. CFD Study of the Effect of SWM Feed Spacer Geometry on Mass Transfer Enhancement Driven by Forced Transient Slip Velocity. *Journal of Membrane Science*. 2020. Vol. 597. Article 117643. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.memsci.2019.117643>.
- [6] Liang Y. Y., Toh K. Y., Fimbres Weihs G. A. 3D CFD Study of the Effect of Multi-Layer Spacers on Membrane Performance Under Steady Flow. *Journal of Membrane Science*. 2019. Vol. 580. Pp. 256–267. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.memsci.2019.02.015>.
- [7] 3D Printed Nanofiltration Membrane Technology for Waste Water Distillation/ S.B. Khan et al. *Journal of Water Process Engineering*. 2022. Vol. 49. Article 102958. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jwpe.2022.102958>.
- [8] Park C., Kim J.-O. Performance of Biofouling Mitigating Feed Spacer by Surface Modification Using Quorum Sensing Inhibitor. *Desalination*. 2022. Vol. 538. Article 115904. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.desal.2022.115904>.
- [9] Atkinson S. Spacer Patterns Are Printed Directly onto Membranes. *Membrane Technology*. 2021. Vol. 2021. No. 11. Article 7. DOI: [https://doi.org/10.1016/s0958-2118\(21\)00174-9](https://doi.org/10.1016/s0958-2118(21)00174-9).
- [10] Hulienko S. V., Yashchuk V. V., Protsiuk M. O. Refined Assessment of the Impact of Membrane Module Channel Curvature on Pressure Drop. *Journal of Applied Membrane Science & Technology*. 2025. Vol. 29, no. 1. Pp. 55–72. DOI: <https://doi.org/10.11113/jamst.v29n1.310>.
- [11] Enhanced Mass Transfer and Energy Efficiency by a Biomimetic Feed Spacer in Reverse Osmosis Membrane Modules/ X. Hu et al. *Journal of Membrane Science*. 2024. Vol. 713. Article 123290. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.memsci.2024.123290>.
- [12] Synergistically Controlling Biofouling and Improving Membrane Module Permeability by Using Simultaneously Structurally Optimized and Surface Modified Feed Spacers / S. Yang et al. *Journal of Membrane Science*. 2024. Vol. 708. Article 123046. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.memsci.2024.123046>.
- [13] Kavianipour O., Ingram G. D., Vuthaluru H. B. Studies into the Mass Transfer and Energy Consumption of Commercial Feed Spacers for RO Membrane Modules Using CFD: Effectiveness of Performance Measures. *Chemical Engineering Research and Design*. 2019. Vol. 141. Pp. 328–338. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.cherd.2018.10.041>.
- [14] Fouling Resilient Perforated Feed Spacers for Membrane Filtration / Kerdi S., A. Qamar, Vrouwenvelder J. S., Ghaffour N. *Water Research*. 2018. Vol. 140. Pp. 211–219. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.watres.2018.04.049>.
- [15] The Effect of Feed Spacer Geometry on Membrane Performance and Concentration Polarisation Based on 3D CFD Simulations / Gu B., Adjiman C. S., Xu X. Y. *Journal of Membrane Science*. 2017. Vol. 527. Pp. 78–91. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.memsci.2016.12.058>.
- [16] Energy Efficient 3D Printed Column Type Feed Spacer for Membrane Filtration / S.M. Ali et al. *Water Research*. 2019. Vol. 164. Article 114961. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.watres.2019.114961>.
- [17] Koutsou C. P., Karabelas A. J. A Novel Retentate Spacer Geometry for Improved Spiral Wound Membrane (SWM) Module Performance. *Journal of Membrane Science*. 2015. Vol. 488. Pp. 129–142. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.memsci.2015.03.064>.
- [18] 3D Printing for Membrane Separation, Desalination and Water Treatment/ L.D. Tijing et al. *Applied Materials Today*. 2020. Vol. 18. Article 100486. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.apmt.2019.100486>.
- [19] 3D-Printed Materials for Wastewater Treatment. S. Roy Barman et al. *JACS Au*. 2023. Vol. 3, iss. 11. Pp. 2930–2947. DOI: <https://doi.org/10.1021/jacsau.3c00409>.
- [20] Ibrahim Y., Hilal N. The Potentials of 3D-Printed Feed Spacers in Reducing the Environmental Footprint of Membrane Separation Processes. *Journal of Environmental Chemical Engineering*. 2022. Article 109249. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jece.2022.109249>.
- [21] Yousefi S. H., Vahedi Tafreshi H. Modeling Electrospun Fibrous Structures with Embedded Spacer Particles: Application to Aerosol Filtration. *Separation and Purification Technology*. 2020. Vol. 235. Article 116184. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.seppur.2019.116184>.
- [22] Bio-Mimetically Inspired 3D-Printed Honeycombed Support (Spacer) for the Reduction of Reverse Solute Flux and Fouling of Osmotic Energy Driven Membranes / Yanar N., Son M., Park H., Choi H. *Journal of Industrial and Engineering Chemistry*. 2020. Vol. 83. Pp. 343–350. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jiec.2019.12.007>.
- [23] The Potential to Enhance Membrane Module Design with 3D Printing Technology/ J.-Y. Lee et al. *Journal of Membrane Science*. 2016. Vol. 499. Pp. 480–490. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.memsci.2015.11.008>.
- [24] 3D Printed Feed Spacers Based on Triply Periodic Minimal Surfaces for Flux Enhancement and Biofouling Mitigation in RO and UF / N. Sreedhar et al. *Desalination*. 2018. Vol. 425. Pp. 12–21. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.desal.2017.10.010>.
- [25] 3D Printed Spacers Based on TPMS Architectures for Scaling Control in Membrane Distillation/ N. Thomas et al. *Journal of Membrane Science*. 2019. Vol. 581. Pp. 38–49. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.memsci.2019.03.039>.
- [26] Mass Transfer Analysis of Ultrafiltration Using Spacers Based on Triply Periodic Minimal Surfaces: Effects of Spacer Design, Directionality and Voidage / N. Sreedhar et al. *Journal of Membrane Science*. 2018. Vol. 561. Pp. 89–98. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.memsci.2018.05.028>.

- [27] 3D Printed Triply Periodic Minimal Surfaces as Spacers for Enhanced Heat and Mass Transfer in Membrane Distillation / N. Thomas et al. *Desalination*. 2018. Vol. 443. Pp. 256–271. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.desal.2018.06.009>.
- [28] 3D Printed Spacers for Organic Fouling Mitigation in Membrane Distillation/ E. H. C. Castillo et al. *Journal of Membrane Science*. 2019. Vol. 581. Pp. 331–343. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.memsci.2019.03.040>.
- [29] CFD Study of the Effect of Perforated Spacer on Pressure Loss and Mass Transfer in Spacer-Filled Membrane Channels / Toh K. Y., Liang Y. Y., Lau W. J., Fletcher D. F. *Chemical Engineering Science*. 2020. Vol. 222. Article 115704. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ces.2020.115704>.
- [30] CFD Prediction of Flow, Heat and Mass Transfer in Woven Spacer-Filled Channels for Membrane Processes / I. E. Mokhtar et al. *International Journal of Heat and Mass Transfer*. 2021. Vol. 173. Article 121246. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2021.121246>.
- [31] Coupled Effects of Circular and Elliptical Feed Spacers under Forced-Slip on Viscous Dissipation and Mass Transfer Enhancement Based on CFD / K. Foo et al. *Journal of Membrane Science*. 2021. Vol. 637. Article 119599. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.memsci.2021.119599>.
- [32] Liang Y. Y., Fimbres Weihs G. A., Wiley D. E. Comparison of Oscillating Flow and Slip Velocity Mass Transfer Enhancement in Spacer-Filled Membrane Channels: CFD Analysis and Validation. *Journal of Membrane Science*. 2020. Vol. 593. Article 117433. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.memsci.2019.117433>.
- [33] Designing Centrifugal Membrane Filters with Uniform Pressure for UF/NF/RO Separations / V. Geraldes et al. *Journal of Membrane Science*. 2024. P. 122752. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.memsci.2024.122752>.
- [34] Koutsou C. P., Karabelas A. J., Kostoglou M. Membrane Desalination under Constant Water Recovery – The Effect of Module Design Parameters on System Performance. *Separation and Purification Technology*. 2015. Vol. 147. Pp. 90–113. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.seppur.2015.04.012>.
- [35] A Review of CFD Modelling and Performance Metrics for Osmotic Membrane Processes / K. Y. Toh et al. *Membranes*. 2020. Vol. 10. No. 10. Article 285. DOI: <https://doi.org/10.3390/membranes10100285>.
- [36] Increasing Performance of Spiral-Wound Modules (SWMs) by Improving Stability against Axial Pressure Drop and Utilising Pulsed Flow / Toh K. Y., Liang Y. Y., Lau W. J., Fimbres Weihs G. A. *Membranes*. 2023. Vol. 13. No. 9. Article 791. DOI: <https://doi.org/10.3390/membranes13090791>.
- [37] CFD Investigation of the Effect of the Feed Spacer on Hydrodynamics in Spiral Wound Membrane Modules / Han Z., Terashima M., Liu B., Yasui H. *Mathematical and Computational Applications*. 2018. Vol. 23, no. 4. Article 80. DOI: <https://doi.org/10.3390/mca23040080>.
- [38] Kavianiipour O., Ingram G. D., Vuthaluru H. B. Investigation into the Effectiveness of Feed Spacer Configurations for Reverse Osmosis Membrane Modules Using Computational Fluid Dynamics. *Journal of Membrane Science*. 2017. Vol. 526. Pp. 156–171. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.memsci.2016.12.034>.
- [39] Schiffer S., Kulozik U. Effect of Temperature-Dependent Bacterial Growth during Milk Protein Fractionation by Means of 0.1 μm Microfiltration on the Length of Possible Production Cycle Times. *Membranes*. 2020. Vol. 10. No. 11. Article 326. DOI: <https://doi.org/10.3390/membranes10110326>.
- [40] Influence of Feed Temperature on Biofouling of Ultrafiltration Membrane during Skim Milk Processing / J. Chamberland et al. *International Dairy Journal*. 2019. Vol. 93. Pp. 99–105. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.idairyj.2019.02.005>.
- [41] Microbial Biofilms in the Food Industry – A Comprehensive Review / C. Carrascosa et al. *International Journal of Environmental Research and Public Health*. 2021. Vol. 18, no. 4. Article 2014. DOI: <https://doi.org/10.3390/ijerph18042014>.
- [42] Qiu T. Y., Davies P. A. Concentration Polarization Model of Spiral-Wound Membrane Modules with Application to Batch-Mode RO. Desalination of Brackish Water. *Desalination*. 2015. Vol. 368. Pp. 36–47. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.desal.2014.12.048>.
- [43] Spatial Heterogeneity of Biofouling under Different Cross-Flow Velocities in Reverse Osmosis Membrane Systems / N. M. Farhat et al. *Journal of Membrane Science*. 2016. Vol. 520. Pp. 964–971. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.memsci.2016.08.065>.
- [44] Milk Protein Fractionation by Custom-Made Prototypes of Spiral-Wound Microfiltration Membranes Operated at Extreme Crossflow Velocities / M. Hartinger et al. *Journal of Membrane Science*. 2020. Vol. 605. Article 118110. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.memsci.2020.118110>.
- [45] A Review of Efforts to Reduce Membrane Fouling by Control of Feed Spacer Characteristics / Abid H. S., Johnson D. J., Hashaikeh R., Hilal N. *Desalination*. 2017. Vol. 420. Pp. 384–402. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.desal.2017.07.019>.
- [46] Effect of Different Commercial Feed Spacers on Biofouling of Reverse Osmosis Membrane Systems: A Numerical Study / S. S. Bucs et al. *Desalination*. 2014. Vol. 343. Pp. 26–37. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.desal.2013.11.007>.
- [47] A Study of Flow Field and Concentration Polarization Evolution in Membrane Channels with Two-Dimensional Spacers during Water Desalination / M. Amokrane et al. *Journal of Membrane Science*. 2015. Vol. 477. Pp. 139–150. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.memsci.2014.11.029>.

- [48] Koutsou C.P., Yiantsios S.G., Karabelas A.J. A Numerical and Experimental Study of Mass Transfer in Spacer-Filled Channels: Effects of Spacer Geometrical Characteristics and Schmidt Number. *Journal of Membrane Science*. 2009. Vol. 326, no. 1. Pp. 234–251. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.memsci.2008.10.007>.
- [49] Completo C., Semiao V., Geraldes V. Efficient CFD-Based Method for Designing Cross-Flow Nanofiltration Small Devices. *Journal of Membrane Science*. 2016. Vol. 500. Pp. 190–202. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.memsci.2015.11.012>.
- [50] Fimbres-Weihs G. A., Wiley D. E. Numerical Study of Mass Transfer in Three-Dimensional Spacer-Filled Narrow Channels with Steady Flow. *Journal of Membrane Science*. 2007. Vol. 306. No. 1–2. Pp. 228–243. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.memsci.2007.08.043>.
- [51] Shakaib M., Hasani S. M. F., Mahmood M. CFD Modeling for Flow and Mass Transfer in Spacer-Obstructed Membrane Feed Channels. *Journal of Membrane Science*. 2009. Vol. 326, no. 2. Pp. 270–284. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.memsci.2008.09.052>.
- [52] The Techno-Economic Case for Coupling Advanced Spacers to High-Permeance RO Membranes for Desalination / Toh K. Y., Liang Y. Y., Lau W. J., Fimbres Weihs G. A. *Desalination*. 2020. Vol. 491. Article 114534. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.desal.2020.114534>.
- [53] Geraldes V., Afonso M. D. Generalized Mass-Transfer Correction Factor for Nanofiltration and Reverse Osmosis. *AIChE Journal*. 2006. Vol. 52, no. 10. Pp. 3353–3362. DOI: <https://doi.org/10.1002/aic.10968>.
- [54] Multiscale Analysis of Permeable and Impermeable Wall Models for Seawater Reverse Osmosis Desalination / Yang Q., Heng Y., Jiang Y., Luo J. *Separations*. 2023. Vol. 10, no. 2. Article 134. DOI: <https://doi.org/10.3390/separations10020134>.
- [55] Analysis of Concentration Polarisation in Full-Size Spiral Wound Reverse Osmosis Membranes Using Computational Fluid Dynamics / W. Wei et al. *Membranes*. 2021. Vol. 11, no. 5. Article 353. DOI: <https://doi.org/10.3390/membranes11050353>.
- [56] Estimation of Foulant Deposition across the Leaf of a Spiral-Wound Module / Schwinge J., Neal P. R., Wiley D. E., Fane A. G. *Desalination*. 2002. Vol. 146. No. 1–3. Pp. 203–208. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0011-9164\(02\)00471-X](https://doi.org/10.1016/S0011-9164(02)00471-X).
- [57] Schwinge J., Wiley D. E., Fletcher D. F. A CFD Study of Unsteady Flow in Narrow Spacer-Filled Channels for Spiral-Wound Membrane Modules. *Desalination*. 2002. Vol. 146, no. 1–3. Pp. 195–201. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0011-9164\(02\)00470-8](https://doi.org/10.1016/S0011-9164(02)00470-8).
- [58] Schwinge J., Wiley D. E., Fletcher D. F. Simulation of Unsteady Flow and Vortex Shedding for Narrow Spacer-Filled Channels. *Industrial & Engineering Chemistry Research*. 2003. Vol. 42, no. 20. Pp. 4962–4977. DOI: <https://doi.org/10.1021/ie030211n>.
- [59] Liang Y. Y., Fimbres Weihs G. A., Fletcher D. F. CFD Study of the Effect of Unsteady Slip Velocity Waveform on Shear Stress in Membrane Systems. *Chemical Engineering Science*. 2018. Vol. 192. Pp. 16–24. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ces.2018.07.009>.
- [60] CFD Modelling of Unsteady Electro-Osmotic Permeate Flux Enhancement in Membrane Systems / Liang Y. Y., Fimbres Weihs G., Setiawan R., Wiley D. *Chemical Engineering Science*. 2016. Vol. 146. Pp. 189–198. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ces.2016.02.028>.
- [61] Liang Y. Y., Fimbres Weihs G. A., Wiley D. E. CFD modelling of electro-osmotic permeate flux enhancement in spacer-filled membrane channels. *Journal of Membrane Science*. 2016. Vol. 507. Pp. 107–118. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.memsci.2016.02.012>.
- [62] Concentration polarization and permeate flux variation in a vibration enhanced reverse osmosis membrane module / Su X., Li W., Palazzolo A., Ahmed S. *Desalination*. 2018. Vol. 433. Pp. 75–88. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.desal.2018.01.001>.
- [63] Permeate flux increase by colloidal fouling control in a vibration enhanced reverse osmosis membrane desalination system / Su X., Li W., Palazzolo A., Ahmed S. *Desalination*. 2019. Vol. 453. Pp. 22–36. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.desal.2018.12.003>.
- [64] Evaluation and minimisation of energy consumption in a medium-scale reverse osmosis brackish water desalination plant / A. A. Alsarayreh et al. *Journal of Cleaner Production*. 2020. Vol. 248. Article 119220. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.119220>.
- [65] Membrane modeling using CFD: Combined evaluation of mass transfer and geometrical influences in 1D and 3D / Haddadi B., Jordan C., Miltner M., Harsek M. *Journal of Membrane Science*. 2018. Vol. 563. Pp. 199–209. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.memsci.2018.05.040>.
- [66] Ahmad A. L., Lau K. K. Impact of different spacer filament geometries on 2D unsteady hydrodynamics and concentration polarization in spiral wound membrane channel. *Journal of Membrane Science*. 2006. Vol. 286, no. 1–2. Pp. 77–92. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.memsci.2006.09.018>.
- [67] Koutsou C. P., Yiantsios S. G., Karabelas A. J. Direct numerical simulation of flow in spacer-filled channels: Effect of spacer geometrical characteristics. *Journal of Membrane Science*. 2007. Vol. 291, no. 1–2. Pp. 53–69. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.memsci.2006.12.032>.
- [68] Ruiz-García A., de la Nuez Pestana I. Feed spacer geometries and permeability coefficients: Effect on the performance in BWRO spiral-wound membrane modules. *Water*. 2019. Vol. 11, no. 1. Article 152. DOI: <https://doi.org/10.3390/w11010152>.
- [69] Abdelbaky M. M. A., El-Refae M. M. A. A 3D CFD comparative study between torsioned and non-torsioned net-type feed spacer in reverse osmosis.

- Applied Sciences*. 2019. Vol. 1, no. 9. DOI: <https://doi.org/10.1007/s42452-019-1098-8>.
- [70] 3D CFD study on hydrodynamics and mass transfer phenomena for SWM feed spacer with different floating characteristics / Toh K. Y., Liang Y. Y., Lau W. J., Fimbres Weihs G. A. *Chemical Engineering Research and Design*. 2020. Vol. 159. Pp. 36–46. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.cherd.2020.04.010>.
- [71] Saliakellis P., Koutsou C., Karabelas A. The effect of gap reduction on fluid dynamics and mass transfer in membrane narrow channels filled with novel spacers – A detailed computational study. *Membranes*. 2022. Vol. 13, no. 1. Article 20. DOI: <https://doi.org/10.3390/membranes13010020>.
- [72] Dynamic evolution of membrane biofouling in feed channels affected by spacer–membrane clearance and the induced hydrodynamic conditions / W. Lin et al. *Journal of Membrane Science*. 2023. Vol. 668. Article 121209. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.memsci.2022.121209>.
- [73] Saeed A., Vuthaluru R., Vuthaluru H. B. Investigations into the effects of mass transport and flow dynamics of spacer-filled membrane modules using CFD. *Chemical Engineering Research and Design*. 2015. Vol. 93. Pp. 79–99. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.cherd.2014.07.002>.
- [74] Spacer geometry and particle deposition in spiral wound membrane feed channels / A. I. Radu et al. *Water Research*. 2014. Vol. 64. Pp. 160–176. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.watres.2014.06.040>.
- [75] Determining effects of spacer orientations on channel hydraulic conditions using PIV / Haidari A. H., Heijman S. G. J., Uijtewaal W. S. J., van der Meer W. G. J. *Journal of Water Process Engineering*. 2019. Vol. 31. Article 100820. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jwpe.2019.100820>.
- [76] A rotary spacer system for energy-efficient membrane fouling control in oil/water emulsion filtration / N. I. Mat Nawi et al. *Membranes*. 2022. Vol. 12, no. 6. Article 554. DOI: <https://doi.org/10.3390/membranes12060554>.
- [77] Review on strategies for biofouling mitigation in spiral wound membrane systems / S. S. Bucs et al. *Desalination*. 2018. Vol. 434. Pp. 189–197. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.desal.2018.01.023>.
- [78] Impacts of flow channel geometry, hydrodynamic and membrane properties on osmotic backwash of RO membranes – CFD modeling and simulation / Jeong K., Park M., Oh S., Kim J. H. *Desalination*. 2020. Vol. 476. Article 114229. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.desal.2019.114229>.
- [79] Structural tailoring of sharkskin-mimetic patterned reverse osmosis membranes for optimizing biofouling resistance / W. Choi et al. *Journal of Membrane Science*. 2020. Vol. 595. Article 117602. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.memsci.2019.117602>.
- [80] Uppu A., Chaudhuri A., Prasad Das S. Numerical modeling of particulate fouling and cake-enhanced concentration polarization in roto-dynamic reverse osmosis filtration systems. *Desalination*. 2019. Vol. 468. Article 114053. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.desal.2019.06.019>.
- [81] Fimbres Weihs G. A., Wiley D. E. CFD analysis of tracer response technique under cake-enhanced osmotic pressure. *Journal of Membrane Science*. 2014. Vol. 449. Pp. 38–49. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.memsci.2013.08.015>.
- [82] Modeling the effect of biofilm formation on reverse osmosis performance: Flux, feed channel pressure drop and solute passage / Radu A. I., et al. *Journal of Membrane Science*. 2010. Vol. 365, no. 1–2. Pp. 1–15. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.memsci.2010.07.036>.
- [83] Biofouling in spiral wound membrane systems: Three-dimensional CFD model based evaluation of experimental data / Radu A. I., Vrouwenvelder J. S., van Loosdrecht M. C. M., Picioreanu C. *Journal of Membrane Science*. 2010. Vol. 346, no. 1. Pp. 71–85. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.memsci.2009.09.025>.
- [84] Effect of flow velocity, substrate concentration and hydraulic cleaning on biofouling of reverse osmosis feed channels / Radu A. I., Vrouwenvelder J. S., van Loosdrecht M. C. M., Picioreanu C. *Chemical Engineering Journal*. 2012. Vol. 188. Pp. 30–39. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.cej.2012.01.133>.
- [85] Spatially-resolved in-situ quantification of biofouling using optical coherence tomography (OCT) and 3D image analysis in a spacer filled channel / L. Fortunato et al. *Journal of Membrane Science*. 2017. Vol. 524. Pp. 673–681. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.memsci.2016.11.052>.
- [86] Fortunato L., Leiknes T. In-situ biofouling assessment in spacer filled channels using optical coherence tomography (OCT): 3D biofilm thickness mapping. *Bioresource Technology*. 2017. Vol. 229. Pp. 231–235. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2017.01.021>.
- [87] Tang C. Y., Chong T. H., Fane A. G. Colloidal interactions and fouling of NF and RO membranes: A review. *Advances in Colloid and Interface Science*. 2011. Vol. 164, no. 1–2. Pp. 126–143. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.cis.2010.10.007>.
- [88] Combined biofouling and scaling in membrane feed channels: a new modeling approach / Radu A. I., Bergwerff L., van Loosdrecht M. C. M., Picioreanu C. *Biofouling*. 2015. Vol. 31, no. 1. Pp. 83–100. DOI: <https://doi.org/10.1080/08927014.2014.996750>.
- [89] The critical role of feed spacer channel porosity in membrane biofouling: Insights and implications / W. Lin et al. *Journal of Membrane Science*. 2022. Vol. 649. Article 120395. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.memsci.2022.120395>.
- [90] Advancement in membrane spacer technology: emerging trend and modification of three-dimensional printed membrane spacers for fouling mitigation / N. M. Munir et al. *Frontiers of Chemical Science and Engineering*. 2025. Vol. 19, no. 11. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11705-025-2606-6>.

- [91] Improved quantitative evaluation of the fouling potential in spacer-filled membrane filtration channels through a biofouling index based on the relative pressure drop / Huisman K. T., Franco-Clavijo N., Vrouwenvelder J. S., Blankert B. *Journal of Membrane Science*. 2023. Vol. 671. Article 121400. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.memsci.2023.121400>.
- [92] Kang G.-d., Cao Y.-m. Development of antifouling reverse osmosis membranes for water treatment: A review. *Water Research*. 2012. Vol. 46, no. 3. Pp. 584–600. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.watres.2011.11.041>.
- [93] Effects of hydrophilicity/hydrophobicity of membrane on membrane fouling in a submerged membrane bioreactor / M. Zhang et al. *Bioresource Technology*. 2015. Vol. 175. Pp. 59–67. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2014.10.058>.
- [94] Saeed A., Vuthaluru R., Vuthaluru H. B. Impact of feed spacer filament spacing on mass transport and fouling propensities of RO membrane surfaces. *Chemical Engineering Communications*. 2014. Vol. 202, no. 5. Pp. 634–646. DOI: <https://doi.org/10.1080/00986445.2013.860525>.
- [95] Designing surfaces that kill bacteria on contact / Tiller J. C., Liao C.-J., Lewis K., Klibanov A. M. *Proceedings of the National Academy of Sciences*. 2001. Vol. 98, no. 11. Pp. 5981–5985. DOI: <https://doi.org/10.1073/pnas.111143098>.
- [96] Effect of vibration on fouling propensity of hollow fiber membranes in microfiltration and membrane distillation / Y. Park et al. *Desalination and Water Treatment*. 2020. Vol. 192. Pp. 11–18. DOI: <https://doi.org/10.5004/dwt.2020.25151>.
- [97] Impact of permeate flux and gas sparging rate on membrane performance and process economics of granular anaerobic membrane bioreactors / S. Vinarde et al. *Science of The Total Environment*. 2022. Vol. 825. Article 153907. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.153907>.
- [98] Simulated preparation and hydration property of a new-generation zwitterionic modified PVDF membrane / H. Zhu et al. *Journal of Membrane Science*. 2022. Vol. 652. Article 120498. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.memsci.2022.120498>.
- [99] Assessment of anti-bacterial adhesion and anti-biofouling potential of plasma-mediated poly(sulfobetaine methacrylate) coatings of feed spacer / Jabłońska M., Menzel M., Hirsch U., Heilmann A. *Desalination*. 2020. Vol. 493. Article 114664. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.desal.2020.114664>.
- [100] Modification of a polypropylene feed spacer with metal oxide-thin film by chemical bath deposition for biofouling control in membrane filtration / C. Thamaraiselvan et al. *Journal of Membrane Science*. 2019. Vol. 573. Pp. 511–519. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.memsci.2018.12.033>.
- [101] Experimental characterization and numerical simulation of the anti-biofouling activity of nanosilver-modified feed spacers in membrane filtration / Ronen A., Lerman S., Ramon G. Z., Dosoretz C. G. *Journal of Membrane Science*. 2015. Vol. 475. Pp. 320–329. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.memsci.2014.10.042>.
- [102] Mi B. Graphene oxide membranes for ionic and molecular sieving. *Science*. 2014. Vol. 343, no. 6172. Pp. 740–742. DOI: <https://doi.org/10.1126/science.1250247>.
- [103] An integrated rotating biological contactor and membrane separation process for domestic wastewater treatment / S. Waqas et al. *Alexandria Engineering Journal*. 2020. Vol. 59, no. 6. Pp. 4257–4265. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.aej.2020.07.029>.
- [104] Enhancing fouling mitigation of submerged flat-sheet membranes by vibrating 3D-spacers / Y. Z. Tan et al. *Separation and Purification Technology*. 2019. Vol. 215. Pp. 70–80. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.seppur.2018.12.085>.
- [105] Performance evaluation of a novel reciprocation membrane bioreactor (rMBR) for enhanced nutrient removal in wastewater treatment: a comparative study / Ho J., Smith S., Kim G. D., Roh H. K. *Water Science and Technology*. 2015. Vol. 72, no. 6. Pp. 917–927. DOI: <https://doi.org/10.2166/wst.2015.267>.
- [106] Spacer vibration for fouling control of submerged flat sheet membranes / B. Wu et al. *Separation and Purification Technology*. 2019. Vol. 210. Pp. 719–728. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.seppur.2018.08.062>.

RECENT ADVANCES IN THE INVESTIGATION OF MEMBRANE CHANNEL HYDRODYNAMICS: A CRITICAL REVIEW

Yasenchuk V.V.

postgraduate student, National Technical University of Ukraine «Igor Sikorsky Kyiv polytechnic institute», Kyiv, ORCID: <https://orcid.org/0009-0006-1012-9475>, e-mail: Ivitaliy10@ukr.net;

Hulienko S.V.

PhD (Engineering), associate professor, National Technical University of Ukraine «Igor Sikorsky Kyiv polytechnic institute», Kyiv, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-9042-870X>, e-mail: sergiigulienko@gmail.com

The abstract is a concise yet informative summary of the main aspects of a scientific work. It outlines the general scientific or practical context of the study, justifies its relevance and importance, and states the purpose of the work along with the tasks addressed. In this review, the results of scientific studies from 2015 to 2025 are systematized, focusing on the influence of spacer geometric parameters on the operational performance of spiral-wound reverse osmosis membrane modules. Contemporary approaches to spacer design optimization are analyzed, including the use of additive manufacturing (3D printing), computational fluid dynamics (CFD) methods, and experimental techniques for investigating hydrodynamics, mass transfer, and biofouling. The effects of filament diameter, mesh orientation angle, channel height, node shape, and spatial configuration (including TPMS – triply periodic minimal surfaces) on velocity distribution, shear stresses, and pressure drop are examined. The importance of finding a balance between enhanced mass transfer and minimized hydraulic losses is emphasized. Special attention is given to modeling biofouling processes, which represent the dominant type of membrane contamination and are closely linked to local hydrodynamic conditions in the channel, particularly the presence of stagnant zones. CFD studies with both permeable and impermeable boundary conditions are summarized, along with approaches for validating numerical models using high-resolution experimental methods such as OCT (Optical Coherence Tomography) and PIV (Particle Image Velocimetry). The review highlights the potential of 3D-printed and functionalized spacers (e.g., antibacterial coatings, hydrophilic materials) to reduce fouling intensity and improve the energy efficiency of membrane systems. Active fouling control methods, such as vibration and spacer rotation, which induce secondary flows, are also discussed. Key directions for future research are identified, including multiscale modeling, comprehensive descriptions of interactions between different fouling types, geometry optimization considering energy constraints, as well as the development of new materials and active biofouling control methods. The synthesized findings provide a scientific basis for the development of energy-efficient, fouling-resistant next-generation membrane technologies.

Keywords: membrane; biofouling; spacer; 3D printing; CFD modelling; reverse osmosis; concentration polarization.

References

- [1] F. Z. Najdawi and K. T. Neptune, "Optimizing reverse osmosis membrane parameters through the use of the solution-diffusion model: A review," *Engineering*, vol. 14, no. 1, pp. 9–32, 2022. doi: [10.4236/eng.2022.141002](https://doi.org/10.4236/eng.2022.141002).
- [2] J. Luo, M. Li, E. M. V. Hoek, and Y. Heng, "Supercomputing and machine learning-aided optimal design of high permeability seawater reverse osmosis membrane systems," *Science Bulletin*, Vol. 68, iss. 4, 2023. doi: [10.1016/j.scib.2023.01.039](https://doi.org/10.1016/j.scib.2023.01.039).
- [3] C. Bhattacharjee, V. K. Saxena, and S. Dutta, "Fruit juice processing using membrane technology: A review," *Innovative Food Science & Emerging Technologies*, vol. 43, pp. 136–153, 2017. doi: [10.1016/j.ifset.2017.08.002](https://doi.org/10.1016/j.ifset.2017.08.002).
- [4] R. Sarbatly, J. Sariau, and D. Krishnaiah, "Recent developments of membrane technology in the clarification and concentration of fruit juices," *Food Engineering Reviews*, vol. 15, pp. 420–437, 2023. doi: [10.1007/s12393-023-09346-2](https://doi.org/10.1007/s12393-023-09346-2).
- [5] K. Foo, Y. Y. Liang, and G. A. F. Weihs, "CFD study of the effect of SWM feed spacer geometry on mass transfer enhancement driven by forced transient slip velocity," *Journal of Membrane Science*, vol. 597, article 117643, 2020. doi: [10.1016/j.memsci.2019.117643](https://doi.org/10.1016/j.memsci.2019.117643).
- [6] Y. Y. Liang, K. Y. Toh, and G. A. F. Weihs, "3D CFD study of the effect of multi-layer spacers on membrane performance under steady flow," *Journal of Membrane Science*, vol. 580, pp. 256–267, 2019. doi: [10.1016/j.memsci.2019.02.015](https://doi.org/10.1016/j.memsci.2019.02.015).
- [7] S. B. Khan, S. Irfan, S. S. Lam, X. Sun, and S. Chen, "3D printed nanofiltration membrane technology for wastewater distillation," *Journal of Water Process Engineering*, vol. 49, article 102958, 2022. doi: [10.1016/j.jwpe.2022.102958](https://doi.org/10.1016/j.jwpe.2022.102958).
- [8] C. Park, and J.-O. Kim, "Performance of biofouling mitigating feed spacer by surface modification using quorum sensing inhibitor," *Desalination*, vol. 538, article 115904, 2022. doi: [10.1016/j.desal.2022.115904](https://doi.org/10.1016/j.desal.2022.115904).
- [9] S. Atkinson, "Spacer patterns are printed directly onto membranes," *Membrane Technology*, vol. 2021, no. 11, article 7, 2021. doi: [10.1016/S0958-2118\(21\)00174-9](https://doi.org/10.1016/S0958-2118(21)00174-9).
- [10] S. V. Hulienko, V. V. Yashchuk, and M. O. Protsiuk, "Refined assessment of the impact of membrane module channel curvature on pressure drop," *Journal of Applied Membrane Science & Technology*, vol. 29, no. 1, pp. 55–72, 2025. doi: [10.11113/jamst.v29n1.310](https://doi.org/10.11113/jamst.v29n1.310).
- [11] X. Hu, J. Li, S. Yu, Z. Zhu, P. Lin, and X. Li, "Enhanced mass transfer and energy efficiency by a biomimetic feed spacer in reverse osmosis membrane modules," *Journal of Membrane Science*, vol. 713, article 123290, 2024. doi: [10.1016/j.memsci.2024.123290](https://doi.org/10.1016/j.memsci.2024.123290).
- [12] S. Yang et al., "Synergistically controlling biofouling and improving membrane module permeability by using simultaneously structurally optimized and surface modified feed spacers," *Journal of Membrane Science*, vol. 708, article 123046, 2024. doi: [10.1016/j.memsci.2024.123046](https://doi.org/10.1016/j.memsci.2024.123046).
- [13] O. Kaviani-pour, G. D. Ingram, and H. B. Vuthaluru, "Studies into the mass transfer and energy consumption of commercial feed spacers for RO membrane modules using CFD: Effectiveness of performance measures," *Chemical Engineering Research and*

- Design*, vol. 141, pp. 328–338, 2019. doi: [10.1016/j.cherd.2018.10.041](https://doi.org/10.1016/j.cherd.2018.10.041).
- [14] S. Kerdi, A. Qamar, J. S. Vrouwenvelder, and N. Ghaffour, “Fouling resilient perforated feed spacers for membrane filtration,” *Water Research*, vol. 140, pp. 211–219, 2018. doi: [10.1016/j.watres.2018.04.049](https://doi.org/10.1016/j.watres.2018.04.049).
- [15] B. Gu, C. S. Adjiman, and X. Y. Xu, “The effect of feed spacer geometry on membrane performance and concentration polarisation based on 3D CFD simulations,” *Journal of Membrane Science*, vol. 527, pp. 78–91, 2017. doi: [10.1016/j.memsci.2016.12.058](https://doi.org/10.1016/j.memsci.2016.12.058).
- [16] S. M. Ali et al., “Energy efficient 3D printed column type feed spacer for membrane filtration,” *Water Research*, vol. 164, article 114961, 2019. doi: [10.1016/j.watres.2019.114961](https://doi.org/10.1016/j.watres.2019.114961).
- [17] C. P. Koutsou, and A. J. Karabelas, “A novel retentate spacer geometry for improved spiral wound membrane (SWM) module performance,” *Journal of Membrane Science*, vol. 488, pp. 129–142, 2015. doi: [10.1016/j.memsci.2015.03.064](https://doi.org/10.1016/j.memsci.2015.03.064).
- [18] L. D. Tijning, J. R. C. Dizon, I. Ibrahim, A. R. N. Nisay, H. K. Shon, and R. C. Advincula, “3D printing for membrane separation, desalination and water treatment,” *Applied Materials Today*, vol. 18, article 100486, 2020. doi: [10.1016/j.apmt.2019.100486](https://doi.org/10.1016/j.apmt.2019.100486).
- [19] S. R. Barman, P. Gavit, S. Chowdhury, K. Chatterjee, and A. Nain, “3D-printed materials for wastewater treatment,” *JACS Au*, vol. 3, iss. 11, pp. 2930–2947, 2023. doi: [10.1021/jacsau.3c00409](https://doi.org/10.1021/jacsau.3c00409).
- [20] Y. Ibrahim, and N. Hilal, “The potentials of 3D-printed feed spacers in reducing the environmental footprint of membrane separation processes,” *Journal of Environmental Chemical Engineering*, article 109249, 2022. doi: [10.1016/j.jece.2022.109249](https://doi.org/10.1016/j.jece.2022.109249).
- [21] S. H. Yousefi, and H. Vahedi Tafreshi, “Modeling electrospun fibrous structures with embedded spacer particles: Application to aerosol filtration,” *Separation and Purification Technology*, vol. 235, article 116184, 2020. doi: [10.1016/j.seppur.2019.116184](https://doi.org/10.1016/j.seppur.2019.116184).
- [22] N. Yanar, M. Son, H. Park, and H. Choi, “Bio-mimetically inspired 3D-printed honeycombed support (spacer) for the reduction of reverse solute flux and fouling of osmotic energy driven membranes,” *Journal of Industrial and Engineering Chemistry*, vol. 83, pp. 343–350, 2020. doi: [10.1016/j.jiec.2019.12.007](https://doi.org/10.1016/j.jiec.2019.12.007).
- [23] J.-Y. Lee et al., “The potential to enhance membrane module design with 3D printing technology,” *Journal of Membrane Science*, vol. 499, pp. 480–490, 2016. doi: [10.1016/j.memsci.2015.11.008](https://doi.org/10.1016/j.memsci.2015.11.008).
- [24] N. Sreedhar et al., “3D printed feed spacers based on triply periodic minimal surfaces for flux enhancement and biofouling mitigation in RO and UF,” *Desalination*, vol. 425, pp. 12–21, 2018. doi: [10.1016/j.desal.2017.10.010](https://doi.org/10.1016/j.desal.2017.10.010).
- [25] N. Thomas, N. Sreedhar, O. Al-Ketan, R. Rowshan, R. K. Abu Al-Rub, and H. Arafat, “3D printed spacers based on TPMS architectures for scaling control in membrane distillation,” *Journal of Membrane Science*, vol. 581, pp. 38–49, 2019. doi: [10.1016/j.memsci.2019.03.039](https://doi.org/10.1016/j.memsci.2019.03.039).
- [26] N. Sreedhar et al., “Mass transfer analysis of ultrafiltration using spacers based on triply periodic minimal surfaces: Effects of spacer design, directionality and voidage,” *Journal of Membrane Science*, vol. 561, pp. 89–98, 2018. doi: [10.1016/j.memsci.2018.05.028](https://doi.org/10.1016/j.memsci.2018.05.028).
- [27] N. Thomas, N. Sreedhar, O. Al-Ketan, R. Rowshan, R. K. Abu Al-Rub, and H. Arafat, “3D printed triply periodic minimal surfaces as spacers for enhanced heat and mass transfer in membrane distillation,” *Desalination*, vol. 443, pp. 256–271, 2018. doi: [10.1016/j.desal.2018.06.009](https://doi.org/10.1016/j.desal.2018.06.009).
- [28] E. H. C. Castillo et al., “3D printed spacers for organic fouling mitigation in membrane distillation,” *Journal of Membrane Science*, vol. 581, pp. 331–343, 2019. doi: [10.1016/j.memsci.2019.03.040](https://doi.org/10.1016/j.memsci.2019.03.040).
- [29] K. Y. Toh, Y. Y. Liang, W. J. Lau, and D. F. Fletcher, “CFD study of the effect of perforated spacer on pressure loss and mass transfer in spacer-filled membrane channels,” *Chemical Engineering Science*, vol. 222, article 115704, 2020. doi: [10.1016/j.ces.2020.115704](https://doi.org/10.1016/j.ces.2020.115704).
- [30] I. E. Mokhtar et al., “CFD prediction of flow, heat and mass transfer in woven spacer-filled channels for membrane processes,” *International Journal of Heat and Mass Transfer*, vol. 173, article 121246, 2021. doi: [10.1016/j.ijheatmasstransfer.2021.121246](https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2021.121246).
- [31] I. E. Mokhtar et al., “CFD prediction of flow, heat and mass transfer in woven spacer-filled channels for membrane processes,” *International Journal of Heat and Mass Transfer*, vol. 173, article 121246, 2021. doi: [10.1016/j.ijheatmasstransfer.2021.121246](https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2021.121246).
- [32] Y. Y. Liang, G. A. Fimbres Weihs, and D. E. Wiley, “Comparison of oscillating flow and slip velocity mass transfer enhancement in spacer-filled membrane channels: CFD analysis and validation,” *Journal of Membrane Science*, vol. 593, article 117433, 2020. doi: [10.1016/j.memsci.2019.117433](https://doi.org/10.1016/j.memsci.2019.117433).
- [33] V. Geraldes et al., “Designing centrifugal membrane filters with uniform pressure for UF/NF/RO separations,” *Journal of Membrane Science*, 2024, article 122752. doi: [10.1016/j.memsci.2024.122752](https://doi.org/10.1016/j.memsci.2024.122752).
- [34] C. P. Koutsou, A. J. Karabelas, and M. Kostoglou, “Membrane desalination under constant water recovery – The effect of module design parameters on system performance,” *Separation and Purification Technology*, vol. 147, pp. 90–113, 2015. doi: [10.1016/j.seppur.2015.04.012](https://doi.org/10.1016/j.seppur.2015.04.012).
- [35] K. Y. Toh, Y. Y. Liang, W. J. Lau, and G. A. Fimbres Weihs, “A review of CFD modelling and performance metrics for osmotic membrane processes,” *Membranes*, vol. 10, no. 10, article 285, 2020. doi: [10.3390/membranes10100285](https://doi.org/10.3390/membranes10100285).
- [36] C. Kürzl, M. Hartinger, P. Ong, R. Schopf, S. Schiffer, and U. Kulozik, “Increasing performance of spiral-wound modules by improving stability against axial pressure drop and utilising pulsed flow,” *Membranes*,

- vol. 13, no. 9, article 791, 2023. doi: [10.3390/membranes13090791](https://doi.org/10.3390/membranes13090791).
- [37] Z. Han, M. Terashima, B. Liu, and H. Yasui, "CFD investigation of the effect of the feed spacer on hydrodynamics in spiral wound membrane modules," *Mathematical and Computational Applications*, vol. 23, no. 4, article 80, 2018. doi: [10.3390/mca23040080](https://doi.org/10.3390/mca23040080).
- [38] O. Kavianipour, G. D. Ingram, and H. B. Vuthaluru, "Investigation into the effectiveness of feed spacer configurations for reverse osmosis membrane modules using computational fluid dynamics," *Journal of Membrane Science*, vol. 526, pp. 156–171, 2017. doi: [10.1016/j.memsci.2016.12.034](https://doi.org/10.1016/j.memsci.2016.12.034).
- [39] S. Schiffer, and U. Kulozik, "Effect of temperature-dependent bacterial growth during milk protein fractionation by means of 0.1 μm microfiltration on the length of possible production cycle times," *Membranes*, vol. 10, no. 11, article 326, 2020. doi: [10.3390/membranes10110326](https://doi.org/10.3390/membranes10110326).
- [40] J. Chamberland et al., "Influence of feed temperature on biofouling of ultrafiltration membrane during skim milk processing," *International Dairy Journal*, vol. 93, pp. 99–105, 2019. doi: [10.1016/j.idairyj.2019.02.005](https://doi.org/10.1016/j.idairyj.2019.02.005).
- [41] C. Carrascosa, D. Raheem, F. Ramos, A. Saraiva, and A. Raposo, "Microbial biofilms in the food industry – A comprehensive review," *International Journal of Environmental Research and Public Health*, vol. 18, no. 4, article 2014, 2021. doi: [10.3390/ijerph18042014](https://doi.org/10.3390/ijerph18042014).
- [42] T. Y. Qiu, and P. A. Davies, "Concentration polarization model of spiral-wound membrane modules with application to batch-mode RO desalination of brackish water," *Desalination*, vol. 368, pp. 36–47, 2015. doi: [10.1016/j.desal.2014.12.048](https://doi.org/10.1016/j.desal.2014.12.048).
- [43] N. M. Farhat, M. Staal, Sz. S. Bucs, M. C. M. van Loosdrecht, and J. S. Vrouwenvelder, "Spatial heterogeneity of biofouling under different cross-flow velocities in reverse osmosis membrane systems," *Journal of Membrane Science*, vol. 520, pp. 964–971, 2016. doi: [10.1016/j.memsci.2016.08.065](https://doi.org/10.1016/j.memsci.2016.08.065).
- [44] M. Hartinger, S. Schiffer, H.-J. Heidebrecht, J. Dümpler, and U. Kulozik, "Milk protein fractionation by custom-made prototypes of spiral-wound microfiltration membranes operated at extreme crossflow velocities," *Journal of Membrane Science*, vol. 605, article 118110, 2020. doi: [10.1016/j.memsci.2020.118110](https://doi.org/10.1016/j.memsci.2020.118110).
- [45] H. S. Abid, D. J. Johnson, R. Hashaikh, and N. Hilal, "A review of efforts to reduce membrane fouling by control of feed spacer characteristics," *Desalination*, vol. 420, pp. 384–402, 2017. doi: [10.1016/j.desal.2017.07.019](https://doi.org/10.1016/j.desal.2017.07.019).
- [46] Sz. S. Bucs, A. I. Radu, V. Lavric, J. S. Vrouwenvelder, and C. Picioreanu, "Effect of different commercial feed spacers on biofouling of reverse osmosis membrane systems: A numerical study," *Desalination*, vol. 343, pp. 26–37, 2014. doi: [10.1016/j.desal.2013.11.007](https://doi.org/10.1016/j.desal.2013.11.007).
- [47] M. Amokrane, D. Sadaoui, C. P. Koutsou, A. J. Karabelas, and M. Dudeck, "A study of flow field and concentration polarization evolution in membrane channels with two-dimensional spacers during water desalination," *Journal of Membrane Science*, vol. 477, pp. 139–150, 2015. doi: [10.1016/j.memsci.2014.11.029](https://doi.org/10.1016/j.memsci.2014.11.029).
- [48] C. P. Koutsou, S. G. Yiantsios, and A. J. Karabelas, "A numerical and experimental study of mass transfer in spacer-filled channels: Effects of spacer geometrical characteristics and Schmidt number," *Journal of Membrane Science*, vol. 326, no. 1, pp. 234–251, 2009. doi: [10.1016/j.memsci.2008.10.007](https://doi.org/10.1016/j.memsci.2008.10.007).
- [49] C. Completo, V. Semiao, and V. Geraldes, "Efficient CFD-based method for designing cross-flow nanofiltration small devices," *Journal of Membrane Science*, vol. 500, pp. 190–202, 2016. doi: [10.1016/j.memsci.2015.11.012](https://doi.org/10.1016/j.memsci.2015.11.012).
- [50] G. A. Fimbres-Weihs, and D. E. Wiley, "Numerical study of mass transfer in three-dimensional spacer-filled narrow channels with steady flow," *Journal of Membrane Science*, vol. 306, no. 1–2, pp. 228–243, 2007. doi: [10.1016/j.memsci.2007.08.043](https://doi.org/10.1016/j.memsci.2007.08.043).
- [51] M. Shakaib, S. M. F. Hasani, and M. Mahmood, "CFD modeling for flow and mass transfer in spacer-obstructed membrane feed channels," *Journal of Membrane Science*, vol. 326, no. 2, pp. 270–284, 2009. doi: [10.1016/j.memsci.2008.09.052](https://doi.org/10.1016/j.memsci.2008.09.052).
- [52] K. Y. Toh, Y. Y. Liang, W. J. Lau, and G. A. Fimbres Weihs, "The techno-economic case for coupling advanced spacers to high-permeance RO membranes for desalination," *Desalination*, vol. 491, article 114534, 2020. doi: [10.1016/j.desal.2020.114534](https://doi.org/10.1016/j.desal.2020.114534).
- [53] V. Geraldes, and M. D. Afonso, "Generalized mass-transfer correction factor for nanofiltration and reverse osmosis," *AIChE Journal*, vol. 52, no. 10, pp. 3353–3362, 2006. doi: [10.1002/aic.10968](https://doi.org/10.1002/aic.10968).
- [54] Q. Yang et al., "Multiscale analysis of permeable and impermeable wall models for seawater reverse osmosis desalination," *Separations*, vol. 10, no. 2, article 134, 2023. doi: [10.3390/separations10020134](https://doi.org/10.3390/separations10020134).
- [55] W. Wei, X. Zou, X. Ji, R. Zhou, K. Zhao, and Y. Wang, "Analysis of concentration polarisation in full-size spiral wound reverse osmosis membranes using computational fluid dynamics," *Membranes*, vol. 11, no. 5, article 353, 2021. doi: [10.3390/membranes11050353](https://doi.org/10.3390/membranes11050353).
- [56] J. Schwinge, P. R. Neal, D. E. Wiley, and A. G. Fane, "Estimation of foulant deposition across the leaf of a spiral-wound module," *Desalination*, vol. 146, no. 1–3, pp. 203–208, 2002. doi: [10.1016/S0011-9164\(02\)00471-X](https://doi.org/10.1016/S0011-9164(02)00471-X).
- [57] J. Schwinge, D. E. Wiley, and D. F. Fletcher, "A CFD study of unsteady flow in narrow spacer-filled channels for spiral-wound membrane modules,"

- Desalination*, vol. 146, no. 1–3, pp. 195–201, 2002. doi: [10.1016/S0011-9164\(02\)00470-8](https://doi.org/10.1016/S0011-9164(02)00470-8).
- [58] J. Schwinge, D. E. Wiley, and D. F. Fletcher, “Simulation of unsteady flow and vortex shedding for narrow spacer-filled channels,” *Industrial & Engineering Chemistry Research*, vol. 42, no. 20, pp. 4962–4977, 2003. doi: [10.1021/ie030211n](https://doi.org/10.1021/ie030211n).
- [59] Y. Y. Liang, G. A. Fimbres Weihs, and D. F. Fletcher, “CFD study of the effect of unsteady slip velocity waveform on shear stress in membrane systems,” *Chemical Engineering Science*, vol. 192, pp. 16–24, 2018. doi: [10.1016/j.ces.2018.07.009](https://doi.org/10.1016/j.ces.2018.07.009).
- [60] Y. Y. Liang, G. Fimbres Weihs, R. Setiawan, and D. Wiley, “CFD modelling of unsteady electro-osmotic permeate flux enhancement in membrane systems,” *Chemical Engineering Science*, vol. 146, pp. 189–198, 2016. doi: [10.1016/j.ces.2016.02.028](https://doi.org/10.1016/j.ces.2016.02.028).
- [61] Y. Y. Liang, G. A. Fimbres Weihs, and D. E. Wiley, “CFD modelling of electro-osmotic permeate flux enhancement in spacer-filled membrane channels,” *Journal of Membrane Science*, vol. 507, pp. 107–118, 2016. doi: [10.1016/j.memsci.2016.02.012](https://doi.org/10.1016/j.memsci.2016.02.012).
- [62] X. Su, W. Li, A. Palazzolo, and S. Ahmed, “Concentration polarization and permeate flux variation in a vibration enhanced reverse osmosis membrane module,” *Desalination*, vol. 433, pp. 75–88, 2018. doi: [10.1016/j.desal.2018.01.001](https://doi.org/10.1016/j.desal.2018.01.001).
- [63] X. Su, W. Li, A. Palazzolo, and S. Ahmed, “Permeate flux increase by colloidal fouling control in a vibration enhanced reverse osmosis membrane desalination system,” *Desalination*, vol. 453, pp. 22–36, 2019. doi: [10.1016/j.desal.2018.12.003](https://doi.org/10.1016/j.desal.2018.12.003).
- [64] A. A. Alsarayreh, M. A. Al-Obaidi, A. M. Al-Hroub, R. Patel, and I. M. Mujtaba, “Evaluation and minimisation of energy consumption in a medium-scale reverse osmosis brackish water desalination plant,” *Journal of Cleaner Production*, vol. 248, p. 119220, 2020. doi: [10.1016/j.jclepro.2019.119220](https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.119220).
- [65] B. Haddadi, C. Jordan, M. Miltner, and M. Harasek, “Membrane modeling using CFD: Combined evaluation of mass transfer and geometrical influences in 1D and 3D,” *Journal of Membrane Science*, vol. 563, pp. 199–209, 2018. doi: [10.1016/j.memsci.2018.05.040](https://doi.org/10.1016/j.memsci.2018.05.040).
- [66] A. L. Ahmad, and K. K. Lau, “Impact of different spacer filament geometries on 2D unsteady hydrodynamics and concentration polarization in spiral wound membrane channel,” *Journal of Membrane Science*, vol. 286, no. 1–2, pp. 77–92, 2006. doi: [10.1016/j.memsci.2006.09.018](https://doi.org/10.1016/j.memsci.2006.09.018).
- [67] C. P. Koutsou, S. G. Yiantsios, and A. J. Karabelas, “Direct numerical simulation of flow in spacer-filled channels: Effect of spacer geometrical characteristics,” *Journal of Membrane Science*, vol. 291, no. 1–2, pp. 53–69, 2007. doi: [10.1016/j.memsci.2006.12.032](https://doi.org/10.1016/j.memsci.2006.12.032).
- [68] A. Ruiz-García, and I. de la Nuez Pestana, “Feed spacer geometries and permeability coefficients: Effect on the performance in BWRO spiral-wound membrane modules,” *Water*, vol. 11, no. 1, article 152, 2019. doi: [10.3390/w11010152](https://doi.org/10.3390/w11010152).
- [69] M. M. Abdelbaky, and M. M. El-Refae, “A 3D CFD comparative study between torsioned and non-torsioned net-type feed spacer in reverse osmosis,” *SN Applied Sciences*, vol. 1, no. 9, 2019. doi: [10.1007/s42452-019-1098-8](https://doi.org/10.1007/s42452-019-1098-8).
- [70] K. Y. Toh, Y. Y. Liang, W. J. Lau, and G. A. Fimbres Weihs, “3D CFD study on hydrodynamics and mass transfer phenomena for SWM feed spacer with different floating characteristics,” *Chemical Engineering Research and Design*, vol. 159, pp. 36–46, 2020. doi: [10.1016/j.cherd.2020.04.010](https://doi.org/10.1016/j.cherd.2020.04.010).
- [71] P. Saliakellis, C. Koutsou, and A. Karabelas, “The effect of gap reduction on fluid dynamics and mass transfer in membrane narrow channels filled with novel spacers – A detailed computational study,” *Membranes*, vol. 13, no. 1, article 20, 2022. doi: [10.3390/membranes13010020](https://doi.org/10.3390/membranes13010020).
- [72] W. Lin, D. Li, Q. Wang, X.-m. Wang, and X. Huang, “Dynamic evolution of membrane biofouling in feed channels affected by spacer–membrane clearance and the induced hydrodynamic conditions,” *Journal of Membrane Science*, vol. 668, article 121209, 2023. doi: [10.1016/j.memsci.2022.121209](https://doi.org/10.1016/j.memsci.2022.121209).
- [73] A. Saeed, R. Vuthaluru, and H. B. Vuthaluru, “Investigations into the effects of mass transport and flow dynamics of spacer filled membrane modules using CFD,” *Chemical Engineering Research and Design*, vol. 93, pp. 79–99, 2015. doi: [10.1016/j.cherd.2014.07.002](https://doi.org/10.1016/j.cherd.2014.07.002).
- [74] A. I. Radu, M. S. H. van Steen, J. S. Vrouwenvelder, M. C. M. van Loosdrecht, and C. Picioreanu, “Spacer geometry and particle deposition in spiral wound membrane feed channels,” *Water Research*, vol. 64, pp. 160–176, 2014. doi: [10.1016/j.watres.2014.06.040](https://doi.org/10.1016/j.watres.2014.06.040).
- [75] A. H. Haidari, S. G. J. Heijman, W. S. J. Uijttewaal, and W. G. J. van der Meer, “Determining effects of spacer orientations on channel hydraulic conditions using PIV,” *Journal of Water Process Engineering*, vol. 31, article 100820, 2019. doi: [10.1016/j.jwpe.2019.100820](https://doi.org/10.1016/j.jwpe.2019.100820).
- [76] N. I. Mat Nawi et al., “A rotary spacer system for energy-efficient membrane fouling control in oil/water emulsion filtration,” *Membranes*, vol. 12, no. 6, article 554, 2022. doi: [10.3390/membranes12060554](https://doi.org/10.3390/membranes12060554).
- [77] Sz. S. Bucs, N. Farhat, J. C. Kruithof, C. Picioreanu, M. C. M. van Loosdrecht, and J. S. Vrouwenvelder, “Review on strategies for biofouling mitigation in spiral wound membrane systems,” *Desalination*, vol. 434, pp. 189–197, 2018. doi: [10.1016/j.desal.2018.01.023](https://doi.org/10.1016/j.desal.2018.01.023).
- [78] K. Jeong, M. Park, S. Oh, and J. H. Kim, “Impacts of flow channel geometry, hydrodynamic and membrane properties on osmotic backwash of RO membranes – CFD modeling and simulation,” *Desalination*,

- vol. 476, article 114229, 2020. doi: [10.1016/j.desal.2019.114229](https://doi.org/10.1016/j.desal.2019.114229).
- [79] W. Choi et al., “Structural tailoring of sharkskin-mimetic patterned reverse osmosis membranes for optimizing biofouling resistance,” *Journal of Membrane Science*, vol. 595, article 117602, 2020. doi: [10.1016/j.memsci.2019.117602](https://doi.org/10.1016/j.memsci.2019.117602).
- [80] A. Uppu, A. Chaudhuri, and S. P. Das, “Numerical modeling of particulate fouling and cake-enhanced concentration polarization in rotodynamic reverse osmosis filtration systems,” *Desalination*, vol. 468, article 114053, 2019. doi: [10.1016/j.desal.2019.06.019](https://doi.org/10.1016/j.desal.2019.06.019).
- [81] G. A. Fimbres Weihs, and D. E. Wiley, “CFD analysis of tracer response technique under cake-enhanced osmotic pressure,” *Journal of Membrane Science*, vol. 449, pp. 38–49, 2014. doi: [10.1016/j.memsci.2013.08.015](https://doi.org/10.1016/j.memsci.2013.08.015).
- [82] A. I. Radu, J. S. Vrouwenvelder, M. C. M. van Loosdrecht, and C. Picioreanu, “Modeling the effect of biofilm formation on reverse osmosis performance: Flux, feed channel pressure drop and solute passage,” *Journal of Membrane Science*, vol. 365, no. 1–2, pp. 1–15, 2010. doi: [10.1016/j.memsci.2010.07.036](https://doi.org/10.1016/j.memsci.2010.07.036).
- [83] J. S. Vrouwenvelder, C. Picioreanu, J. C. Kruithof, and M. C. M. van Loosdrecht, “Biofouling in spiral wound membrane systems: Three-dimensional CFD model based evaluation of experimental data,” *Journal of Membrane Science*, vol. 346, no. 1, pp. 71–85, 2010. doi: [10.1016/j.memsci.2009.09.025](https://doi.org/10.1016/j.memsci.2009.09.025).
- [84] A. I. Radu, J. S. Vrouwenvelder, M. C. M. van Loosdrecht, and C. Picioreanu, “Effect of flow velocity, substrate concentration and hydraulic cleaning on biofouling of reverse osmosis feed channels,” *Chemical Engineering Journal*, vol. 188, pp. 30–39, 2012. doi: [10.1016/j.cej.2012.01.133](https://doi.org/10.1016/j.cej.2012.01.133).
- [85] L. Fortunato, Sz. Bucs, R. V. Linares, C. Cali, J. S. Vrouwenvelder, and T.-O. Leiknes, “Spatially-resolved in-situ quantification of biofouling using optical coherence tomography (OCT) and 3D image analysis in a spacer filled channel,” *Journal of Membrane Science*, vol. 524, pp. 673–681, 2017. doi: [10.1016/j.memsci.2016.11.052](https://doi.org/10.1016/j.memsci.2016.11.052).
- [86] L. Fortunato, and T. Leiknes, “In-situ biofouling assessment in spacer filled channels using optical coherence tomography (OCT): 3D biofilm thickness mapping,” *Bioresource Technology*, vol. 229, pp. 231–235, 2017. doi: [10.1016/j.biortech.2017.01.021](https://doi.org/10.1016/j.biortech.2017.01.021).
- [87] C. Y. Tang, T. H. Chong, and A. G. Fane, “Colloidal interactions and fouling of NF and RO membranes: A review,” *Advances in Colloid and Interface Science*, vol. 164, no. 1–2, pp. 126–143, 2011. doi: [10.1016/j.cis.2010.10.007](https://doi.org/10.1016/j.cis.2010.10.007).
- [88] A. I. Radu, L. Bergwerff, M. C. M. van Loosdrecht, and C. Picioreanu, “Combined biofouling and scaling in membrane feed channels: A new modeling approach,” *Biofouling*, vol. 31, no. 1, pp. 83–100, 2015. doi: [10.1080/08927014.2014.996750](https://doi.org/10.1080/08927014.2014.996750).
- [89] W. Lin et al., “The critical role of feed spacer channel porosity in membrane biofouling: Insights and implications,” *Journal of Membrane Science*, vol. 649, article 120395, 2022. doi: [10.1016/j.memsci.2022.120395](https://doi.org/10.1016/j.memsci.2022.120395).
- [90] N. M. Munir et al., “Advancement in membrane spacer technology: Emerging trend and modification of three-dimensional printed membrane spacers for fouling mitigation,” *Frontiers of Chemical Science and Engineering*, vol. 19, no. 11, 2025. doi: [10.1007/s11705-025-2606-6](https://doi.org/10.1007/s11705-025-2606-6).
- [91] K. T. Huisman, N. Franco-Clavijo, J. S. Vrouwenvelder, and B. Blankert, “Improved quantitative evaluation of the fouling potential in spacer-filled membrane filtration channels through a biofouling index based on the relative pressure drop,” *Journal of Membrane Science*, vol. 671, article 121400, 2023. doi: [10.1016/j.memsci.2023.121400](https://doi.org/10.1016/j.memsci.2023.121400).
- [92] G.-D. Kang, and Y.-M. Cao, “Development of anti-fouling reverse osmosis membranes for water treatment: A review,” *Water Research*, vol. 46, no. 3, pp. 584–600, 2012. doi: [10.1016/j.watres.2011.11.041](https://doi.org/10.1016/j.watres.2011.11.041).
- [93] M. Zhang, B.-Q. Liao, X. Zhou, Y. He, H. Hong, H. Lin, and J. Chen, “Effects of hydrophilicity/hydrophobicity of membrane on membrane fouling in a submerged membrane bioreactor,” *Bioresource Technology*, vol. 175, pp. 59–67, 2015. doi: [10.1016/j.biortech.2014.10.058](https://doi.org/10.1016/j.biortech.2014.10.058).
- [94] A. Saeed, R. Vuthaluru, and H. B. Vuthaluru, “Impact of feed spacer filament spacing on mass transport and fouling propensities of RO membrane surfaces,” *Chemical Engineering Communications*, vol. 202, no. 5, pp. 634–646, 2014. doi: [10.1080/00986445.2013.860525](https://doi.org/10.1080/00986445.2013.860525).
- [95] J. C. Tiller, C.-J. Liao, K. Lewis, and A. M. Klibanov, “Designing surfaces that kill bacteria on contact,” *Proceedings of the National Academy of Sciences*, vol. 98, no. 11, pp. 5981–5985, 2001. doi: [10.1073/pnas.111143098](https://doi.org/10.1073/pnas.111143098).
- [96] Y. Park, Y. Choi, J. Choi, J. Ju, B. Kim, and S. Lee, “Effect of vibration on fouling propensity of hollow fiber membranes in microfiltration and membrane distillation,” *Desalination and Water Treatment*, vol. 192, pp. 11–18, 2020. doi: [10.5004/dwt.2020.25151](https://doi.org/10.5004/dwt.2020.25151).
- [97] S. Vinardell et al., “Impact of permeate flux and gas sparging rate on membrane performance and process economics of granular anaerobic membrane bioreactors,” *Science of the Total Environment*, vol. 825, article 153907, 2022. doi: [10.1016/j.scitotenv.2022.153907](https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.153907).
- [98] H. Zhu, Z. Chen, L. Qin, L. Zhang, and J. Zhou, “Simulated preparation and hydration property of a new-generation zwitterionic modified PVDF membrane,” *Journal of Membrane Science*, vol. 652, article 120498, 2022. doi: [10.1016/j.memsci.2022.120498](https://doi.org/10.1016/j.memsci.2022.120498).
- [99] M. Jabłońska, M. Menzel, U. Hirsch, and A. Heilmann, “Assessment of anti-bacterial adhesion and anti-biofouling potential of plasma-mediated

- poly(sulfobetaine methacrylate) coatings of feed spacer,” *Desalination*, vol. 493, article 114664, 2020. doi: [10.1016/j.desal.2020.114664](https://doi.org/10.1016/j.desal.2020.114664).
- [100] C. Thamaraiselvan, Y. Carmiel, G. Eliad, C. N. Sukenik, R. Semiat, and C. G. Dosoretz, “Modification of a polypropylene feed spacer with metal oxide-thin film by chemical bath deposition for biofouling control in membrane filtration,” *Journal of Membrane Science*, vol. 573, pp. 511–519, 2019. doi: [10.1016/j.memsci.2018.12.033](https://doi.org/10.1016/j.memsci.2018.12.033).
- [101] A. Ronen, S. Lerman, G. Z. Ramon, and C. G. Dosoretz, “Experimental characterization and numerical simulation of the anti-biofouling activity of nanosilver-modified feed spacers in membrane filtration,” *Journal of Membrane Science*, vol. 475, pp. 320–329, 2015. doi: [10.1016/j.memsci.2014.10.042](https://doi.org/10.1016/j.memsci.2014.10.042).
- [102] B. Mi, “Graphene oxide membranes for ionic and molecular sieving,” *Science*, vol. 343, no. 6172, pp. 740–742, 2014. doi: [10.1126/science.1250247](https://doi.org/10.1126/science.1250247).
- [103] S. Waqas, M. R. Bilad, Z. B. Man, C. Klaysom, J. Jaafar, and A. L. Khan, “An integrated rotating biological contactor and membrane separation process for domestic wastewater treatment,” *Alexandria Engineering Journal*, vol. 59, no. 6, pp. 4257–4265, 2020. doi: [10.1016/j.aej.2020.07.029](https://doi.org/10.1016/j.aej.2020.07.029).
- [104] Y. Z. Tan et al., “Enhancing fouling mitigation of submerged flat-sheet membranes by vibrating 3D-spacers,” *Separation and Purification Technology*, vol. 215, pp. 70–80, 2019. doi: [10.1016/j.seppur.2018.12.085](https://doi.org/10.1016/j.seppur.2018.12.085).
- [105] J. Ho, S. Smith, G. D. Kim, and H. K. Roh, “Performance evaluation of a novel reciprocation membrane bioreactor (rMBR) for enhanced nutrient removal in wastewater treatment: A comparative study,” *Water Science and Technology*, vol. 72, no. 6, pp. 917–927, 2015. doi: [10.2166/wst.2015.267](https://doi.org/10.2166/wst.2015.267).
- [106] B. Wu et al., “Spacer vibration for fouling control of submerged flat sheet membranes,” *Separation and Purification Technology*, vol. 210, pp. 719–728, 2019. doi: [10.1016/j.seppur.2018.08.062](https://doi.org/10.1016/j.seppur.2018.08.062).

Стаття надійшла 24.01.2026

Стаття прийнята 18.02.2026

Стаття опублікована 26.03.2026

Цитуйте цю статтю як: Ясеньчук В. В., Гулієнко С. В. Новітні досягнення в дослідженні гідродинаміки мембранних каналів: критичний огляд. *Вісник Приазовського державного технічного університету. Серія: Технічні науки*. 2026. Вип. 53, том 1. С. 188–205. DOI: <https://doi.org/10.31498/2225-6733.53.1.2026.359808>.