

УДК 628.35:579.68:504.064

ІННОВАЦІЙНЕ ТЕХНОЛОГІЧНЕ РІШЕННЯ РЕГУЛЯЦІЇ РЕЖИМУ АЕРАЦІЇ В ТЕХНОЛОГІЇ ОЧИЩЕННЯ СТІЧНИХ ВОД ЗА УМОВ ОПТИМІЗАЦІЇ ФУНКЦІОНУВАННЯ МІКРОБІОЦЕНОЗУ АКТИВНОГО МУЛУ В БІОСПОРУДАХ

¹А. В. Пасенко, ²І. О. Солошич, ³О. В. Новохатько

¹Кременчуцький національний університет імені Михайла Остроградського
вул. Університетська, 20, 39600, Кременчук, Україна, pasenkoalena2015@gmail.com
<http://orcid.org/0000-0003-1108-0408>

²Кременчуцький національний університет імені Михайла Остроградського
вул. Університетська, 20, 39600, Кременчук, Україна, soloishych@gmail.com
<http://orcid.org/0000-0002-8842-5120>

³Кременчуцький національний університет імені Михайла Остроградського
вул. Університетська, 20, 39600, Кременчук, Україна, olga.novohatko2022@gmail.com
<http://orcid.org/0000-0003-0604-3362>

Розробка інноваційних еколого-біотехнологічних рішень щодо підвищення ефективності біоочищення стічних вод в аеротенках досягаються шляхом комплексного підходу із забезпечення стабільного перебігу біохімічних процесів окислення забруднень мікроорганізмами активного мулу, що включає технічну модернізацію, автоматизацію процесів та оптимізацію технологічних параметрів. Актуальним залишається пошук шляхів оптимізації технологічних параметрів подачі, контакту стоків та мулової суміші в біоспорудах для підвищення високого ступеня очищення стічних вод, що є ключовим елементом забезпечення екологічної безпеки, сталого розвитку промислових регіонів за умов зниження негативного впливу на довкілля. Метою статті є розробка інноваційного технологічного рішення щодо режиму аерації мікробіоценозу біоспоруд в технології очищення стічних вод шляхом регуляції навантаження на активний мул за умов зниження забруднення природних водних об'єктів навколишнього середовища. Об'єктом дослідження у роботі є біотехнологія очищення стічних вод за участю мікроорганізмів активного мулу в аеротенках за умов зниження забруднення природних водних об'єктів навколишнього середовища. Предметом роботи є дослідження технологічних умов оптимізації режиму аерації в аеротенку-змішувачі для ефективного функціонування мікробіоценозу активного мулу в біотехнології очищення стічних вод. У роботі використані теоретичні методи (аналіз, синтез, узагальнення, порівняння та систематизація наукових джерел і нормативних документів), емпіричні методи (відбір і зберігання проб стічної води, гідробіологічний аналіз активного мулу, визначення віку активного мулу, навантаження на активний мул, концентрації розчиненого кисню у стічній воді, витрати стічної води), методи інтерпретації та узагальнення результатів, які дозволили оцінити основні параметри функціонування організмів активного мулу та визначити ступень біоочищення стічних вод в аеротенку. Наукова новизна полягає у розробці технологічного рішення щодо регуляції режиму аерації мікробіоценозу активного мулу в технології очищення стічних вод шляхом зниження навантаження за органічною речовиною у разі розосередженої подачі стоків за довжиною аеротенка-змішувача. Практичною цінністю роботи є розробка за результатами гідробіологічного аналізу активного мулу та умов його функціонування заходів щодо оптимізації параметрів аерації, навантаження за органічною речовиною у стоках в аеротенку-змішувачі шляхом розосередженого впуску стічних вод у певному співвідношенні на три впускних вікна з метою забезпечення високої ефективності їх біоочищення та зниження забруднення природних водних.

Визначено, що оптимальним розподілом стічних вод за довжиною біоспоруди для оптимізації умов аерації за рахунок збалансування навантаження за органічною речовиною на активний мул буде подача стоків на три впускних вікна аеротенка-змішувача у відсотковому співвідношенні до загальних витрат води відповідно: 48,3%, 36,7%, 15,0%. У результаті навантаження за органічною речовиною на активний мул буде максимальним на початку першого коридору і мінімальним – наприкінці другого, концентрація розчиненого кисню – врівноваженою у стоках біоспоруди, а можливість надходження неочищеної води у відвідну систему на очисній станції буде виключена, що зменшить забруднення водою.

Ключові слова: гідросфера, очищення стічних вод, аеротенк, інноваційне технологічне рішення, режим аерації, мікробіоценоз активного мулу.

1. ВСТУП

Гідросфера є однією з ключових складових біосфери, що забезпечує існування живих організмів та стабільність глобальних екологічних процесів. Проте інтенсивна антропогенна діяльність призвела до суттєвого погіршення якості водних ресурсів. Забруднення водних ресурсів є однією з найгостріших екологічних проблем сучасності.

Скидання недостатньо очищених стічних вод у поверхневі водні об'єкти є однією з найактуальніших екологічних проблем сучасного стану гідросфери. Це призводить до деградації водних екосистем, погіршення якості питної води, накопичення токсичних речовин у біоценозах.

Вирішення екологічної проблеми потребує комплексного підходу, що включає модернізацію технологій очищення стічних вод. Зростання обсягів промислових і побутових стоків, а також ускладнення їхнього хімічного складу зумовлюють необхідність впровадження ефективних методів глибокого очищення. Традиційні технології часто не забезпечують належного рівня видалення забруднювальних речовин, патогенних мікроорганізмів, що обумовлює актуальність застосування інноваційних підходів щодо підвищення ефективності очищення стічних вод.

Біологічне очищення із застосуванням активного мулу, біореакторів із прикріпленою мікрофлорою та мембранних біореакторів (MBR) є ефективними технологіями видалення забруднень зі стоків. Інноваційні біотехнології дозволяють поєднувати біологічні процеси з мембранною фільтрацією, що значно підвищує якість очищення. Більш ефективними є комбіновані системи, які поєднують декілька методів очищення (наприклад, біологічне очищення + мембранна фільтрація + озонування).

Такий підхід дозволяє досягти високого ступеня очищення та адаптувати технологію до різних типів стічних вод. Аналіз показує, що жодна окрема технологія не є універсальною. Найкращі результати досягаються при інтеграції різних методів.

Мембранні технології забезпечують найвищу якість очищення, проте потребують значних ресурсів. Біологічні методи є економічно вигідними, але менш ефективними щодо мікрозабруднювачів [1].

Окиснювальні процеси доцільно використовувати як етап доочищення.

Але основною технологічною ланкою з вилучення органічних забруднень зі стічних вод є біоспорида очищення стічних вод. Найбільш поширено запроваджуються на очисних станціях для очищення комунальних та промислових стоків біоспорида – аеротенки. Біологічне очищення в аеротенках базується на процесах біохімічного окиснення органічних речовин мікроорганізмами активного мулу. Крім окиснення органічних сполук в аеротенках відбуваються процеси нітрифікації на етапі їх глибокої мінералізації, які є високочутливими до концентрації розчиненого кисню, температури, рН стічних вод.

Значною мірою ефективність процесу біоочищення стічних вод залежить від фізіологічного стану активного мулу в біоспоридах, що насамперед обумовлено режимом аерації біоценозу. Аерація є визначальним елементом функціонування аеротенків і безпосередньо впливає на ефективність біологічного очищення стічних вод.

Вона забезпечує подачу розчиненого кисню, необхідного для життєдіяльності аеробних мікроорганізмів активного мулу, а також підтримує гідродинамічний режим, інтенсифікує масоперенесення кисню з газової фази у рідину, переміщує мулову суміш зі стічними водами, запобігаючи утворенню анаеробних зон та сприяючи рівномірному контакту біомаси із субстратом.

Оптимальна концентрація розчиненого кисню у воді в біоспоридах для ефективного функціонування мікроорганізмів активного мулу становить 2–4 мг/дм³ [2].

Ефективність біологічного очищення стічних вод значною мірою визначається способом подачі кисню до активного мулу.

Незважаючи на широкий спектр сучасних аераційних систем, їх експлуатація супроводжується рядом технічних, енергетичних та технологічних проблем, що впливають на стабільність процесу очищення. Недостатня аерація призводить до розвитку анаеробних процесів, зниження ефективності очищення, утворення запахів. Надмірна аерація, у свою чергу, викликає підвищене енергоспоживання і руйнування флокул активного мулу.

Технологічні проблеми у режимі аерації в аеротенках призводять до погіршення процесу нітрифікації забруднень у стічних водах, викликають розвиток нитчастих бактерій, призводять до нестабільності активного мулу. Неповна нітрифікація речовин стоків сприяє

утворенню парникових газів, у тому числі N_2O , що обумовлює вторинне забруднення об'єктів гідросфери.

Вказана проблема має комплексний характер й охоплює гідродинамічні, біохімічні та енергетичні аспекти. Підвищення ефективності аерації є ключовим завданням оптимізації процесів біологічного очищення стічних вод. Сучасні підходи базуються на комплексному вдосконаленні конструкцій аераційних систем, режимів їх роботи та методів автоматизованого керування.

Але значною мірою біохімічний аспект ефективності біоочищення стічних вод залежить від технологічного параметра навантаження на активний мул за органічною речовиною стоків, що нівелює запровадження найсучаснішої системи аерації в очисних спорудах. Врівноваження навантаження на активний мул за довжиною споруди в аеротенках значною мірою оптимізує процеси аерації та біоокислення забруднень у стоках за умов нормалізації функціонування активного мулу [3].

Інноваційні технологічні рішення щодо підвищення ефективності біоочищення стоків в аеротенках досягаються шляхом комплексного підходу із забезпечення стабільного перебігу біохімічних процесів окислення забруднень мікроорганізмами активного мулу, що включає технічну модернізацію, автоматизацію процесів та оптимізацію технологічних параметрів [4].

Актуальним залишається пошук шляхів оптимізації технологічних параметрів подачі, контакту стоків та мулової суміші в біоспорудах для підвищення високого ступеня очищення стічних вод, що є ключовим елементом забезпечення екологічної безпеки, сталого розвитку промислових регіонів за умов зниження негативного впливу на довкілля.

Метою статті є розробка інноваційного технологічного рішення щодо режиму аерації мікробіоценозу біоспруд в технології очищення стічних вод шляхом регуляції навантаження на активний мул за умов зниження забруднення природних водних об'єктів.

Мета реалізована у наступних завданнях:

- аналіз роботи споруд біоочищення стічних вод на очисній станції;
- проведення гідробіологічного аналізу індикаторних організмів активного мулу з визначенням основних параметрів функціонування мулу та ступеня біоочищення стічних вод в аеротенку міських очисних споруд;

– розробка технологічного рішення щодо оптимізації умов аерації та навантаження на активний мул в аеротенку міських очисних споруд.

Об'єктом дослідження у роботі є біотехнологія очищення стічних вод за участю мікроорганізмів активного мулу в аеротенках за умов зниження забруднення природних водних об'єктів

Предметом роботи є дослідження технологічних умов оптимізації режиму аерації в аеротенку-змішувачі для ефективного функціонування мікробіоценозу активного мулу в біотехнології очищення стічних вод.

2. МАТЕРІАЛИ ТА МЕТОДИ ДОСЛІДЖЕННЯ

У роботі досліджено процес біоочищення комунальних стічних вод в аеротенках міських очисних споруд (Полтавська область). Витрати стоків, що надходять на очисну станцію, становлять у середньому $5500 \text{ м}^3/\text{добу}$, БСК_{повн} стічної води – 110 мг/дм^3 .

У процесі дослідження було використано комплекс методів. Зокрема, теоретичні методи (аналіз, синтез, узагальнення, порівняння та систематизація наукових джерел і нормативних документів), емпіричні методи (відбір і зберігання проб стічної води, гідробіологічний аналіз активного мулу, визначення віку активного мулу, навантаження на активний мул, концентрації розчиненого кисню у стічній воді, витрати стічної води), методи інтерпретації та узагальнення результатів, які дозволили оцінити основні параметри функціонування організмів активного мулу та визначити ступінь біоочищення стічних вод в аеротенку.

3. РЕЗУЛЬТАТИ ДОСЛІДЖЕНЬ ТА ЇХ ОБГОВОРЕННЯ

Біоочищення стоків на станції відбувається в аеротенках-змішувачах за умов безперервної аерації суміші стічної рідини та активного мулу (рис. 1).

Подача стічних вод до аеротенку після первинних відстійників відбувається по центральному розподільчому лотку до коридору аеротенка через три впускні вікна, що перекриваються шиберами. Наявність впускних вікон дозволяє забезпечити роботу аеротенка у двох режимах [5]:

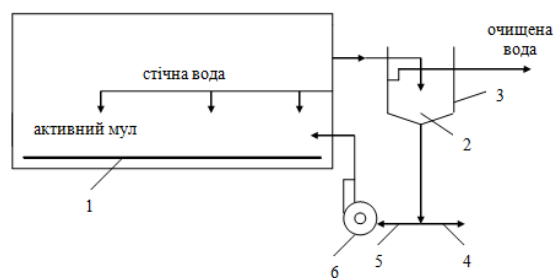


Рис. 1 – Схема роботи аеротенка:

1 – пристрій для подачі повітря; 2 – осад активного мулу; 3 – відстійник; 4 – надлишковий мул; 5 – зворотний мул; 6 – насос

Fig. 1 – Aerotank operation diagram:

1 – air supply device; 2 – activated sludge sediment; 3 – settling tank; 4 – excess sludge; 5 – return sludge; 6 – pump

– без регенерації активного мулу (при $БСК_{20}=250$ мг/дм³ стічних вод або при зменшенні обсягів стоків, що надходять на станцію, подача стічної води у 1-ий та 2-ий впуски становить 40 % від загальної кількості стоків, а у 3-й впуск – 20 %);

– з регенерацією активного мулу (при $БСК_{20}>250$ мг/дм³ стічних вод або при залпових скидах частина аеротенка від 25% до 50% відводиться під регенератор активного мулу, при цьому подачу стічних вод у 3-й впуск закрито, а у 1-ий та 2-ий впуски – становить 60 і 40 % відповідно).

До аеротенків безперервно подається циркуляційний зворотний мул із вторинних відстійників. Коридорні аеротенки обладнані пневматичною системою аерації, що забезпечує подачу кисню у складі повітря, підтримку мулу у завислому стані й постійне перемішування стічної води з мулом по всій довжині аеротенка. Специфікою роботи аеротенків-змішувачів є уповільнена швидкість окислення органічних забруднень, що призводить до можливого виходу з біоспород недостатньо очищених стічних вод.

Тому при експлуатації аеротенків-змішувачів постає нагальне прикладне завдання щодо ретельного спостереження за ефективністю біоочищення стоків та розробки на очисній станції певних технологічних рішень щодо регуляції режиму аерації та навантаження на активний мул за органічною речовиною у стічній воді.

Для аналізу ефективності роботи аеротенків-змішувачів на міській очисній станції під час досліджень проведений гідробіологічний аналіз

активного мулу, що характеризує склад, кількісний розподіл та фізіологічний стан організмів біоценозу мулу – біоагентів-окислювачів, мінералізаторів забруднень стічних вод.

Характерні зміни у біоценозі активного мулу відображають перебіг процесу біоочищення, дозволяють швидко оцінити ступень біоокислення забруднень та зробити висновки про несприятливі фактори, що погіршують ефективність очищення стічних вод. Результати проведеного гідробіологічного аналізу, стан активного мулу свідчать про перевантаження мулу за органічною речовиною, вплив токсикантів і нестачу кисню. Такі умови характеризуються незначною різноманітністю гідробіонтів при вираженому домінуванні за кількістю 2–4 видів.

У біоценозі активного мулу аеротенків виявлено велику кількість безбарвних джгутикових роду *Bodo*, дрібних амеб, хижих сисних інфузорій родів *Podophrya*, *Tokophrya*, хижих війчастих інфузорій роду *Litonotus*. Були присутні у значних кількостях війчасті інфузорії роду *Vorticella*, значно менших – роду *Opercularia* та ін. Відмічено розвиток специфічних нитчастих форм мікроорганізмів, що викликають «спухання» мулу, погіршують його осідання у вторинних відстійниках та у результаті знижують якість очищеної води. Поява у біоценозі активного мулу великої кількості безбарвних джгутикових класу *Mastigophora* (тип *Sarcomastigophora*) також свідчить про перевантаження мулу за органічною речовиною, сполуками Нітрогену та нестачу кисню.

Численні представники прикріплених кругловічастих інфузорій *Vorticella microstoma* та *Vorticella submicrostoma* підтверджують виявлений стан активного мулу, тому що розвиваються у сильно забрудненому на органічній речовині середовищі [6].

Колір активного мулу зафіксований як сірий з коричневим відтінком, відмічено неприємний гнильний запах, присутність численних органічних включень й сміття, пластівці мулу дрібнодисперсні, вода над мулом каламутна. За результатами гідробіологічного аналізу стан активного мулу у біоспородах встановлений як перевантажений в умовах нестачі кисню.

Для зіставлення віку активного мулу і допустимого навантаження на мул за органічною речовиною в аеротенку використовують дані табл. 1.

Таблиця 1 – Допустиме навантаження на активний мул залежно від його віку

Table 1 – Permissible load on activated sludge depending on its age

Вік мулу, доба	1	3	5	7	10	20
Навантаження на мул, мг БСК _{повн} /г сухої речовини мулу на добу	1000	400	250	200	70	50

Для ефективного очищення стічних вод рекомендовано використання активного мулу віком не більше 3–7 діб, що пов'язано з його високою ферментативною активністю, окислювальною потужністю, задовільним флокуло утворенням із досягненням необхідного ступеню очищення вод на очисних спорудах. Але «молоді» мули досить чутливі до змін умов середовища, впливу екотоксикантів, ксенобіотиків, що знижує ефективність процесів біологічного очищення стічних вод. Тому в умовах роботи очисних станцій з нестабільними за складом і кількістю стічними водами, підвищеним ступенем їх токсичності та біорезистентності, реалізуються процеси біоочищення мулами зрілого віку (понад 10 діб), здатних нівелювати залпові скиди важко окислювальних, токсичних забруднювальних речовин.

За результатами проведених у роботі розрахунків отримано значення віку активного мулу в аеротенках, який становив 10,993 діб, а навантаження на активний мул за органічною речовиною – 359,36 мг БСК_{повн}/г·добу, що перевищує у 5 разів допустиме навантаження для мулу віком близько 10 діб. Розраховані показники свідчать про перевантаження активного мулу у біоспорудах та як наслідок – негативний вплив на його фізіологічний стан токсичних сполук субстрату, що знижує ефективність біоочищення стічних вод. Існує пропорційна залежність між швидкістю споживання органічних сполук мікроорганізмами мулу та швидкістю споживання кисню. На початку аеротенка-змішувача відбувається інтенсивне споживання органічних речовин та кисню, тому що в аеротенк випускають концентровані стічні води і циркуляційний зворотній активний мул. У зв'язку з цим, при обмеженій кількості розчиненого кисню у стічній воді його концентрація в муловій суміші в стоках на початку аеротенка залишається на невисокому рівні (менше 2 мг О₂/дм³), що сповільнює

швидкість біохімічного окислення органічних забруднень. Результати визначення концентрації розчиненого кисню у першому коридорі аеротенка-змішувача наведено на рис. 2.

Концентрація розчиненого кисню, мг/дм³

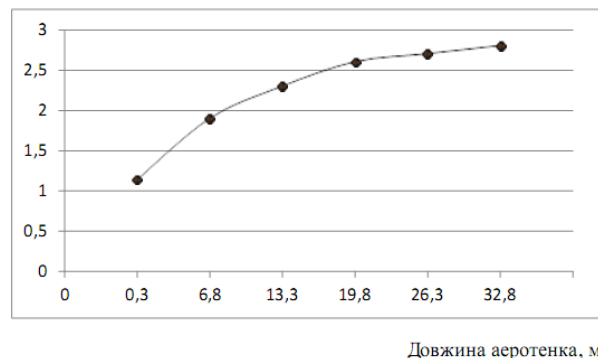


Рис. 2 – Динаміка концентрації розчиненого кисню по довжині першого коридору аеротенка-змішувача з пневматичною аерацією

Fig. 2 – Dynamics of dissolved oxygen concentration along the length of the first corridor of the aeration tank-mixer with pneumatic aeration

Технологічне регулювання концентрації розчиненого кисню у стічній воді в коридорах аеротенка-змішувача відповідно до нормативних вимог щодо якості очищення стоків можливе шляхом зниження в них концентрації органічних забруднень у разі розосередженої їх подачі за довжиною очисної споруди. Таким чином, розосереджену подачу стічної води в аеротенку можна здійснити таким чином, щоб навантаження на мул залишалось постійним за всією його довжиною. Стічну воду в аеротенк необхідно подавати не рівномірно, а з витратами, що постійно зменшуються за довжиною споруди, які у точності співпадають із зменшенням концентрації мулу внаслідок розбавлення, що й дає змогу отримати навантаження на мул постійним, тобто знизити навантаження за органічною речовиною в аеротенку, що забезпечить якість очищеної води на виході зі споруди нормативним вимогам.

У роботі розроблено режим роботи аеротенка, який забезпечує постійне навантаження на активний мул за довжиною аеротенку шляхом розосередженої подачі стічної води. Таким чином, аеротенк з нерівномірно розподіленою подачею рідини об'єднує в собі основні переваги аеротенка-змішувача та аеротенка-витискувача. Мул в аеротенках за розробленим режимом знаходитиметься в одній окремій фазі розвитку, а швидкість вилучення забруднень, їх окислення та споживання кисню стануть сталими,

можливість потрапляння неочищеної води у відповідну систему з очисних споруд буде зведена до мінімуму. Загальна біомаса активного мулу, відповідно і пропускна здатність у біоспорах цього типу буде вищою.

На підставі проведених розрахунків встановлено, що оптимальним розподілом стічних вод за довжиною аеротенка буде розподіл стоків на три впускні вікна (рис. 3). Такий розподіл стічних вод сприяє помірному споживанню кисню за довжиною аеротенка, підвищенню окисної потужності аеротенка та зменшенню навантаження на активний мул.

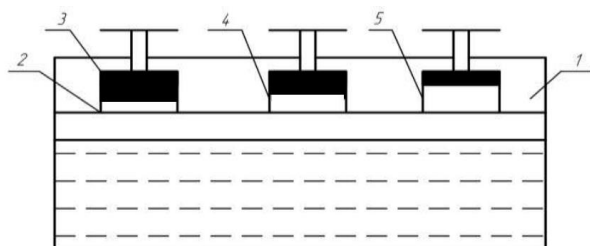


Рис. 3 – Розташування впускних вікон у першому коридорі аеротенка-змішувача:

- 1 – розподільчий лоток;
2, 4, 5 – впускні вікна подачі стічної води;
3 – шибири для регулювання витрати стічних вод

Fig. 3 – Location of inlet windows in the first corridor of the aeration tank-mixer:

- 1 – distribution tray;
2, 4, 5 – wastewater inlet windows;
3 – gate valves for regulating wastewater flow

Навантаження за стічною водою по довжині споруди обчислюють за формулою:

$$q_x = \frac{aQ}{2l} \cdot \frac{(1/a + 1)^2 - 1}{\sqrt{x[(1/a + 1)^2 - 1]/l + 1}}, \quad (1)$$

де, a – кількість зворотного мулу, у долях одиниці від витрати стічної води; Q – загальні витрати стічних вод, $\text{м}^3/\text{с}$; l – довжина біоспоруди, м ; x – відстань від початку впуску стоків до заданого перетину, м .

На досліджених очисних спорудах для розрахунку параметрів режиму роботи аеротенка-змішувача вихідними даними щодо розмірів споруди були: довжина аеротенка – 39 м ; відстань між початком впуску стічної води та першим зливним вікном – 2 м , між першим і другим зливними вікнами – 15 м , між другим і третім – 17 м .

За результатами проведених розрахунків витрати стічної води на три впускні вікна в аеротенку-змішувачі розподілилися наступним чином:

$$q_1 = \frac{0,74 \cdot 0,064}{2 \cdot 39} \cdot \frac{\left(\frac{1}{0,74} + 1\right)^2 - 1}{\sqrt{2 \left[\frac{\left(\frac{1}{0,74} + 1\right)^2 - 1}{39}\right] + 1}} = 0,002477 \frac{\text{м}^3}{\text{с}};$$

$$q_2 = \frac{0,74 \cdot 0,064}{2 \cdot 39} \cdot \frac{\left(\frac{1}{0,74} + 1\right)^2 - 1}{\sqrt{17 \left[\frac{\left(\frac{1}{0,74} + 1\right)^2 - 1}{39}\right] + 1}} = 0,00159 \frac{\text{м}^3}{\text{с}};$$

$$q_3 = \frac{0,74 \cdot 0,064}{2 \cdot 39} \cdot \frac{\left(\frac{1}{0,74} + 1\right)^2 - 1}{\sqrt{34 \left[\frac{\left(\frac{1}{0,74} + 1\right)^2 - 1}{39}\right] + 1}} = 0,00123 \frac{\text{м}^3}{\text{с}}.$$

Відповідно до отриманих значень щодо загальних витрат стічної води навантаження за трьома зливними вікнами розподілилося у наступних співвідношеннях:

$$\frac{q_1}{Q} \cdot 100 = 48,3 \%;$$

$$\frac{q_2}{Q} \cdot 100 = 36,7 \%;$$

$$\frac{q_3}{Q} \cdot 100 = 15,0 \%.$$

На підставі проведених розрахунків визначено, що оптимальним розподілом стічних вод за довжиною біоспоруди для оптимізації умов аерації за рахунок збалансування навантаження за органічною речовиною на активний мул буде подача стоків на три впускні вікна аеротенка-змішувача у відсотковому співвідношенні до загальних витрат води відповідно: 48,3%, 36,7%, 15,0%. Таким чином, навантаження за органічною речовиною на активний мул буде максимальним на початку першого коридору і мінімальним – наприкінці другого, концентрація розчиненого кисню – врівноваженою у стоках біоспоруди, а можливість надходження неочищеної води у відповідну систему на очисній станції буде виключена.

Наукова новизна полягає у розробці технологічного рішення щодо регуляції режиму аерації мікробоценозу активного мулу в технології очищення стічних вод шляхом зниження навантаження за органічною речовиною у разі розосередженої подачі стоків за довжиною аеротенка-змішувача.

Практичною цінністю роботи є розробка за результатами гідробіологічного аналізу

активного мулу та умов його функціонування заходів щодо оптимізації параметрів аерації, навантаження за органічною речовиною у стоках в аеротенку-змішувачі шляхом розосередженого впуску стічних вод у певному співвідношенні на три впускних вікна з метою забезпечення високої ефективності їх біоочищення та зниження забруднення природних водних об'єктів.

4. ВИСНОВКИ

1. Встановлено, що біоочищення стічних вод на очисних спорудах відбувається в аеротенках-змішувачах з пневматичною системою аерації у двох режимах: без регенерації активного мулу (при $БСК_{20}=250$ мг/дм³ стоків або зменшенні їх загальних витрат) та з регенерацією активного мулу (при $БСК_{20}>250$ мг/дм³ стоків або при залпових їх скидах). Недоліком роботи аеротенків-змішувачів є уповільнена швидкість окислення органічних забруднень, що обумовлює скиди недостатньо очищених стічних вод. Тому важливим є ретельний контроль за ефективністю біоочищення стоків та розробка технологічних рішень регуляції режиму аерації та навантаження на біоценоз споруд.

2. Визначено за результатами гідробіологічного аналізу стан активного мулу в аеротенках очисних споруд як перевантажений, що працює в умовах нестачі кисню. Спостерігається незначна різноманітність гідробіонтів при вираженому домінуванні за кількістю 2–4 видів, розвиток нитчастих форм мікроорганізмів, що викликають «спухання» мулу, погіршують його осідання у вторинних відстійниках та у результаті знижують якість очищеної води. Значення концентрації розчиненого кисню стоків у біоспорудах свідчать, що на початку першого коридору аеротенка-змішувача відбувається інтенсивний впуск органічних речовин, погіршення кисневих умов, уповільнення швидкості біохімічного окислення органічних забруднень і як наслідок – зниження ефективності біоочищення стічних вод.

3. Запропоновано інноваційне технологічне рішення щодо регулювання режиму аерації в технології очищення стічних вод за умов оптимізації функціонування мікробіоценозу активного мулу шляхом розосередженої подачі стоків у три впускні вікна першого коридору аеротенка-змішувача відповідно у відсотковому співвідношенні до загальних витрат води: 48,3%, 36,7%, 15,0%. Оптимізація режиму аерації

активного мулу в біоспорудах за рахунок збалансування навантаження за органічною речовиною по довжині аеротенку підвищить ефективність біоочищення та виключить скидання неочищених стічних вод у природні водойми, що зменшить забруднення навколишнього середовища.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Гриневич, А., Саблій, Л., Жукова, В., Ляшок, І. Ефективність біологічного очищення стічних вод з використанням іммобілізованих мікроорганізмів на носіях різних типів. *Проблеми водопостачання, водовідведення та гідравліки*. 2025. № 52. С. 16–23. <https://doi.org/10.32347/2524-0021.2025.52.16-23>.
2. Міць М. Г., Білошенко К. С., Божков, А. І. Дослідження щодо вдосконалення способу періодичної аерації стічних вод. *Вісник Національного технічного університету «ХПІ»*. Серія: Нові рішення в сучасних технологіях. 2021. № 1. С. 90-95. URL: http://nbuv.gov.ua/UJRN/vntuhpi_2021_1_15.
3. Liu X., Nie Y., Wu X.-L. Predicting microbial community compositions in wastewater treatment plants using artificial neural networks. *Microbiome*. 2023. Vol. 11. Article 93. DOI: 10.1186/s40168-023-01519-9.
4. Zhao L., Fu G., Zeng A. et al. Effects of different aeration strategies and ammonia-nitrogen loads on nitrification performance and microbial community succession. *Chemosphere*. 2023. Vol. 339. Article 139685. DOI: 10.1016/j.chemosphere.2023.139685.
5. Саблій Л. А., Ободович О. М., Сидоренко В. В., Кононцев С. В., Коренчук М. С. Використання аераційної системи ежекторного типу для біологічного очищення стічних вод. *Вода і водоочисні технології. Науково-технічні вісті*. 2018. №1 (22). С. 51–59. DOI: 10.20535/2218-93002212018144244.
6. Cheng Y., Wang K., Zhang K. et al. Full-scale upgrade activated sludge to continuous-flow aerobic granular sludge. *Water Research*. 2024. Vol. 248. Article 120870. DOI: 10.1016/j.watres.2023.120870.

REFERENCES

1. Hrynevych, A., Sablii, L., Zhukova, V., Liashok, I. Efficiency of biological wastewater treatment using immobilized microorganisms on different types of carriers. *Problemy vodopostachannia, vodovidvedennia ta hidravliky*. 2025. № 52, S. 16–23. <https://doi.org/10.32347/2524-0021.2025.52.16-23>.
2. Mits M. H., Biloshenko K. S., Bozhkov, A. I. Research on improving the method of periodic aeration of wastewater. *Visnyk Natsionalnoho tekhnichnoho universytetu «KhPI»*. Seria: Novi rishennia v suchasnykh tekhnolohiiakh. 2021. № 1. S. 90-95. URL: http://nbuv.gov.ua/UJRN/vntuhpi_2021_1_15.
3. Liu X., Nie Y., Wu X.-L. Predicting microbial community compositions in wastewater treatment plants using artificial neural networks. *Microbiome*. 2023. Vol. 11. Article 93. DOI: 10.1186/s40168-023-01519-9.
4. Zhao L., Fu G., Zeng A. et al. Effects of different aeration strategies and ammonia-nitrogen loads on nitrification performance and microbial community succession. *Chemosphere*. 2023. Vol. 339. Article 139685. DOI: 10.1016/j.chemosphere.2023.139685.

5. Sablii L. A., Obodovych O. M., Sydorenko V. V., Konontsev S. V., Korenchuk M. S. Use of an ejector-type aeration system for biological wastewater treatment. *Voda i vodoochysni tekhnolohii. Naukovo-tekhichni visti.* 2018. №1 (22). S. 51–59. DOI: 10.20535/2218-93002212018144244.
6. Cheng Y., Wang K., Zhang K. et al. Full-scale upgrade activated sludge to continuous-flow aerobic granular sludge. *Water Research.* 2024. Vol. 248. Article 120870. DOI: 10.1016/j.watres.2023.120870.

INNOVATIVE TECHNOLOGICAL APPROACH TO AERATION REGIME CONTROL IN TECHNOLOGY FOR WASTEWATER TREATMENT THROUGH OPTIMIZATION OF THE ACTIVATED SLUDGE MICROBIOCENOSIS IN BIOLOGICAL TREATMENT SYSTEMS

¹A. V. Pasenko, ²I. O. Soloshych, ³O. V. Novohatko

¹Kremenchuk Mykhailo Ostrohradskyi National University
20, University Street, Kremenchuk, 39600, Ukraine
pasenkoalena2015@gmail.com
<http://orcid.org/0000-0003-1108-0408>

²Kremenchuk Mykhailo Ostrohradskyi National University
20, University Street, Kremenchuk, 39600, Ukraine
soloishych@gmail.com
<http://orcid.org/0000-0002-8842-5120>

³Kremenchuk Mykhailo Ostrohradskyi National University
20, University Street, Kremenchuk, 39600, Ukraine
olga.novohatko2022@gmail.com
<http://orcid.org/0000-0003-0604-3362>

The development of innovative environmental and biotechnological solutions aimed at improving the efficiency of wastewater biological treatment in aeration tanks is achieved through an integrated approach that ensures the stable progression of biochemical oxidation processes carried out by activated sludge microorganisms. This approach includes technical modernization, process automation, and optimization of technological parameters. The search for ways to optimize the technological parameters of wastewater supply, contact between wastewater and sludge mixture in biological treatment facilities remains highly relevant for achieving a high degree of wastewater purification. This is a key element in ensuring environmental safety and the sustainable development of industrial regions while reducing negative impacts on the environment. The purpose of the article is to develop an innovative technological solution for regulating the aeration mode of the microbiocenosis in biological treatment facilities within the technology of wastewater treatment by controlling the load on activated sludge under conditions of reducing pollution of natural water bodies. The object of the study is the biotechnology of wastewater treatment involving activated sludge microorganisms in aeration tanks under conditions of reducing pollution of natural aquatic environments. The subject of the study is the investigation of technological conditions for optimizing the aeration mode in a mixing aeration tank to ensure the effective functioning of the activated sludge microbiocenosis in wastewater treatment biotechnology. The study employed theoretical methods (analysis, synthesis, generalization, comparison, and systematization of scientific sources and regulatory documents), empirical methods (sampling and storage of wastewater samples, hydrobiological analysis of activated sludge, determination of activated sludge age, activated sludge loading, dissolved oxygen concentration in wastewater, and wastewater flow rate), as well as methods of interpretation and generalization of results, which made it possible to evaluate the main parameters of activated sludge organism functioning and determine the degree of wastewater biological treatment in the aeration tank. The scientific novelty lies in the development of a technological solution for regulating the aeration regime of the activated sludge microbiocenosis in the technology of wastewater treatment by reducing the organic matter load through distributed wastewater inflow along the length of the mixing aeration tank. The practical significance of the work consists in the development, based on the results of hydrobiological analysis of activated sludge and the conditions of its functioning, of measures for optimizing aeration parameters and organic matter loading in wastewater within a mixing aeration tank by means of distributed wastewater inflow in a specific ratio through three inlet windows. This approach ensures high wastewater treatment efficiency and reduces pollution of natural water bodies.

It was determined that the optimal distribution of wastewater along the length of the biological treatment facility for optimizing aeration conditions through balancing the organic matter load on

activated sludge involves supplying wastewater to the three inlet windows of the mixing aeration tank in the following percentage ratio of the total water flow: 48.3%, 36.7%, and 15.0%, respectively. As a result, the organic matter load on activated sludge will be maximal at the beginning of the first corridor and minimal at the end of the second corridor, while the dissolved oxygen concentration will remain balanced within the treatment facility wastewater. Moreover, the possibility of untreated water entering the discharge system at the treatment plant will be eliminated, thereby reducing pollution of water bodies.

Key words: hydrosphere, wastewater treatment, aeration tank, innovative technological solution, aeration regime, activated sludge microbiocenosis.

Подання до редакції : 25. 02. 2026

Надходження остаточної версії : 28. 04. 2026

Публікація статті : 25. 05. 2026