

В.О. Юрченко, С.О. Ткаченко

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

КІЛЬКІСНЕ ВИЗНАЧЕННЯ МІЦНОСТІ ПЛАСТІВЦІВ АКТИВНОГО МУЛУ В ТЕХНОЛОГІЯХ БІОЛОГІЧНОЇ ОЧИСТКИ

Створено комп'ютеризований метод кількісної оцінки морфологічної характеристики пластівців активного мулу - міцності, шляхом аналізу мікрофотографій за допомогою програми ImageJ. В експериментальних дослідженнях виявлено, що підвищення концентрації магнію в муловій рідині призводять до збільшення лінійних розмірів (на 59 %), площі (на 81 %) і об'єму пластівців (на 275 %), але знижує міцність (на 21%).

Ключові слова: активний мул, пластівці, концентрація магнію, міцність, технологічні характеристики.

Постановка проблеми

Основною задачею при експлуатації споруд біологічної очистки стічних вод є діагностика стану активного мулу та виявлення причин, які негативно впливають на нього. Активний мул представляє собою біомасу бактерій, актиноміцетів, грибів, водоростей, найпростіших (джгутикових, саркодових, віїчастих та сисних інфузорій), та багатоклітинних організмів, які здатні автофлокулювати. Мул трансформує забруднюючі речовини та очищає стічні води шляхом біосорбції, біохімічного окислення, виїдання бактерій та найпростіших. Його здатність утворювати міцні, швидко осідаючі пластівці є однією з основних властивостей, яка використовується у процесі біологічної очистки стічних вод у системі аеротенк - вторинний відстійник [1, 2]. Утворення пластівців зумовлене наявністю в мікробіоценозі активного мулу бактерій, що виділяють біополімери-флокулянти, які об'єднують окремі клітини в агрегати (флоки), здатні укрупнюватися й відділятися від обробленої рідини. Згідно з даними [3], активність цього процесу залежить від різних факторів, таких як видовий склад мікрофлори й мікрофауни, кисневий режим, фізико-технічні параметри тощо.

Аналіз останніх досліджень та публікацій

Для седиментації мулу визначальними факторами є морфологічні характеристики його пластівців, такі як розмір, структура, міцність і форма [4], а також стан популяції нитчастих мікроорганізмів [5]. Пластівці з «круглою» формою осаджуються ефективніше, ніж ті, що мають неправильну форму, щільні пластівці осаджуються швидше, ніж більш відкриті структури. За міцністю можна виділити міцні і слабкі флоки [6].

Молодий активний мул, у якому ще не утворилися щільні, великі пластівці, має низьку здатність до седиментації. Такий мул часто зустрічається при запуску аеротенку та при інтенсивному надходженні мулу, коли велика кількість надлишкового мулу видаляється, а його час перебування в системі "аеротенк-вторинний відстійник" скорочується. З дозріванням мулу пластівці стають більш компактними, збільшуються в розмірі, утворюється біополімерний гель, який захищає клітини в пластівцях від токсикантів і утримує клітини мікроорганізмів [7-9]. Такі пластівці легко відокремлюються від очищеної води у вторинних відстійниках.

Вчасне виявлення погіршень седиментаційних властивостей активного мулу, визначення впливів експлуатації, які керують цими властивостями, та їх спрямоване використання для інтенсифікації біологічної очистки є важливим завданням в науковому та практичному плані, що дозволить підвищити ефективність та надійність [10, 11].

Характеристики пластівців враховує представлена Д. Ейкельбумом схема діагностики якості активного мулу (добра, середня та недостатня) (табл. 1) [1]. Проте в діагностиці активного мулу за Ейкельбумом такі важливі показники, як структура, міцність та форма, характеризуються не кількісно, а лише якісно, що значно ускладнює їхнє практичне застосування на діючих очисних спорудах.

Зазначені в табл. 1 морфологічні показники (структура, форма, міцність) активного мулу використовуються при моніторингу його стану в технологічному контролі процесів очистки на діючих очисних спорудах в Україні. Однак визначення цих характеристик залишається лише кількісним, проводиться візуально, оцінки мають суб'єктивний характер і не піддаються статистичному обробленню.

Таблиця 1

Критерії для встановлення якості активного мулу

Показники	Добра	Середня	Недостатня
Структура пластівців	компактна	відкрита	-
Міцність пластівців	міцна, щільна	слабка	-
Форма пластівців	кругла	неправильна	-

Зазначені в табл. 1 морфологічні показники (структура, форма, міцність) активного мулу використовуються при моніторингу його стану в технологічному контролі процесів очистки на діючих очисних спорудах в Україні. Однак визначення цих характеристик залишається лише кількісним, проводиться візуально, оцінки мають суб'єктивний характер і не піддаються статистичному обробленню.

Мета та завдання

Метою роботи є розробка комп'ютеризованої методики кількісного визначення міцності пластівців активного мулу та апробація її ефективності в експериментальних дослідженнях.

Матеріали та методи

Об'єктом дослідження був активний мул, отриманий з аеротенку міських біологічних очисних споруд. Для кількісного визначення технологічних характеристик активного мулу за допомогою комп'ютеризованої методики використали обробку мікрофотознімків мулу в програмному продукті ImageJ. 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.

Теоретичні розрахунки і статистичну обробку експериментальних даних здійснювали з використанням комп'ютерної програми Microsoft Excel.

Провели лабораторне дослідження впливу іонів Mg на властивості пластівців активного мулу при контролі морфології пластівців за допомогою розробленої комп'ютеризованої методики. До зразків мулової рідини (100 мл) додавали аліквоту розчину сульфату магнію для збільшення за розрахунком концентрації Mg на 4 мг/л (з 9,0 до 13,0 мг/л). Після аерації мулової суміші протягом 1 години відбирали зразки для мікроскопування та дослідження морфологічних характеристик пластівців активного мулу.

Під час дослідження мікроскопіювали та фіксували показники 10 полів зору.

Результати та обговорення

Розробка кількісних еталонів визначення міцності пластівців активного мулу. Для кількісної оцінки міцності пластівців використали показники забарвленості та контрастності, які були аналізовані за допомогою програми ImageJ. В якості еталонів для визначення міцності використали фотознімки мулу з роботи Д. Ейкельбума. При розрахунках використали знімки Д. Ейкельбума, виконані при збільшенні в 300 разів (100 пікселів) та 150 разів (50 пікселів). На цих фотознімках визначали забарвленість в центрі пластівця (точка 1), на краю пластівця (точка 2) та забарвленість водного середовища, що оточує пластівець (точка 3) (рис. 1).

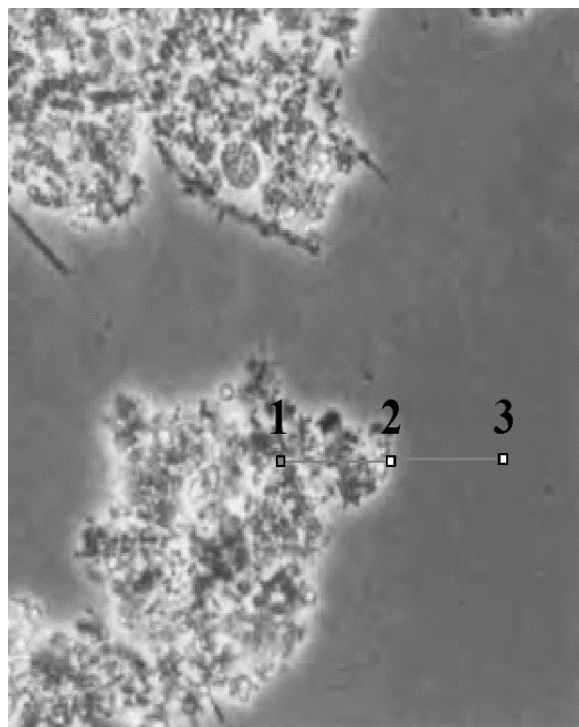


Рис. 1. Точки на препаратах активного мулу для визначення показників контрастності пластівців

Потім обчислювали контрастність через визначення різниці між забарвленістю різних точок:

між центром пластівця та водним середовищем ($d(1-3)$), центром пластівця та краєм пластівця ($d(1-2)$), краєм пластівця та водним середовищем (2-3). Різницю забарвленості краю пластівця та водного середовища виражали у відсотках ($\%(2-3)$) (табл. 2-5).

Таблиця 2
Визначення контрастності щільних пластівців
активного мулу (збільшення в 300 разів)

Вимір	Контрастність			
	Абсолютна			Між точками 2-3, %
	d(1-2)	d(1-3)	d(2-3)	
1	-68	2	70	40,23
2	-74	60	134	56,07
3	-8	96	104	47,71
4	-1	-34	-33	42,31
5	21	114	93	43,87
6	5	-22	-27	25,96
7	42	8	-34	45,95
8	21	117	96	47,52
9	-22	76	98	45,79
10	8	99	91	44,39
Середнє значення	59,2	-7,6	51,6	43,98

Таблиця 3
Визначення контрастності слабких пластівців
активного мулу (збільшення в 300 разів)

Вимір	Контрастність			
	Абсолютна			Між точками 2-3, %
	d(1-2)	d(1-3)	d(2-3)	
1	50	86	36	20,93
2	18	53	35	19,34
3	71	89	18	10,56
4	23	79	56	28,87
5	-20	41	61	29,05
6	41	83	42	21,65
7	39	87	48	25,81
8	39	65	26	15,95
9	43	79	36	20
10	21	46	25	15,34
Середнє значення	38,3	32,5	70,8	20,75

Як видно з даних табл. 2 та табл. 3, при збільшенні в 300 разів різниця між забарвленістю точок на пластівцях і оточуючим водним середовищем (контрастність) була значно більшою в зразках щільних пластівців та досягала майже 44 % (табл. 2). В зразках активного мулу з слабкими пластівцями (табл. 3) і високим рівнем їх прозорості різниця в забарвленості між 2 та 3 точками (контрастність) становила лише 20 %. Загалом контрастність слабких

пластівців була в 2,12 разів нижче контрастності міцних пластівців. Така різниця дозволяє використати градієнт контрастності в якості показника міцності пластівців активного мулу.

Таблиця 4
Визначення контрастності щільних пластівців
активного мулу (збільшення в 150 разів)

Вимір	Контрастність			
	Абсолютна			Між точками 2-3, %
	d(1-2)	d(1-3)	d(2-3)	
1	114	20	94	39,17
2	40	35	7	33,78
3	35	29	64	31,68
4	77	1	76	35,51
5	36	2	38	22,75
6	104	63	41	45,05
7	87	12	75	34,88
8	29	4	25	16,03
9	76	2	74	33,64
10	53	2	55	28,5
Середнє значення	65,1	17	54,9	32,677

Таблиця 5
Визначення контрастності слабких пластівців
активного мулу (збільшення в 150 разів)

Вимір	Контрастність			
	Абсолютна			Між точками 2-3, %
	d(1-2)	d(1-3)	d(2-3)	
1	71	86	15	10,64
2	28	36	8	7,21
3	75	57	18	16,98
4	84	120	36	23,23
5	50	30	20	19,61
6	11	19	8	7,92
7	41	49	8	6,5
8	44	39	5	4,07
9	86	68	18	16,51
10	62	46	16	14,95
Середнє значення	55,2	55	15,2	13,02

При збільшенні в 150 разів забарвленість точок 1 і 2 відрізнялась суттєво. В мулі з міцними пластівцями більш інтенсивне забарвлення відмічено в центрі пластівця, а в мулі з слабкими пластівцями - по краях пластівців. Різниця між забарвленістю (контрастність) точок на краях пластівців та оточуючим водним середовищем в зразках міцних пластівців досягала майже 33 %, а в зразках активного мулу з слабкими пластівцями різниця в забарвленості між 2 та 3 точками

була в 2,50 рази менша і становила лише 13 % (табл. 4, 5). Саме збільшення в 150 разів рекомендується для визначення міцності пластівців активного мулу.

Отже, за класифікацією Д. Ейкельбума визначені значення контрастності можна поділити наступним чином: пластівці з контрастністю > 30 можна відносити до міцних, а пластівці з контрастністю < 15 - до слабких.

Розробка шкали для кількісного визначення міцності пластівців активного мулу. Алгоритм для створення шкали розроблено на підставі визначень і розрахунків, здійснених для еталонних зразків - фотознімків Д. Ейкельбума, для рекомендованого збільшення 150. Побудову шкали (рис.2) здійснювали в 3 етапи:

1. Встановлюємо різницю (а) в між максимальним (М) і мінімальним (м) значенням показника, округлюючи значення до десятих.

2. Встановлюємо крок шкали, для чого ділимо різницю а на 4, і розглядаємо діапазон від (м-а/4) до (М+а/4).

3. Будуємо шкалу покроково з кроком а/4 і позначаємо якісне і кількісне визначення міцності для кожного кроку.

Виходячи з цієї шкали при міцності (контрастності) $< 8,0$ % пластівців дуже слабкий, від 8,1 до 18,0 % - слабкий, від 18,1 до 28,0 % - відносно міцний, від 28,1 до 38,0 % - міцний (сильний), $\geq 38,1$ дуже міцний.



Рис. 2. Побудова шкали міцності пластівців активного мулу за значенням контрастності

Дослідження впливу магнію на показники міцності пластівців активного мулу. Провели лабораторне дослідження впливу іонів Mg на властивості пластівців активного мулу при контролі морфології пластівців за допомогою розробленої комп'ютеризованої методики. Результати досліджень представлені в табл. 6.

Як видно з даних табл.6, при додаванні солей магнію в мулову суміш морфологічні показники пластівців активного мулу змінюються. Спостерігається збільшення лінійних розмірів (на 59 %), збільшення площі (на 81 %) і надзвичайне збільшення об'єму пластівців (на 275 %).

Таблиця 6

Визначення впливу концентрації магнію в середовищі на морфологічні показники пластівців активного мулу

Морфологічні показники пластівців активного мулу	Значення морфологічних показників при концентрації М, мг /л	
	9	13
dn, мкм	3,9	6,2
Площа, мкм ²	42,1	76,2
Об'єм, мкм ³	35,4	132,8
Міцність	42,1	33,3

При цьому міцність пластівців суттєво зменшувалась з 42,1 до 33,3. За встановленими межами класифікації міцності при концентрації магнію 9 мг/л пластівці були дуже міцними, а при концентрації 13 мг/л міцність пластівців дещо зменшилась, але пластівці залишались міцними. Вірогідно, що за термін експозиції мулової рідини протягом експерименту (1 год) пластівці збільшились проте не встигали ущільнитись та сформувати більш міцну структуру.

Отже розроблена методика дозволяє визначати незначні відхилення, тобто є значно чутливішою ніж визначення цього показника візуальним методом.

Висновки

За результатами проведеного дослідження можна зробити наступні висновки:

розроблений метод кількісної оцінки технологічних характеристик пластівців активного мулу дозволяє кількісно охарактеризувати показник міцності, який раніше визначали тільки якісно, шляхом візуального спостереження. Крім того, розроблена комп'ютеризована методика кількісного визначення міцності пластівців активного мулу дозволяє значно деталізувати та уточнити результати візуальних оцінок;

за допомогою розробленої комп'ютеризованої методики показано особливості впливу солей магнію на морфологічні характеристики активного мулу. Дослідження показали, що при збільшенні концентрації магнію в муловій рідині на 4 мг/л до 13 мг/л спостерігається збільшення лінійних розмірів (на 59 %), площі (на 81 %) і об'єму пластівців (на 275 %), але при цьому відбувається зменшення міцності пластівців (на 21 %).

Література:

1. Eikelboom D. H. *Process control of activated sludge plants by microscopic investigation*. London : IWA Pub., 2000. 156 p.
2. M. Henze, P. Harremoës, Jansen J. La Cour & E. Arvin, editors. *Wastewater treatment. biological; and chemical processes*. 2nd edition. 383p. Berlin: springer-verlag, 1997. price

£52–50. *Journal of the marine biological association of the United Kingdom*. 1997. Vol. 77, no. 4. P. 1266. URL: <https://doi.org/10.1017/s0025315400038911> (date of access: 06.12.2023).

3. Monitoring activated sludge settling properties using image analysis / R. Jenné et al. *Water science and technology*. 2004. Vol. 50, no. 7. P. 281–285. URL: <https://doi.org/10.2166/wst.2004.0471> (date of access: 06.12.2023).

4. Mikkelsen L. The shear sensitivity of activated sludge: an evaluation of the possibility for a standardised floc strength test. *Water research*. 2002. Vol. 36, no. 12. P. 2931–2940. URL: [https://doi.org/10.1016/s0043-1354\(01\)00518-8](https://doi.org/10.1016/s0043-1354(01)00518-8) (date of access: 06.12.2023).

5. Microscopic image analysis versus sludge volume index to monitor activated sludge bioflocculation: a case study / J. Van Dierdonck et al. *Separation science and technology*. 2013. Vol. 48, no. 10. P. 1433–1441. URL: <https://doi.org/10.1080/01496395.2013.767836> (date of access: 06.12.2023).

6. Karczmarczyk A., Kowalik W. Combination of microscopic tests of the activated sludge and effluent quality for more efficient on-site treatment. *Water*. 2022. Vol. 14, no. 3. P. 489. URL: <https://doi.org/10.3390/w14030489> (date of access: 01.05.2023).

7. Resource recovery from wastewater by biological technologies: opportunities, challenges, and prospects / D. Puyol et al. *Frontiers in microbiology*. 2017. Vol. 7. URL: <https://doi.org/10.3389/fmicb.2016.02106> (date of access: 20.11.2023).

8. Юрченко В.О., Христенко А.М., Мельнікова О.Г., Пономарьов К.С. Біохімічне та фізіологічне тестування активного мулу біологічних очисних споруд. *Науковий вісник будівництва*. – Х.: ХНУБА, ХОТБ, АБУ, 2021. – Вип. 108, №4. – С.166–172.

9. Tillman G. M. Activated sludge. *Wastewater treatment*. 2017. P. 69–78. URL: <https://doi.org/10.1201/9780203734216-10> (date of access: 20.11.2023).

10. Handbook of wastewater treatment: biological methods, technology and environmental impact. Nova Science Pub Inc, 2013. 337 p.

11. Use of water treatment plant sludge in high-rate activated sludge systems: a techno-economic investigation / H. Gulhan et al. *Science of the total environment*. 2023. P. 166431. URL: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2023.166431> (date of access: 20.11.2023).

References:

1. Eikelboom D. H. Process control of activated sludge plants by microscopic investigation. London : IWA Pub., 2000. 156 p.

2. M. Henze, P. Harremoës, Jansen J. La Cour & E. Arvin, editors. *Wastewater treatment. biological; and chemical processes*. 2nd edition. 383p. Berlin: Springer-verlag, 1997. price £52–50. *Journal of the marine biological association of the United Kingdom*. 1997. Vol. 77, no. 4. P. 1266. URL: <https://doi.org/10.1017/s0025315400038911> (date of access: 06.12.2023).

3. Monitoring activated sludge settling properties using image analysis / R. Jenné et al. *Water science and technology*. 2004. Vol. 50, no. 7. P. 281–285. URL: <https://doi.org/10.2166/wst.2004.0471> (date of access: 06.12.2023).

4. Mikkelsen L. The shear sensitivity of activated sludge: an evaluation of the possibility for a standardised floc strength test. *Water research*. 2002. Vol. 36, no. 12. P. 2931–2940. URL: [https://doi.org/10.1016/s0043-1354\(01\)00518-8](https://doi.org/10.1016/s0043-1354(01)00518-8) (date of access: 06.12.2023).

5. Microscopic image analysis versus sludge volume index to monitor activated sludge bioflocculation: a case study / J. Van Dierdonck et al. *Separation science and technology*. 2013. Vol. 48, no. 10. P. 1433–1441. URL: <https://doi.org/10.1080/01496395.2013.767836> (date of access: 06.12.2023).

6. Karczmarczyk A., Kowalik W. Combination of microscopic tests of the activated sludge and effluent quality for more efficient on-site treatment. *Water*. 2022. Vol. 14, no. 3. P. 489. URL: <https://doi.org/10.3390/w14030489> (date of access: 01.05.2023).

7. Resource recovery from wastewater by biological technologies: opportunities, challenges, and prospects / D. Puyol et al. *Frontiers in microbiology*. 2017. Vol. 7. URL: <https://doi.org/10.3389/fmicb.2016.02106> (date of access: 20.11.2023).

8. Iurchenko V.O., Khristenko A.M., Melnikova O.G., Ponomaryov K.S. Biochemical and physiological testing of activated sludge of biological treatment plants. *Scientific bulletin of construction*. – Kh.: Khnuba, Hotv, ABU, 2021. – Issue 108, No. 4. – P.166–172.

9. Tillman G. M. Activated sludge. *Wastewater treatment*. 2017. P. 69–78. URL: <https://doi.org/10.1201/9780203734216-10> (date of access: 20.11.2023).

10. Handbook of wastewater treatment: biological methods, technology and environmental impact. Nova Science Pub Inc, 2013. 337 p.

11. Use of water treatment plant sludge in high-rate activated sludge systems: a techno-economic investigation / H. Gulhan et al. *Science of the total environment*. 2023. P. 166431. URL: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2023.166431> (date of access: 20.11.2023).

Автор: ЮРЧЕНКО Валентина Олександрівна
докт. техн. наук, професор, професор кафедри
інженерної екології міст

Харківський національний університет міського
господарства імені О.М. Бекетова

E-mail - yurchenko.valentina@gmail.com

ID ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7123-710X>

Автор: ТКАЧЕНКО Світлана Олександрівна
аспірант

Харківський національний університет міського
господарства імені О.М. Бекетова

E-mail - tkachenkosvetlana98@gmail.com

ID ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9542-5869>

QUANTITATIVE DETERMINATION OF THE STRENGTH OF ACTIVATED SLUDGE FLOCKS IN BIOLOGICAL TREATMENT TECHNOLOGIES

V. Iurchenko, S. Tkachenko

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

The performance of sludge and the effectiveness of wastewater treatment in various biological treatment facilities are influenced by the morphological features of activated sludge flocs. Currently, these features are assessed qualitatively through visual inspection, without statistical processing of the data. The article presents the results of quantitative determination of the strength of activated sludge flocs. A computerized method has been created to quantify the morphological characteristics of activated sludge flocs by analyzing sludge micrographs using the ImageJ software. Color and contrast indices were used to quantify the strength of the flocs. Photographs of activated sludge from the work of D. Eikelboom were used as standards for determining strength. In the calculations, we used photographs by D. Eikelboom taken at a magnification of 300 times (100 pixels) and 150 times (50 pixels). A laboratory study of the effect of Mg ions on the properties of activated sludge flocs was carried out when controlling the morphology of the flakes using the developed computerized technique. Examining the impact of Mg ions on activated sludge flocs revealed that higher magnesium concentrations in the sludge liquid result in increased linear dimensions (by 59%), floc area (by 81%) and floc volume (by 275%), but concurrently lead to a decrease in the strength of activated sludge flakes (by 21%). The obtained results in general indicated the positive effect of magnesium ion on the sedimentation properties of sludge in the aerotank-settlement system. A scale for quantitative determination of the strength of activated sludge flocs has been constructed. The developed computerized method enhances the precision and detail of visual evaluations of the technological attributes of activated sludge flocs, enabling the detection of even the smallest changes in the morphological characteristics across different wastewater treatment technologies.

Key words: activated sludge, flocs, concentration of magnesium, strength, technological characteristics.