

В.О. Юрченко, С.О. Ткаченко

Харківський національний університет міського господарства імені О.М. Бекетова, Україна

МЕТОДИКА КІЛЬКІСНОЇ ОЦІНКИ ІНДЕКСУ НИТЧАТИХ В ТЕХНОЛОГІЯХ БІОЛОГІЧНОЇ ОЧИСТКИ

Для кількісного контролю індексу нитчатих в біологічних очисних спорудах в рамках представленого дослідження розроблено комп'ютеризовану методику, використання якої підвищує надійність та техногенну безпеку експлуатації біологічних очисних споруд. В статті розглядаються проблеми, пов'язані з нитчатими мікроорганізмами, які можуть перешкоджати ефективному очищенню стічних вод. Обговорюється використання мікроскопічного аналізу як важливого інструменту для управління проблемами активного мулу. Розглядається індекс нитчатості, ключовий параметр для моніторингу якості активного мулу, а також методи мінімізації суб'єктивних факторів оцінки за допомогою комп'ютерних технологій. Використано програмне забезпечення ImageJ для обробки мікрофотознімків мулу, що дозволило здійснювати точні вимірювання геометричних характеристик. Використано програмне забезпечення Microsoft Excel для теоретичних розрахунків та статистичного аналізу експериментальних даних. Наведено результати досліджень, які підтверджують ефективність запропонованих методик.

Ключові слова: активний мул, спухання мулу, індекс нитчатості, кількісний аналіз, ефективність очищення.

Постановка проблеми

У сфері забезпечення екологічної стійкості та збереження природних ресурсів біологічне очищення стічних вод відіграє ключову роль. Цей процес заснований на використанні мікроорганізмів для розкладання забруднень у стічних водах до безпечніших рівнів. Однак, у деяких випадках, може виникати явище, відоме як "спухання", яке може суттєво утруднити або навіть порушити процес очищення [1-3].

Спухання виникає, коли інтенсивний ріст нитчатих мікроорганізмів перешкоджає ефективному відділенню активного мулу від очищеної стічної води. Це стається, коли загальна довжина нитчатих форм перевищує 10^7 ниток на грам активного мулу, а муловий індекс перевищує 150-200 $\text{cm}^3/\text{г}$. Підвищений ріст такого активного мулу призводить до зменшення об'єму надмулової води, погіршення щільності та водовіддачі мулу. Це також призводить до збільшення вмісту завислих речовин у очищеній воді, виведення часток мулу разом з очищеною водою та зниження концентрації активного мулу у рециркуляційному потоці [4].

Початок вирішення проблеми спухання мулу повинен включати мікроскопічний огляд активного мулу. Це виявляє, чи проблема виникла через нитчасті організми чи ні. Якщо причиною є нитчаті організми, що відбувається у більшості випадків, ідентифікація цих організмів вказує напрямок або підхід до виправлення ситуації. Кілька методів

боротьби із спуханням активного мулу є найбільш практичними та перевіреними. Серед них короткострокові (боротьба з симптомами) та довгострокові (боротьба з причинами) зміни у режимі експлуатації. Короткострокові заходи включають: "маніпуляцію з осадом" - зміни у швидкості поверненого активного осаду та точках подачі; додавання полімерів і коагулянтів для полегшення осадження; та хлорування. Довгострокові заходи включають такі дії, як контроль за септичністю забруднення стічних вод, що надходять на очистку (органічні кислоти та H_2S); додавання поживних речовин (тільки для промислових систем); зміни в аерації; та зміни у концентрації біомаси або у моделі подачі [5 - 9].

Таким чином, нитчате спухання є важливим аспектом біологічного очищення стічних вод, який потребує уваги та контролю з боку фахівців у галузі водоочищення. Розуміння причин та механізмів цього явища, а також розробка ефективних стратегій його запобігання та управління відіграють ключову роль у забезпеченні ефективної та стійкої роботи систем очищення стічних вод.

Аналіз останніх досліджень і публікацій

Нитчате спухання активного мулу є одним з процесів, які відбуваються в біологічних очисних спорудах для очищення стічних вод від органічних забруднень та може викликати такі наслідки [5, 10-16]:

1. Зниження ефективності очищення: Нитчаті структури можуть утворювати простори, які ускладнюють процеси осадження та фільтрації, що може призводити до зниження ефективності очищення стічних вод та виносу активного мулу у природні водойми.

2. Погіршення якості води: Нитчаті структури можуть вміщувати органічні забруднення та збільшувати їхню концентрацію у воді, що може призводити до погіршення її якості та забруднення навколишнього середовища.

3. Затримка процесу очищення: Нитчаті спухання може призводити до затримки процесу очищення стічних вод, збільшуючи час, необхідний для досягнення вимог щодо якості очищення.

4. Посилення зносу обладнання: Нитчаті структури можуть викликати проблеми забруднення та зносу обладнання біологічних очисних споруд, що може вимагати додаткових витрат на обслуговування та ремонт.

5. Екологічні наслідки: Нитчаті спухання може мати негативний вплив на екологічну рівновагу водойм, особливо якщо відбувається винос активного мулу у природні водойми. Хоча спухання активного мулу не призводить до серйозних експлуатаційних проблем, все ж спостерігається погіршення ефективності очистки стічних вод за глибиною видалення амонійного азоту [7].

Отже, розуміння процесу нитчатого спухання активного мулу, його механізмів та впливу на середовище є важливим для ефективного управління очищенням стічних вод і збереження якості навколишнього середовища. Використання мікроскопічного аналізу є незамінним інструментом для вирішення проблем з активним мулом.

В даний час найбільш глибоко і детально класифікацію нитчатих бактерій, засновану на візуальному спостереженні, розробив Д. Ейкельбум [9]. Класифікаційні ключі й характеристика нитчастих бактерій базується на їх візуальному аналізі. За допомогою класифікаційних ключів можна ідентифікувати 21 вид нитчастих організмів у активному мулі, які відносяться до органотрофів за типом живлення. Для ідентифікації цих мікроорганізмів Д. Ейкельбум використовує дев'ять характеристик: рухливість, розгалуження, форма ниток, спосіб прикріплення, діаметр клітин, наявність поперечних стінок, форма клітин, наявність капсул та наявність різних гранул.

Д. Ейкельбум розробив також систему оцінки якості активного мулу, в яку входить показник індекс нитчатих (табл. 1) [9, 17]. Цей індекс характеризує об'єм популяції нитчатих і визначається візуально, що не виключає суб'єктивну оцінку.

Таблиця 1

Критерії для встановлення якості активного мулу [9]

Показники	Добрий	Задовільний	Поганий
Індекс нитчастих	< 3	3-4	4-5
Вільно живучі клітини	0-1	2-3	≥ 3
Спірили	0	1	≥ 2
Співвідношення війчасті : амеби	>1	<1	0
Джгутикові : амеби	0	1-2	≥ 3
%-ий вміст пластівців > 25 μm	> 80-90	> 50-70	< 50
Структура пластівців	компактна	відкрита	-
Міцність пластівців	щільний	слабкий	-
Форма пластівців	кругла	неправильна	-

Контроль індексу нитчатих є ключовим аспектом моніторингу стану активного мулу у біологічних очисних спорудах. Для досягнення цієї мети важливо зменшити вплив суб'єктивних факторів при оцінці. Крім того, проведення численних досліджень щодо ефективності різних заходів, технологічних рішень та методів вимагає об'єктивної кількісної оцінки концентрації нитчатих бактерій у біоценозі. Таким чином, застосування комп'ютерних методик для контролю розвитку нитчатих мікроорганізмів є важливим кроком у напрямку підвищення ефективності та надійності біологічних очисних споруд.

Мета дослідження

Метою роботи є розробка комп'ютеризованої методики оперативного кількісного визначення індексу нитчатих мікроорганізмів в активному мулі біологічних очисних споруд.

Матеріали та методи

Об'єктом дослідження був активний мул з аеротенків різних міських біологічних очисних споруд та установок для біологічної очистки промислових стічних вод. Для кількісного визначення характеристик нитчатих мікроорганізмів в активному мулі за допомогою комп'ютеризованої методики використали обробку еталонних

мікрофотознімків мулу в програмному продукті ImdageJ.

При обробці мікрофотознімків виконували наступні дії:

- відкривали файл зображення;
- натискали інструмент «Збільшувальне скло», та збільшували зображення до зручного розміру;
- використовуючи інструмент виділення ліній позначали довжину однієї частинки пилу, записували розмір та одиницю вимірювання;
- робили зображення чорно-білим і збільшували контрастність для сегментування частинок та фону, використавши такі команди: Image Type>8-bit, Image>Adjust>Threshold>Auto>Apply, Process>Binary>Make binary;
- зафарбовували пусті місця;
- перетворювали поточне зображення в чорно-біле на основі вже виставлених налаштувань: Process>Binary>Convert to Mask;
- відділяли зображення частинок пилу одне від одного, натиснувши “Watershed”. Сегменти, які не відділилися автоматично, розділяли вручну;
- отримували результати виміру геометричних характеристик використавши команду: Analyze>Analyze Particles>OK;
- задавали характеристики, які необхідно аналізувати натиснувши “Set Measurements”.

Теоретичні розрахунки і статистичну обробку експериментальних даних виконували із застосуванням комп'ютерної програми Microsoft Excel.

Результати та обговорення

Розробка кількісних еталонів визначення нитчатості зразків активного мулу. Для кількісної оцінки індексу нитчатих мікроорганізмів використали показники їх концентрації в мікробіоценозі активного мулу, які можливо визначити в програмі Imdage J., а саме площі, що займають нитчаті мікроорганізми в полі зору мікроскопу, площі, що займають флокули активного мулу, та їх співвідношення. В якості еталонів для визначення цих показників використали фотознімки мулу з роботи Д.Ейкельбума [9]. При розрахунках використали знімки Д. Ейкельбума, виконані при збільшенні в 150 разів (50 пікселів). У таблиці наведені результати обрахунку зображень активного мулу, які отримані під час дослідження. Кожен рядок таблиці відповідає окремому фотознімку, який був аналізований. Показник Sfs, μm^2 - показник площі, який відображає розподіл нитчатих структур на область дослідження. Sas, μm^2 - площа активного мулу у полі зору. Szag, μm^2 - загальна площа поля зору. FS, % - відношення площі нитчатих до загальної площі поля зору, виражене у відсотках. AS, % - відсоток пластівців активного мулу у полі зору. FS/AS, % - показник, який відображає відносну кількість нитчатих до кількості пластівців активного мулу (ненитчатих, флокулоутворюючих мікроорганізмів) на дослідженому фотознімку.

Всього оброблено 10 фотознімків Д.Ейкельбума для яких він візуально визначив індекс нитчатих FI.

Результати проведених розрахунків представлено в табл. 2.

Таблиця 2

Результати обрахунку еталонних зображень активного мулу

№	FI	Sfs, μm^2	Sas, μm^2	Szag, μm^2	FS, %	AS, %	FS/AS, %
1	0	13,068	6733,058	13386,363	0,098	50,298	0,19409
2	1	44,192	4928,957	13243,848	0,334	37,217	0,89658
3	2	111,88	2547,779	13340,909	0,839	19,097	4,39128
4	2	375,441	5526,347	13205,418	2,843	41,849	6,79366
5	3	675,321	2875,781	13220,721	5,108	21,752	23,483
6	3	899,009	2513,925	13154,362	6,834	19,111	35,7612
7	4	981,508	3766,416	13347,837	7,353	28,217	26,0595
8	4	1675,751	3624,791	13169,643	12,724	27,524	46,2303
9	5	2140,546	2753,848	13250,564	16,154	20,783	77,7293
10	5	2470,209	3836,414	13206,212	18,705	29,05	64,3885

Застосований прийом обробки еталонних мікрофотознімків кореспондується з роботою [5]. Її автори використали обробку еталонних фотознімків (але з досліджень Jenkins D. [18]) з відомими значеннями індексу нитчатих, для розрахунку співвідношення нитчатих та ненитчатих

мікроорганізмів та відносної концентрації флокулоутворюючих (ненитчатих) мікроорганізмів в досліджених зразках.

Отримані дані надають детальну інформацію щодо розподілу та відношення нитчатих та ненитчатих (таких, що утворюють флоки) складових

мікробіоценозу активного мулу, що є важливим для оцінки його стану та ефективності очищення стічних вод. Індекс нитчатих (FI) є показником, що характеризує ступінь розвитку нитчатих мікроорганізмів у зразках, і наразі використовується при розробці математичних моделей спухання активного мулу [5, 8, 17].

Характеристики індексу FI:

– FI = 0: Відсоток нитчатих у полі зору (FS) менше 0,216%. Це найнижчий рівень нитчатих, що свідчить про їхню відсутність або дуже низьку концентрацію.

– FI = 1: Відсоток нитчатих у полі зору (FS) від 0,217% до 0,586%. Низький рівень нитчатих, що може не мати значного впливу на процес очищення.

– FI = 2: Відсоток нитчатих у полі зору (FS) від 0,587% до 3,976%. Помірний рівень нитчатих, що починає впливати на характеристики мулу.

– FI = 3: Відсоток нитчатих у полі зору (FS) від 3,977% до 7,094%. Високий рівень нитчатих, що може викликати негативні ефекти.

– FI = 4: Відсоток нитчатих у полі зору (FS) від 7,095% до 14,439%. Дуже високий рівень нитчатих, що значно впливає на процес очищення.

– FI = 5: Відсоток нитчатих у полі зору (FS) більше 14,440%. Критично високий рівень нитчатих, що потребує негайної стабілізації процесу.

Для зручності використання одержані характеристики нитчастого спухання представили у вигляді таблиці (табл. 3), в якій відображена їх відповідність найпоширенішому показнику спухання - індексу нитчатих.

Таблиця 3

Залежність між індексом нитчатих та іншими показниками нитчастого спухання активного мулу

FI	FS, %	FS/AS, %
0	< 0,216	< 0,545
1	0,217 — 0,586	0,546 — 2,644
2	0,587 — 3,976	2,645 — 15,138
3	3,977 — 7,094	15,139 — 30,911
4	7,095 — 14,439	30,912 — 61,979
5	>14,440	>61,980

Таким чином, за даними Д.Ейкельбума, його формулюванню показника індексу нитчатих «0» відповідають фотознімки активного мулу з відсотком нитчатих FS менше 0,216 %. Індексу нитчатих «1» відповідають фотознімки з FS від 0,217 % до 0,586 %. Індексу нитчатих «2» відповідають фотознімки з FS від 0,587 % до 3,976 %. Індексу нитчатих «3» відповідають фотознімки з FS від 3,977 % до 7,094 %. Індексу нитчатих «4» відповідають фотознімки з FS від

7,095 % до 14,439 %. Індексу нитчатих «5» відповідають фотознімки з FS більше 14,439 %.

Отримані результати, а саме значення FS/AS, в цілому кореспондуються з даними, представленими в роботі [5]. Її автори також на підставі обробки еталонних фотознімків з роботи [18], порівнювали відоме значення індексу нитчатих (тільки цілі значення від 0 до 6) для порівняння з іншими характеристиками концентрації нитчатих та нитчатих мікроорганізмів в досліджуваному матеріалі. Отримані результати автори використали для розширення відомої математичної моделі процесів з активним мулом ASM1.

Висновки

1. Інтенсивний ріст нитчатих мікроорганізмів спричиняє утруднення в процесі осадження активного мулу, що призводить до зменшення об'єму надмулової води, виносу часток мулу разом із очищеною водою і зменшенню концентрації активного мулу в рециркуляційному потоці аж до повного виносу із системи. Крім того спухання мулу призводить до збільшення вмісту завислих речовин в очищеній воді, погіршення якості води, затримки процесу очищення та підвищення зносу обладнання.

2. Збудники спухання мулу – нитчаті бактерії, відіграють важливу роль у розкладанні органічних забруднень, утворенні біологічних плівок, адсорбції важких металів та регулюванні складу активного мулу. Контроль за складом мікробіоценозу активного мулу дозволяє підтримувати оптимальний баланс між різними видами мікроорганізмів.


3. Для оцінки якості активного мулу та тенденцій до його спухання використовується індекс нитчатих бактерій, розроблений в дослідженнях Д. Ейкельбума та Д.Дженкітса. Цей індекс базується на візуальному спостереженні і визначенні при мікроскопуванні препаратів мулової рідини та характеризує об'єм популяції нитчатих мікроорганізмів в мікробіоценозі.

4. Програма ImageJ показала високу ефективність у визначенні геометричних параметрів нитчатих мікроорганізмів. За отриманими даними розроблена градація класифікації рівню нитчатості у активному мулі. Відсоток нитчатих у полі зору (FS) менше 0,216 відповідає індексу (FI), рівному 0, відсоток нитчатих від 0,217 % до 0,586 % - індексу 1, відсоток нитчатих від 0,587 % до 3,976 % - індексу 2, відсоток нитчатих від 3,977 % до 7,094 % - індексу 3, відсоток нитчатих від 7,095 % до 14,439 % - індексу 4, відсоток нитчатих більше 14,440 % - індексу 5.

5. Регулярний моніторинг індексу нитчатих мікроорганізмів та відсоткового вмісту нитчатих у полі зору є критично важливим для забезпечення стабільності та ефективності процесу біологічного

очищення. Використання комп'ютеризованої отриманих даних, що сприяє своєчасному методиці значно підвищує точність та надійність виявленню та усуненню проблем.

Подяка:

	Дослідження було проведено в рамках виконання проєкту «StormCompetence - Посилення професійних компетенцій дослідників щодо управління зливовими водами для відновлення інфраструктури міста України у післявоєнний час.». Цей проєкт профінансовано програмою Swedish Institute.
---	---

Література

- Wanner J. *Activated sludge bulking and foaming control*. Lancaster, PA: Technomic Pub., 1994. 327 p.
- Pasveer A. *Investigation on the control of filamentous bulking. Advances in water pollution research*. 1969. P. 555–561. URL: <https://doi.org/10.1016/b978-0-08-012999-0.50066-6> (date of access: 23.05.2024).
- Research on filamentous bulking in aerobic granular sludge / F. Jiang et al. *Advanced materials research*. 2011. Vol. 356-360. P. 1267–1271. URL: <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/amr.356-360.1267> (date of access: 23.05.2024).
- Filamentous bulking sludge—a critical review / A. M. P. Martins et al. *Water research*. 2004. Vol. 38, no. 4. P. 793–817. URL: <https://doi.org/10.1016/j.watres.2003.11.005> (date of access: 23.05.2024).
- Amin L, van der Steen P., López-Vázquez C. M. *Expanding the activated sludge model no.1 to describe filamentous bulking: the filamentous model. Journal of water process engineering*. 2022. Vol. 48. P. 102896. URL: <https://doi.org/10.1016/j.jwpe.2022.102896> (date of access: 23.05.2024).
- Intensification of bioprocesses with filamentous microorganisms / A. Dinius et al. *Physical sciences reviews*. 2023. URL: <https://doi.org/10.1515/psr-2022-0112> (date of access: 23.05.2024).
- Христенко А. М. Особливості спухання активного мулу в мембранних біореакторах. *Науковий вісник будівництва. ХНУБА*. 2022. №1(107). С. 41-48. doi.org/10.29295/2311-7257-2022-107-1-41-48. (дата звернення: 03.07.2024).
- Eikelboom D. H. *Filamentous organisms observed in activated sludge. Water research*. 1975. Vol. 9, no. 4. P. 365–388. URL: [https://doi.org/10.1016/0043-1354\(75\)90182-7](https://doi.org/10.1016/0043-1354(75)90182-7) (date of access: 23.05.2024).
- Eikelboom D. H. *Process Control of Activated Sludge Plants by Microscopic Investigation*. - London: IWA Publishing, 2000. – 163 p.
- Chudoba J., Grau P., Ottová V. *Control of activated-sludge filamentous bulking—II. Selection of microorganisms by means of a selector. Water research*. 1973. Vol. 7, no. 10. P. 1389–1406. URL: [https://doi.org/10.1016/0043-1354\(73\)90113-9](https://doi.org/10.1016/0043-1354(73)90113-9) (date of access: 11.07.2024)
- Lou I., In Jeong I. *Modeling growth of filaments and floc formers in activated sludge flocs: integrating the effects of kinetics and diffusion. Environmental modeling & assessment*. 2015. Vol. 20, no. 3. P. 225–237. URL: <https://doi.org/10.1007/s10666-015-9453-7> (date of access: 11.07.2024).
- Martins A. M. P., Karahan Ö., van Loosdrecht M. C. M. *Effect of polymeric substrate on sludge settleability. Water research*. 2011. Vol. 45, no. 1. P. 263–273. URL: <https://doi.org/10.1016/j.watres.2010.07.055> (date of access: 11.07.2024).
- Cenens C. *Modeling the competition between floc-forming and filamentous bacteria in activated sludge waste water treatment systems* □ □ II. *A prototype mathematical model based on kinetic selection and filamentous backbone theory. Water research*. 2000. Vol. 34, no. 9. P. 2535–2541. URL: [https://doi.org/10.1016/s0043-1354\(99\)00422-4](https://doi.org/10.1016/s0043-1354(99)00422-4) (date of access: 11.07.2024).
- Filamentous bacteria. *Wastewater bacteria*. Hoboken, NJ, USA, 2006. P. 143–151. URL: <https://doi.org/10.1002/0471979910.ch15> (date of access: 23.05.2024).
- Liao J. *Quantifying activated sludge bulking-causative filamentous bacteria using molecular methods*. 2003. URL: <http://www.lib.ncsu.edu/theses/available/etd-01222003-102459/> (date of access: 23.05.2024).
- Lawson L. *Microscopic investigation of filamentous microorganisms in activated sludge process for sewage treatment: thesis*. 2018. URL: <http://urn.kb.se/resolve?urn=urn:nbn:se:kth:diva-231524> (date of access: 23.05.2024).
- Eikelboom D. H., Geurkink B. *Filamentous microorganisms observed in industrial activated sludge plants. Water science and technology*. 2002. Vol. 46, no. 1-2. P. 535–542. URL: <https://doi.org/10.2166/wst.2002.0531> (date of access: 23.05.2024).
- Jenkins, D., Richard, M. G., & Daigger, G. T. (2003). *Manual on the causes and control of activated sludge bulking, foaming, and other solids separation problems*. CRC Press. <https://doi.org/10.1201/9780203503157>

References

- Wanner, J. (1994). *Activated sludge bulking and foaming control*. Technomic Pub.
- Pasveer, A. (1969). *Investigation on the control of filamentous bulking. Advances in water pollution research (c. 555–561)*. Elsevier. <https://doi.org/10.1016/b978-0-08-012999-0.50066-6>
- Jiang, F., Zhao, Y. L., Chen, S. F., & Liang, R. (2011). *Research on filamentous bulking in aerobic granular sludge. Advanced Materials Research, 356-360, 1267–1271*. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/amr.356-360.1267>
- Martins, A. M. P., Pagilla, K., Heijnen, J. J., & van Loosdrecht, M. C. M. (2004). *Filamentous bulking sludge—a critical review. Water Research, 38(4), 793–817*. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2003.11.005>
- Amin, L., van der Steen, P., & López-Vázquez, C. M. (2022). *Expanding the activated sludge model no.1 to describe filamentous bulking: The filamentous model. Journal of Water Process Engineering, 48, 102896*. <https://doi.org/10.1016/j.jwpe.2022.102896>
- Dinius, A., Kozanecka, Z. J., Hoffmann, K. P., & Krull, R. (2023). *Intensification of bioprocesses with filamentous microorganisms. Physical Sciences Reviews*. <https://doi.org/10.1515/psr-2022-0112>
- Khristenko, A. M. (2022). *Features of activated sludge bulking in membrane bioreactors. Scientific Bulletin of Civil Engineering, 107(1), 41–48*. <https://doi.org/10.29295/2311-7257-2022-107-1-41-48>

8. Eikelboom, D. H. (1975). Filamentous organisms observed in activated sludge. *Water Research*, 9(4), 365–388. [https://doi.org/10.1016/0043-1354\(75\)90182-7](https://doi.org/10.1016/0043-1354(75)90182-7)
9. Eikelboom, D. H. (2000). Process control of activated sludge plants by microscopic investigation. IWA Pub.
10. Chudoba, J., Grau, P., & Ottová, V. (1973). Control of activated-sludge filamentous bulking—II. Selection of microorganisms by means of a selector. *Water Research*, 7(10), 1389–1406. [https://doi.org/10.1016/0043-1354\(73\)90113-9](https://doi.org/10.1016/0043-1354(73)90113-9)
11. Lou, I., & In Jeong, I. (2015). Modeling growth of filaments and floc formers in activated sludge flocs: Integrating the effects of kinetics and diffusion. *Environmental Modeling & Assessment*, 20(3), 225–237. <https://doi.org/10.1007/s10666-015-9453-7>
12. Martins, A. M. P., Karahan, Ö., & van Loosdrecht, M. C. M. (2011). Effect of polymeric substrate on sludge settleability. *Water Research*, 45(1), 263–273. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2010.07.055>
13. Cenens, C. (2000). Modeling the competition between floc-forming and filamentous bacteria in activated sludge waste water treatment systemsâ II. A prototype mathematical model based on kinetic selection and filamentous backbone theory. *Water Research*, 34(9), 2535–2541. [https://doi.org/10.1016/S0043-1354\(99\)00422-4](https://doi.org/10.1016/S0043-1354(99)00422-4)
14. Filamentous bacteria. (2006). *Wastewater bacteria* (c. 143–151). John Wiley & Sons, Inc. <https://doi.org/10.1002/0471979910.ch15>
15. Liao, J. (2003). Quantifying activated sludge bulking-causative filamentous bacteria using molecular methods [NCSU]. <http://www.lib.ncsu.edu/theses/available/etd-01222003-102459/>
16. Lawson, L. (2018). Microscopic investigation of filamentous microorganisms in activated sludge process for sewage treatment [Thesis, KTH, Skolan för kemi, bioteknologi och hälsa (CBH)]. <http://urn.kb.se/resolve?urn=urn:nbn:se:kth:diva-231524>
17. Eikelboom, D. H., & Geurkink, B. (2002). Filamentous micro-organisms observed in industrial activated sludge plants. *Water Science and Technology*, 46(1-2), 535–542. <https://doi.org/10.2166/wst.2002.0531>
18. Jenkins, D., Richard, M. G., & Daigger, G. T. (2003). *Manual on the causes and control of activated sludge bulking, foaming, and other solids separation problems*. CRC Press. <https://doi.org/10.1201/9780203503157>

Рецензент: д-р техн. наук проф. А.С. Карагяур, Харківський національний університет міського господарства імені О.М. Бекетова, Україна.

Автор: ЮРЧЕНКО Валентина Олександрівна, докт. техн. наук, професор, професор кафедри інженерної екології міст, Харківський національний університет міського господарства імені О.М. Бекетова
E-mail - Valentyna.Yurchenko@kname.edu.ua
ID ORCID: 0000-0001-7123-710X

Автор: ТКАЧЕНКО Світлана Олександрівна, Аспірант, Кафедра інженерної екології міст, Харківський національний університет міського господарства імені О.М. Бекетова
E-mail - Svitlana.Tkachenko3@kname.edu.ua
ID ORCID: 0000-0001-9542-5869

METHODOLOGY FOR QUANTITATIVE ASSESSMENT OF THE FILAMENTOUS INDEX IN TECHNOLOGIES OF BIOLOGICAL WASTEWATER TREATMENT

V. Iurchenko, S. Tkachenko

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

For the quantitative control of the filamentous index in biological treatment facilities, a computerized methodology has been developed within the presented study. Its use enhances the reliability and techno-genic safety of operating biological treatment facilities. Problems related to filamentous microorganisms, which can hinder effective wastewater treatment, are considered. Sludge bulking occurs when the intensive growth of these microorganisms complicates the separation of activated sludge from treated wastewater, leading to various operational issues. The study emphasizes the importance of microscopic analysis in identifying and addressing problems associated with filamentous organisms. The use of microscopic analysis as a crucial tool for managing activated sludge issues is discussed. The classification system developed by D. Eikelboom, which identifies 21 types of filamentous organisms based on visual characteristics, is described in detail. The filamentous index, a key parameter for monitoring the quality of activated sludge, is examined in detail, along with methods to minimize subjective evaluation factors using computer technologies. The primary goal of the study is to develop a computerized methodology for the rapid quantitative determination of the filamentous index, and area of filamentous microorganisms in activated sludge. The ImageJ software was used for processing microphotographs of sludge, enabling precise measurements of geometric characteristics. The analysis includes processing images from Eikelboom's work to establish reference values for the filamentous index. Microsoft Excel software was used for theoretical calculations and statistical analysis of experimental data. The results of the research, which confirm the effectiveness of the proposed methodologies, are presented.

Keywords: activated sludge, sludge bulking, filamentous index, quantitative analysis, treatment efficiency.