

Scientific and technical journal «Technogenic and Ecological Safety»

RESEARCH ARTICLE
OPEN ACCESS

ДОСЛІДЖЕННЯ ПРОЦЕСІВ ОЧИЩЕННЯ МІСЬКИХ СТІЧНИХ ВОД В СИСТЕМІ СПОРУД БІОЛОГІЧНОГО ОЧИЩЕННЯ «АЕРОТЕНК-ЗМІШУВАЧ – ВТОРИННИЙ ВІДСТІЙНИК»

С. А. Горносталь¹, С. Р. Артем'єв¹, О. В. Бригада¹, О. В. Ільїнський¹, О. В. Рибалова¹, Б. С. Рейнвальд¹¹Національний університет цивільного захисту України, Харків, Україна

УДК 504.064.4

DOI: 10.52363/2522-1892.2023.2.3

Отримано: 28 вересня 2023

Прийнято: 29 листопада 2023

Cite as: Gornostal S., Artemiev S., Bryhada O., Ilyinskiy O., Rybalova O., Reinvald B. (2023). Study of urban wastewater treatment processes in the system of biological treatment facilities “aeration tank-mixer – secondary sedimentation tank”. *Technogenic and ecological safety*, 14(2/2023), 23–31. doi: 10.52363/2522-1892.2023.2.3

Анотація

В роботі досліджено особливості процесу біологічного очищення в системі «аеротенк-змішувач – вторинний відстійник». Визначено фактори, які впливають на перебіг процесів, проведено експериментальне дослідження цього процесу. Після обробки результатів запропоновано моделі, які описують протікання процесу регенерації активного мула та безпосередньо процесу біологічного очищення стічних вод.

Проаналізовано результати розрахунку, досліджено та проаналізовано взаємний вплив окремих факторів на перебіг процесу біологічного очищення. Отримані в роботі моделі дозволяють без проведення додаткових експериментів досліджувати процес регенерації активного мулу в залежності від концентрації мулу та його витрати, а також досліджувати процес очищення стічних вод з урахуванням їх характеристик (витрати, концентрації забруднень), дози мулу, що поступає з регенератора, концентрації розчиненого кисню.

Запропоновані моделі доцільно використовувати для аналізу процесу біологічного очищення стічних вод в системі «аеротенк-змішувач – вторинний відстійник» та швидкого реагування на зміни, які відбуваються в процесі очищення. Це дозволить запобігти потраплянню недостатньо очищених стічних вод в водний об'єкт та зменшити їх негативний вплив на навколишнє середовище.

Ключові слова: аеротенк-змішувач, вторинний відстійник, стічна рідина, біологічне очищення, активний мул, регенератор, захист навколишнього середовища.

1 Постановка проблеми

Стічні води, які надходять після використання в різноманітних виробничих та побутових процесах, містять органічні та неорганічні забруднення. Схеми очищення стічних вод, які використовують в Україні, включають два способи: механічний та біологічний. Механічне очищення дозволяє видалити з води сміття, пісок, зважені часточки та деяку частину органічних забруднень. Біологічне очищення спрямовано на видалення органічних речовин. Метод механічного очищення є першим етапом перед біологічним очищенням. Завдяки їх поєднанню досягають необхідних показників, які дозволяють знизити антропогенний вплив на водойми, в які скидають очищені стічні води.

Особливістю стічних вод, що надходять на очисні споруди населених пунктів, територія яких насичена транспортом, виробничими об'єктами, житловими комплексами, є значна нерівномірність витрати протягом доби та коливання концентрацій забруднень. Це значно ускладнює роботу споруд та призводить до періодичних порушень в режимі їхньої роботи [1]. Внаслідок цього недостатньо очищені стічні води потрапляють до водойм та провокують погіршення стану навколишнього середовища, збільшення кількості інфекційних захворювань [2, 3]. Такі ситуації періодично трапляються, але завдяки здатності водойм до самоочищення вони не мають катастрофічних наслідків.

В той же час при постійному перевищенні концентрацій забруднюючих речовин в стічних водах очисні споруди не забезпечують нормативну якість очищення та взагалі можуть втратити працездатність. Така ситуація більш характерна саме для споруд біологічного очищення, яке відбувається завдяки життєдіяльності аеробних мікроорганізмів, що населяють активний мул. Втрата або загибель активного мулу – це локальна екологічна катастрофа, наслідки якої відчує на себе кожен мешканець населеного пункту [4]. Проблема забезпечення нормативної якості очищення стічних вод на спорудах біологічного очищення залишається актуальною, що і обумовило напрям дослідження представленої роботи.

2 Аналіз останніх досліджень і публікацій

Екологічна політика України спрямована на захист навколишнього середовища. Це обумовлено не тільки бажанням зберегти природні ресурси та середовище існування для прийдешніх поколінь. Також це є невід'ємною частиною інтеграційного процесу з країнами Європейського Союзу. Тільки завдяки безумовному дотриманню екологічних вимог можливо забезпечити громадянам повноцінне життя. Постійне потрапляння забруднюючих речовин в концентраціях, що перевищують нормативні, призводить до погіршення здоров'я людей та тварин, спалахів інфекційних захворювань.

Водна стратегія України [5] відзначає, що однією з проблем галузі використання і охорони вод та відтворення водних ресурсів є саме низький стан якості води в поверхневих водних об'єктах. Причиною цього є антропогенне навантаження, яке в тому числі проявляється в технічній неспроможності досягти заданого рівня очищення міських стічних вод, яке обумовлено застарілістю системи очищення.

Держава зобов'язалася охороняти громадян від навантажень, ризиків для здоров'я і благополуччя, пов'язаних з навколишнім середовищем [5, 6]. Серед стратегічних цілей та показників їх досягнення, які держава поставила перед собою, перша ціль спрямована на «забезпечення рівного доступу до якісної і безпечної для здоров'я людини питної води та належних санітарно-профілактичних заходів» [6]. Одним з показників вказаної цілі є якість скидів стічних вод з очисних споруд у водні об'єкти. На її досягнення необхідно спрямувати сукупність різноманітних правових, фінансових, організаційних та технічних заходів.

Одним з таких заходів є покращення якості очищення стічних вод на комунальних спорудах. Враховуючи, що реконструкція та модернізація потребують великих коштів, варто звернути увагу на можливість вплинути на ефективність очищення шляхом удосконалення технологічного режиму роботи споруд. Цими питаннями займаються науковці в Україні та за межами нашої держави. Вони працюють в різних напрямках та розглядають можливі шляхи покращення технологічної схеми біологічного очищення.

В роботі [7] автори дослідили різні варіанти (зосереджена та розосереджена) подачі стічних вод в секцію аеротенка. Зіставлення експериментальних даних показало, що при зосередженому впуску стічних вод в секцію спостерігається невелике покращення якості очищення. Але такий результат відповідає визначеним межах значень показників забруднень та витрати стічних вод, він потребує подальших досліджень.

Актуальним залишається розробка нових моделей ефективності роботи станцій біологічного очищення стічних вод. Дослідження [8] спрямовано на врахування зовнішніх чинників, а саме, температури повітря, кількості опадів в вигляді дощу та снігу. Авторами отримано математичні моделі, які враховують метеоумови в різні періоди року. Але отримані результати потребують подальшого уточнення та розробки конкретних рекомендацій щодо їх застосування в практичній діяльності.

Цікавим напрямом в підвищенні ефективності роботи споруд біологічного очищення є застосування рослин, які допомагають збільшити вилучення нітратів зі стічних вод. [9, 10]. Авторами встановлено ефективність застосування водоростей для очищення, але відзначена необхідність подальших досліджень з метою визначення меж застосування запропонованих методів.

В роботі [11] приділена увага активному мулу, як важливій складовій процесу біологічного очищення,

установкам з використанням активного мулу, існуючим обмеженням процесу та шляхам їх вирішення.

Необхідною умовою процесу біологічного очищення стічних вод є аерація об'єму рідини, яка потребує значної енергії. В роботі [12] проаналізовано різні види систем аерації та розглянуто шляхи їх удосконалення. Відзначено, що обов'язковою умовою ефективності запропонованих рішень є наявність пристроїв обліку витраченого повітря. Завдяки цьому можна оперативного реагувати на зміни в роботі окремих елементів.

Для підвищення ефективності очищення стічних вод автори [13] пропонують використовувати чистий кисень. Перевагою його застосування є можливість збільшити навантаження на активний мул не втрачаючи при цьому якість очищення. Однак відзначено, що вказана технологія має деякі недоліки, наприклад, призводить до зниження рН середовища, тому потребує подальшого вивчення та обґрунтування.

Складною проблемою, з якою стикаються технологи очисних споруд, є нерівномірність надходження стічних вод та неоднорідність забруднень. Для подолання цієї проблеми вчені пропонують, наприклад, передбачити усереднення стічних вод [14], що також позитивно впливає на роботу вторинних відстійників. Але це вимагає будівництва додаткових споруд великого об'єму та площини. Крім того, в процесі перемішування виникають леткі речовини, для яких потрібно передбачити заходи по попередженню їх викидів.

В роботі [15] розглядається спосіб інтенсифікації процесу очищення шляхом впливу ультразвуку. За рахунок цього краще видаляються тверді часточки, але залишається питання щодо доцільності використання такого способу для значних об'ємів стічних вод.

Динамічна модель, яка описує процес відділення мулу в вторинному відстійнику, запропонована в [16]. Модель дозволяє описати, як поводить себе суміш очищеної води та мулу, але не дає відповіді на питання, як впливає концентрація мулу на виході зі вторинного відстійника на процес його подальшої регенерації.

В [17] автори приводять модель осадження мулу в вторинному відстійнику. Цю модель відрізняє простота та можливість застосувати її для прогнозних розрахунків. Результати розрахунку можна використовувати, як вихідні дані для дослідження процесу в регенераторі.

Пошуки багатьох науковців спрямовано на визначення якості очищення стічних вод [18, 19] та покращення роботи споруд біологічного очищення. Це актуальний напрям досліджень, який спрямований на максимально повне використання можливостей існуючих споруд.

Не дивлячись на великий обсяг наукових робіт, нажаль, не можна стверджувати, що відбулося якісне покращення стану води в водних об'єктах, в які скидають очищені стічні води. Проблема забезпечення нормативної якості очищення стічних вод наразі є актуальною та потребує подальших

наукових пошуків. Для її вирішення пропонується дослідити перебіг процесу очищення в аеротенку-змішувачі та запропонувати заходи спрямовані на дотримання технологічного регламенту роботи споруд біологічного очищення стічних вод.

3 Постановка завдання та його вирішення

Метою роботи є дослідити особливості процесів очищення стічних вод в аеротенку-змішувачі та запропонувати заходи, спрямовані на дотримання технологічного режиму роботи споруд біологічного очищення

Досягнення поставленої мети передбачає розв'язання наступних **задач**:

- проаналізувати етапи очищення стічних вод;
- визначити фактори, які впливають на перебіг процесів очищення;
- запропонувати заходи по забезпеченню нормативної якості очищення стічних вод на спорудах біологічного очищення.

Наукова новизна отриманих результатів полягає в удосконаленні моделі, яка описує процес очищення стічних вод в аеротенку-змішувачі.

3.1 Особливості конструкції аеротенка-змішувача

Очищення стічних вод включає декілька послідовних етапів. На першому етапі на спорудах механічного очищення від стічної рідини відділяють сміття та зважені часточки. Додатково стічна вода позбавляється деякої частини органічних речовин.

Після такої підготовки рідину перекачують на аеротенки, які є основною складовою споруд біологічного очищення. Завдяки контакту води з мікроорганізмами активного мулу з води видаляють органічні речовини. Після очищення воду незаражують, щоб знешкодити шкідливі та хвороботворні бактерії. Очищену рідину далі скидають в водний об'єкт.

Секція аеротенка-змішувача (рис. 1) – це прямокутна в плані споруда, яка розділена перегородками на кілька коридорів. Їх може бути три або чотири. Принцип роботи від цього не залежить, кількість коридорів впливає на розміри споруд. Принциповою особливістю аеротенка-змішувача є подача стічної рідини в секцію розосереджено по довжині коридора. Для цього на розподільному каналі передбачено чотири отвори, які при необхідності можна перекривати шиберними заслінками. Така конструкція дозволяє змінювати кількість точок подачі рідини в секцію та регулювати її витрату. Наведена на рис. 1 поз. 5 конструкція розподільчого каналу забезпечує рівномірне навантаження активним мулом та високий ступінь очищення. До її переваг також відносять стійкість до залпових скидів. Тривалість контакту стічної рідини та активного мулу складає близько 10-12 годин. Вона залежить від розмірів споруди, витрати активного мулу та стічної рідини.

На рис. 1 наведена секція аеротенка з чотирма коридорами. В першому коридорі (рис. 1, поз. 1) відбувається регенерація активного мулу, тобто відновлення його окиснювальної здатності.

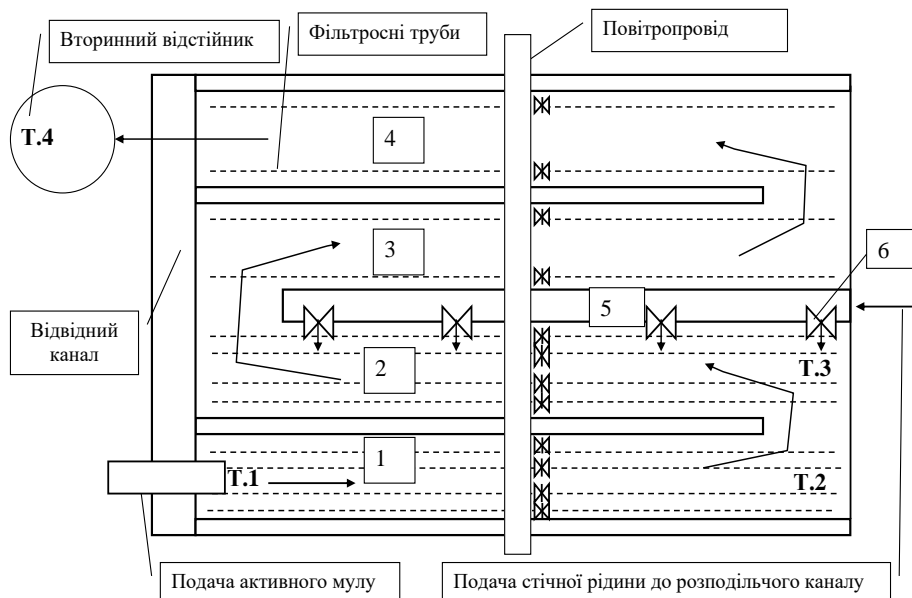


Рисунок 1 – Схема секції аеротенка-змішувача:

- 1 – регенератор (перший коридор), 2 – другий; 3 – третій коридор, 4 – четвертий коридор;
5 – розподільчий канал; 6 – шиберна заслінка

Для підтримання мулу в зваженому стані та активізації окиснення органічних речовин постійно подають стиснене повітря. Для цього по дну коридора прокладено фільтросні труби, які забезпечують аерацію рідини по усьому об'єму. За рахунок перекачування мулу з прийомного

резервуару мулової насосної станції забезпечується циркуляція активного мулу в системі аеротенк-вторинний відстійник.

В другий коридор аеротенка (рис. 1, поз. 2) по розподільчому каналу подають освітлену рідину після механічного очищення. Постійна подача нової

порції рідини забезпечує її рух по коридорах споруди за рахунок витиснення. В результаті переходу розчиненої органіки зі стічної рідини до біомаси активного мулу відбувається процес очищення. В перших двох коридорах споруди підтримують високий рівень аерації для насичення киснем та підтримання суміші в зваженому стані.

В третьому та четвертому коридорах (рис. 1, поз. 3-4) рівень аерації знижують приблизно в два рази за рахунок зменшення кількості паралельних рядків фільтросних труб. Далі суміш поступає на вторинний відстійник, який призначено для відділення води від мулу. Очищена вода подається незараженно, потім її спрямовують по каналах до водойми. Мул по трубах надходить до приймального резервуару мулової насосної станції. Звідси його перекачують в регенератор, де процес повторюється.

Ефективність та швидкість видалення речовин зі стічної рідини напряму пов'язана з різноманіттям мікроорганізмів активного мулу та їх способу живлення. Тому одним з пріоритетних завдань забезпечення технологічного регламенту роботи споруд біологічного очищення є підтримання концентрації активного мулу на заданому рівні. Його вирішують за рахунок щоденного відбору проб на вході-виході з аеротенку, в муловому колодязі вторинного відстійника, в приймальному резервуарі насосної станції. При перевищенні заданого технологом значення зайвий мул видаляють з системи. Якісний склад та концентрація активного мулу, концентрація кисню та інтенсивність аерації, кількість забруднень та витрата стічних вод визначають ефективність роботи споруд біологічного очищення та їх здатність забезпечити нормативну якість очищення.

3.2 Проведення експериментального дослідження.

3.2.1 Дослідження процесу регенерації активного мулу

За результатами аналізу особливостей регенерації активного мулу, який відбувається в першому коридорі аеротенка-змішувача, встановлено, що на концентрацію мулу наприкінці першого коридора впливають показники, з якими мул надходить до регенератора (а саме, концентрація та витрата). Метою проведення експериментальних досліджень було отримати значення концентрації та витрати мулу на вході та виході з регенератора, які необхідні для побудови математичної моделі процесу регенерації.

Для підготовки та безпосередньо проведення експерименту використано положення теорії планування експериментів [20]. Вона передбачає спочатку визначення вхідних величин (факторів), які обумовлюють протікання процесу в регенераторі. Далі за стандартною методикою виконано кодування змінних, та з урахуванням кількості факторів побудована план-матриця. Для визначення меж варіювання факторів (табл. 1) використано результат лабораторних досліджень, які проведено на очисних спорудах м. Харкова.

Таблиця 1. Рівні варіювання факторів

Інтервал варіювання та рівень факторів	Витрата мулу, м ³ /хв	Доза мулу, що подається в регенератор, мг/дм ³	Розчинений кисень, мг/дм ³
Нульовий рівень $x_i=0$	1,1	3,5	2,2
Інтервал варіювання δ_i	0,25	0,7	0,3
Нижній рівень $x_i=-1$	0,85	2,8	1,9
Верхній рівень $x_i=+1$	1,35	4,1	2,5
Кодове позначення	x_1	x_2	x_3

В регенераторі було обрано дві точки відбору проб (рис. 1): точка 1 – початок коридора (активний мул поступає після вторинних відстійників), точка 2 – місце наприкінці коридору, куди надходить активний мул після регенерації. Підготовка, відбір, консервування, зберігання проб здійснено згідно методики [22].

Відбір усередненої проби мулу проводився щоденно в один і той же час безпосередньо з безперервного потоку рідкого мулу. Згідно вимог [21, п. 5.3.1] відбір проб здійснювався за допомогою ручного пробовідбірника в об'ємі 0,5 дм³. Саме ця кількість мулу забезпечує репрезентативність подальшого аналізу, тому що містить достатню кількість сухої речовини. Для зберігання проб використано скляний посуд, який завдяки добре притертим кришкам забезпечив інертність та повітронепроникність досліджуваної речовини. Щоб попередити нагрівання проби в літній час, використано охолоджувальні засоби. Під час відбору проб фіксувалися: дата, час, температура повітря, температура мулу. Визначення концентрації активного мулу проводили шляхом фільтрування з наступним висушуванням та зважуванням.

Обробка результатів експериментальних досліджень дозволила отримати модель (1).

$$u_{\text{мулу}} = 3,28413 - 0,25434 \cdot x_1 + 0,21783 \cdot x_2 + 0,05604x_3 - 0,07464x_1^2 + 0,33153x_2^2 - 0,00694x_3^2 - 0,0375x_1 \cdot x_2 - 0,0375x_1 \cdot x_3 + 0,0375x_2 \cdot x_3 \quad (1)$$

Вона показує залежність дози мулу на виході з регенератора від витрати (x_1) та дози мулу (x_2), що надходить в регенератор, концентрації розчиненого кисню (x_3).

3.2.2 Дослідження процесу очищення стічних вод в другому-четвертому коридорах аеротенка

Після відновлення окисної здатності (регенерації) активний мул поступає в другий коридор аеротенка. Сюди також розосереджено по

довжині коридору подають освітлену стічну воду після механічного очищення.

Запропоновано розглядати процеси, що відбуваються в другому-четвертому коридорах та вторинному відстійнику, сумісно. Це обумовлено тим, що перебіг процесів в цій частині споруди залежить від витрати стічних вод, витрати та концентрації активного мулу, концентрації кисню. Змінювати ці показники можна саме в другому

коридорі. Це означає, що на концентрацію забруднень на виході зі споруд біологічного очищення, в першу чергу, впливає перебіг процесів в другому-четвертому коридорах аеротенка.

Після аналізу значень витрати стічних вод, витрати та концентрації активного мулу, концентрації кисню, отриманих на спорудах біологічного очищення м. Харкова, визначено значення та межі варіювання факторів (табл. 2).

Таблиця 2. Рівні варіювання факторів

Інтервал варіювання та рівень факторів	Доза мулу, мг/дм ³	Витрата стічних вод, м ³ /хв	Концентрація забруднень в стічних водах, г/л	Концентрація розчиненого кисню, мг/дм ³
Нульовий рівень $x_i=0$	4,0	40	0,12	2,2
Інтервал варіювання δ_i	0,45	5	0,03	0,3
Верхній рівень $x_i=+1$	4,45	45	0,15	2,5
Нижній рівень $x_i=-1$	3,55	35	0,09	1,9
Кодове позначення	x_3	x_4	x_5	x_6

В другому коридорі було обрано для дослідження точку 3 (рис. 1) – початок коридора, де відбувається перемішування активного мулу та першої порції стічної рідини. Для контролю протікання процесу біологічного очищення в системі аеротенк-вторинний відстійник обрано точку 4. Вона знаходиться в відповідному лотку вторинного відстійника. Для підготовки, відбору, консервування та зберігання проб використано рекомендації методики [22].

Для відбору проби стічної води обирають місце с сильною турбулентністю, яка забезпечує добре перемішування. Глибину відбирання приймають приблизно на 1/3 нижче поверхні води. Згідно вимог п. 5.1.3 [22] враховано рекомендації щодо часу та кількості досліджень. Для визначення складу стічних вод відбиралися разові проби об'ємом в середньому 200 мл за допомогою ручного пробовідбірника. Отримані проби поміщувалися в скляний посуд, який забезпечував захист від контакту з повітрям та інертність рідини. В літній час передбачалося охолодження проб. На кожній ємності з пробною було зафіксовано дату проведення дослідження, час відбору проби, температуру навколишнього повітря. Для визначення БСК₅ була використана стандартна методика [23], яка передбачає розбавлення проби з урахуванням різниці концентрації кисню до та після інкубації в стандартних умовах при температурі 20 °С без доступу кисню та світла. Для вимірювань використано прилад MP 525 pH/DO Meter (ULAB).

Після обробки результатів експериментальних досліджень отримано модель (2):

$$y_{CB} = 0,01032 - 0,00074 \cdot x_3 + 0,00007 \cdot x_4 - 0,00209x_5 - 0,00021x_6 + 0,00167x_3^2 + 0,00042x_4^2 + 0,00293x_5^2 + 0,00193x_6^2 + 0,0069x_3 \cdot x_4 - 0,00119x_3 \cdot x_5 + 0,00006x_3 \cdot x_6 - 0,00006x_4 \cdot x_5 - 0,00006x_4 \cdot x_6 - 0,00044x_5 \cdot x_6 \quad (2)$$

Залежність (2) дозволяє без додаткових досліджень визначити концентрацію забруднень в очищених стічних водах на виході зі вторинних відстійників з урахуванням дози активного мулу (x_3), що поступає після регенератора, показників стічних вод (витрати (x_4)) та концентрації забруднень (x_5) в стічних водах, розчиненого кисню (x_6).

3.3 Результати та їх обговорення

Залежність показників активного мулу, які він набуває після регенерації в першому коридорі аеротенка, від витрати та дози, з якими мул поступає в регенератор, концентрації розчиненого кисню, показано на рис. 2-4.

При витраті мулу ($x_1=0$) на нульовому рівні (рис. 2) саме концентрація мулу, з якою він надходить на регенерацію оказує більший вплив на дозу мулу на виході з регенератора. Якщо на нульовому рівні (рис. 3) знаходиться концентрація мулу ($x_2=0$), тоді на результат розрахунку більше впливає витрата мулу. Якщо значення концентрації кисню ($x_3=0$) прийняти на нульовому рівні, тоді знов витрата мулу оказує найбільший вплив на дозу мулу на виході з регенератора аеротенку. Таким чином, бачимо, що від витрати, з якою мул надходить на регенерацію, залежать його характеристики на виході з першого коридору аеротенка.

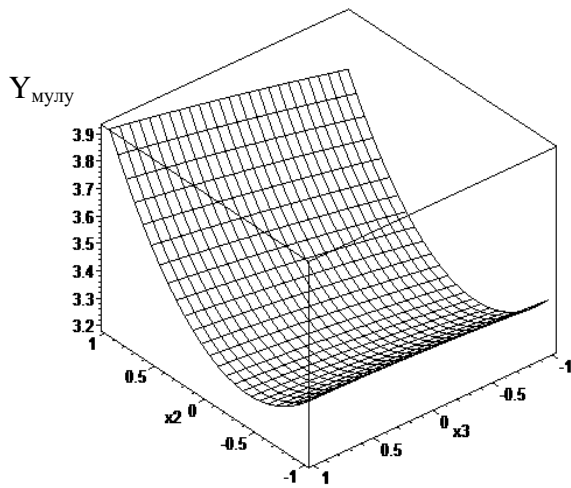


Рисунок 2 – Регенератор аеротенка: залежність дози мулу ($Y_{\text{мулу}}$) від дози мулу (x_2), з якою він поступає в регенератор, та концентрації розчиненого кисню (x_3)

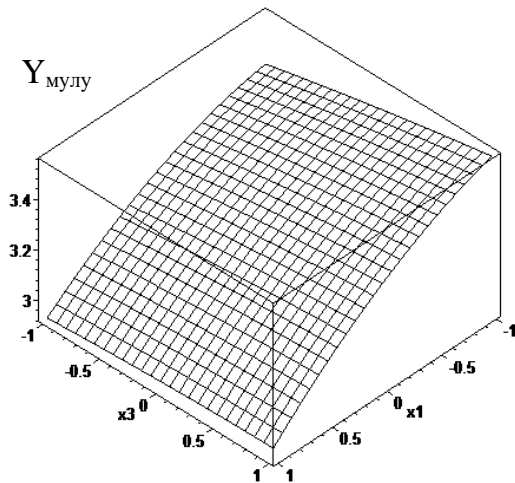


Рисунок 3 – Регенератор аеротенка: залежність дози мулу ($Y_{\text{мулу}}$) від витрати мулу (x_1), з якою він поступає в регенератор, та концентрації розчиненого кисню (x_3)

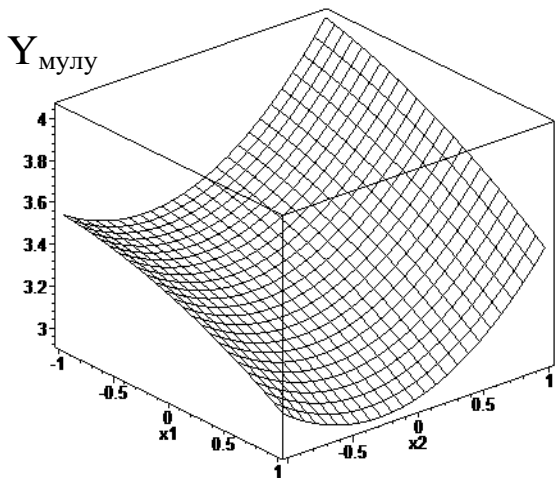


Рисунок 4 – Регенератор аеротенка: залежність дози мулу ($Y_{\text{мулу}}$) від витрати (x_1) та дози (x_2) мулу, з якою він поступає в регенератор

Аналіз отриманих результатів показав, що доза мулу змінюється в межах 2,9-4,0 мг/дм³. При цьому найбільший вплив на результат оказує концентрація, з якою мул повертається з мулових колодязів вторинних відстійників (рис. 2 та 4). Концентрація кисню менше впливає на дозу мулу (рис. 3). Також треба враховувати, що повітря в регенератор подають не тільки для насичення киснем, який потрібен для протікання окиснювальних процесів. Додатково аерація забезпечує перемішування та підтримання мулу в зваженому стані для якісного контакту пластівців мулу з киснем.

На рис. 5-9 наведено результати розрахунку концентрації забруднень на виході зі вторинного відстійника (y_{CB}) в залежності від дози мулу (x_3), витрати стічних вод (x_4) та концентрації забруднень (x_5), з якою вони поступають на очищення, від концентрації розчиненого кисню (x_6).

При дозі мулу ($x_3=0$) та витраті стічних вод ($x_4=0$) на нульовому рівні (рис. 5) найбільший вплив на результат очищення оказує концентрація розчиненого кисню. Якщо на нульовому рівні (рис. 6) знаходиться доза мулу ($x_3=0$) та концентрація забруднень в стічних водах ($x_5=0$), тоді на результат розрахунку більше впливає витрата мулу. Якщо значення концентрації кисню ($x_3=0$) прийняти на нульовому рівні, тоді знов концентрація кисню більше впливає на результат. При дозі мулу ($x_3=0$) та концентрації розчиненого кисню ($x_6=0$) на нульовому рівні (рис. 7) найбільший вплив на результат очищення оказує концентрація забруднень в стічних водах, що поступають на очищення.

Якщо на нульовому рівні (рис. 8) знаходиться концентрація забруднень в стічних водах (x_5), з якою вони поступають на очищення, та витрата стічних вод (x_4), тоді на якість очищення практично однаково впливають доза мулу та концентрація розчиненого кисню. Якщо на нульовому рівні (рис. 9) знаходиться концентрація розчиненого кисню (x_6) та витрати стічних вод (x_4), тоді на якість очищення більше впливає доза мулу, який повертається з регенератора.

Значення концентрації забруднень в очищених стічних водах на виході зі вторинного відстійника знаходяться в межах 0,012-0,024 мг/дм³.

Таким чином, проведений розрахунок показав, що якість біологічного очищення стічних вод залежить від співвідношення показників стічної води, активного мулу та повітря. При цьому характер впливу окремих показників відрізняється в залежності від їх комбінації. Використання запропонованих моделей (1)-(2) дозволяє на підґрунті даних щодо характеристик стічних вод, що поступають на очищення, та з урахуванням умов роботи споруд розрахувати результат очищення та запропонувати зміни в технологічний регламент роботи аеротенка.

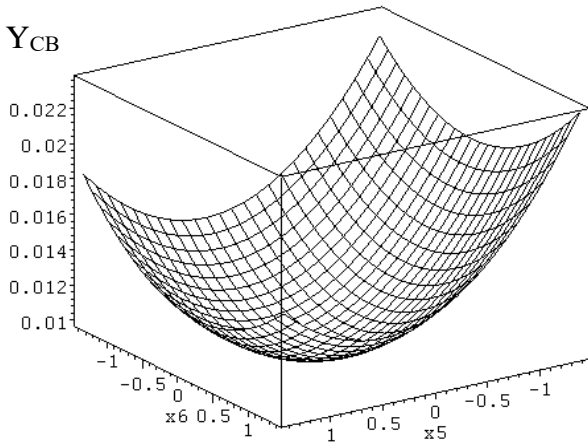


Рисунок 5 – Залежність концентрації забруднень на виході з вторинного відстійника (Y_{CB}): від концентрації забруднень в стічних водах (x_5), з якою вони поступають на очищення та від концентрації розчиненого кисню (x_6), при середніх значеннях дози мулу (x_3) та витрати стічних вод (x_4)

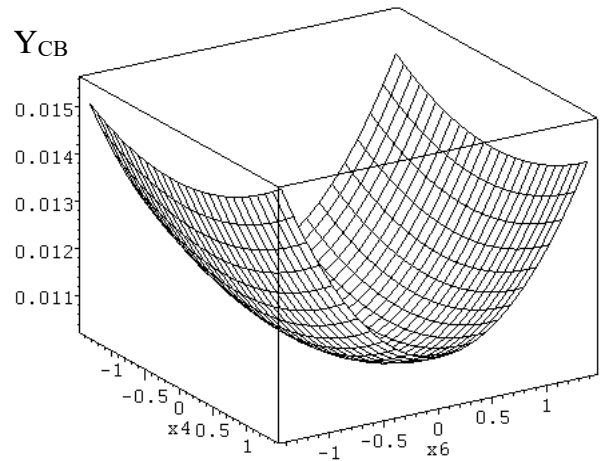


Рисунок 6 – Залежність концентрації забруднень на виході з вторинного відстійника (Y_{CB}): від витрати стічних вод (x_4), з якою вони поступають на очищення, та концентрації розчиненого кисню (x_6), при середніх значеннях дози мулу (x_3) та концентрації забруднень в стічних водах (x_5)

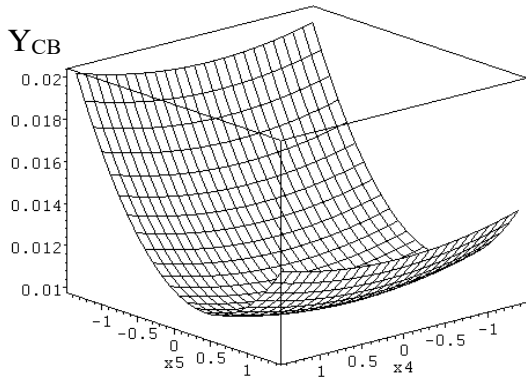


Рисунок 7 – Залежність концентрації забруднень на виході з вторинного відстійника (Y_{CB}): від концентрації забруднень в стічних водах (x_5), з якою вони поступають на очищення, та витрати стічних вод (x_4) при значеннях дози мулу (x_3) та концентрації розчиненого кисню (x_6) на нульовому рівні

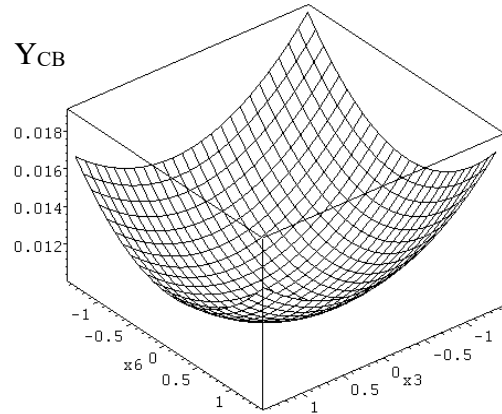


Рисунок 8 – Залежність концентрації забруднень на виході з вторинного відстійника (Y_{CB}): від концентрації розчиненого кисню (x_6) та дози мулу (x_3) при значеннях концентрації забруднень в стічних водах (x_5), з якою вони поступають на очищення, та витрати стічних вод (x_4) на нульовому рівні

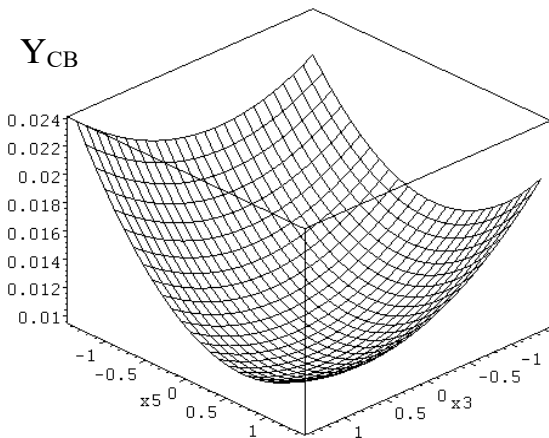


Рисунок 9 – Залежність концентрації забруднень на виході з вторинного відстійника (Y_{CB}): від концентрації забруднень в стічних водах (x_5), з якою вони поступають на очищення, та дози мулу (x_3) при значеннях від концентрації розчиненого кисню (x_6) та витрати стічних вод (x_4) на нульовому рівні

Висновки

Проаналізовано особливості роботи споруд біологічного очищення, які включають аеротенк-змішувач та вторинний відстійник. Аналіз показав, що на процеси біологічного очищення можна впливати завдяки корегуванню співвідношення між його складовими, а саме дозою та витратою активного мулу, концентрацією та витратою стічних вод, концентрацією розчиненого кисню.

Проведені експериментальні дослідження регенерації активного мулу дозволили отримати модель (1), яка враховує особливості протікання регенерації з урахуванням змін, які при цьому відбуваються. Аналіз результатів розрахунків, виконаних з застосуванням запропонованої моделі (1) дозволив визначити вплив факторів на показники мулу після регенерації. Це важливий етап, від якого напряму залежить ефективність подальшого очищення.

За результатами обробки результатів експериментального дослідження процесу очищення в другому-четвертому коридорах аеротенка отримано модель (2). Вона враховує взаємний вплив показників стічної рідини, що поступає на очищення (витрата та концентрація забруднень), активного мулу (витрата та доза), наявність розчиненого кисню. Проведений аналіз показав, що характер впливу окремих показників залежить від їх комбінації.

Запропоновано для дотримання регламенту роботи споруд біологічного очищення, які

представляють собою систему аеротенк-витиснювач – вторинний відстійник, використовувати моделі (1)–(2), які дозволяють без додаткових експериментів досліджувати перебіг процесу очищення з урахуванням можливих змін. Отримані результати спрямовано на забезпечення якості очищення стічних вод та недопущення потрапляння недостатньо очищених стічних вод в водойми. Подальший напрямок досліджень передбачається спрямувати на розробку пропозицій щодо практичного використання запропонованих моделей

ЛІТЕРАТУРА

1. Очищення стічних вод харчових підприємств / Семенова О. І., Омельченко Є. О., Тогачинська О. В., Котинський А. В. Scientific Collection «InterConf». 2023. № 164. С. 183-190.
2. Національна доповідь про стан навколишнього природного середовища в Україні у 2021 році. URL: <https://mepr.gov.ua/wp-content/uploads/2023/01/Natsdopovid-2021-n.pdf> (дата звернення: 10.09.2023).
3. Визначення якісного стану водної екосистеми річки Дніпро / Пономаренко Р. В. та ін. *Екологічна безпека*. 2019. № 2/2019(28). С. 52-62. DOI: 10.30929/2073-5057.2019.2.52-62.
4. Пашнюк В. М., Мякуш О. Р., Сиса Л. В. Оцінка ефективності роботи очисних споруд міста Тернопіль за комплексом гідрохімічних параметрів річки Серет. *Вісник ЛДУБЖД*. 2020. № 21. С. 94-101. DOI: 10.32447/20784643.21.2020.11.
5. Про схвалення Водної стратегії України на період до 2050 року. Розпорядження Кабінету міністрів України від 9 груд. 2022 р. № 1134-р. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/1134-2022-%D1%80#Text> (дата звернення: 12.08.2023).
6. Про охорону навколишнього природного середовища. Закон України № 1268-XII від 26.06.1991 (зі змінами). URL: <http://zakon.rada.gov.ua/laws/show/1264-12> (дата звернення: 10.03.2023).
7. Святенко А. І., Дяденко Н. М., Нечипоренко-Шабуніна Т. Г. Дослідження зміни ефективності очищення стічних вод в аеротенках під впливом різних чинників. *Екологічна безпека*. 2021. № 1/2021(11). С. 64-66.
8. Моделювання ефективності роботи станції біологічного очищення стічних вод / Шевченко О. О., Крупко В. А., Клінцов Л. М., Іванова І. М. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2014. № 5/10 (71). С. 16-20. DOI: 10.15587/1729-4061.2014.26307.
9. Treatment of recirculating water of industrial fish farms in phytoreactor with *Lemnoideae* / Konontcev S., Sabliy L., Kozar M., Korenchuk N. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2017. № 5/10 (89). С. 61-67.
10. Wastewater treatment by using microalgae: Insights into fate, transport, and associated challenges / Ali A., Khalid Z., Ahmed A. A., Ajarem J. S. *Chemosphere*. 2023. Vol. 338. Art. 139501. DOI: 10.1016/j.chemosphere.2023.139501.
11. Activated Sludge Process for Wastewater Treatment / Yeasmin F., Rasheduzzaman M., Manik M., Hasan M. M. In: Shah, M.P. (eds) *Advanced and Innovative Approaches of Environmental Biotechnology in Industrial Wastewater Treatment*. 2023. Pp. 23-50. DOI: 10.1007/978-981-99-2598-8_2.
12. Aeration Process in Bioreactors as the Main Energy Consumer in a Wastewater Treatment Plant. Review of Solutions and Methods of Process Optimization / Drewnowski J, Remiszewska-Skwarek A, Duda S, Łagód G. *Processes*. 2019. Vol. 7(5). Art. 311. DOI: 10.3390/pr7050311.
13. The use of pure oxygen for aeration in aerobic wastewater treatment: A review of its potential and limitations / Skouteris G., Rodriguez-Garcia G., Reinecke S.F., Hampel U. *Bioresource Technology*. 2020. Vol. 312. Art. 123595. DOI: 10.1016/j.biortech.2020.123595.
14. Simultaneous removal of nitrite and organics in a biofilm-enhanced high-salt wastewater treatment system via mixotrophic denitrification coupled with sulfate reduction / Li W. et al. *Journal of Water Process Engineering*. 2021. Vol. 40. Art. 101976. DOI: 10.1016/j.jwpe.2021.101976
15. Forecasting effluent and performance of wastewater treatment plant using different machine learning techniques / El-Rawy M., Abd-Ellah M. K., Fathi H., Ahmed A.K.A. *Journal of Water Process Engineering*. 2021. Vol. 44. Art. 102380. DOI: 10.1016/j.jwpe.2021.102380.
16. 1-D Dynamic knowledge-based model of urban sludge continuous-flow settling process / Valentin C. et al. *Comparison with experimental results*. 2022. hal-03678231.
17. Reliable Tools to Forecast Sludge Settling Behavior: Empirical Modeling / Reyhaneh H. et al. *Energies*. 2023. Vol. 16(2). Art. 963. DOI: 10.3390/en16020963.
18. Krainiukov O. M., Timchenko V. D. Economic consequences of anthropogenic water pollution (by using Pechenizky reservoir as an example). *Visnyk of V. N. Karazin Kharkiv National University Series «Ecology»*. 2018. Vol.19. P.66-74.
19. Моделювання процесу біологічного очищення стічних вод на базі камерних моделей / Лемеш М. В., Біляев М. М., Татарко Л. Г., Якубовська З. М. *Наука та прогрес транспорту*. 2020. № 3 (87). С. 16-24.
20. Важинський С. Е., Щербак Т. І. Методика та організація наукових досліджень: навч. посібник. Суми: СумДПУ імені А.С.Макаренка, 2016. 260 с.
21. ДСТУ ISO 5667-13:2005. Якість води. Відбирання проб. Частина 13. Настанови щодо відбирання проб мулу на спорудах для очищення стічних вод і для водоготування. URL: <http://surl.li/llrla> (дата звернення: 10.09.2023).
22. ДСТУ ISO 5667-10:2005. Якість води. Відбирання проб. Частина 10. Настанови щодо відбирання проб стічних вод. URL: https://dnaop.com/html/62776/doc-%D0%94%D0%A1%D0%A2%D0%A3_ISO_5667-10_2005 (дата звернення: 10.09.2023).
23. КНД 211.1.4.024-95. Методика визначення біохімічного споживання кисню після n днів (БСК) в природних і стічних водах.

Gornostal S., Artemiev S., Bryhada O., Pyynskiy O., Rybalova O., Reinvald B.

STUDY OF URBAN WASTEWATER TREATMENT PROCESSES IN THE SYSTEM OF BIOLOGICAL TREATMENT FACILITIES “AERATION TANK-MIXER – SECONDARY SEDIMENTATION TANK”

The paper examines the features of the biological purification process in the “aeration tank-mixer – secondary settling tank” system. Factors influencing the course of processes were determined, and an experimental study of this process was carried out. After processing the results, models are proposed that describe the course of the activated sludge regeneration process and directly the process of biological wastewater treatment.

The results of the calculation were analyzed, the mutual influence of individual factors on the course of the biological purification process was investigated and analyzed. The models obtained in the work allow, without conducting additional experiments, to study the process of regeneration of activated sludge depending on the concentration of sludge and its consumption, as well as to study the process of wastewater treatment taking into account its characteristics (costs, concentrations of pollutants), the dose of sludge coming from the regenerator, concentrations dissolved oxygen.

It is advisable to use the proposed models for the analysis of the process of biological wastewater treatment in the system “aeration tank-mixer – secondary settling tank” and for quick response to changes occurring in the treatment process. This will prevent insufficiently treated wastewater from entering the reservoir and reduce its negative impact on the environment.

Key words: aeration tank-mixer, secondary settling tank, waste liquid, biological treatment, activated sludge, regenerator, environmental protection.

REFERENCES

1. Semenova, O. I., Omelchenko, Ye. O., Tohachynska, O. V., & Kotynskiy, A. V. (2023). Ochyschennia stichnykh vod kharchovykh pidpryemstv. [Wastewater treatment of food enterprises]. *Scientific Collection «InterConf»*, 164, 183-190. [in Ukrainian]
2. *Natsionalna dopovid pro stan navkolyshnoho pryrodnoho seredovyshcha v Ukraini u 2021 rotsi [National report on the state of the natural environment in Ukraine in 2021]*. (2021). URL: <https://mepr.gov.ua/wp-content/uploads/2023/01/Natsdopovid-2021-n.pdf>. [in Ukrainian]
3. Ponomarenko, R. V., Slepuzhnikov, Ye. D., Pliatsuk, L. D., Ablieieva, I. Iu., & Tretiakov, O. V. (2019). Vyznachennia yakisnoho stanu vodnoi ekosystemy richky Dnipro. [Determination of the qualitative state of the water ecosystem of the Dnipro River. Ecological safety]. *Ekolohichna bezpeka*, 2/2019 (28), 52-62. DOI: 10.30929/2073-5057.2019.2.52-62. [in Ukrainian]
4. Pashniuk, V. M., Miakush, O. R., & Sysa, L. V. (2020). Otsinka efektyvnosti roboty ochysnykh sporud mista Ternopil za kompleksom hidrokhimichnykh parametriv richky Seret. [Evaluation of the efficiency of the treatment facilities of the city of Ternopil based on the complex of hydrochemical parameters of the Seret River]. *Bulletin of Lviv State University of Life Safety*, 21, 94-101. DOI: 10.32447/20784643.21.2020.11. [in Ukrainian]
5. *Pro skhvalennia Vodnoi stratehii Ukrainy na period do 2050 roku [On the approval of the Water Strategy of Ukraine for the period until 2050]*. 1134-r Order of the Cabinet of Ministers of Ukraine. (2022). URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/1134-2022-%D1%80#Text>. [in Ukrainian]
6. *Pro okhoronu navkolyshnoho pryrodnoho seredovyshcha [On environmental protection]*. 1264-XII Law of Ukraine. (1995). URL: <http://zakon.rada.gov.ua/laws/show/1264-12>. [in Ukrainian]. <http://zakon.rada.gov.ua/laws/show/1264-12> [in Ukrainian].
7. Sviatenko, A. I., Diadenko, N. M., & Nechyporenko-Shabunina, T. H. (2021). Doslidzhennia zminy efektyvnosti ochyschennia stichnykh vod v aerotenkakh pid vplyvom riznykh chynnykiv. [Study of changes in the efficiency of wastewater treatment in aeration tanks under the influence of various factors]. *Ekolohichna bezpeka*, 1/2021 (11), 64-66. [in Ukrainian]
8. Shevchenko, O. O., Krupko, V. A., Klintsov, L. M., & Ivanova, I. M. (2014). Modeliuvannia efektyvnosti roboty stantsii biolohichnoho ochyschennia stichnykh vod. [Modeling the efficiency of the biological wastewater treatment plant]. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 5/10 (71), 16-20. DOI: 10.15587/1729-4061.2014.26307. [in Ukrainian]
9. Konontsev, S., Sabliy, L., Kozar, M., & Korenchuk, N. (2017). Treatment of recirculating water of industrial fish farms in phytoreactor with Lemnoideae. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 5/10 (89), 61-67.
10. Ali A., Khalid Z., Ahmed A. A., Ajarem J. S. (2023). Wastewater treatment by using microalgae: Insights into fate, transport, and associated challenges. *Chemosphere*, 338, 139501. DOI: 10.1016/j.chemosphere.2023.139501.
11. Yeasmin, F., Rasheduzzaman, M., Manik, M., & Hasan, M. M. (2023). Activated Sludge Process for Wastewater Treatment. In: Shah, M.P. (eds) *Advanced and Innovative Approaches of Environmental Biotechnology in Industrial Wastewater Treatment*, 23-50. DOI: 10.1007/978-981-99-2598-8_2.
12. Drownowski, J., Remiszewska-Skwarek, A., Duda, S., & Łagód G. (2019). Aeration Process in Bioreactors as the Main Energy Consumer in a Wastewater Treatment Plant. Review of Solutions and Methods of Process Optimization. *Processes*, 7(5), 311. DOI: 10.3390/pr7050311.
13. Skouteris, G., Rodriguez-Garcia, G., Reinecke, S. F., & Hampel, U. (2020). The use of pure oxygen for aeration in aerobic wastewater treatment: A review of its potential and limitations. *Bioresource Technology*, 312, 123595. DOI: 10.1016/j.biortech.2020.123595.
14. Li, W., Liu, J., Zhen, Y., Lin, M., Sui, X., Zhao, W., Bing, X., Lin, J., & Zhai, L. (2021). Simultaneous removal of nitrite and organics in a biofilm-enhanced high-salt wastewater treatment system via mixotrophic denitrification coupled with sulfate reduction. *Journal of Water Process Engineering*, 40, 101976. DOI: 10.1016/j.jwpe.2021.101976
15. El-Rawy M., Abd-Ellah M. K., Fathi H., & Ahmed A.K.A. (2021). Forecasting effluent and performance of wastewater treatment plant using different machine learning techniques. *Journal of Water Process Engineering*, 44, 102380. DOI: 10.1016/j.jwpe.2021.102380.
16. Valentin, C., Chassin, N., Couenne, F., Choubert, J. M., & Jallut, C. (2022). 1-D Dynamic knowledge-based model of urban sludge continuous-flow settling process. *Comparison with experimental results*. hal-03678231.
17. Reyhaneh, H., Javad, A., Behrooz, S., Omid, M., & Sohrab, Z. (2023). Reliable Tools to Forecast Sludge Settling Behavior: Empirical Modeling. *Energies*, 16(2), 963. DOI: 10.3390/en16020963
18. Krainiukov, O. M. Timchenko, V. D. (2018). Economic consequences of anthropogenic water pollution (by using Pechenizky reservoir as an example). *Visnyk of V. N. Karazin Kharkiv National University Series “Ecology”*, 19, 66-74.
19. Lemeshe, M. V., Biliaiev, M. M., Tatarko, L. H., & Yakubovska, Z. M. (2020). Modeliuvannia protsesu biolohichnoho ochyschennia stichnykh vod na bazi kamernykh modelei. [Modeling of the process of biological wastewater treatment based on chamber models]. *Nauka ta prohresh transport*, 3 (87), 16–24. [in Ukrainian]
20. Vazhynskiy, S. E., & Shcherbak, T. I. (2016). *Metodyka ta orhanizatsiia naukovykh doslidzen. [Methodology and organization of scientific research]*. Sumy: SumDPU imeni A.S.Makarenka, 260. [in Ukrainian]
21. DSTU ISO 5667-13:2005. (2005). *Yakist vody. Vidbyrannia prob. Chastyna 13. Nastanovy shchodo vidbyrannia prob mulu na sporudakh dlia ochyschennia stichnykh vod i dlia vodohotuvannia [Water quality. Sampling of samples. Part 13. Guidelines for sludge sampling at wastewater treatment and water treatment facilities]*. URL: <http://surl.li/lrla>. [in Ukrainian]
22. DSTU ISO 5667-10:2005. (2005). *Yakist vody. Vidbyrannia prob. Chastyna 10. Nastanovy shchodo vidbyrannia prob stichnykh vod. [Water quality. Sampling of samples. Part 10. Guidelines for waste water sampling]*. URL: https://dnaop.com/html/62776/doc-%D0%94%D0%A1%D0%A2%D0%A3_ISO_5667-10_2005. [in Ukrainian]
23. KND 211.1.4.024-95. (1995). *Metodyka vyznachennia biokhimichnoho spozhyvannia kysniu pislia n dniv (BSK) v pryrodnykh i stichnykh vodakh [Methodology for determining biochemical oxygen consumption after n days (BSK) in natural and wastewater]*. [in Ukrainian]