

УДК 504.06

В. О. Юрченко, д.т.н., професор, проф. каф. (ORCID 0000-0001-7123-710X)

С. О. Ткаченко, аспірант (ORCID 0000-0001-9542-5869)

Ю. С. Левашова, к.т.н., доцент, доц. каф. (ORCID 0000-0001-6323-2114)

Н. О. Косенко, к.т.н., доцент, доц. каф. (ORCID 0000-0002-4554-0305)

О. Г. Мельнікова, к.т.н., доц. каф. (ORCID 0000-0001-5649-2997)

Г. О. Чернишченко, к.б.н., доцент, доц. каф. (ORCID 0000-0002-0685-925X)

Харківський національний університет міського господарства

ім. О. М. Бекетова, Харків, Україна

КІЛЬКІСНИЙ КОНТРОЛЬ ТЕХНОЛОГІЧНИХ ХАРАКТЕРИСТИК АКТИВНОГО МУЛУ В ЕКОЛОГІЧНИХ БІОТЕХНОЛОГІЯХ

Для кількісного контролю технологічних характеристик активного мулу в біологічних очисних спорудах в рамках представленого дослідження розроблено комп'ютеризовану методику, використання якої підвищує надійність та техногенну безпеку експлуатації біологічних очисних споруд. Методика базується на визначенні в кількісних показниках геометричних (площі, об'єму) та морфологічних (форми та структури) характеристик пластівців активного мулу при обробці мікрофотознімків мулу в програмному продукті Imadge J. Фотографування мікроскопічних зображень мулу виконували при збільшенні в 100 разів і масштабуванні з допомогою окуляра-мікрометра. Наразі морфологічні характеристики активного мулу визначають тільки візуально, що не дозволяє усереднити дані великої кількості зразків та загалом зумовлює суб'єктивний характер оцінок. Дослідження пластівців мулу в налипаннях на мембранах мембранного біологічного реактора показали, що пластівці з поверхневої аеробної зони налипань мають дещо круглішу форму, менші лінійні розміри, площу та об'єм, ніж пластівці мулу з анаеробної зони в глибині налипань. Дослідження впливу іонів магнію на властивості пластівців активного мулу показали, що при збільшенні концентрації магнію в муловій рідині спостерігається зменшення округлості пластівців, незначне погіршення структури, проте відбувається значно суттєвіше збільшення лінійних розмірів (майже на 60 %), площі (на 134 %) і надзвичайне збільшення (на 275 %) об'єму пластівців. Ці показники свідчать про покращення технологічних властивостей пластівців та зменшення їх здатності до налипань на мембранах реактора. Розроблена комп'ютеризована методика дозволяє значно деталізувати й уточнити результати візуальних оцінок технологічних характеристик пластівців активного мулу та у великому масиві даних виявляти найдрібніші зміни морфологічних показників пластівців в різних технологіях очистки стічних вод.

Ключові слова: активний мул, пластівці, технологічні характеристики, форма, розміри, структура, седиментаційні властивості, налипання

1. Вступ

Під сталим міським розвитком розуміють соціально, економічно та екологічно збалансовані зміни суспільно-територіальної системи міста, спрямовані на максимально повну реалізацію всіх складових його потенціалу і запобігання тенденціям погіршення якості життя населення [1, 2]. Сталій розвиток міста впливає на можливість реалізації принципів сталого розвитку систем більш високого рівня та залежить від сталості усіх складових елементів, що входять до міської соціально-економічної системи. Це безумовно стосується експлуатації систем життєзабезпечення міста, одна з яких – водовідведення, носить яскравий природоохоронний напрям. В рамках концепції сталого розвитку навколишнє природне середовище займає центральне місце в економіці і розглядається як частина системи, що підтримує існування суспільства. Тому в реалізації доктрини сталого розвитку, а саме сталого міського розвитку, особливе місце належить природоохоронним спорудам та технологіям, що забезпечують надійність цього захисту [3].

Системи відведення стічних вод забезпечують екологічну безпеку водокористування міста і захист природного водного середовища від забруднення рідкими антропогенними відходами. Стабільність роботи міських очисних споруд є запорукою стабільності життєзабезпечення міста та його екологічної безпеки для природного середовища. Як свідчать дослідження вітчизняних та закордонних фахівців [4–6], ключовою ланкою надзвичайно складного процесу перетворення забрудненої, токсичної рідини промислових або побутових стічних вод в чисту, екологічно безпечну, біологічно повноцінну воду є біологічна очистка, яка на більшості очисних споруд в Україні здійснюється при обробці стічних вод активним мулом в аеротенках.

Управління та ретельний контроль стану активного мулу в біологічних очисних спорудах є запорукою експлуатаційної надійності цих технічних систем. Контроль стану активного мулу здійснюється шляхом оцінки його якості, в тому числі при обліку індикаторних мікроорганізмів, визначенні активності мулу в окисленні певних забруднень, оцінці седиментаційної здатності [5, 7–10]. Такі дослідження є необхідним інструментом як для проведення науково-дослідних робіт, так і для управління експлуатацією очисних споруд.

Стабільність будь-якої технології забезпечують за допомогою технічних та технологічних засобів, і базуються при їх використанні на даних технологічного контролю процесу, а особливо його ключових ланок. Сучасні біотехнології захисту навколишнього середовища потребують складного комплексного контролю процесу із залученням хімічних, гідробіологічних біохімічних та інших методів, необхідних в першу чергу для управління активними мікробіоценозами. Необхідно, щоб ці методи були експресними, придатними для автоматизації та аналізу великої кількості проб, а їх показники – кількісними, придатними до використання в математичному моделюванні. Тому недосконалість методів технологічного контролю процесів в біологічних очисних спорудах є актуальною проблемою.

2. Аналіз літературних даних та постановка проблеми

Життєдіяльність активного мулу в біологічних очисних спорудах забезпечує сорбцію забруднень зі стічних вод, деструкцію забруднень і ефективне відділення очищеної рідини від біомаси. Здатність активного мулу утворювати міцні, швидко осідаючі пластівці є, як свідчать [4, 5, 7], однією з основних його властивостей, що використовується для організації процесу біологічної очистки стічних вод у системі аеротенк – вторинний відстійник. Утворення пластівців обумовлене присутністю в мікробіоценозі активного мулу бактерій, що виділяють біополімерифлокулянти, які з'єднують окремі клітини в агрегати (флоки), здатні укрупнюватися й відділятися від обробленої рідини. При цьому, кількісні показники характеристик мулу та динаміка їх зміни взагалі не розглядаються. За даними [8, 10] активність цього процесу залежить від багатьох факторів, у тому числі – видового складу мікрофлори й мікрофауни, кисневого режиму, фізико-технічних параметрів і ін. «Спухання» активного мулу – порушення процесу відділення активного мулу від очищеної стічної рідини, обумовлено інтенсивним розвитком нитчастих мікроорганізмів, внаслідок чого мул втрачає здатність до осадження [7, 11–14]. Залишаються далеко не вирішеними питання раннього виявлення погіршень седиментаційних властивостей активного мулу, визначення експлуатаційних впливів, що керують цими властивостями мулу, та спрямоване їх використання, що дозволить інтенсифікувати біологічну очистку, підвищити її ефективність та надійність.

Для седиментації мулу значущими факторами є морфологічні властивості його пластівців (розмір, структура, щільність, форма) [15–17]. та стан популяції нитчастих мікроорганізмів [18, 19]. «Круглі» пластівці осаджуються краще, ніж пластівці з неправильною формою, щільні пластівці осаджуються швидше, ніж відкриті скупчення. Характеристики пластівців становлять приблизно 30% показників, необхідних для запропонованої Д. Ейкельбумом схеми діагностування якості активного мулу (добра, середня та недостатня) (табл. 1) [7]. Проте в діагностиці активного мулу, запропонованій Д. Ейкельбумом, такі важливі показники його якості, як структура, міцність та форма, характеризуються не кількісно, а лише якісно, що надзвичайно ускладнює їх практичне використання на діючих очисних спорудах.

Наразі морфологічні характеристики пластівців мають вплив на експлуатаційні характеристики не тільки традиційних аеротенків, але й новітніх біологічних очисних споруд – мембранних біологічних реакторів (МБР). В МБР об'єднуються окисно-деструктивна потужність процесів біологічної очистки з ефективністю мембранної фільтрації [20, 21]. Система МБР дозволяє суттєво підвищити концентрацію активного мулу у споруді, змінити кінетику та інші показники автотрофних і гетеротрофних біохімічних процесів, що протікають у системі, поглибити видалення сполук біогенних елементів. Порушення технологічних характеристик активного мулу (наприклад, седиментаційних властивостей) не призводить до таких масштабних негативних наслідків, як у спорудах із традиційними аеротенками. Проте морфологія пластівців впливає на такий важливий експлуатаційний показник МБР як обростання мембран та падіння швидкості мембранної фільтрації. Теоретично чим більше пластівець, тим менше тенденція до налипань та вище швидкості мембранної фільтрації [21, 22]. Є повідомлення в науково-технічній літературі про позитивний вплив іонів Mg^{2+} на властивості флоків активного мулу в МБР та зменшення активності налипань на мембранах при додаванні солей цього лужно-земельного металу в стічні води, що оброблюються [22]. Ефективність дії іонів Mg^{2+} в цих дослідженнях контролювали за величиною швидкості засмічення мембран, яку вираховували за мембранним опором. Однак, морфологічні властивості активного мулу в МБР при цьому не контролювали, що суттєво знижувало доказовість представлених висновків. Отже і ця біотехнологія гостро потребує методики кількісного визначення геометричних та морфологічних показників активного мулу, причому, при статистичній обробці великого масиву даних.

Табл. 1. Критерії для встановлення якості активного мулу (за Eikelboom D. [7])

Показники	Добра	Середня	Недостатня
Індекс нитчастих	<3	3–4	4–5
Вільно живучі клітини	0–1	2–3	≥3
Спірили	0	1	≥ 2
Співвідношення в'їчасті : амеби	>1	<1	0
Джгутикові : амеби	0	1–2	≥ 3
%-ий вміст пластівців > 25µm	> 80–90	> 50–70	< 50
Структура пластівців	компактна	відкрита	-
Міцність пластівців	щільний	слабкий	-
Форма пластівців	кругла	неправильна	-

Деякі з зазначених в табл. 1 морфологічних показників (структура, форма, щільність) активного мулу використовуються при моніторингу його стану в технологічному контролі процесів очистки на діючих очисних спорудах в Україні. Проте визначення зазначених характеристик проводиться лише якісно, візуально, оцінки носять суб'єктивний характер і не оброблюються статистично.

Таким чином, невирішеною частиною розглянутої проблеми є відсутність методів кількісного визначення технологічних характеристик пластівців активного мулу в біологічних очисних спорудах.

3. Мета та завдання дослідження

Метою дослідження є розробка комп'ютеризованої методики кількісного визначення технологічних характеристик пластівців активного мулу для підвищення надійності та техногенної безпеки експлуатації біологічних очисних споруд.

Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити наступні задачі:

1. Визначити за допомогою розробленої комп'ютеризованої методики кількісні характеристики округлості та структури пластівців активного мулу в фотоматеріалах Д. Ейкельбума, що якісно визначають цей показник.

2. Дослідити мул з поверхневої аеробної та глибинної анаеробної зон налипань на мембранах мембранних біологічних реакторів і з допомогою розробленої комп'ютеризованої методики кількісно визначити округлість та структуру пластівців.

3. Експериментально дослідити вплив концентрації іонів магнію на властивості пластівців активного мулу при кількісному контролі морфологічних характеристик пластівців (округлості й структури) та геометричних показників (площі та об'єму) за допомогою розробленої комп'ютеризованої методики.

4. Матеріали та методи дослідження

Об'єктом дослідження є активний мул з аеротенку міських біологічних очисних споруд і налипання на мембранах МБР, в якому обробляли промислові стічні води. В налипаннях розрізняли поверхневий шар (аеробна зона) та глибинний шар (анаеробна зона).

Предмет дослідження – морфологічні та геометричні характеристики пластівців активного мулу.

Робоча гіпотеза дослідження – використання для кількісного визначення морфологічних та геометричних характеристик пластівців активного мулу програми, що обробляє зображення, робить арифметичні операції та геометричні перетворення. Дослідження морфологічних та геометричних характеристик пластівців активного мулу проводились експериментально мікроскопічними методами з візуалізацією, фотофіксацією та наступною цифровою обробкою зображень.

Дослідження проведено вперше для комп'ютеризованої методики кількісного визначення технологічних характеристик активного мулу використали обробку мікрофотознімків мулу в програмному продукті Imadge J. Ця програма підтримує стандартні функції обробки зображень, такі як логічні та арифметичні операції між зображеннями, маніпуляції з контрастністю, підвищення різкості, згладжування, виявлення меж та медіанний фільтр. Комплекс дозволяє робити різні геометричні перетворення, такі як масштабування, поворот або відображення. Комплекс підтримує будь-яку кількість зображень, що одночасно використовуються, обмеження пов'язане тільки з об'ємом доступної пам'яті. Результатом розрахунку

програми були наступні показники: площа пластівців, їх розмір (середній проєктований діаметр, мкм) та об'єм, структура (α' – відношення довжини частинки до її проєктованого діаметру), округлість.

Фотографування мікроскопічних зображень мулу виконували при збільшенні в 100–150 разів при мікроскопуванні проб збовтаної мулової рідини з використанням біологічного мікроскопу Ломо Мікмед-1. Для масштабування розміру пластівців для подальших досліджень паралельно виконували прямі вимірювання розміру деяких пластівців за допомогою окуляр-мікрометра.

При обробці мікрофотознімків виконували наступні дії:

- після відкриття файлу зображення збільшували його до зручного розміру;
- використовуючи інструмент виділення ліній, позначали відому довжину (яку попередньо при мікроскопуванні вимірювали за допомогою окуляр мікрометра);

- фіксували розмір та одиницю вимірювання;
- робили зображення чорно-білим і збільшували контрастність для сегментування частинок та фону;

- зафарбовували пусті місця;

- задавали характеристики, які необхідно аналізувати;

- отримували результати виміру геометричних характеристик.

Для кожного варіанту досліду обробляли не менше 10 мікрофотознімків.

Під розміром частинки зазвичай розуміють її діаметр. За допомогою цієї величини можна однозначно охарактеризувати лише частинки, що мають сферичну форму. У разі коли частинка має неправильну форму, вводять поняття еквівалентного діаметра. Одним із варіантів визначення еквівалентного діаметра частинок є використання середнього проєктованого діаметра, який є діаметром кола, площа якого дорівнює площі зображення проєкції частинки. Оскільки площа проєкції сферичної частинки дорівнює:

$$S_{\Pi} = \frac{\pi d^2}{4}, \quad (1)$$

то середній проєктований діаметр розраховується як:

$$d_{\Pi} = \sqrt{\frac{4S_{\Pi}}{\pi}}. \quad (2)$$

Коефіцієнт округлості C_{irc} визначається за формулою:

$$C_{irc} = \frac{4\pi S_{\Pi}}{P^2}, \quad (3)$$

де P – периметр.

Відомо, що чим ближче значення коефіцієнта округлості до нуля, тим менш округла форма пластівців.

Діаметр Ферета – максимальна відстань між двома паралельними дотиками до частинки. Min Feret – це мінімальна відстань між двома паралельними дотика-

ми до частинки.

Форму частинок у числовому вираженні характеризують за допомогою різних коефіцієнтів, що враховують міру неправильності форми. Найчастіше з таких коефіцієнтів використовується об'ємний коефіцієнт форми частинок – α_v . Цей коефіцієнт визначається за рівнянням:

$$\alpha_v = \frac{0,455c}{\sqrt{\alpha'}}, \quad (4)$$

де c – відношення товщини частинки до її проектованого діаметру, α' – відношення довжини частинки до її проектованого діаметру.

Коефіцієнт форми дозволяє розрахувати об'єм частинки неправильної форми:

$$V = \alpha_v d_{\text{пр}}^3. \quad (5)$$

Для розрахування a' довжину частинки визначали як добуток (MinFeret)·AR. Тоді a' розраховували за формулою:

$$\alpha' = \frac{(\text{MinFeret})AR}{d_n}. \quad (6)$$

Чим ближче α' до 1, тим компактніша частинка.

При лабораторному дослідженні впливу іонів Mg^{2+} на кількісні морфологічні показники пластівців активного мулу (за допомогою розробленої комп'ютеризованої методики) в зразки мулової рідини (100 мл) додавали аліквоту розчину сульфату магнію для збільшення за розрахунком концентрації Mg^{2+} на 2 мг/л та 4 мг/л в варіантах досліду. Після цього мулову суміш аерували, і через 1 год відбирали зразки для мікроскопування та визначення морфологічних характеристик пластівців активного мулу.

Теоретичні розрахунки і статистичну обробку експериментальних даних виконували із застосуванням комп'ютерної програми Microsoft Excel. В таблицях наведені середні значення показників.

5. Результати розробки методики кількісного визначення технологічних характеристик пластівців активного мулу

5.1 Розробка кількісних еталонів визначення морфологічних характеристик пластівців активного мулу

В якості еталонів при визначенні кількісних показників округлості та структури пластівців використали мікрофотознімки, представлені в роботі Д. Ейкельбума [7].

В результаті обробки матеріалів Д. Ейкельбума в розробленій програмі одержані дані, представлені в табл. 2. В цій таблиці представлені головним чином відносні показники (середні значення). Абсолютні значення лінійних вимірів (MinFeret та d_n) умовні, оскільки ми не мали даних для масштабування виміру пластівців на фотознімках. Але ці дані придатні для визначення відносних показників. На фотознімках 13 та 15 представлений активний мул доброї якості (за Д. Ейкельбумом), на фотознімках 14 та 16 – недостатньої.

Табл. 2. Геометричні характеристики пластівців активного мулу, розраховані за фотознімками Д. Ейкельбума [7]

Мікрофотознімок	Circ	Min Feret*, мкм	AR	d_n^* , мкм	a'
15	0,51	71,80	1,88	90,11	1,50
17	0,54	62,50	1,45	69,43	1,30
18	0,60	21,05	1,63	24,08	1,40
19	0,65	26,80	1,78	32,38	1,43
14	0,08	95,81	1,54	75,70	1,95
16	0,05	94,56	1,51	84,28	1,70

* – дані умовні, не масштабувались за виміром пластівців в препараті при мікроскопуванні.

Таким чином, за даними Д. Ейкельбума його формулюванню показника форми «кругла» відповідають пластівці активного мулу з Circ 0,51–0,65, а формулюванню показника форми як «неправильна» відповідають пластівці активного мулу з $Circ \leq 0,08$. А в проміжку між значеннями Circ від 0,081 до 0,50 знаходяться пластівці, форму яких можливо охарактеризувати як проміжну між формою «неправильною» та «круглою» (наприклад, «дещо неправильна», «дещо кругла», «слабо кругла» та ін.). Пластівці з показником a' 1,30–1,50 за даними Д. Ейкельбума відповідають його визначенню показника структури «компактна», а пластівці активного мулу з показником a' 1,70–1,81 відповідають його характеристиці структури «відкрита». В проміжку між значеннями a' від 1,51 до 1,69 знаходяться пластівці, структуру яких можливо охарактеризувати як проміжну між структурою «компактною» та «відкритою» (наприклад «слабо компактна», або «дещо відкрита»).

5.2. Визначення геометричних та морфологічних характеристик пластівців мулу в налипаннях

Результати дослідження пластівців мулу в налипаннях на мембранах, які відбирали з поверхні (аеробна зона) та в глибині (анаеробна зона) представлені в табл. 3 і на рис. 1. Як видно з геометричних характеристик (лінійних, площинного та об'ємного показників) пластівців біоплівки мулу в налипаннях на мембрані в МБР (рис.1), в поверхневому шарі пластівці значно дрібніші ніж в глибині налипань. Це може свідчити про збільшення розмірів пластівців за глибиною шарів налипань.

Як видно з представлених даних (рис. 1), пластівці мулу з аеробної зони мають дещо круглішу форму (максимальне значення коефіцієнта округлості 1,0), менші розміри (за значенням Feretta d_n), меншу площу та об'єм. Причому, за абсолютним значенням Circ показник форми пластівців мулу і в аеробній, і в анаеробній зоні налипань відповідає оцінці «кругла». За показником структура пластівця (який розглядали за значенням α') досліджувані мули практично не відрізнялись, їх структура була скоріше закрыта і досить компактна. Хоча можна відзначити, що в анаеробній зоні структура пластівців була дещо відкритіша, що кореспондується з дещо меншою округлістю пластівців в цій зоні. Встановлені особливості, вірогідно, відбивають зміну розмірів пластівців мулу в динаміці формування налипань на мембранах (декілька діб), а також специфічних біохімічних процесів в товщі мембран. Мул з аеробної зони мав світло коричневий колір, а мул з анаеробної зони – чорний. Зазначені характеристики свідчать про низьку якість активного мулу з анаеробної зони та переважання в ньому не окисних, а відновних процесів.

Табл. 3. Геометричні характеристики пластівців мулу, визначені з допомогою розробленої методики

Шар налипань	Площа, мкм ²	Розмір, мкм		Об'єм, мкм ³
		MinFerret	d _n	
Поверхневий (аеробна зона)	$\frac{4,50}{0,10 - 96,43}$	$\frac{1,99}{0,28 - 11}$	$\frac{1,66}{0,36 - 11}$	$\frac{15,5}{0,01 - 488,90}$
Глибинний (анаеробна зона)	$\frac{10,68}{0,14 - 111,07}$	$\frac{2,75}{0,38 - 11}$	$\frac{2,76}{0,43 - 11}$	$\frac{32,8}{0,03 - 489,90}$

В чисельнику середнє значення, в знаменнику – мінімальне та максимальне.

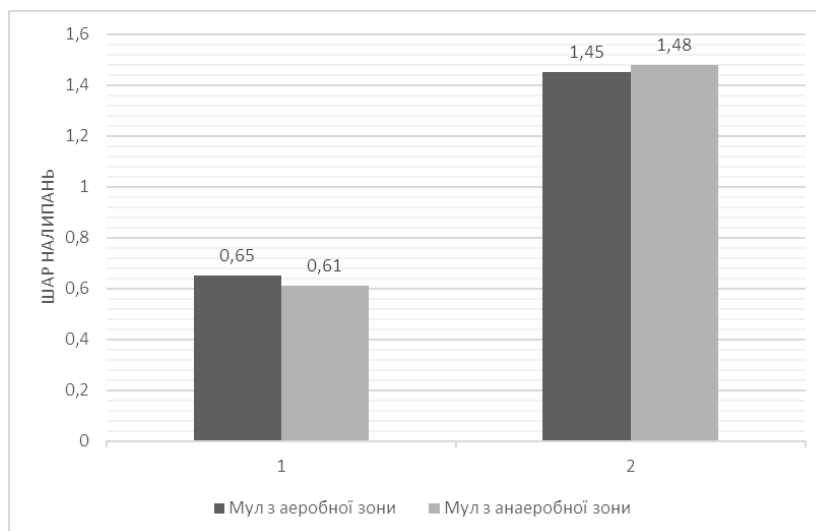


Рис. 1. Технологічні показники пластівців активного мулу: 1 - округлість Circ, 2 - структура α

5.3. Дослідження впливу іонів магнію на пластівці активного мулу

Розроблена методика кількісного визначення морфологічних характеристик активного мулу необхідна в дослідженнях та випробовування ефективності різних технологічних заходів, що покращують якість пластівців активного мулу в біологічних очисних спорудах. Результати лабораторного дослідження впливу іонів Mg^{2+} на морфологічні показники пластівців активного мулу (при контролі морфології пластівців за допомогою розробленої комп'ютеризованої методики) представлені в табл. 4 і на рис. 2.

Як видно з даних табл. 4 і рис. 2, при додаванні солей магнію в мулову суміш розмір та морфологічні показники пластівців активного мулу змінювались. Лінійні розміри, площа та об'єм пластівців із збільшенням концентрації магнію в муловій рідині зростали, причому особливо радикально при переході від концентрації магнію 11 мг/л до 13 мг/л. Вірогідно, що зміни концентрації магнію в діапазоні від 9 мг/л до 11 мг/л не суттєво впливали на ці характеристики пластівців активного мулу. А от при збільшенні концентрації магнію на 4 мг/л (від 9 мг/л до 13 мг/л) вже спостерігався суттєвий вплив додавання цього катіону на технологічні характеристики пластівців мулу. При збільшенні концентрації магнію в середовищі спостерігалась чітка тенденція зменшення округлості (при збільшенні від 9 мг/л до 13 мг/л на 31,0 %), що є негативною зміною. За абсолютним значенням Circ при концентрації магнію 9 мг/л та 11 мг/л показник форми пластівців відповідав оцінці «кругла», а при концентрації магнію 13 мг/л – вже не відповідав їй. В

цьому варіанті досліджу показник форми скоріше відповідав оцінці «дещо неправильна». Структура пластівців у другому варіанті досліджу покращилась (значення a' зменшилось), проте в третьому варіанті при збільшенні концентрації магнію в муловому середовищі до 13 мг/л значення a' збільшилось (порівняно з a' при 9 мг/л на 9,1 %). Отже, структура дещо погіршилась, що кореспондується з динамікою форми. За абсолютним значенням a' в варіантах досліджу при концентрації магнію 9 мг/л та 11 мг/л показник структури пластівців відповідав оцінці «компактна», а при концентрації магнію 13 мг/л – дещо не відповідав їй. В цьому варіанті досліджу показник структури скоріше відповідав оцінці «слабо компактна»

Табл. 4. Вплив додавання солей Mg^{2+} на розмір та морфологічні характеристики пластівців активного мулу, які визначені з допомогою розробленої методики

Концентрація Mg^{2+} , мг/л	Площа, мкм ²	Розмір, мкм		Об'єм, мкм ³
		MinFerret	d_n	
9	14,88	3,55	3,94	35,43
	2,02 – 42,08	0,38 – 10,02	1,60 – 7,32	1,67 – 120
11	17,46	3,99	4,16	54,97
	2,18 – 59,69	1,44 – 8,40	1,66 – 8,72	1,42 – 246
13	34,89	5,70	6,19	132,75
	7,92 – 76,14	3,07 – 10,0	3,17 – 9,85	12,07 – 36

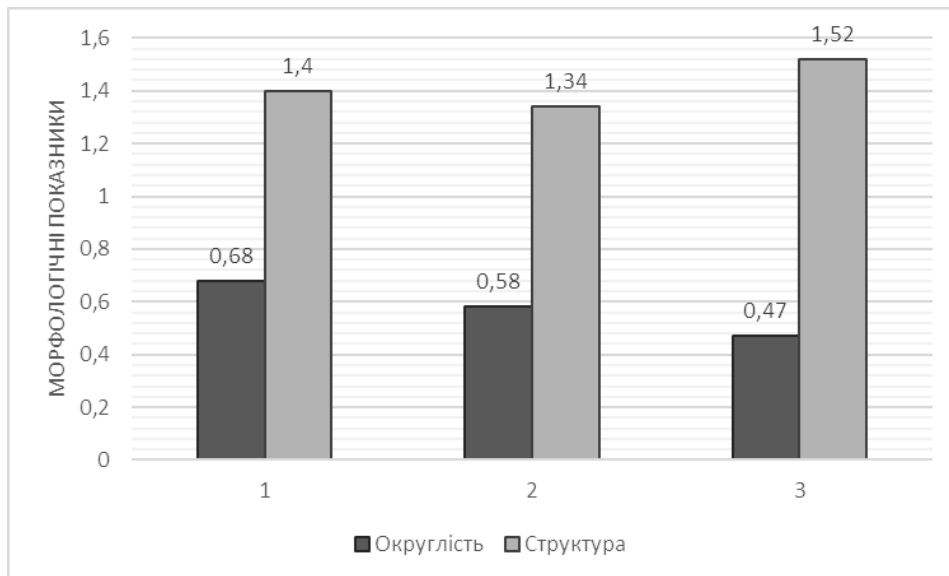


Рис. 2. Технологічні показники пластівців активного мулу при різних концентраціях солей магнію в середовищі: 1 – концентрація Mg 9 мг/л; 2 – концентрація Mg 11 мг/л; 3 – концентрація Mg 13 мг/л

Можна стверджувати, що додавання солей магнію (розглядаємо перший та третій варіанти – концентрації магнію 9 мг/л та 13 мг/л) дещо погіршувало форму пластівців та їх структуру, проте набагато суттєвіше збільшувало лінійні розміри (майже на 60 %) пластівців, площу – на 134 %, і надзвичайно (на 275 %) збільшувало об'єм пластівців. Вірогідно, що за термін експозиції мулової рідини протягом експерименту (1 год) пластівці збільшились проте не встигли ущільнитись та сформувати більш компакту форму і структуру. Отже, отримані результати в цілому свідчили про позитивний вплив іону магнію як на седиментаційні властивості мулу в системі аеротенк-відстійник, так і на зменшення його налипань на мембранах в МБР, що кореспондується з даними науково-технічної літерату-

ри [22]. Необхідно зазначити, що розроблена комп'ютеризована методика кількісного визначення технологічних характеристик пластівців активного мулу дозволила значно деталізувати та уточнити результати візуальних оцінок.

6. Обговорення результатів розробки методики кількісного визначення технологічних характеристик пластівців активного мулу

Таким чином, оскільки морфологічні (форма і структура) та геометричні (площа, об'єм) характеристики пластівців активного мулу впливають на експлуатаційні характеристики мулу як при обробці стічних вод за традиційною схемою аеротенк-відстійник (седиментаційні властивості), так і в МБР (активність налипань на мембранах), існує нагальна необхідність визначення цих показників у кількісному вираженні в технологічному процесі очистки. А наразі при технологічному контролі роботи біологічних очисних споруд визначення морфологічних та геометричних характеристик активного мулу проводиться лише візуально і оцінюється лише якісно.

Для розробки комп'ютеризованої методики визначення морфологічних характеристик пластівців активного мулу в кількісному вираженні на широкому масиві даних проводили обробку мікрофотознімків мулу в програмному продукті Imadge J. В якості еталонів при визначенні кількісних показників округлості та структури пластівців використали мікрофотознімки, представлені в роботі Д. Ейкельбума. За допомогою розробленої методики провели дослідження пластівців мулу в налипаннях на мембранах в МБР та в лабораторних експериментах визначили вплив іонів магнію на розмір й морфологічні характеристики пластівців активного мулу з аеротенків. Ці дослідження довели великі можливості методики в експрес контролі стану активного мулу в очисних спорудах, її кореляцію з експлуатаційно важливими технологічними властивостями мулу в аеротенках та в МБР. Розроблена комп'ютеризована методика дозволяє визначати морфологічні та геометричні характеристики активного мулу кількісно, а, отже, використовувати в відповідних математичних моделях процесів з активним мулом. Методика експресна, придатна для автоматизації та аналізу великої кількості проб. Як видно з представлених експериментальних даних, методика дозволяє значно деталізувати й уточнювати результати візуальних оцінок та виявляти тонкі нюанси зміни морфологічних показників пластівців в динаміці різних параметрів обробки стічних вод.

Звичайно, розроблена методика потребує певних вдосконалень щодо виконання фотографування, експресності та точності, які будуть проведені в процесі подальших досліджень та накопичення даних. Вона має достатній потенціал розвитку стосовно визначення інших показників якості активного мулу, таких як індекс нитчастих, міцність пластівців, відсотковий вміст пластівців $>25\mu\text{m}$.

7. Висновки

1. Встановлено, що за матеріалами Д. Ейкельбума показнику форми «кругла» відповідають пластівці активного мулу, які на фотознімках автора мають округлість (Circ) 0,51–0,65, а показнику форми «неправильна» відповідають пластівці активного мулу з округлістю менше 0,1; показнику структури «компактна» відповідають пластівці активного мулу, які на фотознімках автора мають a' (відношення довжини частинки до її проєктованого діаметру) 1,30–1,50, а показнику структури «відкрита» відповідають пластівці активного мулу з a' 1,70–1,81.

2. Експериментально в дослідженнях налипань на мембранах мембранних біологічних реакторів встановлено, що пластівці мулу з поверхневої аеробної зони налипань на мембранах мають дещо круглішу форму, менші лінійні розміри,

площу та об'єм ніж пластівці мулу з анаеробної зони в глибині налипань. В анаеробній зоні структура пластівців була дещо відкритіша, що кореспондується з дещо меншою округлістю пластівців в цій зоні. Такі відмінності зумовлені, вірогідно, зміною форми пластівців в споруді протягом терміну формування налипань (декілька діб), а також біохімічними процесами в анаеробних шарах налипань.

3. В лабораторному дослідженні впливу іонів магнію на властивості пластівців активного мулу при контролі морфології пластівців за допомогою розробленої комп'ютеризованої методики доведено, що при збільшенні концентрації магнію в муловій рідині з 4 мг/л до 13 мг/л спостерігається зменшення округлості пластівців (на 31 %), незначне (на 9 %) погіршення структури, проте відбувається значно суттєвіше збільшення лінійних розмірів (майже на 60 %), площі (на 134 %) і надзвичайне збільшення (на 275 %) об'єму пластівців. Це свідчило про позитивний вплив іону магнію на технологічні властивості мулу, що кореспондується з даними наукової літератури.

Література

1. Sustainable Cities And Towns Campaign [Електронний ресурс]. URL: <https://sustainablecities.eu/sustainable-cities-platform/>
2. Буркинський Б. В., Степанов В. Н., Харичков С. К. Економико-екологічні основи регіонального природопольовання і розвитку. Одеса: Фенікс, 2005. 575 с. URL: <https://nvd-nanu.org.ua/d578f989-9d9f-e859-760b-dd2853739841/>
3. Згуровський М. З. Сталий розвиток регіонів України. Київ: НТУУ «КПІ», 2009. 197 с. URL: <http://irbis-nbuv.gov.ua/ulib/item/ukr0000013879>
4. Henze M., Harremoës P., Jansen J. I. C., Arvin E. Wastewater Treatment: Biological and Chemical Processes. Berlin ; New York : Springer, 2002. 430 p. URL: <https://orbit.dtu.dk/en/publications/wastewater-treatment-biological-and-chemical-processes-2>
5. Жмур Н. С. Технологічні і біохімічні процеси очищення сточних вод на об'єктах з аэротенками. Москва: АКВАРОС, 2003. 512 с. URL: <https://elima.ru/books/?id=5483>
6. Блінова Н. К., Кравченко А. В. Сучасні проблеми біологічної очищення стічних вод та шляхи їх вирішення. Вісник східноукраїнського національного університету ім. В. Даля. 2018. № 3(244). С. 14–19 URL: https://deps.snu.edu.ua/media/filer_public/35/56/3556d222-10ff-4466-939f-18fc2496c428/visnik_3_244_.pdf
7. Eikelboom D. H. Process Control of Active Thing Plants by Microscopic Investigation. London: IWA Publishing, 2000. 163 p. URL: <https://www.iwapublishing.com/sites/default/files/ebooks/9781900222297.pdf>
8. Mark C. M. van Loosdrecht, Per H. Nielsen, Carlos M. Lopez-Vazquez and Damir Brdjanovic. Experimental Methods In Wastewater Treatment. Published by IWA Publishing, London, UK, 2016. 362 p. URL: <https://experimentalmethods.org/wp-content/uploads/2018/01/Experimental-Methods-in-Wastewater-Treatment.pdf>
9. Jenneé R., Banadda E., Smets I., Van Impe, J. Monitoring activated sludge settling properties using image analysis. Water Science Technology. 2004. 50(7). P.281–285. doi: 10.2166/wst.2004.0471
10. Xu D., Li J., Ma T. Rapid aerobic sludge granulation in an integrated oxidation ditch with two-zone clarifiers. Water Research. 2020. Vol. 175. doi: 10.1016/j.watres.2020.115704
11. D'Antoni B. M., Iracà F., Romero M. Filamentous foaming and bulking in activated sludge treatments: causes and mitigation actions. Brief review. June 2017. doi: 10.13140/RG.2.2.29506.58560

12. Sam T., Le Roes-Hill M, Hoosain N. and Welz P. J. Strategies for controlling filamentous bulking in activated sludge wastewater treatment plants: the old and the new J. Water. 2022. 14(20). P 3223–3244. doi: 10.3390/w14203223

13. Ai S, Du L, Wang Z, Shao L, Kang H, Wang F and Bian D. Effect of controlling filamentous bulking sludge by Sequencing Batch Reactor Activated Sludge Process. January. 2021. E3S Web of Conferences. 261. 04031. doi: 10.1051/e3sconf/202126104031

14. Щетинин А. И., Юрченко В. А., Мальбиев Б. Ю., Михнев А. Н., Мельник В. А., Коробкина И. А. Нитчатое вспухание активного ила и эффект удаления биогенных элементов. Химия и технология воды. 2006. № 4. С. 83–88. URL: <http://jwct.org.ua/uk/home-uk.html>

15. Gulshin I. The settling behavior of an activated sludge with simultaneous nitrification and denitrification. Matec Web of Conferences. 2017. Vol. 106. doi: 10.1051/matecconf/201710607002

16. Mesquita D. P., Amaral A. L., Ferreir E. C. Activated sludge characterization through microscopy: a review on quantitative image analysis and chemometric techniques. Analytica Chimica Acta. 2013. Vol. 802. P. 14–28. doi: 10.1016/j.aca.2013.09.016

17. Mikkelsen L. H., Keiding K. The shear sensitivity of activated sludge: an evaluation of the possibility for a standardised floc strength test. Water Research. 2002. Vol. 36. P. 2931–2940. doi: 10.1016/S0043-1354(01)00518-8

18. Van Dierdonck J., den Broeck R., Vansant A., Van Impe J., Smets I. Microscopic image analysis versus sludge volume index to monitor activated sludge bioflocculation: a case study. Separation Science and Technology. 2013. Vol. 48. P. 1433–1441. doi: 10.1080/01496395.2013.767836

19. Winkler M., Kleerebezem R., Strous M., Chandran K., van Loosdrecht M. Factors influencing the density of aerobic granular sludge. Applied Microbiology and Biotechnology. 2013. 97. P. 7459–7468. doi: 10.1007/s00253-012-4459-4

20. Hoinkisa J, Deowan S. A., Panten V., Figoli A., Rong Rong Huang Enrico Drioli, Membrane Bioreactor (MBR) Technology – a Promising Approach for Industrial Water Reuse. Procedia Engineering. 2012. Vol. 33. P. 234–241. doi: 10.1016/j.proeng.2012.01.1199

21. Aslam M., Charfi A., Lesage G., Heran M., Kim J. Membrane bioreactors for wastewater treatment: A review of mechanical cleaning by scouring agents to control membrane fouling. Chemical Engineering Journal. 2017. Vol. 307. P. 897–913. doi: 10.1016/j.cej.2016.08.144

22. Arabi S., Nakhla G. Impact of cation concentrations on fouling in membrane bioreactors Journal of Membrane Science. 2009. Vol. 343. P. 110–118. doi: 10.1016/j.memsci.2009.07.016

Iurchenko V., DSc, Professor of the Department

Tkachenko S., Graduate Student

Levashova Yu., PhD, Associate Professor of the Department

Kosenko N., PhD, Associate Professor of the Department

Melnikova O., PhD, Associate Professor of the Department

Chernyshenko G., Candidate of Science, Associate Professor of the Department

O. M. Beketov National University of Urban Economy in Kharkiv, Kharkiv, Ukraine

QUANTITATIVE CONTROL OF TECHNOLOGICAL CHARACTERISTICS OF ACTIVATED SLUDGE IN ENVIRONMENTAL BIOTECHNOLOGIES

treatment plants, a computerized method was developed as part of the presented research, the use of which increases the reliability and man-made safety of the operation of biological treatment plants. The methodology is based on the quantitative determination of geometric (area, volume) and morphological (shape and structure) characteristics of activated sludge flakes during the processing of microphotographs of sludge in the Image J software product. Photographing of microscopic images of sludge was performed at a magnification of 100 times and zoomed using micrometer eyepiece. Currently, the morphological characteristics of activated sludge are determined only visually, which does not allow averaging the data of a large number of samples and generally determines the subjective nature of the assessments. Studies of sludge flakes in adhesions on membranes of a membrane biological reactor showed that flakes from the surface aerobic zone of adhesions have a somewhat rounder shape, smaller linear dimensions, area and volume than sludge flakes from the anaerobic zone in the depth of adhesions. Studies of the effect of magnesium ions on the properties of activated sludge flakes showed that with an increase in the concentration of magnesium in the sludge liquid, there is a decrease in the roundness of the flakes, a slight deterioration of the structure, but there is a much more significant increase in linear dimensions (by almost 60 %), area (by 134 %) and extraordinary increase (by 275 %) in the volume of flakes. These indicators indicate an improvement in the technological properties of the flakes and a reduction in their ability to stick to the reactor membranes. The developed computerized technique makes it possible to significantly detail and clarify the results of visual evaluations of the technological characteristics of activated sludge flakes and to detect the smallest changes in the morphological indicators of flakes in various wastewater treatment technologies in a large array of data.

Keywords: activated sludge, flakes, technological characteristics, shape, dimensions, structure, sedimentation properties, adhesion

References

1. Sustainable Cities And Towns Campaign Available at: <https://sustainablecities.eu/sustainable-cities-platform/>
2. Burkin'sky, B. V., Stepanov, V. N., Kharichkov, S. K. (2005). Economic and ecological foundations of regional nature management and development. Odesa: Phoenix, 575. Available at: <https://nvd-nanu.org.ua/d578f989-9d9f-e859-760b-dd2853739841/>
3. Zgurovsky, M. Z. (2009). Sustainable development of the regions of Ukraine. Kiev: NTUU «KPI», 197. Available at: <http://irbis-nbuv.gov.ua/ulib/item/ukr0000013879>
4. Henze, M., Harremoës, P., Jansen, J. I. C., Arvin E. (2002). Wastewater Treatment: Biological and Chemical Processes. Berlin; New York: Springer, 430. Available at: <https://orbit.dtu.dk/en/publications/wastewater-treatment-biological-and-chemical-processes-2>
5. Zhmur, N. S. (2003). Technological and biochemical processes of wastewater treatment at facilities with aerotanks. Moscow: AQUAROS, 512. Available at: <https://elima.ru/books/?id=5483>
6. Blinova, N. K., Kravchenko, A. V. (2018). Modern problems of biological wastewater treatment and ways to solve them. Visnik of the Volodymyr Dahl east Ukrainian national university, 3(244), 14. Available at: https://deps.snu.edu.ua/media/filer_public/35/56/3556d222-10ff-4466-939f-18fc2496c428/visnik_3_244_.pdf
7. Eikelboom, D. (2000). Process Control of Activated Sludge Plants by Microscopic Investigation. London: IWA Publishing, 163. Available at: <https://www.iwapublishing.com/sites/default/files/ebooks/9781900222297.pdf>
8. Mark, C. M. van Loosdrecht, Per H. Nielsen, Carlos, M. Lopez-Vazquez and Damir Brdjanovic. (2005). Experimental Methods In Wastewater Treatment. Published by IWA Publishing, London, UK, 362. Available at: <https://experimentalmethods.org/wp-content/uploads/2018/01/Experimental-Methods-in-Wastewater-Treatment.pdf>
9. Jenneé, R., Banadda, E., Smets, I., Van Impe, J. (2007). Monitoring activated sludge settling properties using image analysis. Water Science Technology, 50(7), 281. doi: 10.2166/wst.2004.0471
10. Xu, D., Li, J., Ma, T. (2021). Rapid aerobic sludge granulation in an integrated oxidation ditch with two-zone clarifiers. Water Research, 175. doi:

10.1016/j.watres.2020.115704

11. D'Antoni, B.M., Iracà, F., Romero, M. (2017). Filamentous foaming and bulking in activated sludge treatments: causes and mitigation actions. Brief review. doi: 10.13140/RG.2.2.29506.58560

12. Sam, T., Le Roes-Hill, M., Hoosain, N., Welz, P. (2022). Strategies for controlling filamentous bulking in activated sludge wastewater treatment plants: the old and the new *J. Water*, 14(20), 3223. doi: 10.3390/w14203223

13. Ai, S., Du, L., Wang, Z., Shao, L., Kang, H., Wang, F. and Bian, D. (2021). Effect of controlling filamentous bulking sludge by Sequencing Batch Reactor Activated Sludge Process, *E3S Web of Conferences*, 261, 04031. doi: 10.1051/e3sconf/202126104031

14. Shchetinin, A. I., Yurchenko, V. A., Malbiev, B. Y., Mikhnev, A. N., Melnik, V. A., Korobkina, I. A. (2006). Filamentous activated sludge bulking and the effect of nutrient removal *J. Chemistry and technology of water*, 259(4), 83. Available at: <http://jwct.org.ua/uk/home-uk.html>

15. Gulshin, I. (2017). The settling behavior of an activated sludge with simultaneous nitrification and denitrification. *Matec Web of Conferences*, 106. doi: 10.1051/mateconf/201710607002

16. Mesquita, D. P., Amaral, A. L., Ferreira, E. C. (2013). Activated sludge characterization through microscopy: a review on quantitative image analysis and chemometric techniques. *Analytica Chimica Acta*, 802, 14. doi: 10.1016/j.aca.2013.09.016

17. Mikkelsen, L. H., Keiding, K. (2002). The shear sensitivity of activated sludge: an evaluation of the possibility for a standardised floc strength test. *Water Research*, 36, 2931. doi: 10.1016/S0043-1354(01)00518-8

18. Van Dierdonck, J., den Broeck, R., Vansant, A., Van Impe, J., Smets, I. (2013). Microscopic image analysis versus sludge volume index to monitor activated sludge bioflocculation: a case study. *Separation Science and Technology*, 48, 1433. doi: 10.1080/01496395.2013.767836

19. Winkler, M. K., Kleerebezem, R., Strous, M., Chandran, K., van Loosdrecht, M. (2013). Factors influencing the density of aerobic granular sludge. *Applied Microbiology and Biotechnology*, 97.7459-7468. doi: 10.1007/s00253-012-4459-4

20. Jan Hoinkisa, Shamim A. Deowan, Volker Panten, Alberto Figoli, Rong Rong Huang (2012). Enrico Drioli, Membrane Bioreactor (MBR) Technology – a Promising Approach for Industrial Water Reuse. *Procedia Engineering*, 33, 234. doi: 10.1016/j.proeng.2012.01.1199

21. Aslam, M., Charfi, A., Lesage, G., Heran, M., Kim, J. (2017). Membrane bioreactors for wastewater treatment: A review of mechanical cleaning by scouring agents to control membrane fouling. *Chemical Engineering Journal*, 307, 897–913. doi: 10.1016/j.cej.2016.08.144

22. Arabi S., Nakhla G. (2009). Impact of cation concentrations on fouling in membrane bioreactors *Journal of Membrane Science*, 343, 110–118. doi: 10.1016/j.memsci.2009.07.016

Надійшла до редколегії: 02.03.2023

Прийнята до друку: 12.04.2023