

УДК 628.31

DOI: 10.31498/2225-6733.52.2025.351070

ДІАГНОСТИКА ТА КОНТРОЛЬ СПУХАННЯ АКТИВНОГО МУЛУ
НА БІОЛОГІЧНИХ ОЧИСНИХ СПОРУДАХ

Копаниця О.Б. провідний судовий експерт Лабораторії досліджень об'єктів навколишнього середовища та екологічних досліджень Київського науково-дослідного інституту судових експертиз Міністерства юстиції України; аспірант, Державна наукова установа «Інститут екологічного відновлення та розвитку України», м. Київ, ORCID: <https://orcid.org/0009-0003-8939-2919>, e-mail: ecology.expert.2020@gmail.com

У статті розглянуто проблему виносу активного мулу з вторинних відстійників біологічних очисних споруд на основі найсучасніших досліджень 2023-2025 років. Актуальність дослідження обумовлена тим, що спухання мулу не лише погіршує якість очищених стоків, але й підвищує ризики розповсюдження генів антибіотикорезистентності. Метою роботи є комплексний аналіз проблеми з акцентом на інноваційні методи діагностики та контролю. Дослідження базується на систематизації наукових публікацій, присвячених молекулярним механізмам спухання мулу, діагностичним технологіям та стратегіям контролю. Проаналізовано роль екстрацелюлярних полімерних речовин та нитчастих бактерій з використанням протеомічних методів та високопродуктивного секвенування. Розглянуто застосування методів машинного навчання для раннього виявлення спухання та біологічні методи контролю. Встановлено, що зміни у складі екстрацелюлярних полімерних речовин призводять до електростатичного відштовхування між бактеріальними клітинами. Ідентифіковано 94 види нитчастих бактерій, понад 74% яких містять гени антибіотикорезистентності. Показано, що динамічні графові згорткові мережі дозволяють досягти точності виявлення спухання 99% з нульовою кількістю хибних тривог. Метод періодичного голодування забезпечує зниження рясності *Thiothrix* з понад 50% до менше 1% протягом 14 діб. Біологічні методи з використанням бактеріофагів дозволяють специфічно таргетувати проблемні види без негативного впливу на функціональні групи мікроорганізмів. Наукова новизна полягає у систематизації найсучасніших досягнень у розумінні молекулярних механізмів спухання та інноваційних підходів до його діагностики і контролю. Практична значущість результатів полягає у можливості впровадження описаних методів на реальних очисних спорудах для підвищення надійності роботи систем біологічного очищення. Подальші дослідження доцільно спрямувати на розробку специфічних біологічних агентів, удосконалення алгоритмів машинного навчання та створення інтегрованих систем управління.

Ключові слова: активний мул, спухання мулу, винос біомаси, нитчасті бактерії, високопродуктивне секвенування, машинне навчання, діагностика, біологічний контроль.

Постановка проблеми

Процес біологічного очищення стічних вод методом активного мулу залишається найпоширенішою технологією на комунальних та промислових очисних спорудах у всьому світі.

Однак проблема спухання та виносу активного мулу продовжує бути критичним викликом для ефективної експлуатації систем біологічного очищення. Спухання мулу характеризується погіршенням седиментаційних властивостей біомаси внаслідок надмірного розвитку нитчастих бактерій, що призводить до виносу твердих часток з вторинних відстійників та погіршення якості очищених стоків [1, 2].

За оцінками 2023-2024 років глобальні очисні споруди генерують понад 103 мільйони тонн надлишкового активного мулу на рік у перерахунку на вологу масу [3].

Винос мулу не лише погіршує якість стоків, але й створює екологічне, економічне та санітарне навантаження на системи водовідведення.

Сучасні дослідження 2024-2025 років продемонстрували, що спухання мулу може також підвищувати ризики розповсюдження генів антибіотико-резистентності, що додає нові виміри до розуміння цієї проблеми [4].

Аналіз останніх досліджень та публікацій

Дослідження останніх років виявили критичну роль екстрацелюлярних полімерних речовин у механізмах спухання мулу, зокрема вплив змін у співвідношенні полісахариди/білки на седиментаційні властивості [5, 6]. В огляді 2024 року детально описано та систематизовано дані про 94 види нитчастих бактерій, що належать до шести філумів [7]. Глобальне дослідження, проведене наступного року, виявило значні регіональні відмінності у розповсюдженні філаментів [8]. Важливим відкриттям став зв'язок нитчастих бактерій з генами антибіотикорезистентності – 74,84% нитчастих бактерій мають принаймні один такий ген [4, 9]. Це відкриває нові виміри в розумінні екологічних ризиків спухання мулу. Було зареєстровано прорив у розробці методів машинного навчання для діагностичних цілей. Динамічна графова згорткова мережа показала точність 99% [10], тоді як гібридні системи ELM-DBN показали точність до 98,39% [11]. Однак високопродуктивне секвенування та технології FISH значно покращили можливості виявлення ниткоподібних бактерій [2, 12]. Найновіший підхід полягає в розробці методів біологічного контролю з використанням бактеріофагів. Специфічні фаги зменшують кількість проблемних філаментів до 83% [1, 2]. Метод кворумного

гасіння, що блокує сигнали AHL, також дає хороші результати [13].

Однак, незважаючи на значний прогрес, досягнутий у розумінні окремих аспектів, пов'язаних з цим питанням, існуючі роботи залишаються фрагментарними та не дають цілісного міждисциплінарного погляду на проблему спухання мулу. Тому в цій статті проведено детальний систематичний огляд сучасних методів як діагностики, так і контролю накопичення активного мулу разом із практичними рекомендаціями, що стосуються різних типів очисних споруд, щоб можна було сформулювати міждисциплінарне розуміння проблеми, що охоплює досягнення молекулярної біології, біоінформатики та технологічних процесів.

Мета статті

Мета дослідження полягає у комплексному аналізі проблеми виносу активного мулу на основі найсучасніших наукових публікацій за період з 2020 року по 2025 рік з акцентом на інноваційні методи діагностики та контролю.

Завдання дослідження включають систематизацію сучасних знань про молекулярні механізми спухання мулу, огляд передових діагностичних технологій на основі машинного навчання та високопродуктивного секвенування, а також узагальнення ефективних стратегій біологічного та процесного контролю спухання.

Виклад основного матеріалу

Дослідження останніх років продемонстрували критичну роль екстрацелюлярних полімерних речовин у механізмах спухання мулу.

Комплексний аналіз на основі протеомічних методів виявив, що під час спухання вміст екстрацелюлярних полімерних речовин поступово зменшується від 210,23 мг/г легких завислих речовин до 131,34 мг/г [5]. Особливо значущим є зниження вмісту білків від 173,33 мг/г до 95,42 мг/г при одночасному збільшенні полісахаридів.

Ключовим механізмом погіршення седиментації виявилось електростатичне відштовхування між бактеріальними клітинами. Надмірний розвиток нитчастих бактерій суттєво впливає на молекулярні функції екстрацелюлярних білків та метаболічні шляхи екстрацелюлярних полімерних речовин. Зокрема, відбувається зменшення синтезу гідрофобних амінокислот та збільшення синтезу гідрофільних, що призводить до формування пухкої структури пластівців з поганою здатністю до осадження [5].

Додаткові дослідження 2023 року підтвердили, що зміни у співвідношенні полісахариди/білки в екстрацелюлярних полімерних речовинах можуть індукувати нефіламентозне спухання мулу навіть за відсутності масового розвитку нитчастих бактерій [14]. Це розширює розуміння механізмів спухання beyond

традиційної парадигми, що фокусувалася виключно на нитчастих організмах.

Детальний огляд популяційного складу, фізіології та екології нитчастих бактерій, опублікований у 2024 році, систематизував дані про дев'яносто чотири види нитчастих бактерій, що належать до 6 філумів та 42 родів [7]. Ядро нитчастих бактерій у спухлому активному мулі включає *Microthrix parvicella*, тип 0092, *Mycobacterium fortuitum* та інші види.

Тривалі дослідження популяційної динаміки нитчастих бактерій на 28 очисних спорудах з видаленням біогенних елементів у Данії продемонстрували, що нитчасті організми становили в середньому 24% від загальної мікробної спільноти [15].

Незважаючи на те, що більшість нитчастих бактерій знаходилася всередині пластівців, вони періодично викликали проблеми з осадженням на більшості станцій. Виявлено низьку різноманітність нитчастих бактерій з домінуванням *Microthrix* та різних видів, що належать до філumu *Chloroflexi*, включаючи типи 0803 та 0092.

Особливо важливим є відкриття 2024 року про зв'язок нитчастих бактерій з генами антибіотикорезистентності. Дослідження виявили, що 74,84% нитчастих бактерій містять принаймні один ген антибіотикорезистентності, причому частота виявлення таких генів у нитчастих організмів приблизно в 1,5 рази вища, ніж у загальній бактеріальній популяції активного мулу [4]. Геномний та метагеномний аналіз показав, що гени антибіотикорезистентності у нитчастих бактеріях тісно пов'язані з мобільними генетичними елементами та часто виявляються у потенційно патогенних бактеріях, що підкреслює додаткові ризики, пов'язані з цими мікроорганізмами.

Дослідження 2024-2025 років виявили значний вплив складу органічних речовин стічної води на розвиток спухання мулу. Результати досліджень свідчать, що повільно біодеградуючі органічні сполуки призводять до концентрованого розподілу мікроорганізмів всередині пластівців з ростом нитчастих бактерій всередину [16]. Системи, що оброблювали Tween-80 та гранульований крохмаль, демонстрували значне збільшення вмісту білків. В свою чергу, система з глюкозою із використанням розчинних субстратів, показувала значно вищий вміст полісахаридів.

Високопродуктивне секвенування підтвердило вплив різних характеристик мулу при живленні різними формами крохмалю на функціональну мікробну спільноту. Домінуючим родом у системі з партикулярним крохмалем виявився *Flavobacterium*, що сприяє продукції полісахаридів в екстрацелюлярних полімерних речовинах, тоді як домінуючим родом у системі з розчинним крохмалем був *Kouleothrix*, який виконує адсорбційно-містковуроль у мулі з більшими розмірами часток та підтримує добру седиментаційну ефективність [16].

Революційним досягненням останніх років стало впровадження методів машинного навчання для

раннього виявлення спухання мулу. У роботі [17] запропоновано новаторську динамічну графову згорткову мережу з механізмом уваги для ефективного виявлення зачаткових проблем, пов'язаних зі спуханням мулу. Модель використовує графові структури для представлення складних взаємозв'язків та темпоральної динаміки часових рядів даних, використовуючи лагові спостереження для створення матриць суміжності, що відображають поведінку системи в часі.

Експериментальні результати продемонстрували, що динамічна графова згорткова мережа перевершує традиційні моделі в управлінні динамічними даними, досягаючи швидкості виявлення 99%, нульової кількості хибних тривог та менше одного відсотка некоректних виявлень [17]. Модель була валідована з використанням Benchmark Simulation Model 2 для симуляції різних сценаріїв спухання мулу, а також даних з реальних очисних споруд.

Альтернативний підхід, запропонований у 2023 році, використовує динамічне графове вбудовування для моніторингу спухання мулу у промислових очисних спорудах [18]. Метод ідентифікує подібності між процесними змінними як у темпоральних, так і в просторових залежностях. Динамічна байєсівська мережа обчислює апіорні та апостеріорні ймовірності, що оновлюються на кожному часовому кроці, дозволяючи діагностувати основні причини спухання з точністю 98%.

Технології високопродуктивного секвенування революціонізували розуміння мікробних спільнот активного мулу. Всебічний огляд 2025 року підкреслює роль флуоресцентної гібридизації *in situ*, полімеразної

ланцюгової реакції та високопродуктивного секвенування у виявленні та ідентифікації нитчастих бактерій [2]. Ці методології надали детальні інсайти у динаміку та взаємодії мікробних спільнот.

Кількісний аналіз зображень, що використовує складну мікроскопію та обчислювальні техніки, став потужним інструментом для дослідження характеристик пластівців та кількісної оцінки нитчастих бактерій, підвищуючи точність виявлення спухання мулу [2]. Інтеграція операційних даних з методами машинного навчання та статистичними методами дозволяє підвищити прогностичну точність, що є критично важливим для раннього виявлення та ефективного управління спуханням.

Розвиток специфічних молекулярних зондів для ідентифікації нитчастих бактерій значно покращив можливості діагностики. Застосування 16S рРНК-орієнтованих олігонуклеотидних зондів для *Haliscomenobacter spp.*, *Sphaerotilus spp.*, *Leptothrix spp.*, *Thiothrix spp.* та інших дозволяє швидкий моніторинг високої роздільності цих організмів [12].

Гібридизація на місці з флуоресцентними похідними зондів у поєднанні з конфокальною лазерною скануючою мікроскопією забезпечує аналіз тривимірної локалізації філаментів всередині мулових пластівців. Це дозволяє не тільки ідентифікувати види нитчастих бактерій, але й розуміти їх просторове розташування та роль у структурі пластівців.

Узагальнену порівняльну характеристику всіх методів діагностики спухання мулу представлено в таблиці 1.

Таблиця 1

Порівняльна характеристика методів діагностики спухання активного мулу

Метод діагностики	Час виявлення	Точність, %	Вартість впровадження	Складність використання	Переваги	Обмеження
Мікроскопія (традиційна)	2-4 год	60-75	Низька	Середня	Доступність, простота, візуалізація структури	Суб'єктивність оцінки, неможливість кількісного аналізу
Індекс об'єму мулу (ІОМ)	30-60 хв	70-80	Дуже низька	Низька	Швидкість, стандартизація, простота	Запізнile виявлення, не показує причину спухання
Хімічний аналіз ЕПП	4-8 год	75-85	Середня	Висока	Розуміння молекулярних механізмів, кількісні дані	Тривалість аналізу, потреба у обладнанні
FISH (флуоресцентна гібридизація)	3-6 год	85-92	Висока	Висока	Специфічна ідентифікація видів, кількісний аналіз	Вартість зондів, потреба у спеціалістах
Високопродуктивне секвенування (NGS)	24-48 год	92-97	Дуже висока	Дуже висока	Повний профіль мікробіому, ідентифікація 94 видів	Висока вартість, складність інтерпретації даних
qPCR (кількісна ПЛР)	2-4 год	88-95	Середня	Висока	Швидкість, кількісна оцінка конкретних видів	Потреба у праймерах для кожного виду
Машинне навчання (графові нейронні мережі)	Реальний час	99	Висока (початкова)	Середня (після налаштування)	Точність 99%, 0% хибних тривог, раннє виявлення, автоматизація	Потреба у навчальних даних, початкові інвестиції

Примітка: ЕПП – екстрацелюлярні полімерні речовини; FISH – fluorescence in situ hybridization; qPCR – quantitative polymerase chain reaction; NGS – next-generation sequencing.

Найбільш інноваційним напрямком останніх років став розвиток біологічних методів контролю спухання мулу. Дослідження 2024-2025 років демонструють високий потенціал використання бактеріофагів для специфічного таргетування нитчастих бактерій. Бактеріофаг ННУ здатен специфічно впливати на нитчасту бактерію *Haliscomenobacter hydrossis*, відповідає за спухання мулу, що призводить до підвищення швидкості осадження та зниження індексу об'єму мулу [2, 3].

Використання коктейлів бактеріофагів для підвищення бактеріальної супресії та задоволення специфічних вимог різних бактеріальних штамів, присутніх у системах очищення стічних вод, є перспективним підходом [3]. Однак найбільшим обмеженням залишається складність підтримання оптимальної мікробної спільноти, яка може функціонувати стабільно за різноманітних умов навколишнього середовища.

Метод *quorum quenching*, що полягає у блокуванні системи комунікації між бактеріями через молекули-сигнали, також показує обнадійливі результати для контролю спухання [2]. Цей підхід дозволяє специфічно впливати на координоване поведіння нитчастих бактерій без застосування неспецифічних біоцидів.

Ефективний метод контролю спухання, викликаного *Thiothrix* species, був продемонстрований у повномасштабному дослідженні на очисних спорудах молочної промисловості. Дослідження свідчать, що модифікація циклу реактора на основі впровадження періодичного голодування ефективно вирішує проблему виносу біомаси та фактично знижує індекс об'єму мулу [4].

Аналіз бактеріального різноманіття з використанням 16S ампліконного секвенування та кількісної полімеразної ланцюгової реакції показав зниження рясності *Thiothrix* з 51,9% до 1,0% в одному реакторі та з 71,8% до 0,6% в іншому. Одночасно відбулося

збільшення рясності глікоген-акумулюючої бактерії *Candidatus Competibacter*. Мікроскопічний аналіз підтвердив трансформацію від спухлого мулу до гранулоподібного мулу з покращеними седиментаційними властивостями [4].

Це дослідження підтверджує застосовність періодичного голодування для вирішення рекурентного спухання, викликаного *Thiothrix*, конверсії пухких агрегатів у щільні компактні гранулоподібні структури та значного зменшення енергетичних потреб на аерацію.

Узагальнені рекомендації щодо вибору методів контролю спухання залежно від типу нитчастих бактерій наведено в таблиці 2.

Таблиця 2
Рекомендовані методи контролю для різних типів нитчастих бактерій

Вид	Основна причина	Рекомендований метод	Обґрунтування
<i>Microthrix parvicella</i>	Низька температура, жири	Періодичне голодування, бактеріофаги	Високий вміст ліпідів робить їх чутливими до голодування
<i>Thiothrix</i> spp.	Сульфіди, низьке DO	Періодичне голодування	Зниження рясності з 71,8% до 0,6% за 14 діб
Тип 0092, 0803 (<i>Chloroflexi</i>)	Низьке F/M	Оптимізація F/M, аерація	Чутливі до змін навантаження
<i>Haliscomenobacter hydrossis</i>	Низький pH	Бактеріофаг ННУ, корекція pH	Специфічне пригнічення фагами

Порівняльну динаміку зміни індексу об'єму мулу при застосуванні різних методів контролю представлено на рисунку 1.

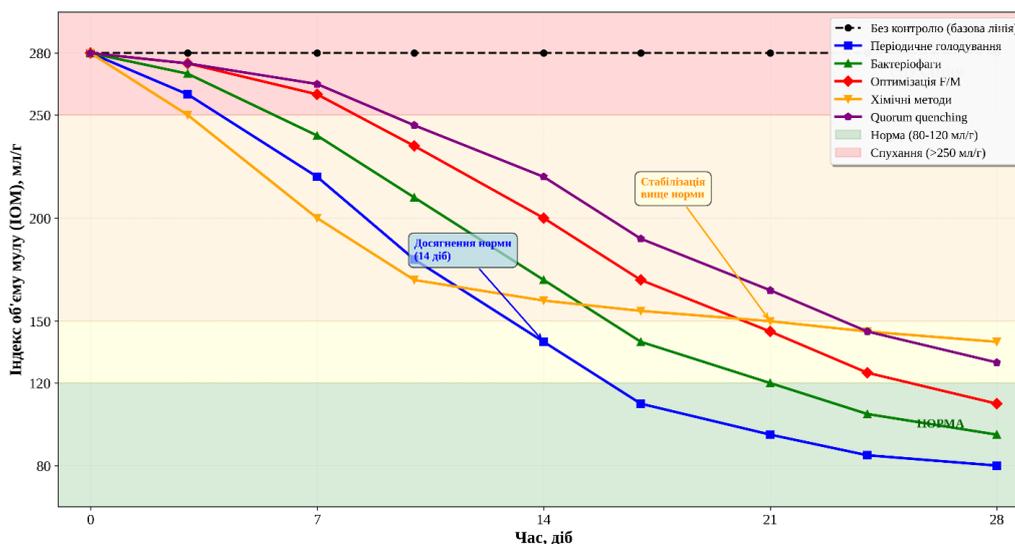


Рис. 1 – Динаміка зміни індексу об'єму мулу при застосуванні різних методів контролю спухання

Аналіз представленої динаміки свідчить, що різні методи контролю демонструють відмінну швидкість досягнення нормативних значень ІОМ. Найшвидший результат забезпечує періодичне голодування (досягнення норми за 14 діб), що узгоджується з експериментальними даними [4]. Біологічні методи (бактеріофаги, quorum quenching) характеризуються помірною швидкістю дії (21-28 діб), однак забезпечують стабільний довготривалий ефект без негативного впливу на функціональні групи мікроорганізмів [2, 3].

Хімічні методи забезпечують швидкий початковий ефект, проте їх застосування обмежене ризиком неповного вирішення проблеми та можливістю повторного спухання. Оптимізація процесних параметрів (F/M, аерація) демонструє поступовий, але стабільний ефект, що робить цей підхід оптимальним для довгострокової профілактики спухання.

Комплексне дослідження 2025 року підкреслює важливість інтегрованих, багатогранних стратегій, що враховують екологічний баланс всередині систем активного мулу для досягнення довгострокового контролю спухання [2]. Оцінка різноманітних стратегій контролю від хімічних до біологічних та фізичних методів підкреслює потенціал таких технологій, як quorum quenching та магнітні поля у вирішенні проблем спухання.

Застосування мультидисциплінарного підходу, що поєднує мікробну екологію, процесне інженірування та технологічні інновації, забезпечує холістичну перспективу на виклики спухання мулу. Важливим є розуміння, що жоден окремий метод не є повністю ефективним, тому необхідна комбінація підходів з урахуванням специфіки конкретних очисних споруд.

Висновки

Проведений аналіз сучасних наукових досліджень 2023-2025 років засвідчує суттєву трансформацію підходів до розуміння та контролю проблеми виносу активного мулу. Якщо традиційна парадигма фокусувалася виключно на нитчастих бактеріях як причині спухання, то сучасні протеомічні та молекулярні дослідження розкрили складну взаємодію між структурними змінами екстрацелюлярних полімерних речовин, електростатичними властивостями бактеріальних клітин та фізико-хімічними параметрами середовища. Встановлення зв'язку між співвідношенням білків і полісахаридів та седиментаційними властивостями мулу створює теоретичну основу для розробки превентивних стратегій контролю.

Революційним досягненням останніх років стала конвергенція біотехнологій, інформаційних технологій та мікробної екології. Інтеграція високопродуктивного секвенування з алгоритмами машинного навчання не лише підвищила точність діагностики до 99%, але й дозволила перейти від реактивного до проактивного управління системами біологічного очищення.

Динамічні графові згорткові мережі демонструють потенціал для створення систем автоматизованого контролю в режимі реального часу, що є критично важливим для великих міських та промислових очисних споруд.

Особливої уваги заслуговує парадигмальний зсув від неспецифічних хімічних методів контролю до таргетованих біологічних підходів. Успішне застосування бактеріофагів та стратегії періодичного голодування підтверджує можливість специфічного впливу на проблемні види нитчастих бактерій зі збереженням функціональної структури мікробної спільноти. Трансформація спухлого мулу у гранулоподібну структуру за 14 діб не лише вирішує проблему седиментації, але й відкриває перспективи для зменшення енергетичних витрат на аерацію та утилізацію надлишкового мулу.

Виявлення кореляції між нитчастими бактеріями та генами антибіотикорезистентності розширює розуміння проблеми спухання мулу за межі операційної ефективності очисних споруд, додаючи важливий епідеміологічний вимір. Це підкреслює необхідність розгляду систем біологічного очищення не лише як технологічної інфраструктури, але й як критичного компонента системи охорони здоров'я, що вимагає комплексного підходу до управління мікробними ризиками.

Перспективи подальших досліджень вбачаються у декількох напрямках. По-перше, необхідна розробка широкого спектру специфічних бактеріофагів для контролю 94 ідентифікованих видів нитчастих бактерій з урахуванням їх екологічних особливостей. По-друге, удосконалення алгоритмів машинного навчання повинно включати не лише прогнозування спухання, але й автоматизовану рекомендацію оптимальних коригувальних дій. По-третє, критично важливим є створення інтегрованих систем управління, що поєднують молекулярну діагностику, процесний контроль та управління ризиками антибіотикорезистентності в єдиній платформі для забезпечення сталої роботи очисних споруд.

Наукова новизна роботи полягає у формуванні цілісного міждисциплінарного погляду на проблему виносу активного мулу, що інтегрує досягнення молекулярної біології, машинного навчання, екології та епідеміології на основі критичного аналізу найсучасніших досліджень 2023-2025 років.

Практична значущість результатів визначається можливістю безпосереднього впровадження описаних методів діагностики та контролю на очисних спорудах різного масштабу та призначення, що дозволить підвищити надійність біологічного очищення, зменшити операційні витрати та забезпечити стабільну якість очищених стічних вод з одночасним контролем мікробіологічних ризиків.

Перелік використаних джерел

- [1] Strategies for controlling filamentous bulking in activated sludge wastewater treatment plants: The old and

- the new / Sam T., Le Roes-Hill M., Hoosain N., Welz P. *Water*. 2022. Vol. 14(20). Article 3223. DOI: <https://doi.org/10.3390/w14203223>.
- [2] Advancing sludge bulking control in wastewater treatment: A comprehensive review of detection, identification, and strategic interventions / H. Sun et al. *Sustainable Horizons*. 2025. Vol. 15. Article 100142. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.horiz.2025.100142>.
- [3] Biotechnology revival: in situ sludge minimization in wastewater / Chen Y., Jiang X., Yang M., Wang Z. *Frontiers in Microbiology*. 2025. Vol. 16. DOI: <https://doi.org/10.3389/fmicb.2025.1603215>.
- [4] Filamentous bacteria-induced sludge bulking can alter antibiotic resistance gene profiles and increase potential risks in wastewater treatment systems / Ma Y., Qiao Y., Zhang X., Ye L. *Environment International*. 2024. Vol. 190. Article 108920. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.envint.2024.108920>.
- [5] New insights into filamentous sludge bulking: The potential role of extracellular polymeric substances in sludge bulking in the activated sludge process / W. M. Li et al. *Chemosphere*. 2020. Vol. 248. Article 126012. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2020.126012>.
- [6] The mechanism of extracellular polymeric substances in the formation of activated sludge flocs / Q. An et al. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*. 2023. Vol. 663. Article 131009. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.colsurfa.2023.131009>.
- [7] Population Composition, Physiology and Ecology of Filamentous Bacteria in Activated Sludge / S. Gao et al. *Processes*. 2024. Vol. 12(10). Article 2156. DOI: <https://doi.org/10.3390/pr12102156>.
- [8] Filamentous bacteria in activated sludge: Geographic distribution and impact of treatment processes / R. Liu et al. *Journal of Environmental Management*. 2025. Vol. 379. Article 124859. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2025.124859>.
- [9] Alterations in microbial communities and antibiotic resistance genes pre- and post-sludge bulking in a wastewater treatment plant / L. Zhang et al. *Environmental Pollution*. 2025. Vol. 376. Article 126391. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2025.126391>.
- [10] Prediction of activated sludge sedimentation performance using deep transfer learning / J. Wang et al. *ACS ES&T Engineering*. 2024. Vol. 4(6). Pp. 1367-1377. DOI: <https://doi.org/10.1021/acsestengg.3c00631>.
- [11] A hybrid extreme learning machine and deep belief network framework for sludge bulking monitoring in a dynamic wastewater treatment process / Usman S., Jorge L., Hai-Tra N., Yoo C. *Journal of Water Process Engineering*. 2022. Vol. 46. Article 102580. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jwpe.2022.102580>.
- [12] GenomeFISH: genome-based fluorescence in situ hybridization for strain-level visualization of microbial communities / J. P. Engelberts et al. *The ISME Journal*. 2025. Vol. 19(1). Article wraf138. DOI: <https://doi.org/10.1093/ismejo/wraf138>.
- [13] Insight into sludge bulking in a full-scale wastewater treatment plant: Quorum sensing, microbial community, and metabolic characteristics / L. Liu et al. *Environmental Technology and Innovation*. 2024. Vol. 34. Article 103562. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.eti.2024.103562>.
- [14] Non-filamentous sludge bulking induced by exopolysaccharide variation in structure and properties during aerobic granulation / S. Wang et al. *Science of The Total Environment*. 2023. Vol. 876. Article 162786. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2023.162786>.
- [15] Poelmans S., Dobbeleers T., Dries J. Bacterial community and filamentous population of industrial wastewater treatment plants in Belgium. *Applied Microbiology and Biotechnology*. 2024. Vol. 108. Pp. 1–16. DOI: <https://doi.org/10.1007/s00253-023-12822-8>.
- [16] Pathways of inhibition of filamentous sludge bulking by slowly biodegradable organic compounds / C. Gao et al. *Journal of Environmental Sciences*. 2025. Vol. 150. Pp. 104-115. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jes.2024.03.021>.
- [17] Towards sludge bulking diagnosis via dynamic attention graph neural network / Y. Chen et al. *Journal of Water Process Engineering*. 2025. Vol. 69. Article 106774. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jwpe.2024.106774>.
- [18] Sludge bulking monitoring in industrial wastewater treatment plants through graphical methods: A dynamic graph embedding and Bayesian networks approach / J. Loy-Benitez et al. *Journal of Environmental Management*. 2023. Vol. 345. Article 118804. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2023.118804>.

DIAGNOSIS AND CONTROL OF ACTIVATED SLUDGE BULKING AT BIOLOGICAL WASTEWATER TREATMENT PLANTS

Kopanytsia O.B.

leading forensic expert of the Laboratory of environmental and ecological research of the Kyiv Research institute of forensic expertise of the Ministry of justice of Ukraine; postgraduate student, State scientific institution «Institute of ecological restoration and development of Ukraine», Kyiv, ORCID: <https://orcid.org/0009-0003-8939-2919>, e-mail: ecology.expert.2020@gmail.com

The article examines the problem of activated sludge carryover from secondary clarifiers of biological wastewater treatment plants based on the most recent research from 2023-2025. The relevance of the study is determined by the fact that sludge bulking not only deteriorates the quality of treated effluent but also increases the risks of antibiotic resistance gene dissemination. The aim of the work is a comprehensive analysis of the problem with emphasis on innovative diagnostic and control methods. The study is based on systematization of scientific publications devoted to molecular mechanisms of sludge bulking, diagnostic technologies, and control strategies. The role of extracellular polymeric substances and filamentous bacteria was analyzed using proteomic methods and high-throughput sequencing. The application of machine learning methods for early bulking detection and biological control methods was examined. It was established that changes in the composition of extracellular polymeric substances lead to electrostatic repulsion between bacterial cells. Ninety-four species of filamentous bacteria were identified, over 74% of which contain antibiotic resistance genes. It was demonstrated that dynamic graph convolutional networks enable achieving 99% bulking detection accuracy with zero false alarms. The periodic starvation method ensures reduction of *Thiothrix* abundance from over 50% to less than 1% within 14 days. Biological methods using bacteriophages allow specific targeting of problematic species without negative impact on functional groups of microorganisms. The scientific novelty lies in systematization of the most recent advances in understanding molecular mechanisms of bulking and innovative approaches to its diagnosis and control. The practical significance of the results lies in the possibility of implementing the described methods at actual treatment plants to enhance the reliability of biological treatment systems. Further research should be directed toward development of specific biological agents, improvement of machine learning algorithms, and creation of integrated management systems. **Keywords:** activated sludge, sludge bulking, biomass carryover, filamentous bacteria, high-throughput sequencing, machine learning, diagnostics, biological control.

References

- [1] T. Sam, M. Le Roes-Hill, N. Hoosain, and P. Welz, "Strategies for controlling filamentous bulking in activated sludge wastewater treatment plants: The old and the new," *Water*, vol. 14(20), article 3223, 2022. doi: [10.3390/w14203223](https://doi.org/10.3390/w14203223).
- [2] H. Sun et al., "Advancing sludge bulking control in wastewater treatment: A comprehensive review of detection, identification, and strategic interventions," *Sustainable Horizons*, vol. 15, article 100142, 2025. doi: [10.1016/j.horiz.2025.100142](https://doi.org/10.1016/j.horiz.2025.100142).
- [3] Y. Chen, X. Jiang, M. Yang, and Z. Wang, "Biotechnology revival: in situ sludge minimization in wastewater," *Frontiers in Microbiology*, vol. 16, 2025. doi: [10.3389/fmicb.2025.1603215](https://doi.org/10.3389/fmicb.2025.1603215).
- [4] Y. Ma, Y. Qiao, X. Zhang, and L. Ye, "Filamentous bacteria-induced sludge bulking can alter antibiotic resistance gene profiles and increase potential risks in wastewater treatment systems," *Environment International*, vol. 190, article 108920, 2024. doi: [10.1016/j.envint.2024.108920](https://doi.org/10.1016/j.envint.2024.108920).
- [5] W.M. Li et al., "New insights into filamentous sludge bulking: The potential role of extracellular polymeric substances in sludge bulking in the activated sludge process," *Chemosphere*, vol. 248, article 126012, 2020. doi: [10.1016/j.chemosphere.2020.126012](https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2020.126012).
- [6] Q. An, Y. Chen, M. Tang, B. Zhao, S. Deng, and Z. Li, "The mechanism of extracellular polymeric substances in the formation of activated sludge flocs," *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, vol. 663, article 131009, 2023. doi: [10.1016/j.colsurfa.2023.131009](https://doi.org/10.1016/j.colsurfa.2023.131009).
- [7] S. Gao, W. Pan, L. Niu, H. Lu, and X. Wang, "Population Composition, Physiology and Ecology of Filamentous Bacteria in Activated Sludge," *Processes*, vol. 12(10), article 2156, 2024. doi: [10.3390/pr12102156](https://doi.org/10.3390/pr12102156).
- [8] R. Liu et al., "Filamentous bacteria in activated sludge: Geographic distribution and impact of treatment processes," *Journal of Environmental Management*, vol. 379, article 124859, 2025. doi: [10.1016/j.jenvman.2025.124859](https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2025.124859).
- [9] L. Zhang, S. Wang, Y. Jia, Z. Liu, J. Yao, and Y. Chen, "Alterations in microbial communities and antibiotic resistance genes pre- and post-sludge bulking in a wastewater treatment plant," *Environmental Pollution*, vol. 376, article 126391, 2025. doi: [10.1016/j.envpol.2025.126391](https://doi.org/10.1016/j.envpol.2025.126391).
- [10] J. Wang, et al., "Prediction of activated sludge sedimentation performance using deep transfer learning," *ACS ES&T Engineering*, vol. 4(6), pp. 1367-1377, 2024. doi: [10.1021/acsestengg.3c00631](https://doi.org/10.1021/acsestengg.3c00631).
- [11] S. Usman, L. Jorge, N. Hai-Tra, and C. Yoo, "A hybrid extreme learning machine and deep belief network framework for sludge bulking monitoring in a dynamic wastewater treatment process," *Journal of Water Process Engineering*, vol. 46, article 102580, 2022. doi: [10.1016/j.jwpe.2022.102580](https://doi.org/10.1016/j.jwpe.2022.102580).
- [12] J. P. Engelberts, et al., "GenomeFISH: genome-based fluorescence in situ hybridization for strain-level visualization of microbial communities," *The ISME Journal*, vol. 19(1), article wraf138, 2025. doi: [10.1093/ismejo/wraf138](https://doi.org/10.1093/ismejo/wraf138).
- [13] L. Liu, Y. Wang, H. Chen, X. Zhang, Q. Guo, and M. Li, "Insight into sludge bulking in a full-scale wastewater treatment plant: Quorum sensing, microbial community, and metabolic characteristics," *Environmental Technology and Innovation*, vol. 34, article 103562, 2024. doi: [10.1016/j.eti.2024.103562](https://doi.org/10.1016/j.eti.2024.103562).
- [14] S. Wang, G. Wang, P. Yan, Y. Chen, F. Fang, and J. Guo, "Non-filamentous sludge bulking induced by

- exopolysaccharide variation in structure and properties during aerobic granulation,” *Science of The Total Environment*, vol. 876, article 162786, 2023. doi: **10.1016/j.scitotenv.2023.162786**.
- [15] S. Poelmans, T. Dobbeleers, and J. Dries, “Bacterial community and filamentous population of industrial wastewater treatment plants in Belgium,” *Applied Microbiology and Biotechnology*, vol. 108, pp. 1-16, 2024. doi: **10.1007/s00253-023-12822-8**.
- [16] C. Gao, F. Yang, Z. Tian, D. Sun, W. Liu, and Y. Peng, “Pathways of inhibition of filamentous sludge bulking by slowly biodegradable organic compounds,” *Journal of Environmental Sciences*, vol. 150, pp. 104-115, 2025. doi: **10.1016/j.jes.2024.03.021**.
- [17] Y. Chen et al., “Towards sludge bulking diagnosis via dynamic attention graph neural network,” *Journal of Water Process Engineering*, vol. 69, article 106774, 2025. doi: **10.1016/j.jwpe.2024.106774**.
- [18] J. Loy-Benitez, S. Tariq, H. Nguyen, S. Heo, and C. Yoo, “Sludge bulking monitoring in industrial wastewater treatment plants through graphical methods: A dynamic graph embedding and Bayesian networks approach,” *Journal of Environmental Management*, vol. 345, article 118804, 2023. doi: **10.1016/j.jenvman.2023.118804**.

Стаття надійшла 10.11.2025

Стаття прийнята 02.12.2025

Стаття опублікована 29.12.2025

Цитуйте цю статтю як: Копаниця О. Б. Діагностика та контроль спухання активного мулу на біологічних очисних спорудах. *Вісник Приазовського державного технічного університету. Серія: Технічні науки. 2025. Вип. 52. С. 158-165. DOI: <https://doi.org/10.31498/2225-6733.52.2025.351070>.*