



УДК 579.69:628.353
DOI <https://doi.org/10.32782/naturaljournal.14.2025.33>

НОСІЇ ДЛЯ ІММОБІЛІЗАЦІЇ МІКРОБІОТИ В ТЕХНОЛОГІЯХ ОЧИЩЕННЯ СТІЧНИХ ВОД

О. Ф. Рильський¹, Ю. Ю. Петруша², К. О. Домбровський³

Робота присвячена узагальненню наукових даних щодо різноманіття носіїв для іммобілізації мікроорганізмів, матеріалів для їх виготовлення, конструкцій і архітектури, і впливу цих характеристик на ефективність очищення води. Розглянуто досягнення закордонних та вітчизняних учених у цій галузі. Більшість носіїв, що використовуються сьогодні, має або недостатню поверхню для іммобілізації мікроорганізмів або складність у монтажі чи експлуатації, або низьку біологічну стійкість. Синтетичні носії мікроорганізмів отримують все більше визнання та широке застосування в технологіях біологічного очищення стічних вод. Матеріал носія для іммобілізації мікроорганізмів повинен володіти певними характеристиками: нерозчинністю у воді; значною проникністю щодо повітря, води, ферментів, субстратів і продуктів реакції; високою хімічною і біологічною стійкістю; високою питомою поверхнею для іммобілізації біомаси; значною сорбційною ємністю стосовно мікроорганізмів; технологічністю у виготовленні й монтажі; можливістю регулювання параметрів процесу шляхом зміни структури елементів носія; низькою матеріаломісткістю та економією завдяки використанню вторинних матеріалів. З'ясовано, що шорсткі носії можуть забезпечити кращі можливості для формування біоплівки, ніж гладкі. Бажано також, щоб носій мав позитивний поверхневий заряд, оскільки поверхневий заряд клітин бактерій є негативним. Серед відомих носіїв вітчизняний капроновий волокнистий носій «ВІЯ» має низьку беззаперечних переваг і знайшов широке використання в очищенні стічних вод широкого спектра промислових підприємств. Упровадження в сучасні біотехнології очищення води систем для іммобілізації бактеріальної біоти й інших гідробіонтів надає можливість значно покращити

¹ доктор біологічних наук, професор,
завідувач кафедри загальної та прикладної екології і зоології
(Запорізький національний університет, м. Запоріжжя)
e-mail: rylsky@ukr.net
ORCID: 0000-0002-9631-1828

² кандидат біологічних наук, доцент,
доцент кафедри «Композиційні матеріали, хімія та технології»
(Національний університет «Запорізька політехніка», м. Запоріжжя)
e-mail: yulia.znu@ukr.net
ORCID: 0000-0003-3041-2877

³ кандидат біологічних наук, доцент,
доцент кафедри загальної та прикладної екології і зоології
(Запорізький національний університет, м. Запоріжжя)
e-mail: dombrov1717@ukr.net
ORCID: 0000-0001-6965-6989

та збільшити швидкість очищення стічних вод в очисних спорудах, а також значно прискорити процеси самоочищення води в малих річках, позитивно вплинути на екологію гідробіонтів водних екосистем.

Ключові слова: іммобілізація, мікроорганізми, носії, стічні води.

CARRIERS FOR MICROBIOTA IMMOBILIZATION IN WASTEWATER TREATMENT TECHNOLOGIES

O. F. Rylskyi, Yu. Yu. Petrusha, K. O. Dombrovskiy

This study provides a comprehensive synthesis of available data on the diversity of carriers for microorganism immobilization, the materials and design architectures used in their production, and analyses how these characteristics affect the efficiency of water purification. This work considers the contributions of researchers from both domestic and international contexts in this field. Most carriers used today either have insufficient surface area for microorganism immobilization, are complex to install or operate, or have low biological stability. Synthetic microorganism carriers are gaining increasing recognition and widespread use in biological wastewater treatment technologies. The carrier material for microorganism immobilization must possess certain characteristics: insolubility in water; significant permeability to air, water, enzymes, substrates, and reaction products; high chemical and biological stability; high specific surface area for biomass immobilization; considerable sorption capacity for microorganisms; manufacturability in production and installation; the ability to regulate process parameters by changing the structure of carrier elements; low material consumption and cost-effectiveness through the use of secondary materials. It has been found that rough carriers can provide better opportunities for biofilm formation than smooth ones. It is also desirable for the carrier to have a positive surface charge, as the surface charge of bacterial cells is negative. Among known carriers, the domestic capron fiber carrier "VIYA" has a variety of undeniable advantages and has found wide application in the treatment of wastewater from a wide range of industrial enterprises. The introduction of systems for the immobilization of bacterial biota and other hydrobionts into modern water purification biotechnologies makes it possible to significantly improve and increase the rate of wastewater treatment at treatment facilities, as well as to significantly accelerate the self-purification processes of water in small rivers, and positively affect the ecology of aquatic ecosystem hydrobionts.

Key words: immobilization, microorganisms, carriers, wastewater.

Вступ

Технології біологічного очищення стічних вод є одними з перспективних і сучасних методів відновлення якості води до її питного стану. Як показує практика їх застосування, однією з основних перешкод для їх широкого використання є низька концентрація біомаси у споруді та значні витрати на рециркуляцію активного мулу (Iurchenko & Tkachenko, 2024). Цю проблему дозволяє вирішити використання різноманітних носіїв для іммобілізації мікроорганізмів завдяки їхній природній здатності закріплюватися на твердій поверхні носія (Жукова, 2018; Цитлішвілі, 2021).

Відомими українськими вченими П.І. Гвоздяком і А.І. Глобою теоретично обґрунтовано ефективність використання в біотехнологіях очищення промислових і господарсько-фекальних стічних вод іммобілізованих мікроорганізмів, що підтверджено результатами досліджень і роботою очисних споруд, реконструйованих або заново побудованих за розробленими біотехнологіями (Гвоздяк, 2019).

Носії класифікуються на природні (органічні, неорганічні) та синтетичні. Природні органічні носії мають багато функціональних груп. До цього класу носіїв відносять: альгінат, к-карагінан, хітозан, тирсу, солому, деревне вугілля, рослинні волокна, кукурудзяні качани, жом, рис, лушпиння насіння соняшнику, діатоміт і міцелій (Dzionek et al., 2016; Armanu & Volf, 2022). Це гідрофільні, біорозкладні, біосумісні й недорогі матеріали, оскільки переважно являють собою відходи харчової промисловості. Однак можливість їх застосування у процесах біоремедіації обмежена через низьку стійкість до біологічного розкладання, чутливість до органічних розчинників і стабільність у вузькому діапазоні рН. Синтетичні органічні носії також мають численні функціональні групи. До цього класу відносять поліпропілен, полівініл хлорид, полістирол, пінополіуретан, поліакрилонітрит і полівініловий спирт. Їх перевагою є можливість регулювання їхньої структури на макромолекулярному рівні – вибір належної молекулярної маси, просто-

рової структури та способу й порядку розташування кожної активної функціональної групи в ланцюжку. Окрім того, під час синтезу можна контролювати пористість, діаметр пор, полярність і гідрофобність носія. Синтетичні носії можуть мати різні форми (трубки, мембрани, покриття, сфери, овали), вони легкодоступні та відносно недорогі. Неорганічні носії (природні та синтетичні) мають високу хімічну, фізичну та біологічну стійкість. Представники цієї групи: магнетит, вулканічні породи, вермикуліт, пористе скло, матеріали на основі кремнезему, кераміка та наночастинки. Істотний недолік цих носіїв – наявність невеликої кількості функціональних груп, що перешкоджає достатньому зчепленню. Із цієї причини їх використовують у формуванні гібридних носіїв, поєднують натуральні полімери та синтетичні наночастинки (Dzionic et al., 2016). Окремо виділяють композитні носії, що являють собою комбінацію неорганічних і органічних матеріалів таким чином, що характеристики двох типів матеріалів доповнюють одна одну (Zhang et al., 2016).

Натепер уже розроблено й використовуються низка носіїв для іммобілізації мікроорганізмів у системах очищення стічних вод. Але більшість з них має або недостатню поверхню для іммобілізації мікроорганізмів або складність у монтажі чи експлуатації, або низьку біологічну стійкість. Матеріал носія для іммобілізації мікроорганізмів повинен володіти визначеними характеристиками: високою питомою поверхнею для іммобілізації біомаси; значною сорбційною ємністю стосовно мікроорганізмів; нерозчинністю у воді; значною проникністю щодо повітря, води, ферментів, субстратів і продуктів реакції; високою хімічною і біологічною стійкістю; технологічністю у виготовленні й монтажі; можливістю регулювання параметрів процесу шляхом зміни структури елементів носія; низькою матеріаломісткістю та економією завдяки використанню вторинних матеріалів. Цим характеристикам, зокрема, відповідають синтетичні носії (поліетилєнові, поліамідні, полієфірні тощо) (Жукова, 2018). Для іммобілізації мікрофлори зазвичай використовують інертні носії, якими заповнюють об'єм біореактора, утворюють таким чином високорозвинену поверхню для прикріплення і утримування біомаси мікроорганізмів. Варто зазначити, що відомості про використання носіїв іммобілізованих мікроорганізмів і вплив на процеси біологічного очищення стічних вод в анае-

робних і аноксидних зонах не досить висвітлено в літературі (Саблій, 2013).

Тому метою нашої роботи було проведення узагальнення щодо різноманіття носіїв для іммобілізації мікроорганізмів, матеріалів для їх виготовлення, конструкцій і архітектури, і впливу цих характеристик на ефективність очищення води. Відповідно до поставленої мети було визначено такі завдання:

- проаналізувати спектр матеріалів, що використовуються в сучасних технологіях як носії мікробіоти для очищення води;
- виявити найбільш поширені носії та їх модифікації, що застосовуються для очищення стічних і природних вод;
- з'ясувати вплив особливостей конструкцій і архітектури носіїв на ефективність очищення води;
- встановити найбільш перспективні носії в сучасних і майбутніх технологіях.

Матеріал і методи

Під час проведення дослідження було використано загальноприйняті теоретичні методи, зокрема: аналіз, синтез, порівняння, систематизацію та узагальнення даних наукових джерел, що забезпечило можливість інтеграції результатів у єдиний комплекс. Як основна інформаційна база дослідження використовувалися монографії, актуальні наукові дослідження, статті з наукових фахових видань, патенти тощо.

У дослідженні також реалізовано комплексний міждисциплінарний підхід, що інтегрує знання з усіх природничих галузей для всебічного аналізу даних, дозволяє виокремити найбільш перспективний, екологічно безпечний і економічно доцільний тип носія для іммобілізації мікробіоти. Отримані результати спрямовані на адаптацію наявних розробок до практичного використання, що є особливо актуальним для територій південної та південно-східної України, екосистемами яких найбільш постраждали від воєнних дій.

Результати та їх обговорення

У науковій літературі представлено велике розмаїття носіїв для іммобілізації мікробіоти у вигляді пластин, просторових решіток, сіток з комітками у формі квадрата, прямокутника, кола, овала, три-, шести- й восьмикутника, йоржів, циліндричних, кубічних і гвинтових полімерних елементів, волокон, тканин із природних і штучних матеріалів, гранул цеолітів (клиноптілоліт, морденіт, хабазит, філліпсит), вулканічних шлаків, пінополіуретану, полі-

мерних волокон, ниток, тканин і нетканих матеріалів з капрону («ВІЯ»), поліетилену, лавсану, поліпропілену, поліамідних волокон, скловолокна, кубиків зі спіненого поліефіру тощо (Саблій, 2013). З безперервним розвитком технологій були розроблені нові носії для іммобілізації, як-от композитні носії, наноматеріали, металоорганічні каркаси й біовугільні матеріали, щоб підвищити навантаження, стабільність і активність мікроорганізмів (Нон et al., 2024). У біореакторах роторного типу носії являють собою встановлені на валу у великій кількості диски з пористою поверхнею, на якій фіксується мікробіота. Вал ротора розташований над поверхнею стічної води в реакторі, під час обертання дисків їхня поверхня аерується. Чи не найважливішим показником носія є питома поверхня для іммобілізації мікроорганізмів, адже цим показником визначається кількість активної іммобілізованої біомаси. Чим він більший, тим інтенсивніше йтимуть процеси вилучення з води забруднювальних речовин, їх розкладання до утворення мінеральних речовин і газів і, як результат, – очищення води (Саблій, 2013).

Для отримання іммобілізованих мікробіоценозів науковцями (Цитлішвілі, 2021) пропонуються диски, виготовлені з полікарбонату, і конструкції з фільтруючого мату в металевих дірчастих кошиках, які занурюють у мулову рідину аеротенка-витіснювача міських очисних споруд і залишають на 6–8 тижнів. Конструкцію з полікарбонату встановлюють на початку аеротенка-витіснювача, а конструкцію з фільтруючих матів – у кінці аеротенків. Таке просторове розміщення носіїв для іммобілізації потрібно для формування специфічних біоценозів. На вході до аеротенка неочищена стічна вода містить велику концентрацію органічних речовин, які є поживним субстратом для сапрофітних гетеротрофних мікроорганізмів (політрофів). Відповідно, на полікарбонатних дисках відбудеться формування біоценозу деструкторів саме органічних сполук. Конструкцію з фільтруючих матів розміщують у кінці аеротенка, де вже очищена вода містить значно менше органічних речовин, але з'являються сполуки мінерального азоту. Це середовище сприяє формуванню біоценозу оліготрофних і хемолітоавтотрофних мікроорганізмів, які окиснюють сполуки азоту в аеробних і мікроаерофільних умовах за мінімальної концентрації органічних сполук, або ж за їх відсутності. Для ефектив-

ного формування біоплівки з анаеробних і аноксидних бактерій доцільно застосовувати фільтруючий мат з поліетилену високого тиску, який завдяки своїй структурі володіє великою поверхнею для закріплення хемоавтотрофної мікрофлори (Цитлішвілі, 2021).

Відомо, що полімерні нановолокнисті носії мають багато переваг, зокрема, велику активну питому поверхню, вищу стійкість утвореної біоплівки до зовнішнього токсичного впливу, значну толерантність до фізико-хімічних впливів параметрів середовища та високу швидкість колонізації носія (Kriklavova & Lederer, 2010). Реактор із рухомим шаром біоплівки (MBBR) є різновидом системи очищення з активним мулом і має низку переваг перед іншими методами. Ці переваги включають високу концентрацію біомаси, високу ефективність очищення, відсутність засмічення носія, використання всього об'єму резервуара для зростання біомаси, відсутність потреби в переробці осаду, менші капітальні й експлуатаційні витрати, а також меншу площу. У MBBR для формування мікробної плівки використовуються різні частинки-носії. Ці частинки-носії можуть бути природними матеріалами, як-от пісок, камінь, скло або частинки металевої сітки. Останніми роками також успішно застосовуються синтетичні полімерні матеріали, як-от поліуретан, поліетилен і полівініловий спирт. Нановолокна останнім часом також широко використовуються в багатьох галузях, зокрема й у мікробіології. Однією з відмітних властивостей нановолокон, які можуть покращити поведінку клітин, є адгезивність (покращена порівняно з іншим матеріалом). Для очищення стічних вод бажано використовувати матеріал, який важко псується і є простим у використанні. Поєднання такого носія, мікробної біоплівки та регульованих параметрів навколишнього середовища (температура, швидкість потоку стічних вод) має значний вплив на видалення забруднювальних речовин (Kriklavova & Lederer, 2010). Комерційні носії фірми “AnoxKaldnes” типу K3 (Швеція) виготовлені з поліетилену з питомою поверхнею біоплівки 500 м²/м³ та використовуються в технології MBBR (рис. 1).

Технологія нановолоконних носіїв була розроблена в Технічному університеті Ліберця (Чехія). Розробка наноносіїв триває вже декілька років і дослідження продовжуються (Kriklavova & Lederer, 2010). Носії з нановолокна складаються із трьох частин.

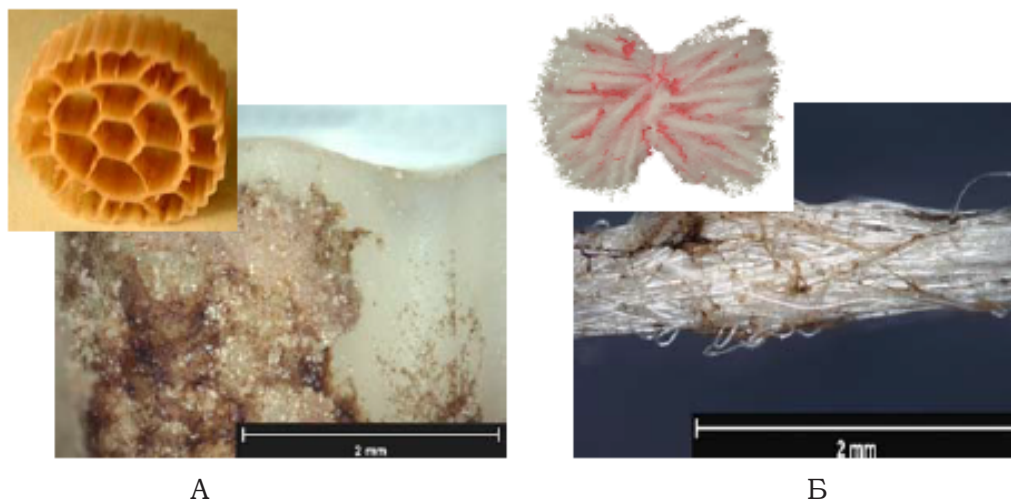


Рис. 1: А – носій фірми “AnoxKaldnes” К3 та фрагмент біоплівки на ньому; Б – носій з нановолокон і фрагмент біоплівки на ньому (Kriklavova & Lederer, 2010)

Основною несучою ниткою є поліетилен, покриття складається з поліуретанових нановолокон (метод електропрядіння) і все двічі обмотується нитками поліетилену, що забезпечує менший розпад нановолокон. Для нановолокна питома поверхня біоплівки становить понад 1 000 м²/м³. Діаметр обох носіїв (К3 та з нановолокна) становить 25 мм. Дослідження були присвячені визначенню мінімальної кількості наношарового наповнення волокном. Занадто малий шар не буде підтримувати ріст мікробіоти, занадто великий шар – буде дорогим для виготовлення. Було виготовлено чотири типи носіїв: без шару нановолокна, з мінімальним, середнім і товстим шаром. Найкращою комбінацією, з погляду швидкості колонізації мікроорганізмами, виявилася нанонитка з позначкою «Шар нановолокон 2». Значною перевагою технології з нановолокнами є можливе зростання бактеріальної біоплівки не тільки на поверхні волокна, але й усередині волокна, де бактерії будуть більш захищеними від токсичної дії навколишнього середовища, а також забезпеченими субстратом і киснем. На наношаровому носії біоплівка наростає в кілька разів швидше, ніж на поліетиленовому носії (AnoxKaldnes, К3), що має велике значення для обробки системи та для регенерації після можливих надзвичайних подій (Kriklavova & Lederer, 2010).

На основі найважливіших параметрів науковцями (Svobodová & Lederer, 2011) було розроблено новий тип носія з використанням нановолокнистих матеріалів як носія біомаси. Основою є шар нановолокна, отриманий методом електропрядіння, який наноситься за допомогою технології

NANOSPIDER. Нова технологія (хаотично переплетені волокна) є морфологічно дуже примітною, оскільки просторові вигини отриманих волокон збільшують поверхню, яка може сягати 1 000 м²/г. Великою перевагою цієї технології є можливість комбінувати різні полімери та таким чином встановлювати щільність носія (від 900 кг/м³ до 1 200 кг/м³) залежно від вимог конкретного застосування.

Отриману пряжу можна обробляти за допомогою текстильної технології у вигляді котушок типу «бобл» або як поверхневу структуру. Перша форма – це тип носія, який називається «нанобобл», де носій «тече» разом зі стічними водами. Структура повністю довільна, але бажано сферичної форми, що мінімізує витрати, насамперед на змішування. Друга форма (рис. 2) фіксується в резервуарі, і стічна вода рухається через носій, що має вигляд фіксованих трикотажних полотен. Для взаємно переплетених ниток розроблена технологія опорних рам, які можна встановити в аеротенк як змінний модуль. До конструкції входить сито з високою варіабельністю сітки, яке можна регулювати залежно від процесу очищення або властивостей стічних вод, або використовуваної мікробної популяції (наприклад, залежно від швидкості росту мікроорганізмів) (Svobodová & Lederer, 2011).

Кінцевий продукт (нановолокниста пряжа) складається із трьох частин. Базовим волокном є поліпропілен Prolenvir CE (660 дтекс, повітряно-формований), покриття виготовлене з поліуретанових нановолокон Larithane 1083 (30–100 дтекс, електропрядіння, діаметр нановолокон становить



Рис. 2. Технологія знімних опорних рам і деталь суцільної нановолокнистої тканини (Svobodová & Lederer, 2011)

приблизно 260 нм), усе подвійно обгорнуто захисним поліетиленовим волокном (167 дтекс, захищає від тертя під час обробки та під час подальшого нанесення від розпаду нановолокон). Контур поверхневих утворень виготовлений з поліпропіленових волокон (200 дтекс). Питома поверхня отриманого носія становить щонайменше $800 \text{ м}^2/\text{м}^3$ (Svobodová & Lederer, 2011).

Створені нановолокна (Svobodová & Lederer, 2011) були апробовані в умовах, які можуть виникнути на очисних спорудах на початковій стадії очищення, до колонізації бактеріальних популяцій. Результати експерименту свідчать про 100%-ву стабільність шарів нановолокна протягом 1-го тижня; протягом 2-го тижня структура волокон вже пошкоджується. Нановолокна агрегуються одне з одним, тим самим зменшують питому площу поверхні. Незначна кількість волокон, переважно тих, які не були добре закріплені під час виробництва, потрапляє в навколишнє середовище. Методологія визначення розпаду наношарів є критично важливою, якщо стічні води можуть потрапляти безпосередньо у природні водойми, тому цей підхід потребує додаткового вивчення.

З'ясовано, що цей нановолокнистий носій (Svobodová & Lederer, 2011) можна використовувати декілька разів, але за визначених умов. Промивання біомаси з поверхні водою не є ефективним на 100%, але економічним і достатнім для використання на очисних спорудах. Використання CrSO_4 є ефективним, але складним на практиці; окрім того, його використання руйнує наношари, таким чином зменшує питому площу поверхні носія. Наведені нижче зображення (рис. 3) демонструють, як біоплівка зростає на нановолокнистому носії. Нановолокна утворюють скелет біоплівки й утримують її

разом, але водночас дозволяють поживним речовинам і кисню проникати до центру біоплівки.

За допомогою 3D-друку науковцями було створено носії з поліаміду та нейлонового порошку (PA 2200) (рис. 4). Цей матеріал був обраний через його високу міцність і жорсткість, високу роздільну здатність деталей і біосумісність (Ovelheiro, 2020).

Після друку всіх пластин також було зроблено спеціальні стійки, щоб пластини могли підтримуватися у вертикальному положенні. Результати досліджень поставили під сумнів ідею про те, що максимізація площі поверхні є єдиним способом створення більш ефективних біоплівки. Було з'ясовано, що архітектура носія також має вплив на ефективність біоплівки (Ovelheiro, 2020).

Є роботи (Andersson, 2009), у яких досліджено здатність двох денітрифікуючих мікроорганізмів *Comamonas denitrificans* та *Brachymonas denitrificans* утворювати біоплівку на 20 різних дешевих носіях. Утворення біоплівки опосередковано вимірювали шляхом моніторингу швидкості денітрифікації носіїв. Два експериментальні мікроорганізми незалежно один від одного змогли колонізувати 10 досліджуваних матеріалів у різному ступені. Гумові та вапнякові матеріали не сприяли утворенню біоплівки, тоді як інші природні продукти, як-от деревина, лавовий камінь (пемза) і бавовна, а також оброблені матеріали, як-от керамзит (LECA), скловолокну й синтетичні органічні волокна, підтримували ріст біоплівки. Оцінювання пластикових матеріалів показало різні результати, що пов'язано з особливостями структури поверхні. Такі матеріали, як пемза, LECA, деревна стружка та комерційний пластиковий носій Kaldnes (тип K1), було використано в розширеному



Рис. 3. Біоплівка на фіксованому носії (лабораторний експеримент), деталь біоплівки у вологому і сухому стані (Svobodová & Lederer, 2011)

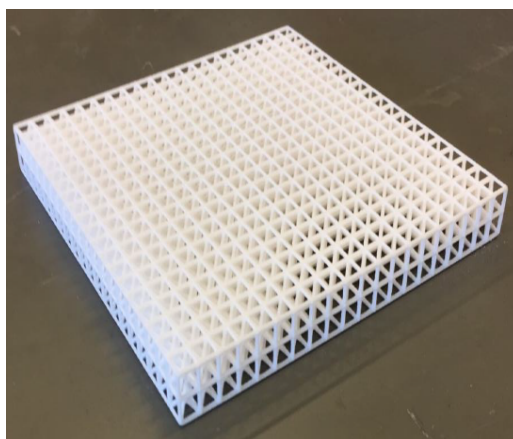


Рис. 4. Приклад 3D-друкованої пластини (Ovelheiro, 2020)

експерименті (5 тижнів), щоб спостерігати проліферацію біоплівки. *C. denitrificans* колонізував матеріали відносно швидко, і кількість біоплівки, прикріпленої до пемзи, LECA та деревини, показала тенденцію до збільшення із часом, тоді як *B. denitrificans* знадобилося більше часу, щоб колонізувати ці матеріали, а потім підтримувати постійну кількість біоплівки. Утворення біоплівки на носіях фірми “Kaldnes” K1 показало значні коливання від одного вимірювання до іншого для обох досліджуваних штамів. Це може бути наслідком нерівномірної колонізації носіїв, спричиненої комбінацією гладкої поверхні (що сповільнює початкове прилипання) та великої захищеної площі поверхні (що полегшує зростання біоплівки) (Andersson, 2009).

Було досліджено (Al-Amshawee et al., 2020a) широкий спектр штучних твердих речовин (поліуретан, поліпропілен, поліетилен) і природних твердих матеріалів (частини рослин і каміння) для колонізації мікробіоти для збільшення утримання твердих речовин і зменшення необхідної

площі простору. У літературі (Al-Amshawee et al., 2020a) зазначається, що бажано, щоб носій мав позитивний поверхневий заряд, оскільки поверхневий заряд клітин бактерій є негативним. Дослідження проводилися, зокрема, на висушених шматочках стебел кактусів *Opuntia imbricata*, смужках губки з полівінілхлориду, натуральному рисовому лушпинні, шамоті, геотекстилі з кокосового волокна, бамбуковому вугіллі, персикових кісточках та поліуретанових сферах. Поліуретанові носії забезпечують найкраще видалення люмінофору й азоту, тоді як поліетилен сприяє найшвидшому зниженню показника ХСК. Досліджувалося також зростання біоплівки на цеоліті (Biolite™ і Perl™) у міських стічних водах з погляду ефективності видалення поживних речовин і активності ферменту дегідрогенази. Perl™ і Biolite™ – це промислові носії, виготовлені зі скляних відходів і кераміки. Протягом перших 45 днів біоплівки на Perl™ були дуже ефективними щодо видалення органічних речовин, тоді як на Biolite™ була вища активність дегідроге-

нази. Автори відзначили, що штучні носії є більш перспективними, ніж природний цеоліт (Al-Amshawee et al., 2020a).

Також було використано носії з боросилікатного скла та поліетилену для формування біоплівки *Pseudomonas sp.*, штам S9, що містить рибулозо-1,5-бісфосфаткарбоксилазу (Al-Amshawee et al., 2020a). Помічено, що коли носії покриваються білком, то більше клітин має тенденцію прикріплюватися, і зростання біоплівки прискорюється. Ученими було досліджено цеоліт, губку та керамзит як носії біоплівки для очищення побутових стічних вод. На поверхні цих носіїв вирости представники родів *Proteobacteria*, *Bacteroidetes*, *Nitrospirae*, *Cyanobacteria* та *Actinobacteria*. Губчастий носій мав найбільшу кількість біомаси через велику площу поверхні (Al-Amshawee et al., 2020a). Окремі типи носіїв наведено на

рис. 5, характеристики десяти з них представлено в таблиці 1 (Al-Amshawee et al., 2020a).

Після двох років досліджень для біологічного очищення стічних вод авторами (Al-Amshawee et al., 2020a) було розроблено два носії. Після огляду носіїв біоплівки “Kaldnes” було помічено, що всі розглянуті носії мають слабку конструкцію для захисту біоплівки від видалення турбулентністю. Відповідно, зовнішні поверхні двох нових носіїв були розроблені по-різному для ефективного прикріплення біоплівки, захищеної від зовнішніх впливів (наприклад, потоку стічної води, бульбашок кисню тощо). Окрім того, відомо, що текстура поверхонь носіїв може посилити або послабити прикріплення мікробіоти. Водночас високе заростання біоплівкою може спричинити неефективне очищення води через низьку



Рис. 5. Розмаїття конструкцій носіїв для формування біоплівки (Al-Amshawee et al., 2020a)

Таблиця 1
Специфікації носіїв біоплівки фірми “Kaldnes” (Al-Amshawee et al., 2020a)

Тип	Матеріал	Кількість комірок	Термін служби, рік	Тривалість утворення біоплівки	Діаметр / висота, мм	Вага на м ³ , кг	Температура роботи, °C
1	2	3	4	5	6	7	8
K1	поліетилен	4	10	5–15 днів	12/9	120	–
K2	поліетилен	4	10	5–15 днів	11/7	140	–
K3	поліетилен	5	10	5–15 днів	11/7	150	–
K4	поліетилен	6	10	5–15 днів	14,5/10	120	–
K5	поліетилен	19	10	5–15 днів	20/12	95	–
K6	поліетилен	19	>15	3–15 днів	35/15	–	5–60
K7	поліетилен	19	–	–	35/18	–	–
K8	поліетилен	8	>15	3–15 днів	5/10	–	5–60
K9	поліетилен	40	>15	3–15 днів	15/15	–	5–60
K10	поліетилен	64	>15	3–15 днів	24/4	–	5–60

площу активної поверхні. Відповідно, два порожнисті куби (носії) було розроблено з використанням програмного забезпечення Auto Desk Auto Cad для високозабруднених (наприклад, стічних вод заводу з виробництва пальмової олії) та низькозабруднених стічних вод (наприклад, муніципальних). Як основний несучий матеріал пропонується поліетилен або поліпропілен, оскільки він має 10–15 років строку служби та вважається менш вартісним порівняно з металами. Носії, що мають гофровані поверхні, можуть підвищити стабільність та прикріплення біоплівки (Al-Amshawee et al., 2020a).

Іншими авторами також зазначено, що нерівності поверхні носія можуть забезпечувати його захист від зсуву рідини та турбулентності, а також від зіткнень частинок. Тобто шорсткі носії можуть забезпечити кращі можливості для формування біоплівки, ніж гладкі. Тому ідеальні частинки носія мають бути грубими, але не дуже гострими. Для дослідження було використано три типи носія: носій, виготовлений

з полівінілового спирту, покритий порошкоподібним активованим вугіллям (носій типу I); Bio Carrier Plastic (носій типу II); носій Kaldnes (носій типу III) (рис. 6) (Zheng, 2005). Їхні фізичні характеристики наведено в таблиці 2.

Асоціація бактеріальної біоти на носії Kaldnes показала високі результати, видаливши 66–96% вхідних органічних сполук. Варто зазначити, що за використання однакових носіїв, але за різного коефіцієнта заповнення (навантаження на конкретну площу), продуктивність очищення була різною. Менше питоме навантаження на площу приводило до кращої якості очищення стоків (Zheng, 2005).

За результатами тривалих досліджень звичайні та модифіковані композитні носії для біоплівки за ефективністю зниження хімічної потреби в кисні вченими було класифіковано таким чином: полівініловий спирт > поліуретан > поліетилен > поліпропілен і полівініловий спирт > утилізована шина > поліуретан > поліетилен (Al-Amshawee et al., 2020b).

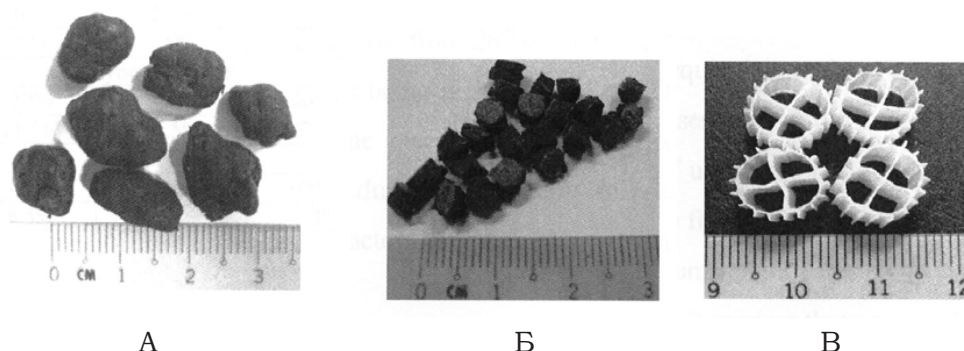


Рис. 6. А – носій типу I, Б – носій типу II, В – носій типу III (Zheng, 2005)

Таблиця 2

Характеристики досліджуваних носіїв (Zheng, 2005)

Фізичні характеристики	Носій типу I	Носій типу II	Носій типу III
1	2	3	4
Загальна площа поверхні, м ² /м ³	600	750	500 (площа захищеної поверхні 300 м ²)
Щільність, г/см ³	1,1	0,98–1,0	0,92–0,96
Діаметр, мм	2–6	4 x 4	7 x 10
Заповнення (об'єм реактора), %	10–30	10–30	35–65
Матеріал	полівініловий спирт і карбон	пластик	поліетилен
Вартість, USD/м ³	1 500	1 300	1 000

У наявних роботах описано отримання високоефективних і недорогих матеріалів для іммобілізації біоплівки на основі соснової кори та кукурудзяної соломки, а також дослідження їхніх переваг порівняно із широко використовуваними носіями, як-от натрій альгінат і пелети агару. Отримані результати показали, що найкращим носієм для іммобілізації була модифікована кора (He et al., 2019).

Процеси іммобілізації мікробіоти широко використовуються для біоремедіації підземних забруднених вод. Оскільки є різні методи іммобілізації мікроорганізмів (адсорбція, зв'язування на поверхні (електростатичне або ковалентне), флокуляція, захоплення та інкапсуляція), то вони, відповідно, потребують і носіїв зі специфічними властивостями (для флокуляції носії не потрібні). Наприклад, носії, що використовуються для адсорбції або зв'язування на поверхні, повинні мати високу пористість для забезпечення якомога більшої площі контакту. Природа виконуваних процесів біоремедіації також впливає на вибір носія. Носії, що використовуються в біоаугментації, мають біологічно розкладатися. У процесах очищення стічних вод носій повинен мати високу механічну стійкість, оскільки може піддаватися впливу різних видів фізичних сил (Dzionek et al., 2016).

Автори (Moga et al., 2018) пропонують новий носій біоплівки для третинного очищення стічних вод шкіряних і паперових фабрик. Біологічне очищення засноване на активності грибів, які будуть вирощувати на інноваційних носіях (суміш поліетилену високої щільності), що містять целюлозу. Носій буде розроблено для використання в біореакторі з рухомим шаром (Moga et al., 2018).

У цьому дослідженні (Freitas et al., 2022) було оцінено продуктивність трьох біоплівкових реакторів з рухомим шаром (MBBR) з використанням різних носіїв (із захищеною площею поверхні та без неї) для очищення побутових стічних вод у безперервному потоці. Кожен реактор був заповнений у співвідношенні 50% носіями з поліетилену високої щільності з різними характеристиками: комерційний носій фірми "Kaldnes" (K1) і альтернативні носії (гофрована трубка із захищеною поверхнею та пластівці без захищеної поверхні). Результати показали, що тип носія та його характеристики (загальна площа та з/без захищеної території) не впливають на видалення органіч-

ної речовини. Отже, носій без захищеної поверхні в методі MBBR може бути перспективним недорогим варіантом для очищення побутових стічних вод (Freitas et al., 2022).

Запропоновано (Hasegawa et al., 2017) носій для очищення стічних вод, що містить серцевинні елементи та мікробні утримувальні елементи, які отримані шляхом формування багатошарових ниток у багаторівневій або петлевій конфігурації, волокна шарів нитки формуються в розслабленому стані, щоб мати можливість відокремлюватися одне від одного у стічній воді. Найкращим варіантом є поєднання гідрофільних і гідрофобних волокон. Водорозчинні органічні речовини у стічних водах, імовірно, прилипають до гідрофільних волокон. Органічні речовини, що не розкладаються (жири, олії, поверхнево-активні речовини) можуть прилипати до гідрофобних волокон. Синергічний ефект поєднання гідрофільних і гідрофобних волокон значно покращує адгезію органічних речовин, а також підтримує мікробний харчовий ланцюг. Гідрофільне волокно містить гідрофільну групу (гідроксильну групу), легко змочується водою. Це може бути нейлон, акрил, поліестер, вінілон, вуглецеве волокно, промікс, ацетат, конопля, бавовна, віскоза, шовк і вовна. Нейлон і вінілон бажано використовувати в діапазоні нормальних і високих температур (10–60 °C), акрил і вуглецеве волокно – у холодну погоду (10 °C або менше). Гідрофобне волокно містить вуглеводневу групу, важко змочується водою. Найчастіше це вініліден, полівінілхлорид, поліпропілен на основі олефіну або поліетилен. З них вініліден і полівінілхлорид є найбільш придатними незалежно від середовища використання. Пропонується також цей носій адаптувати до стічних вод з високою концентрацією органіки (Hasegawa et al., 2017).

Електропрядіння, як технологія виробництва безперервних волокон розміром від десятків нанометрів до кількох мікрон, може запропонувати нові ідеї для виробництва носіїв для іммобілізації. Ця технологія забезпечує більшу гнучкість в модифікації відповідно до конкретних вимог процесу та забезпечує параметричну обробку за помірних витрат. У зв'язку із цим електропрядіння дає можливість отримувати мікронановолокна з різноманітними компонентами, високою площею поверхні та чудовою механічною міцністю. Було встановлено, що синтетичні волокна нагадують природні

нанофібринові мережі за морфологією, механікою та хімією поверхні та мають високу біосумісність із клітинами. Отже, електронановолокна мають великий потенціал для використання як мікробні носії для очищення стічних вод (Zhao et al., 2023).

У роботі (Phan et al., 2023) стічні води від підприємств виробництва морепродуктів очищали за допомогою реактора MBBR на новому носії, отриманому з комбінації пористої (пінополіуретан) і гідрофільної поверхні (полівініловий спирт). Експериментальні результати показали, що такий гелевий носій має гарні текстурні особливості: питома поверхня $3,4 \text{ м}^2/\text{г}$, розмір пор у діапазоні 10–40 мкм і гідрофільна поверхня. Це сприяє швидшому зануренню у воду та кращій мікробній адгезії, у результаті чого обсяг біоплівки, утвореної на початковому етапі, у 2,4 раза вищий порівняно зі звичайним носієм з пінополіуретану.

Ученими було досліджено ефективність утворення біоплівки на 4-х типах пластикових носіїв: сферичних, дископодібних і колесоподібних різного діаметра. Встановлено, що носій діаметром 9,95 мм мав найвищу середню концентрацію біомаси, іммобілізованої на поверхні, – $5\,425 \text{ мг}/\text{дм}^3$, порівняно з іншими: $\varnothing 9,34 \text{ мм}$, $\varnothing 47,09 \text{ мм}$ та $\varnothing 125,93 \text{ мм}$, які показали 2015, 869 та $138 \text{ мг}/\text{дм}^3$ відповідно. Отже, колесоподібні носії діаметром 9,95 мм можуть бути ефективно використані в системах MMBR для очищення стічних вод, а також для покращення роботи аеротенків шляхом їх модернізації – створення зон з носіями для підвищення ефективності очищення стічних вод від органічних речовин, азотних сполук, особливо на стадії нітрифікації, фосфорних сполук та інших забруднювальних речовин (Sablii, 2025).

Як видно з вищенаведеного, вибір носія для іммобілізації мікроорганізмів є критичним фактором, оскільки він впливає на оптимальну товщину біоплівки, ріст біомаси й ефективність біодеградації забруднювальних речовин різної природи (Sablii, 2025).

Закордонні вчені активно працюють над проблемою створення та вдосконалення різноманітних носіїв для іммобілізації мікроорганізмів, щоб підвищити якість найбільшого скарбу планети Земля – води. Українські науковці також плідно працюють над цим питанням. Зокрема, видатний український учений П.І. Гвоздяк ще у 80–90-х рр. XX ст. теоретично обґрунтував і практично довів доцільність та ефективність використання

в біотехнологіях очищення стічних вод волокнистих носіїв із синтетичних (капронових) волокон типу «ВІЯ», «ДІЯ», «НАДІЯ» для іммобілізації гідробіонтів в очисних спорудах (Саблій, 2013; Гвоздяк, 2019). Серед відомих носіїв вони мають найбільшу поверхню, що досягає $5\,000 \text{ м}^2$ в 1 м^3 об'єму очисної споруди. До переваг носіїв «ВІЯ» порівняно з іншими носіями можна віднести:

- створення найкращих умов для утримання активного мулу в системі для збільшення концентрації та віку мулу, що має особливо велике значення для мулів, мікроорганізми яких мають малий період генерації, як-от нітрифікатори або анамокс-бактерії;

- збільшення стабільності роботи біореактора за низької концентрації органічних речовин і схильності активного мулу до спухання;

- відсутність явища спухання, зменшення об'ємів осадів, покращення їхніх седиментаційних властивостей, збільшення мінеральної частки;

- збільшення концентрації активної біомаси приводить до прискорення процесів біологічного очищення стічних вод, збільшення окисної потужності споруд і зменшення їхніх об'ємів (наприклад, аеротенка на 20–30%);

- створення всередині біологічної плівки умов для перебігу процесу денітрифікації, анамокс-процесу;

- велику поверхню адсорбції мікроорганізмів, а також малий гідралічний опір потоку рідини, нерозчинність у воді, високу міцність, стійкість до мікробної деструкції, нешкідливість для організмів, малу вартість.

Для волокна носія «ВІЯ» питома поверхня становить $180 \text{ м}^2/\text{г}$ (для інших волокон цей показник значно менший $26,1 \text{ м}^2/\text{г}$ (табл. 3)). Дослідження показали, що на волокнах «ВІЯ» іммобілізуються епібіоти: черепашкові амеби, коловертки, нематоди, які відіграють значну роль у створенні біоконвеєра. А в товщі носія зареєстровано гідробіонтів – індикаторів високого ступеня чистоти води (Саблій, 2013).

Висновки

Результати проведеного дослідження продемонстрували величезне розмаїття природних і штучних носіїв мікробіоти. Доведено, що різні методи іммобілізації мікроорганізмів потребують різних носіїв зі специфічними властивостями. Синтетичні носії мікроорганізмів отримують все більше

Таблиця 3

Порівняльна характеристика матеріалів – носіїв іммобілізованих мікроорганізмів
(Саблій, 2013)

Показник	Капронова джгу- това нитка «ВІЯ»	Поліпропіленова нитка	Поліетилієнова нитка	Пластмасова муфта	Йоржі зі скловолокна	Спінений полістирол
1	2	3	4	5	6	7
D – діаметр, мм; H – висота, мм	D = 0,5–3,0	D = 0,4	D = 0,4	D = 42, H = 50	–	D > 3,0
Питома поверхня, м ² /г	180	26,1	26,1	–	–	–
Питома активна поверхня, м ² /м ³	5000	–	–	0–250	1 000–10 000	900
Питома маса носія, кг/м ³	0,22	–	–	–	–	35
Концентрація біомаси за сухою речовиною, г/г (кг/м ³)	3,1–3,8 (24–30)	–	–	– (26)	3,65–3,4 (15–30)	–
Марка	–	–	–	–	–	ПСВ, ПСВ-с*

Примітка: * – полістирол самозатухаючий (містить домішки, які запобігають горінню).

визнання та широке застосування в технологіях біологічного очищення стічних вод, значно впливають на екологію та біорізноманіття бактеріальної біоти, що іммобілізується на поверхні. Наприклад, поліуретанові носії забезпечують найкраще видалення люмінофору й азоту, тоді як поліетилен сприяє найшвидшому зниженню показника ХСК.

Встановлено, що носій повинен мати позитивний поверхневий заряд, оскільки поверхневий заряд бактеріальних клітин є негативним. На вірогідність нерівномірної колонізації носіїв впливає комбінація наявності гладкої поверхні та великої захищеної площі поверхні.

Викликає сумнів ідея про максимізацію площі поверхні носія як єдиний спосіб створення більш ефективних біоплівки. З'ясовано, що архітектура носія також має

певний вплив на ефективність біоплівки. Носії, що мають гофровані поверхні, можуть підвищити стабільність та прикріплення біоплівки.

За головними якісними показниками та тривалістю експлуатації в реальних очисних спорудах найбільш перспективним носієм для майбутнього використання показала себе система «ВІЯ» з капронової текстурованої нитки.

Подальше впровадження в сучасні біотехнології очищення води систем для іммобілізації бактеріальної біоти й інших гідробіонтів надає можливість значно покращити та збільшити швидкість очищення стічних вод в очисних спорудах, а також значно прискорити процеси самоочищення води в малих річках (Rylsky et al., 2023; Burdenyuk et al., 2023), позитивно вплинути на екологію гідробіонтів водних екосистем.

Список використаної літератури

Гвоздяк П.І. Біохімія води. Біотехнологія води : автомонографія. Київ : Видавничий дім «Києво-Могилянська академія», 2019. 228 с.

Жукова В.С. Застосування носіїв іммобілізованих мікроорганізмів для ефективного біологічного очищення стічних вод. *Екологічні біотехнології та біоенергетика* : матеріали Науково-практичного семінару, присвяченого 120-річчю Київського політехнічного інституту імені Ігоря Сікорського, м. Київ, 14 грудня 2018 р. Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2018. С. 31–34.

- Саблій Л.А. Фізико-хімічне та біологічне очищення висококонцентрованих стічних вод : монографія. Рівне : НУВГП, 2013. 291 с.
- Цитлішвілі К.О. Екологія іммобілізованого азоттрансформуючого мікробіоценозу в системах очистки стічних вод : дис. ... докт. філос. : 101. Харків, 2021. 187 с.
- Al-Amshawee S.K., Yunus M.Y., Azoddein A.A. A novel microbial biofilm carrier for wastewater remediation. *IOP Conf. Ser.: Mater. Sci. Eng.*, 2020a. 13 p. <http://dx.doi.org/10.1088/1757-899X/736/7/072006>
- Al-Amshawee S., Mohd Y., Mohd Y., Vo D.-V., Tran N. Biocarriers for biofilm immobilization in wastewater treatments: a review. *Environmental Chemistry Letters*. 2020b. Vol. 18(6). P. 1925–1945. <https://doi.org/10.1007/s10311-020-01049-y>
- Andersson S. Characterization of bacterial biofilms for wastewater treatment. Sweden, Stockholm : School of Biotechnology, Royal Institute of Technology, 2009. 71 p.
- Armanu E.G., Volf I. Natural carriers for bacterial immobilization used in bioremediation. *Buletinul institutului politehnic din iasi, Secția Chimie și Inginerie Chimică*. 2022. Vol. 68(72). № 3. P. 109–122. <http://dx.doi.org/10.5281/zenodo.7545779>
- Burdenyuk I., Masikevych A., Dombrovskiy K., Rylskiy O., Masykevich Y., Deyneka S., Tymchuk I. Sanitary, microbiological condition, and ecological state of surface water quality in the upper Siret River basin (Ukraine). *Ecological Engineering & Environmental Technology*. 2023. Vol. 24(9). P. 55–63. <https://doi.org/10.12912/27197050/172930>
- Dzionek A., Wojcieszynska D., Guzik U. Natural carriers in bioremediation: a review. *Electronic Journal of Biotechnology*. 2016. Vol. 19(5). P. 28–36. <http://dx.doi.org/10.1016/j.ejbt.2016.07.003>
- Freitas B. de O., Leite L. de S., Hoffmann M.T., Lamon A.W., Daniel L.A. Application of alternative carriers without protected surface in moving bed biofilm reactor for domestic wastewater treatment. *Water Practice and Technology*. 2022. Vol. 17(2). P. 544–554. <https://doi.org/10.2166/wpt.2022.003>
- Hasegawa M., Amino N., Ishihara K. Wastewater treatment carrier, wastewater treatment carrier module, wastewater treatment carrier unit, and wastewater treatment device. Publication Number WO/2017/056232. Publication Date 06.04.2017. International Application № PCT/JP2015/077726. International Filing Date 30.09.2015. IPC C02F 3/06 2006.1, CPC C02F 2201/007 C02F 3/06 C02F 3/10 C02F 3/103 C02F 3/20. Y02W 10/10.
- He J., Zhang W., Ren X., Xing L., Chen S., Wang C. Preparation of different activated sludge immobilized carriers and their organic wastewater treatment performance by microbial community. *Environmental Engineering Science*. 2019. Vol. 36. Is. 5. P. 604–613. <https://doi.org/10.1089/ees.2018.0295>
- Hou L., Hu K., Huang F., Pan Z., Jia X., Liu W., Yao X., Yang Z., Tang P., Li J. Advances in immobilized microbial technology and its application to wastewater treatment: a review. *Bioresource Technology*. 2024. Vol. 413. P. 131518. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2024.131518>
- Iurchenko V., Tkachenko S. Implementation of the sludge biotic index for control and optimization of the biological treatment process. *Environmental problems*. 2024. Vol. 9. № 3. P. 164–171. <https://doi.org/10.23939/ep2024.03.164>
- Kriklavova L., Lederer T. The use of nanofiber carriers in biofilm reactor for the treatment of industrial wastewaters. *Nanocon 2010 : Conference Proceedings*, 2nd International Conference, 12–14 October 2010, Olomouc, Česká Republika. 6 p.
- Moga I.C., Iordache O.I., Petrescu G., Pricop F., Dumitrescu I. Polyethylene based materials for biofilm carriers used in wastewater treatment. *IOP Conference Series : materials science and engineering*, 17–18 May 2018, Iasi, Romania. Vol. 374. 6 p. <http://dx.doi.org/10.1088/1757-899X/374/1/012080>
- Ovelheiro B. 3D printed architected materials for improving biofilm carriers for wastewater treatment applications. USA : University of Massachusetts Amherst, 2020. 100 p.
- Phan T.A., Pham T.N., Duong T.H., Nguyen H.M. Novel carrier for seafood wastewater treatment using moving bed biofilm reactor system. *Environmental Engineering Research*. 2023. Vol. 28(5). P. 220508. <https://doi.org/10.4491/eer.2022.508>
- Rylsky O., Dombrovskiy K., Masikevych Y., Masikevych A., Malovanyy M. Evaluation of water quality of the Siret River by zooperiphyton organisms. *Journal of Ecological Engineering*. 2023. Vol. 24(6). P. 294–302. <https://doi.org/10.12911/22998993/163166>
- Sablii L., Zhukova V., Kozar M., Hrynevych A., Jaromin-Gleń K. Comparison biofilm characteristics on different types of carriers for wastewater treatment. *Environmental problems*. 2025. Vol. 10. № 1. P. 20–25. <https://doi.org/10.23939/ep2025.01.020>

Svobodová (Kriklavova) L., Lederer T. A review study of nanofiber technology for wastewater treatment. *Nanocon 2011* : Conference Proceedings, 3rd International Conference, 21–23 September 2011, Brno, Czech Republic. 6 p.

Zhang X., You S., Ma L., Chen C., Li C. The application of immobilized microorganism technology in wastewater treatment. *MMECEB 2015* : 2nd International conference on machinery, materials engineering, chemical engineering and biotechnology. 2015. P. 103–106. <http://dx.doi.org/10.2991/mmeceb-15.2016.22>

Zhao Y., Hussain A., Liu Y., Yang Z., Zhao T., Bamanu B., Su D. Electrospinning micro-nanofibers immobilized aerobic denitrifying bacteria for efficient nitrogen removal in wastewater. *Journal of Environmental Management*. 2023. Vol. 343. P. 118230. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2023.118230>

Zheng Q. Selection and optimization of carriers in biological wastewater treatment applications : master's thesis. Singapore : Nanyang Technological University, 2005. 141 p.

References

Ghvozdjak, P.I. (2019). Biokhimija vody. Biotehnologhija vody (avtomonoghrafija) [Biochemistry of water. Biotechnology of water (automonography)]. Kyiv: Vydavnychyj dim “Kyievo-Moghyliansjka akademiia” [in Ukrainian].

Zhukova, V.S. (2018) Zastosuvannja nosijiv immobilizovanykh mikroorghanizmiv dlja efektyv-nogho biologhichnogho ochyshhennja stichnykh vod [Application of immobilized microorganisms carriers for effective biological wastewater treatment]. *Ekologhichni biotehnologhiji ta bioenerghetyka : materialy naukovo-praktychnogho seminaru prysujachenogho 120-richchju KPI im. Ighorja Sikorsjkogho* [Ecological biotechnology and bioenergy: materials of the scientific and practical seminar dedicated to the 120th anniversary of Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute]. Kyjiv: KPI im. Ighorja Sikorsjkogho, pp. 31–34 [in Ukrainian].

Cytlishvili, K.O. (2021) Ekologhija immobilizovanogho azottransformujuchogho mikrobiocenu v systemakh ochystky stichnykh vod [Ecology of immobilized nitrogen-transforming microbiocenosis in wastewater treatment systems]. Dysertacija na zdobuttja naukovogho stupenja doktora filosofiji za specialjnistju 101 – Ekologhija [Dissertation for the degree of Doctor of Philosophy in specialty 101 – Ecology]. Kharkiv: Naukovo-doslidna ustanova “Ukrajinsjkyj naukovo-doslidnyj instytut ekologhichnykh problem” [in Ukrainian].

Sablij, L.A. (2013) Fyzyko-khimichne ta biologhichne ochyshhennja vysokokoncentrovanykh stichnykh vod: monoghrafija [Physico-chemical and biological purification of highly concentrated wastewater: monograph]. Rivne: NUVGhP [in Ukrainian].

Al-Amshawee, S.K., Yunus, M.Y., Azoddein, A.A. (2020a). A novel microbial biofilm carrier for wastewater remediation. *IOP Conf. Ser.: Mater. Sci. Eng.*, 13. <http://dx.doi.org/10.1088/1757-899X/736/7/072006> [in English].

Al-Amshawee, S., Mohd, Y., Mohd Y., Vo D-V., Tran N. (2020b). Biocarriers for biofilm immobilization in wastewater treatments: a review. *Environmental Chemistry Letters*, 18(6), 1925–1945. <https://doi.org/10.1007/s10311-020-01049-y> [in English].

Andersson, S. (2009). Characterization of bacterial biofilms for wastewater treatment. Sweden, Stockholm: School of Biotechnology, Royal Institute of Technology [in English].

Armanu, E.G., & Volf, I. (2022). Natural carriers for bacterial immobilization used in bioremediation. *Buletinul institutului politehnic din iasi, Secția Chimie și Inginerie Chimică*, 68(72), 3, 109–122. <http://dx.doi.org/10.5281/zenodo.7545779> [in English].

Burdenyuk, I., Masikevych, A., Dombrovskiy, K., Rylskiy, O., Masykevich, Y., Deyneka, S., & Tymchuk, I. (2023). Sanitary, microbiological condition, and ecological state of surface water quality in the upper Siret River basin (Ukraine). *Ecological Engineering & Environmental Technology*, 24(9), 55–63. <https://doi.org/10.12912/27197050/172930> [in English].

Dzionek, A., Wojcieszynska, D., & Guzik, U. (2016). Natural carriers in bioremediation: a review. *Electronic Journal of Biotechnology*, 19(5), 28–36. <http://dx.doi.org/10.1016/j.ejbt.2016.07.003> [in English].

Freitas, B. de O., Leite, L. de S., Hoffmann, M.T., Lamon, A.W., & Daniel, L.A. (2022). Application of alternative carriers without protected surface in moving bed biofilm reactor for domestic wastewater treatment. *Water Practice and Technology*, 17(2), 544–554. <https://doi.org/10.2166/wpt.2022.003> [in English].

Hasegawa, M., Amino, N., & Ishihara, K. (2017). Wastewater treatment carrier, wastewater treatment carrier module, wastewater treatment carrier unit, and wastewater treatment device. Publication Number WO/2017/056232. Publication Date 06.04.2017. International Application No. PCT/JP2015/077726. International Filing Date 30.09.2015. IPC C02F 3/06 2006.1, CPC C02F 2201/007 C02F 3/06 C02F 3/10 C02F 3/103 C02F 3/20. Y02W 10/10 [in English].

He, J., Zhang, W., Ren, X., Xing, L., Chen, S., & Wang, C. (2019). Preparation of different activated sludge immobilized carriers and their organic wastewater treatment performance by microbial community. *Environmental Engineering Science*, 36(5), 604–613. <https://doi.org/10.1089/ees.2018.0295> [in English].

Hou, L., Hu, K., Huang, F., Pan, Z., Jia, X., Liu, W., Yao, X., Yang, Z., Tang, P., & Li, J. (2024). Advances in immobilized microbial technology and its application to wastewater treatment: a review. *Bioresource Technology*, 413, 131518. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2024.131518> [in English].

Iurchenko, V., & Tkachenko, S. (2024). Implementation of the sludge biotic index for control and optimization of the biological treatment process. *Environmental problems*, 9(3), 164–171. <https://doi.org/10.23939/ep2024.03.164> [in English].

Kriklavova, L., & Lederer, T. (2010). The use of nanofiber carriers in biofilm reactor for the treatment of industrial wastewaters. *Nanocon*. Olomouc, Česká Republika, 6 p. [in English].

Moga, I.C., Iordache, O.I., Petrescu, G., Pricop, F., & Dumitrescu, I. (2018). Polyethylene based materials for biofilm carriers used in wastewater treatment. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 374. 6 p. <http://dx.doi.org/10.1088/1757-899X/374/1/012080> [in English].

Ovelheiro, B. (2020). 3D printed architected materials for improving biofilm carriers for wastewater treatment applications. Environmental & Water Resources Engineering Masters Projects. USA: University of Massachusetts Amherst [in English].

Phan, T.A., Pham, T.N., Duong, T.H., & Nguyen, H.M. (2023). Novel carrier for seafood wastewater treatment using moving bed biofilm reactor system. *Environmental Engineering Research*, 28(5), 220508. <https://doi.org/10.4491/eer.2022.508> [in English].

Rylsky, O., Dombrowskiy, K., Masikevych, Y., Masikevych, A., & Malovanyy, M. (2023). Evaluation of water quality of the Siret River by zooperiphyton organisms. *Journal of Ecological Engineering*, 24(6), 294–302. <https://doi.org/10.12911/22998993/163166> [in English].

Sablii, L., Zhukova, V., Kozar, M., Hrynevych, A., & Jaromin-Gleń, K. (2025). Comparison biofilm characteristics on different types of carriers for wastewater treatment. *Environmental problems*, 10(1), 20–25. <https://doi.org/10.23939/ep2025.01.020> [in English].

Svobodová (Kriklavova), L., & Lederer, T. (2011). A review study of nanofiber technology for wastewater treatment. *Nanocon*. Brno, Czech Republic, 6 p. [in English].

Zhang, X., You, S., Ma, L., Chen, C., & Li, C. (2015). The application of immobilized microorganism technology in wastewater treatment. *2nd International Conference on Machinery, Materials Engineering, Chemical Engineering and Biotechnology*, 103–106. <http://dx.doi.org/10.2991/mmeceb-15.2016.22> [in English].

Zhao, Y., Hussain, A., Liu, Y., Yang, Z., Zhao, T., Bamanu, B., & Su, D. (2023). Electrospinning micro-nanofibers immobilized aerobic denitrifying bacteria for efficient nitrogen removal in wastewater. *Journal of Environmental Management*, 343, 118230. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2023.118230> [in English].

Zheng, Q. (2005). Selection and optimization of carriers in biological wastewater treatment applications: master's thesis. Singapore: Nanyang Technological University [in English].

Отримано: 29.10.2025

Прийнято: 27.11.2025

Опубліковано: 30.12.2025

