

ХМЕЛЬНИЦЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

Факультет технологій і дизайну

Кафедра хімії та хімічної інженерії

КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА

Удосконалення технологічного процесу системи загального
очищення стічних вод м. Дунаївці

Рівень вищої освіти другий магістерський


Галузь знань 16 – «Хімічна інженерія та біоінженерія»

Спеціальність 161 – «Хімічні технології та інженерія»

Освітня програма – «Хімічні технології та інженерія»

КвРМХТІ.024132.01.07.ПЗ

Виконала здобувачка 2 курсу група ХТІм-24-1



Підпис

Аделіна ЧМІЛЬ

Керівник кандидат технічних наук, доцент



Підпис

Ганна ТКАЧУК

Нормоконтролер старший викладач



Підпис

Олександр СТРЕМЕЦЬКИЙ

До захисту допускаю:

Завідувач кафедри хімічної технології та інженерії



Підпис

Ольга ПАРАСКА

19 грудня 2025 р.

Дата

Хмельницький 2025

РЕФЕРАТ

Удосконалення технологічного процесу системи загального очищення стічних вод м. Дунаївці

Чміль А. С. Науковий керівник Ткачук Г. С.

Робота містить 68 с., 1 рисунок, 5 таблиць, 46 джерел.

Ключові слова: БІОЛОГІЧНЕ ОЧИЩЕННЯ, БІОГЕННІ ЕЛЕМЕНТИ.

ВОДОВІДВЕДЕННЯ, МЕМБРАННИЙ ЕПЕРГОЕФЕКТИВНІСТЬ, БІОРЕАКТОР, ОЧИСТІ СПОРУДИ, СТІЧІ ВОДИ. ТЕХНОЛОГІЧНИЙ ПРОЦЕС ОЧИЩЕННЯ СТІЧНИХ ВОД.

Мета роботи обґрунтування та розробка вдосконаленої технологічної схеми очищення стічних вод у місті Дунаївці з урахуванням змішаного складу стоків, сучасних біологічних та фізико-хімічних технологій очищення, а також умов експлуатації існуючих очисних споруд в комунальному підприємстві «Міськводоканал».

Об'єкт дослідження – система загального очищення стічних вод міста.

Предмет дослідження – технологічні процеси очищення стічних вод та їх удосконалення в умовах існуючих очисних споруд.

Методи дослідження – теоретичні та аналітичні; аналіз джерел науково-технічної документації: узагальнення вітчизняного та міжнародного досвіду експлуатації очисних споруд, порівняльний аналіз технологічних схем, розрахунки показників ефективності очищення та економічної доцільності модернізації.

Кваліфікаційна робота виконана в Хмельницькому національному університеті на базі кафедри хімії та хімічної інженерії з використанням матеріалів «Міськводоканал» відповідно до вимог освітньо-професійної програми та чинних нормативно-правових документів у сфері охорони навколишнього виробничих даних комунального підприємства природного середовища та водовідведення.

Проведений аналіз сучасного стану очищення стічних вод в Україні та узагальнений міжнародний досвід модернізації очисних споруд у малих містах. Проаналізовано існуючу систему очищення м. Дунаївці. охарактеризовано якісний та кількісний склад стічних вод та визначено основні експлуатаційні недоліки. В результаті виконання роботи обґрунтовано економічно доступний та енергоефективний варіант технологічного процесу очищення стічних вод.

Одержані результати кваліфікаційної роботи можуть бути використані при модернізації систем очищення міських стічних вод у малих населених пунктах.

Здобувач _____ Аделіна ЧМІЛЬ

Дата подання роботи на кафедру: «19» грудня 2025 р.

ЗМІСТ

Скорочення та умовні позначення	3
ВСТУП	4
1 ОГЛЯД ДЖЕРЕЛ НАУКОВО-ТЕХНІЧНОЇ ІНФОРМАЦІЇ	7
1.1 Сучасний стан систем очищення стічних вод в Україні	7
1.2 Зарубіжний досвід удосконалення технологій очищення стічних вод	10
1.3 Адаптація зарубіжного досвіду до умов України	16
2 АНАЛІЗ СТАНУ СИСТЕМИ ОЧИЩЕННЯ СТІЧНИХ ВОД М. ДУНАЇВЦІ20	
2.1 Характеристика існуючої системи КП «Міськводоканал»	20
2.2 Аналіз експлуатаційних характеристик та реального стану функціонування системи очищення КП «Міськводоканал»	24
2.3 Розробка вимог до вдосконаленої технологічної схеми очищення стічних вод КП «Міськводоканал»	27
2.4 Обґрунтування вибору технологій удосконалення системи очищення КП «Міськводоканал»	29
2.5 Розрахункова частина удосконаленої системи очищення КП «Міськводоканал»	33
3 ОЦІНКА ЕНЕРГОЕФЕКТИВНОСТІ УДОСКОНАЛЕНОЇ СИСТЕМИ ОЧИЩЕННЯ СТІЧНИХ ВОД	43
3.1 Оцінка ефективності очищення стічних вод базової та удосконаленої системи	43
3.2 Оцінка енергетичної ефективності удосконаленої системи очищення стічних вод	49
3.3 Оцінка капітальних витрат на модернізацію системи очищення стічних вод м. Дунаївці	54
Висновки	60
Перелік джерел посилання	63

Скорочення та умовні позначення

pH	Водневий показник
БСК	Біологічне споживання кисню
ГДК	Гранично допустима концентрація
ГДС	Гранично допустимий скид
ДМР	Дунаєвецька міська рада
КП	Комунальне підприємство
МБР	Біореактор з рухомими носіями біоплівки
ПАР	Поверхнево-активні речовини
ХСК	Хімічне споживання кисню

ВСТУП

Сучасний стан водовідведення та очищення стічних вод в Україні характеризується значно застарілою інфраструктурою та обладнанням, а також невідповідністю значної кількості очисних споруд стічних вод сучасним екологічним та технологічним вимогам. Більшість міських очисних споруд стічних вод були побудовані між 1970-ми та 1990-ми роками та спроектовані відповідно до стандартів, які не враховували поточні навантаження, появу нових видів забруднюючих речовин та необхідність енергоефективної експлуатації, що призводить до неадекватного очищення стічних вод, збільшення скидів забруднюючих речовин у водні шляхи, вищих експлуатаційних витрат та зниження надійності систем водовідведення.

В Україні значна частина каналізаційної мережі та очисних споруд вже працює на повну потужність, що особливо актуально для міста Дунаївці Хмельницької області, де існуюча система очищення спирається на традиційний біологічний процес, який більше не гарантує дотримання норм скидання. Крім того, міські стічні води містять не лише побутові, а й промислові стічні води підприємств легкої промисловості, особливо текстильної, які містять додаткові домішки, такі як поверхнево-активні речовини, барвники та підвищену концентрацію органічних речовин. Забруднювачі порушують біологічну систему, збільшують навантаження на аераційні басейни та погіршують седиментаційні властивості активного мулу.

Аналіз новітньої української та міжнародної науково-технічної літератури, документів промислових організацій та досвіду впровадження нових технологій у СС, США, Японії, Кореї та інших країнах показує, що модернізація систем очищення стічних вод повинна надавати пріоритет більш ефективним, компактним та енергозберігаючим рішенням. Сучасні передові технології включають використання рухомих мембранних

біореакторів, вторинне мембранне очищення, сорбційні фільтри для видалення складних органічних сполук та модернізацію систем аерації. Технології довели свою ефективність при роботі зі стічними водами змішаного складу в містах з населенням менше 50 000 мешканців та на об'єктах з обмеженим простором для реконструкції. Їх використання забезпечує стабільну роботу очисних споруд незалежно від умов навантаження.

Необхідність удосконалення системи очищення стічних вод у місті Дунаївці зумовлена кількома факторами: поточним технічним станом споруд, підвищенням вимог екологічної безпеки, необхідністю зниження експлуатаційних витрат та важливістю адаптації систем очищення для обробки змішаних побутових та промислових стічних вод. Водночас, модернізація має проводитися поетапно та бути обґрунтованою як з технічної, так і з економічної точки зору, що вимагає: проведення інженерного аналізу, порівняння можливих варіантів та розробки раціонального технологічного плану.

Актуальність роботи полягає в тому, що, зіткнувшись із погіршенням стану інфраструктури, зміною складу стічних вод та дедалі жорсткішими екологічними вимогами, місто Дунаївці має адаптувати свою існуючу систему очищення до фактичних навантажень та сучасних технологічних стандартів. Модернізація очисних споруд є важливою не лише через технічний стан обладнання, але й через появу нових забруднюючих речовин у стічних водах місцевої легкої промисловості, які ускладнюють роботу біологічного очищення та знижують його ефективність. Впровадження передових рішень забезпечує стабільну роботу споруд, дотримання чинних екологічних стандартів та довгострокову надійність системи водовідведення міста, що надає цій темі дослідження особливого практичного значення.

Метою кваліфікаційної роботи. обґрунтування та розробка вдосконаленої технологічної схеми очищення стічних вод у місті Дунаївці з урахуванням змішаного складу стоків, сучасних біологічних та фізико-

хімічних технологій очищення, а також умов експлуатації існуючих очисних споруд в комунальному підприємстві «Міськводоканал».

Предмет дослідження технологічний процес очищення, включаючи етапи механічного, біологічного та процесу доочищення.

Об'єктом дослідження є система загального очищення стічних вод міста Дунаївці, що експлуатується КП «Міськводоканал»,

Для досягнення цієї мети потрібно виконати основні завдання:

- аналіз поточного стану та експлуатаційних проблем системи очищення стічних вод міста Дунаївці;
- дослідження сучасних технологій очищення на основі міжнародного досвіду;
- обґрунтування вибору технологічних рішень, спрямованих на підвищення ефективності очищення стічних вод у місцевих умовах;
- технологічні розрахунки за основними параметрами;
- розробка вдосконаленої схеми очищення та оцінка її технічних та екологічних переваг.

Практична цінність цієї роботи полягає в потенційному застосуванні рішень, розроблених під час модернізації очисних споруд стічних вод у Дунаївцях. Удосконалений процес підвищує ефективність видалення органічних речовин та промислових забруднювачів, забезпечує стабільну роботу біологічного процесу, а також зменшує споживання енергії та навантаження на мулові майданчики. Результати цієї роботи можуть бути використані компаніями водопостачання та водовідведення, місцевими органами влади, організаціями з управління проектами та слугувати основою для подальших досліджень у сфері модернізації малих очисних споруд.

У роботі були використані методи дослідження: аналіз літературних джерел та нормативної документації, системний аналіз технологічних схем, моделювання матеріальних та енергетичних потоків, порівняльний аналіз варіантів удосконалення. техніко-економічне обґрунтування, експертні оцінки та методи узагальнення результатів.

1 ОГЛЯД ДЖЕРЕЛ НАУКОВО-ТЕХНІЧНОЇ ІНФОРМАЦІЇ

1.1 Сучасний стан систем очищення стічних вод в Україні

Очищення стічних вод є важливим елементом системи охорони довкілля та забезпечення екологічної безпеки в Україні. Питання раціонального водовідведення та якісного очищення стічних вод стало особливо актуальним через погіршення стану поверхневих водойм, зношення інфраструктури та зростання антропогенного тиску на водні ресурси. Сучасні вимоги до систем очищення стічних вод визначаються не лише національними стандартами, а й інтеграційними процесами з Європейським Союзом, що передбачає гармонізацію українського законодавства з положеннями Директиви Ради ЄС 91/271/ЄЕС «Про очищення міських стічних вод» [1].

В Україні налічується понад 1200 централізованих систем водовідведення, більшість з яких були побудовані між 1960-ми та 1980-ми роками та зараз перебувають у критичному стані. За даними Державної статистичної служби України, понад 45 % обладнання на цих станціях застаріло, а приблизно 30 % потребують повної реконструкції або заміни. Значна частина існуючих станцій працює понад проектний термін, що призводить до поступового зниження ефективності та частого недотримання гранично допустимих концентрацій [2].

Сучасна система очищення стічних вод в Україні характеризується високою централізацією у великих містах та недостатнім розвитком у менших населених пунктах. Згідно з аналізом, проведеним у рамках міжнародного проєкту «Water Sector Ukraine», приблизно 41.9 % централізованих мереж водовідведення перебувають у стані, близькому до аварійного, тоді як понад 13 мільйонів сільських жителів не мають доступу до належних очисних споруд [3]. Показники свідчать про нерівномірний розвиток інфраструктури водовідведення та необхідність впровадження

нових технічних рішень для підвищення ефективності очищення та зменшення впливу на навколишнє середовище.

Вчені зауважили, що більшість очисних споруд в Україні працюють за традиційною технологічною схемою, що включає механічне очищення (решітки, пісколовки, первинні відстійники), біологічне очищення (аеротенки, біофільтри, вторинні відстійники) та знезараження (зазвичай хлоруванням). Схема, що була ефективна свого часу, вже недостатня для належного видалення сполук азоту, фосфору, залишків органічних та ПАР [4]. У більшості випадків відсутні стадії глибокого доочищення та заходи контролю мікробруднення, що призводить до ризиків евтрофікації водойм та деградації водних екосистем.

Проблема посилюється відсутністю систематичного моніторингу, недостатньою автоматизацією процесів та відсутністю сучасних методів аналізу. Більшість підприємств водопостачання та водовідведення використовують застарілі прилади контролю, що ускладнює швидке реагування у разі відхилень у параметрах споруд. Крім того, низький рівень заробітної плати в комунальному секторі призводить до нестачі кваліфікованого персоналу, що також погіршує ефективність роботи очисних систем [5].

Важливо зазначити, що фінансування сектору водовідведення залишається недостатнім. За даними Європейського банку реконструкції та розвитку, у 2023 році лише 7 % комунальних служб отримали інвестиції в модернізацію своїх очисних споруд. Переважна більшість компаній працюють за рахунок власних коштів або за рахунок дотацій з місцевих бюджетів, яких недостатньо для повної реконструкції системи [6]. За таких умов підприємства змушені проводити часткову модернізацію: заміну обладнання, насосів, решіток чи систем аерації без комплексної реконструкції технологічного ланцюга.

Проблема неефективного очищення має не лише технічний, а й соціально-екологічний аспект. За оцінками Державного агентства водних

ресурсів, щороку в водні шляхи України скидається понад мільярд кубічних метрів недостатньо очищених або неочищених стічних вод, то становить приблизно 25% від загального обсягу скидів, ще призводить до зниження якості поверхневих вод, збільшення мікробіологічного забруднення, утворення евтрофікації та деградації водних екосистем [7]. Наявність залишків мийних засобів, пестицидів, фармацевтичних препаратів та важких металів у стічних водах становить потенційну загрозу для здоров'я населення.

Ситуація викликає особливе занепокоєння у менших містах, де обсяг стічних вод менший, але фінансування інфраструктури мінімальне. Комунальне підприємство «Міськводоканал» м. Дунаївці Хмельницької області є яскравим прикладом. Воно обслуговує централізовану каналізаційну систему міста, але значна частина його об'єктів датується 1980-ми роками. Процес базується традиційних методах механічного та біологічного очищення без будь-якої ретельної вторинної очистки. Аналіз технічної документації показує, що споруди працюють частковим перевантаженням, обладнання потребує модернізацій, а системи аерації та управління мулом більше не відповідають сучасним вимогам ефективності.

Окрім технічного зносу, виникають проблеми зі стабільністю гідравлічних режимів та очищенням при змінних обсягах стічних вод. Під час сезонних коливань навантаження на споруди може зростати на 20-30%, порушуючи екосистему активного мулу та погіршуючи якість очищення. Також спостерігалось недостатнє очищення, особливо щодо біохімічного споживання кисню (БСК), хімічного споживання кисню (ХСК) та вмісту завислих речовин, що підкреслює необхідність удосконалення існуючої технології. Метою цього дослідження є вирішення цих проблем шляхом аналізу технологічного процесу загальної системи очищення у місті Дунаївці та розробки заходів оптимізації.

В останні роки Україна активізувала свою політику охорони водних ресурсів. Так, у 2024 році Рада Міністрів України ухвалила Постанову № 378

«Про затвердження Порядку очищення стічних вод перед скиданням в уразливих зонах», яка встановлює нові вимоги до ефективності очищення та контролю якості [8]. Документ спрямований на адаптацію української практики до стандартів ЄС, зокрема щодо зменшення вмісту біогенних елементів (азоту, фосфору) у скидах.

Наукові публікації останніх років підтверджують необхідність переходу до енергоефективних та ресурсозберігаючих технологій. Зокрема, предметом поглиблених досліджень методи біологічного видалення азоту та фосфору, вдосконалені системи аерації, впровадження технологій мембранних біореакторів, анаеробні системи перетравлення осаду та повторне використання очищених стічних вод для технічних цілей [19]. У деяких українських містах, таких як Львів, Луцьк та Івано-Франківськ, за підтримки міжнародних фінансових установ реалізуються проєкти з модернізації очисних споруд, що демонструє позитивний розвиток та закладає основу для подальшого впровадження сучасних технологій у менших містах.

Поточний стан систем очищення стічних вод в Україні є критичним, але все ще має потенціал для покращення. Основними проблемами залишаються технічне старіння обладнання, недостатнє фінансування, низький рівень автоматизації процесів та невідповідність європейським стандартам. Удосконалення технологічних процесів, прикладом якого є КП «Міськводоканал» ДМР, є актуальною та практично важливою галуззю досліджень, адже дозволяє створити модель, адаптовану до модернізацій очисних споруд для малих міських систем з меншими витратами, водночас значно підвищуючи ефективність очищення.

1.2 Зарубіжний досвід удосконалення технологій очищення стічних вод

Сучасний стан систем очищення стічних вод у всьому світі характеризується переходом від традиційних технологічних процесів до

складних, енергоефективних та екологічно чистих рішень. Ці рішення спрямовані не лише на зменшення забруднення, але й на повторне використання очищеної води та ресурсів з осаду. Підхід відповідає концепції циркулярної економіки, яка активно впроваджується в країнах Європейського Союзу. Північної Америки та Азії. Сучасні системи базуються на принципі «нульового скидання стічних вод», що передбачає мінімізацію втрат води та відновлення ресурсів.

У країнах Європейського Союзу модернізація очисних споруд регулюється суворою нормативно-правовою базою, включаючи Рамкову директиву з водних ресурсів 2000/60/ЄС, Директиву 91/271/ЄС «Про очищення міських стічних вод» та оновлені екологічні стандарти Європейської комісії 2022 року. Ці стандарти вимагають не лише досягнення певних показників очищення за БСК, ХСК та концентраціями азоту та фосфору, але й впровадження енергоефективних технологій та зменшення вуглецевого сліду. Згідно з останніми рекомендаціями Європейського агентства з охорони навколишнього середовища, європейські очисні споруди все частіше впроваджують моделі біоенергетики, де продукти очищення біогаз, муз та очищена вода стають вторинними ресурсами для міської інфраструктури [10].

Особлива увага приділяється цифровізації процесів очищення. У рамках програм Horizon Europe та Digital Water EU активно впроваджуються технології «розумного очищення води». Ці технології поєднують сенсори, автоматизовані системи управління та аналітику великих даних, що дозволяє в режимі реального часу контролювати ефективність біологічних процесів, рівень аерації, споживання енергії та якість очищеної води. Наприклад, у Німеччині понад 60% великих очисних споруд оснащені автоматизованими системами управління SCADA, а понад 40 % – інтелектуальними лічильниками потоку і кисню.

У Нідерландах ключовим напрямком розвитку є перехід від централізованих до децентралізованих систем очищення, особливо для

менших громад. Перехід допомагає зменшити витрати на транспортування стічних вод, втрати на насосних станціях та дозволяє використовувати гнучкі локальні рішення для повторного використання води. Проєкти Waternet (Амстердам) та DeSaH (Фрісландія) є прикладами успішного поєднання біологічного очищення з мембранною фільтрацією та повторним використанням очищеної води для технічних потреб та зрошення [11].

Сполучені Штати мають власний регуляторний підхід, що впроваджується Агентством з охорони довкілля відповідно до Закону про чисту воду. Особлива увага приділяється енергоефективності та модернізації очисних споруд у невеликих громадах. Згідно з програмою енергоефективного очищення Energy-Water Nexus, у США існує понад 600 установок, де впроваджено технології рекуперації енергії біогазу, ультрафільтрації, електрокоагуляції та аеробної стабілізації осаду. Результати цих проєктів продемонстрували, що навіть невеликі міста з населенням менше 50 тисяч жителів можуть скоротити споживання енергії своїми очисними системами до 30 %, зберігаючи при цьому високу якість очищення [12].

В Азії, зокрема в Японії та Південній Кореї, основна увага приділяється створенню компактних систем для густонаселених міських районів. Японська технологія Johkasou, розроблена в 1980-х роках, була модернізована: сучасні установки працюють за принципом багатоступеневого біореактора з мембранним доочищенням. За допомогою таких систем ефективно очищують побутові та промислові стічні води в масштабі району або підприємства та дозволяють повторно використовувати очищену воду. Тим часом Південна Корея активно впроваджує гібридні системи, такі як мембранний біореактор та динамічний мембранний біореактор, які поєднують біологічну та фізичну обробку в компактних установках з повною автоматизацією процесу [13].

У Швейцарії, Австрії та Скандинавських країнах системи «біологічного полірування» набули значного розвитку. Заключний етап цього процесу

покращує якість очищеної води без вдавання до складних процесів з використанням реагентів. Наприклад, у Цюриху Стокгольмі використовуються гранульовані біофільтри з контрольованою аерацією, що знижує концентрацію БСК до менш ніж 10 мг/дм^3 та концентрацію ХСК до менш ніж 30 мг/дм^3 [14].

Серед провідних тенденцій останніх років слід також виділити зростаючу роль мембранних технологій та біореакторів наступного покоління. Системи, що поєднують біологічне очищення ультрафільтрацією або нанофільтрацією, поступово стають стандартом для середніх міст ЄС. Мембранні біореактори очищують воду до такої високої якості, що її можна повторно використовувати для промислових або технічних цілей. Як приклад, розглянемо міські очисні споруди стічних вод в Аахені, Німеччина, де після впровадження системи у 2021 році вдалося знизити концентрацію завислих речовин до 1 мг/дм^3 та збільшити коефіцієнт видалення БСК до 99% [15].

Другим важливим напрямком розвитку сучасних технологій очищення є використання мембранних систем. Мембранні процеси, такі як мікрофільтрація, ультрафільтрація, нанофільтрація та зворотний осмос, дозволяють ефективно видаляти завислі речовини, колоїди та деякі розчинені органічні сполуки. У країнах Європейського Союзу мембранні установки все частіше інтегруються в комбіновані схеми біологічного очищення, де вони забезпечують остаточне очищення або замінюють традиційні вторинні відстійники. Очисна споруда стічних вод у Відні (Австрія) є успішно реалізованим прикладом, де мембранні модулі типу ZeeWeed забезпечують очищену воду стабільної якості з каламутністю менше $0,1 \text{ NTU}$, то дозволяє використовувати її в промислових цілях [16].

Мембранні системи мають численні переваги: вони гарантують стабільну якість води незалежно від коливань навантаження, займають менше місця, ніж традиційні установки, і дають змогу повторно використовувати очищену воду. Головний недолік полягає у високому

енергоспоживанні та необхідності періодичного очищення мембран. Однак останніми роками спостерігається значний прогрес у розробці низькоенергетичних мембран низького тиску. Зокрема, Тогау (Японія) та LG Chem (Корея) розробили модулі з нанокompозитних матеріалів, які забезпечують фільтрацію під тиском від 0,1 до 0,2 бар, зменшуючи споживання енергії на 20-30 %. У цих системах все частіше використовується очищення мембран шляхом аерації, що запобігає забрудненню без необхідності використання агресивних хімічних реагентів [17].

Одним з найперспективніших напрямків є поєднання біологічного очищення та мембранної фільтрації: технологія мембранного біореактора, далі МБР. Вона дозволяє поєднувати процеси біодеградації органічних речовин та фізичного розділення осаду, забезпечуючи високий ступінь очищення та оптимальну компактність установок. Системи активно впроваджуються у Франції, Данії, Нідерландах та Польщі, зокрема на очисних спорудах стічних вод, що обслуговують невеликі міста. Дослідження, проведені Європейською водною асоціацією, продемонстрували, що системи МБР можуть видаляти до 98-99 % БСК, до 99,5% зважених твердих речовин та до 99 % патогенних мікроорганізмів. Крім того, воду можна повторно використовувати для технічного водопостачання або зрошення зелених насаджень [18].

У сучасних системах значна увага приділяється електрохімічним методам очищення. Електрокоагуляція, електрофлотація та електроокислення дозволяють ефективно видаляти колоїдні частинки, сполуки важких металів, барвники та інші органічні забруднювачі, що не піддаються біологічній деструкції. Методи особливо ефективні для стічних вод легкої, харчової та хімічної промисловості. Наприклад, у Фінляндії використовується комбінована технологія: установка електрокоагуляції розміщується перед біореактором, що зменшує навантаження на біосистему на 25-35 % та забезпечує стабільність процесу навіть при нерегулярному надходженні промислових стічних вод [19].

У США та Канаді активно досліджується використання систем електроактивації на основі бордопованих алмазних електродів. Системи генерують гідроксильні радикали, які окислюють складні органічні сполуки без реагентів. Хоча ці технології залишаються дорогими, вони є перспективними для локального очищення промислових стічних вод, зокрема текстильної промисловості [20].

Ще один шлях удосконалення передбачає використання біореакторів на основі біоплівки. Технології біоплівкового реактора з рухомим шаром та інтегрованого активованого мулу з фіксованою плівкою збільшують площу поверхні для росту біомаси та покращують процеси нітрифікації та денітрифікації. У скандинавських країнах ці системи встановлюються навіть на старих очисних спорудах без значної реконструкції, що робить їх економічно вигідними. Наприклад, на заводі Тронхеймі в Норвегії їх впровадження збільшило ефективність видалення азоту на 40% без розширення потужностей [21].

В останні роки також набули розвитку сорбційні технології. Вони використовуються як завершальний етап очищення води для видалення залишкових органічних сполук, барвників та ПАВ. Серед найефективніших сорбентів є активоване вугілля, цеоліти, модифіковані глини та вуглецеві наноматеріали. Наприклад, у Нідерландах та Німеччині гранульовані вугільні фільтри зазвичай використовуються після стадії мембранної фільтрації, вони зменшують зміну кольору води та видаляють мікробруднювачі. Для країн із середнім рівнем промислового споживання і рішення вважаються найбільш економічно ефективними [22].

Ще одним ключовим напрямком розвитку є впровадження цифрових та автоматизованих систем керування процесом очищення. Використання датчиків розчищеного кисню, окисно-відновного потенціалу, рН та температури в режимі реального часу дозволяє оптимізувати роботу компресора, зменшити споживання енергій та стабілізувати біологічний процес. У багатьох містах ЄС вже впроваджені прогнозні системи керування;

які передбачають коливання навантаження на очисні споруди та автоматично регулюють подачу повітря або рециркуляцію осаду. Згідно з дослідженням Європейського інституту водних технологій, це дозволяє заощадити до 25% електроенергії без втрати якості очищення [23]

Усі ці рішення об'єднує прагнення до комплексного очищення. Сучасні системи більше не розглядаються просто як споруди для видалення забруднюючих речовин; тому що вони є інтегрованими еко-технологічними об'єктами, що забезпечують очищення відходів, виробництво енергії та повторне використання води. Саме тому замість традиційного терміна «очисна споруда стічних вод» все частіше використовується термін «установка з відновлення водних ресурсів», що підкреслює нову філософію управління водними ресурсами [24].

1.3 Адаптація зарубіжного досвіду до умов України

Адаптація найкращих іноземних практик до українських умов має базуватися на реалістичній оцінці можливостей місцевих водопровідних та водовідвідних підприємств, фінансових ресурсів місцевих органів влади та екологічного стану водотоків. Україна нині перебуває на етапі трансформації систем очищення відповідно до європейських вимог. Зокрема, Закон України «Про державне регулювання у сфері водовідведення та водопостачання» (ред. 2022 року) та Національний план управління водними ресурсами (Міндовкілля, 2023) передбачають поступове узгодження стандартів очищення стічних вод з вимогами Директиви 91/271/СЕС. Їх впровадження означає, що навіть невеликі місцеві органи влади повинні модернізувати свої системи, враховуючи нові підходи до енергоефективності, охорони навколишнього середовища та повторного використання води [25].

Узагальнені підходи до очищення міських стічних вод для населених пунктів малого та середнього розміру передбачають застосування класичних біологічних процесів у поєднанні з елементами доочищення, що

забезпечують стабільність роботи системи за змінного складу та витрати стічних вод. Як зазначено у навчальному посібнику з очищення міських стічних вод, для таких умов ключовими є надійність біологічного процесу, адаптація до нерівномірних навантажень та мінімізація енергетичних витрат при збереженні нормативної якості скиду [26].

На практиці більшість українських очисних споруд були побудовані між 1970-ми та 1990-ми роками і більше не відповідають сучасним екологічним вимогам. Вони потребують не лише реконструкції свого обладнання, але й перегляду технологічних схем. Досвід Польщі, Чехії та країн Балтії показує, що найефективнішим методом модернізації малих міст є поступове впровадження автономних, енергоефективних та мало обслуговуваних технологічних установок. Саме його слід застосовувати до системи очищення стічних вод міста Дунаївці.

Місто характеризується наявністю побутових та промислових стічних вод. Промислові стічні води цього сектору зазвичай містять залишки барвників, поверхнево-активних та органічних речовин також дрібних, дисперсних текстильних волокон, які можуть перешкоджати осадженню активного мулу. Тому система покращення повинна враховувати підвищене навантаження ХСК та БСК, необхідність стабілізації біологічного процесу та можливість локального додаткового очищення.

Основним напрямком покращення для міста може бути впровадження біореактора з рухомими носіями біоплівки. Технологія забезпечує стабільну нітрифікацію навіть за змінного складу стічних вод, підвищує ефективність видалення органічних речовин та знижує чутливість системи до токсичних домішок, зокрема ПАР та барвників. Його можна інтегрувати в існуючі аераційні басейни без значної реконструкції, що є особливо вигідним для невеликих комунальних підприємств. Подібні системи вже працюють у містах Славута, Кам'янець-Подільський та Ковель, де ефективність очищення БСК досягла 97 % завдяки впровадженню біоплівкових фільтруючих матеріалів [27].

Другий етап удосконалення передбачає встановлення вторинної мембранної очистки ультрафільтраційних модулів після вторинних відстійників. Він дозволяє повністю затримувати зважені тверді речовини, текстильні мікрОВОлокна та деякі кольорові сполуки. Очищена вода набуває стабільної прозорості та може бути скинута в річку Тернава без ризику вторинного забруднення. Вторинне мембранне очищення вже продемонструвало свою ефективність на очисних спорудах стічних вод Легниці (Польща) та Оломоуца (Чеська Республіка), які очищують аналогічний тип промислових стічних вод [28].

Для забезпечення подальшого видалення барвників та ПАР доцільно впровадити сорбційну фільтрацію з використанням активованого вугілля або змішаних вугільно-піщаних фільтрів, які можна встановлювати після мембранного етапу для забезпечення поглибленого очищення без необхідності використання складних реагентів. Вони прості у використанні, а сорбент можна регенерувати або замінювати, використовуючи місцеві ресурси (наприклад, активоване вугілля на основі деревини).

Для зниження експлуатаційних витрат рекомендується модернізувати систему аерацій, замінивши застарілі компресори на турбокомпресори з частотним регулюванням та системою автоматичного контролю рівня кисню, що зменшить споживання енергії до 25 % та стабілізує біологічні процеси. Додавання датчиків для контролю параметрів очищення (кисень, рН, температура, рівень осаду) дозволить інтелектуально керувати процесами.

Особливої уваги потребує питання утилізації осаду, який наразі накопичується на сміттєзвалищах без подальшої обробки. Для Дунаївців особливо вигідно впровадити систему анаеробної стабілізації мулу в метантенку невеликого об'єму. Завдяки цьому можна зменшити об'єм осаду до 40 %, усунути неприємні запахи та частково виробляти біогаз, який можна використовувати для опалення технічних приміщень. Подібні практики довели свою ефективність у малих містах Литви, Естонії та Словаччини [30].

Запропоновані технічні рішення є послідовними, економічно виправданими та екологічно безпечними. Вони не потребують повної реконструкції очисних споруд, можуть реалізовуватись у декілька етапів і гарантують дотримання нормативних показників очищення відповідно до ДСТУ 3016-2015.

В результаті проведеного аналітичного огляду встановлено, що сучасні тенденції в очищенні стічних вод спрямовані на досягнення максимальної екологічної ефективності, енергозбереження та відновлення ресурсів. Провідні країни світу впроваджують комплексні системи, що поєднують біологічні, мембранні, сорбційні та цифрові технології. Основними напрямками розвитку є зниження енергоспоживання, підвищення стійкості біологічних процесів та забезпечення можливості повторного використання очищеної води.

Досвід ЄС, США та Азії показує, що модернізація, навіть невеликих очисних споруд, може бути успішною за умови поступового впровадження гнучких технологічних рішень. Для України це особливо актуально, враховуючи значний знос й інфраструктури та необхідність виконання міжнародних зобов'язань щодо охорони водних ресурсів. Аналіз стану системи очищення стічних вод Дунаївці показав, що вона має потенціал для підвищення ефективності без повної реконструкції.

Найбільш актуальними напрямками для покращення – впровадження технологій біоплівкового реактора для стабілізації біологічного процесу, вторинне мембранне очищення для видалення зважених та кольорових домішок, сорбційні фільтри для ретельного очищення, модернізація системи аерації та впровадження цифрової системи моніторингу. Впровадження цих заходів дозволить очищеній воді відповідати екологічним стандартам. зменшить споживання енергій та забезпечить надійну довгострокову роботу системи.

2 АНАЛІЗ СТАНУ СИСТЕМИ ОЧИЩЕННЯ СТІЧНИХ ВОД М. ДУНАЇВЦІ

2.1 Характеристика існуючої системи КП «Міськводоканал»

Система водовідведення в місті Дунаївці функціонує як централізована мережа інфраструктури та технічних споруд, основною функцією якої є збір, транспортування та очищення змішаних стічних вод, побутових, так і промислових. Протягом останніх кількох десятиліть місто швидко розвивалося, характер забруднюючих речовин, що потрапляють у каналізаційну систему, змінився: окрім переважно побутових стічних вод, тепер також присутні стічні води легкої промисловості, зокрема швейних фабрик, що вносять специфічні органічні сполуки та поверхнево-активні речовини. Як наслідок, робоче навантаження очисних споруд є складним, хоча обсяг залишається відносно невеликим.

За даними КП «Міськводоканал», у 2023-2024 роках на очисні споруди надходило від 273 000 до 277 тис. м³ стічних вод. В середньому це приблизно від 740 до 760 м³/день, що менше за проєктну потужність цього типу споруд. Значне недовантаження має певні наслідки: всупереч поширеній думці, вона не зменшує навантаження на обладнання, а навпаки порушує належне функціонування біологічних процесів. Дійсно, активний мул потребує певного рівня органічної речовини для підтримки життєздатної мікробної спільноти. У разі недостатнього навантаження субстратом процеси біологічного очищення можуть сповільнитися, а структура шарів мулу стає менш стабільною, то може призвести до коливань якості очищеної води.

Очисні споруди працюють за традиційною схемою механіко-біологічної очистки, доповненою подальшим природним очищенням. Перший стан включає механічне очищення стічних вод, яке починається з їх проходження через решітки. Початковий етап є вирішальним, оскільки він затримує великі, нерозчинні домішки, такі як поліетилен, побутові відходи та

грубі тверді частинки, які можуть пошкодити обладнання на наступних етапах очищення. Сітки працюють цілодобово та, хоча їхня конструкція не автоматизована, вони забезпечують ефективне механічне відділення великих домішок. Працівники підприємства періодично очищують решітки вручну, що підвищує експлуатаційне навантаження та вимагає додаткових витрат робочого часу.

Після проходження через решітки вода потрапляє у пісколовки, де відбувається осадження мінеральних домішок, в першу чергу піску та важких завислих частинок. Етап вирішальним для обмеження абразивного зносу насосів та труб. Пісколовки традиційної конструкції працюють за принципом уповільнення потоку, дозволяючи важким частинкам осідати. Однак їхня ефективність залежить від гідравлічного режиму та може змінюватися залежно від об'єму та складу стічних вод. У разі низького потоку, що характерно для міста, потік може бути недостатнім, що знижує якість седиментації та призводить до потрапляння частини піску на вторинні стадії очищення.

Відразу після пісколовок стоки потрапляють до первинних відстійників, які дозволяють воді відстоюватися достатньо довго, щоб великі та середні частинки осідали під дією сили тяжіння. Первинні відстійники відіграють вирішальну роль, оскільки вони визначають ступінь зменшення ХСК та зважених речовин ще до фази біологічного очищення. На КП «Міськводоканал» первинні відстійники працюють вже понад 30 років, що призвело до певного зниження їхньої гідравлічної ефективності через нерівномірні режими потоку та накопичення осаду на стінках і дні. Як наслідок, деякі зважені речовини можуть залишатися у зваженому стані та досягати етапу аерації, створюючи додаткове навантаження на процес біологічного очищення.

Після первинного очищення стічні води спрямовуються до аеротенків, ключового елемента біологічного очищення, де відбувається інтенсивний біохімічний процес, під час якого активний мул, що складається з бактерій та

мікроорганізмів, окиснює органічні речовини. Важливо, що на ефективність аеротенків сильно впливають склад та об'єм стічних вод. У випадках низького навантаження, що є поширеною ситуацією в міських районах, мікробні популяції можуть стати нестабільними, а надлишок мулу може старіти та погіршувати його седиментаційні властивості. Промислові стічні води текстильних фабрик мають додатковий вплив: вони містять поверхнево-активні речовини, які можуть розщеплювати флокули активного мулу, викликаючи набухання або піноутворення в аераційних басейнах. Компресорна система аерацій, що використовується на підприємстві, забезпечує постачання повітря, але не дозволяє точно регулювати рівень насичення води киснем, що є суттєвим обмеженням під час коливань навантаження.

Після біологічного очищення стічні води транспортують до вторинних відстійників, які відокремлюють активний мул від освітленої води. Ці відстійники є важливими для підтримки необхідної концентрації мулу в аераційних басейнах, оскільки частину осаду знову вводять біологічний процес. Вторинні відстійники міста експлуатують вже давно, що призводить до деякого зниження їхньої гідравлічної ефективності. У випадках нестабільності активного мулу можливе періодичне винесення мулу у скиди, особливо коли швидкість потоку коливається або вносяться домішки, що змінюють структуру мулових флокул.

Заключний етап технологічного процесу передбачає природне вторинне очищення в біологічних ставках, які функціонують за принципом тривалої витримки стічної води в умовах, сприятливих для фотосинтезу та природних біохімічних процесів. Влітку, коли температура води висока, активується фотосинтез водоростей, що насичує воду киснем і сприяє розкладанню органічної речовини. Однак ріст водоростей часто супроводжується «цвітінням», що може створювати додаткове навантаження. Взимку ж ефективність значно падає. За низьких температур біохімічні

реакції сповільнюються, брак світла обмежує розвиток фотосинтезу, а отже, якість води, що виходить з цих басейнів, може бути недостатньою.

Стан каналізаційної мережі потребує особливої уваги, оскільки технічний рівень безпосередньо впливає на якість роботи очисних споруд. Значна частина груб була встановлена кілька десятиліть тому, і сьогодні вони частково втратили свою герметичність. Як наслідок, у деяких районах можливе проникнення ґрунтових вод у каналізацію або, навпаки, витік стічних вод у землю. Ці явища призводять до непередбачуваних коливань швидкості надходження до очисних споруд, ускладнюючи підтримку стабільного режиму роботи. Інфільтрація розбавляє стічні води та зменшує концентрацію органічних речовин, тим самим погіршуючи оптимальне функціонування біологічних систем. Ексфільтрація, в свою чергу, може створювати локальні осередки забруднення ґрунту та поверхневих вод.

Не менш важливим є стан річки Тернава, в яку відбувається скид. У періоди низького рівня води та слабкої течії природне самоочищення річки обмежене. Навіть нормативно очищені стічні води можуть суттєво змінити їх стан, оскільки концентрація домішок накопичується в прибережній зоні, що проявляється сезонним «цвітінням» водоростей, зниженням прозорості, утворенням мулових відкладень та характерним запахом, типовим для невеликих водойм, що зазнають тривалого забруднення людиною. Зрештою, це призводить до створення умов, що нагадують застійне водоймище, з характерними ознаками евтрофікації: зниженням прозорості, утворенням мулових відкладень, ростом водоростей та розвитком ділянок з низьким рівнем розчиненого кисню.

Таким чином, поточний стан системи очищення стічних вод міста Дунаївці має кілька технологічних особливостей, які зумовлюють її нестабільність. Хоча споруди працюють у межах своєї потужності, їхні технічні ресурси, знос обладнання та застарілість технологічних процесів вимагають модернізації. Гарним рішенням буде вдосконалення системи аерації, вторинного відстоювання та якості попереднього механічного

очищення, а також впровадження додаткових методів доочищення перед скиданням стічних вод у маловодні водотоки. Поєднання цих елементів зменшить екологічний тиск на водотоки та забезпечить дотримання сучасного водного законодавства.

2.2 Аналіз експлуатаційних характеристик та реального стану функціонування системи очищення КП «Міськводоканал»

Функціонування очисних споруд у місті Дунаївці визначається поєднанням технологічних, гідравлічних, екологічних та конструктивних факторів, які з часом набули системного характеру, безпосередньо впливаючи на фактичну ефективність очищення. Як зазначено в підрозділі 2.1, споруди отримують відносно невеликий об'єм стічних вод: приблизно 740-760 м на добу, порівняно зі значно вищою номінальною потужністю, а їх склад є змішаним. У поєднанні з фізичним зносом конструкцій та мереж така ситуація призводить до режиму роботи, коли технологічна система формально виконує свої функції, але насправді працює на межі своєї ефективності.

Однією основних експлуатаційних характеристик є суттєве недовантаження біологічної системи. Через низьку середньодобову витрату та розведення шляхом інфільтрації, фактичні концентрації органічних речовин на вході до очисних споруд (БСК, ХСК) нижчі, ніж у неочищених побутових стічних водах. За цих умов активний мул часто працює з нестачею органічного субстрату, що призводить до утворення дрібних, пухко ущільнених флокул з порушеними седиментаційними властивостями: вони повільно осідають, легко переносяться з аераційних басейнів до вторинних відстійників і частково потрапляють у біоставки. Отже, навіть якщо середні лабораторні показники відповідають нормам, фактична робота біологічної системи нестабільна, а якість очищеної води значно коливається.

Нерівномірність притоку протягом дня ще більше посилює проблему. Для міста характерні пікові навантаження вранці та ввечері, коли потік різко зростає, тоді як вночі він найнижчий. Коливання змінюють фактичний вік мулу та концентрацію органічних речовин в аераційних басейнах. Система аерації, з її обмеженими регулювальними можливостями, не має часу для швидкого регулювання подачі повітря. У години піків можливе тимчасове погіршення якості очищення та виносу мулу, а в періоди низького потоку надмірне споживання електроенергії для аерації недостатньо навантажених об'ємів.

Змішаний характер стічних вод, зумовлений домішками текстильної промисловості, збільшує нестабільність біологічного процесу. Навіть невелика кількість цих стоків може пошкодити структуру флокул активного мулу, сприяючи утворенню піни та дрібнодисперсної суспензії, яка важко осідає у вторинних відстійниках, що призводить до підвищеної каламутності очищеної води, нерівномірного розподілу мулу в відстійниках та збільшення виносу завислих твердих речовин у біоставки.

Важливим експлуатаційним чинником є гідравлічна деформація, що виникає за тривалий період роботи споруд. У каналах, трубопроводах, відстійниках та біоставках накопичуються осади, карбонатні відкладення та плівки, змінюючи прохідні перерізи потоку та гідравлічні режими. У первинних та вторинних відстійниках утворюються зони нерівномірних швидкостей потоку. Через це знижується ефективна очисна місткість споруд. погіршує умови освітлення та підвищує ризик коротких гідравлічних шляхів, коли частина стічних вод проходить через відстійник занадто малою тривалістю перебування.

Стан біоставків є особливо критичним, оскільки, як зазначено в підрозділі 2.1, вони діють як природна лапка вторинного очищення. За роки експлуатації утворився товстий шар донних відкладень, що складається з дрібнодисперсного мулу, органічних залишків та відмерлої біомаси. Фактично, ставки функціонують переважно як відстійні резервуари з

низькою інтенсивністю самоочищення: ефективна зона змішується з «мертвими зонами», де вода застоюється. У теплу пору року це сприяє масовому «цвітінню» водоростей та пов'язаним з ним коливанням вмісту розчиненого кисню, тоді як у холодну пору року ефективність біохімічного очищення значно знижується.

Корозійні процеси суттєво впливають на експлуатаційний стан. Металеві компоненти: ґрати, мости, огорожі, секції труб та елементи аераційної системи зазнають інтенсивної корозії, що призводить до структурного ослаблення та підвищеної потреби в ремонті. Бетонні конструкції демонструють ознаки карбонізації, розтріскування, локального вилуговування та руйнування захисного шару, що не тільки скорочує розрахунковий термін служби конструкцій, але й погіршує гідравлічну однорідність процесів: тріщини, нерівності та локальні западини сприяють застою стічних вод та накопиченню осаду.

Знос аераційної системи проявляється у зниженні технологічної ефективності та збільшенні споживання енергії. Компресори мають знижений коефіцієнт корисної дії та потребують підвищеної потужності для підтримки потоку повітря. Мембранні або перфоровані аератори частково засмічуються мулом та карбонатами, що знижує дрібність бульбашок та рівномірність розподілу повітря в аеротенках. Для підтримки мінімально необхідної концентрації розчиненого кисню доводиться працювати з надлишковою подачею повітря, що безпосередньо збільшує споживання електроенергії.

Стан каналізаційної мережі та вплив атмосферно-інфільтраційних процесів також мають прямі експлуатаційні наслідки. Інфільтрація ґрунтових вод у каналізацію під час дощів та паводкові періоди призводить до раптового збільшення потоку стічних вод, одночасно знижуючи концентрації забруднюючих речовин. Явище гідравлічно перевантажує споруди, але технологічно розбавляє стічні води, що ускладнює підтримку оптимального режиму біологічного очищення. У посушливі періоди ситуація зворотна:

приплив нижчий, але концентрації забруднюючих речовин зростають, створюючи пікові навантаження для фази біологічного етапу. Незбалансований режим характерний для старіючих систем очищення стічних вод і вимагає технічних рішень під час їх модернізації.

Сукупність зазначених факторів, а саме недовантаження споруд, нестача органічного субстрату для активного мулу, змішаний склад стічних вод, гідравлічні деформації, замулення біоставків, корозія конструкцій, знос системи аерації, коливання стоків через атмосферну інфільтрацію та низька водність річки Тернави, створює режим роботи, за якого очисні споруди функціонують з обмеженим запасом надійності. Авжеж, це не означає, що система не працює, однак її технологічна адаптивність до коливань навантаження та екологічна стійкість не відповідають сучасним вимогам. Тому модернізація технологічної схеми, зосереджена на стабілізації біологічного процесу, підвищенні гідравлічної ефективності споруд, модернізації аераційного обладнання та оптимізації структури вторинного очищення, є необхідною передумовою для забезпечення надійної та сталої роботи Дунаєвецької очисної системи.

2.3 Розробка вимог до вдосконаленої технологічної схеми очищення стічних вод КП «Міськводоканал»

На основі аналізу існуючої системи водовідведення та очищення стічних вод у Дунаївцях, представленого в підрозділах 2.1 та 2.2, удосконалена технологічна схема повинна відповідати комплексу технічних, гідравлічних, екологічних та експлуатаційних вимог, що визначаються конкретними експлуатаційними характеристиками існуючих споруд. Насамперед вимоги повинні, зокрема, забезпечувати стабільність очищення у разі низького та нерівномірного навантаження, змішаного складу побутово-промислових вод, зносу споруд та обмеженої здатності річки Тернава до розведення та самоочищення.

Однією з суттєвих вимог є забезпечення стабільності процесу біологічного очищення. Фактичні обсяги стоків, що надходять, значно менші за проектні, концентрації органічних речовин знижені, що ускладнює експлуатацію традиційної системи активного мулу. Тому вдосконалена система має гарантувати стабільну роботу ступеня біологічного очищення як при низькому, так і при змінному органічному навантаженні, а також запобігати утворенню спухлого мулу та його переходу на наступні ступені очищення.

Друга важлива група вимог стосується адаптації нових рішень до існуючої інфраструктури. Модернізація має бути досягнута шляхом оптимізації використання існуючих резервуарів, каналів, відстійників та біоставків, без необхідності масштабної реконструкції споруд. Технологічні рішення повинні забезпечувати поетапне впровадження з поступовою модернізацією різних компонентів без повного виведення системи з експлуатації, що є критично важливим для невеликої комунального підприємства.

Енергоефективність є окремим блоком вимог. Аерація, як найбільш енергоємний етап біологічного очищення, становить основну частку експлуатаційних витрат. Тому вдосконалена система має бути спрямована на зниження питомого споживання електроенергії на одиницю очищеної води шляхом використання енергоефективного обладнання, оптимізації режимів аерації та, де це можливо, впровадження базових автоматизованих механізмів регулювання. Водночас зниження споживання енергії не має погіршувати якість очищення стоків,

Також важливо враховувати вимоги екологічної безпеки скидів у річку з низьким потоком. Удосконалена система зобов'язана гарантувати кращу якість очищених стічних вод, зокрема щодо зважених речовин, каламутності, дрібнодисперсних та колоїдних домішок, а також сполук, характерних для стоків легкої промисловості: поверхнево-активні речовини, барвники, волокнисті включення. Крім того, вона має забезпечувати інтенсифікацію

вторинного очищення у разі посилення нормативних вимог або зміни структури виробничих стоків.

Експлуатаційні вимоги не менш важливі. Обрані рішення мають бути технічно простими в обслуговуванні, не вимагати високоспеціалізованого персоналу, а також мати сервісну підтримку та запасні частини, доступні на українському ринку. Обладнання повинно мати достатній термін служби, стійкість до корозії та здатність працювати за різних навантажень.

Враховуючи обмежені фінансові ресурси комунального підприємства, технологічні рішення мають бути економічно обґрунтованими; вимагати помірних капітальних витрат, мати прийнятний строк окупності та гарантувати реальне зниження експлуатаційних витрат. Водночас модернізація має бути модульною, щоб забезпечити майбутнє збільшення очисної потужності без радикальної перебудови всієї системи.

Виходячи з цих вимог, було здійснено вибір та обґрунтування конкретних технологічних рішень для вдосконалення системи очищення стічних вод міста Дунаївці, детально описано в підрозділі 2.4

2.4 Обґрунтування вибору технологій удосконалення системи очищення КП «Міськводоканал»

Вибір технологій модернізації системи загального очищення стічних вод міста Дунаївці базується на вимогах, сформульованих у підрозділі 2.3, та аналізі можливих альтернативних рішень з урахуванням фактичних умов експлуатації, складу стічних вод та техніко-економічних можливостей підприємства. Поточна система працює зі значним недовантаженням, приймає змішані побутові та промислові стоки, демонструє фізичний та гідравлічний знос інфраструктури та скидає їх у маловодну річку Тернава. За цих умов модернізація має забезпечити стабільність біологічного процесу, покращити якість вторинного очищення, зменшити споживання енергії та дозволити поетапну реалізацію.

Основні критерії вибору технологій модернізації:

- забезпечити відповідності очищення нормативним стандартам щодо БСК, ХСК, завислих речовин та основних біогенних елементів;
- здатність витримувати коливання навантаження та наявність домішок від легкої промисловості;
- можливість інтеграції з існуючою інфраструктурою з мінімальними будівельними роботами;
- поетапне впровадження та прийнятні експлуатаційні витрати;
- перевірений досвід успішного застосування обраних технологій у малих та середніх муніципальних системах очищення стічних вод [31].

На основі цих критеріїв було продемонстровано доцільність наступних удосконалень системи: впровадження біореактора подовженого аерування з рухомими носіями біоплівки на біологічній стадії, модернізація системи аерації енергоефективним обладнанням, застосування компактної мембранної вторинної очистки до частини потоку після вторинних відстійників, можливість додавання сорбційних фільтрів та впровадження автоматизованої системи контролю основних параметрів.

Вибір біореактора подовженого аерування з рухомими носіями біоплівки як основного напрямку модернізацій біологічного блоку зумовлений особливостями роботи очисних споруд в умовах низького та нерівномірного органічного навантаження. Системи МБР поєднують переваги активного мулу та біоплівкових технологій: значна частина біомаси фіксується на полімерних носіях, що збільшує площу поверхні, доступну для росту мікроорганізмів, підвищує буферну здатність системи до коливань навантаження та температури, також дозволяє працювати при більш ефективних навантаженнях на одиницю об'єму без збільшення геометричних розмірів споруд [32], [33]. Дослідження показують, що біореактори з рухомими опорами забезпечують стабільну нітрифікацію та видалення органічних речовин з міських стічних вод навіть за значних коливань потоку та температури. Вони також демонструють підвищену стійкість до токсичних

та поверхнево-активних домішок порівняно з традиційними аеротенками [34]. Впровадження біореактора є особливо важливим для міста Дунаївці, оскільки домішки від швейної промисловості негативно впливають на структуру активного мулу та погіршують його седиментаційні властивості. Впровадження мембранного біореактора в наявні аеротенки можлива шляхом встановлення полімерних носіїв, занурювальних мішалок та часткової реконструкції системи аерації. Рішення підходить для фінансових ресурсів невеликого комунального підприємства.

Другим ключовим елементом удосконаленої системи є мембранне доочищення стічних вод після біологічного етапу. Умови річки Тернава вимагають максимальної стабільності якості скиду, особливо щодо вмісту завислих речовин, дрібнодисперсних частинок, мікрОВОЛОКОН та колоїдних домішок. Сучасні дослідження підтверджують, що ультрафільтрація, як третинний етап очищення, забезпечує майже повне видалення завислих речовин, значне зниження каламутності та утримання мікропластику, що робить її ефективною технологією вторинного очищення міських стічних вод перед скиданням або повторним використанням [35], [36]. Для міста доцільно розглянути можливість встановлення компактних мембранних модулів на ділянці потоку нижче за течією від вторинних відстійників, адже це збереже існуючу біологічну систему, забезпечуючи при цьому постійно високоякісну очищену воду завдяки фазі «полірування» стоку. У поєднанні з біореактором подовженого аерування ця конфігурація пропонує функціональні властивості, подібні до властивостей мембранних біореакторів, але простіша у впровадженні та експлуатації на менших очисних спорудах.

Логічним доповненням до мембранної доочистки є потенційне впровадження сорбційних фільтрів на гранульованому активованому вугіллі. Фільтри дозволяють ефективно видаляти залишкові розчинені органічні сполуки, включаючи поверхнево-активні речовини, барвники та інші мікробруднювачі, які не повністю знищуються під час біологічного очищення [37], [39]. Згідно з результатами досліджень, гранульоване

активоване вугілля забезпечує високу швидкість видалення органічних мікробруднювачів з міських стічних воді може працювати в режимі чистого адсорбенту або в режимі біологічно активованого [40].

Модернізація системи аерації вважається одним із фундаментальних і, одночасно, найбільш економічно ефективних заходів щодо покращення. Аерація традиційно є найбільш енергоємним етапом біологічного очищення, що становить значну частину загального споживання електроенергії очисними спорудами [38], [32]. Заміна застарілих компресорів та неефективних аераторів на сучасні енергоефективні повітродувки, оснащені частотно-регульованими приводами та дрібнобульбашковими дифузорами, значно підвищує коефіцієнт переносу кисню та зменшує питоме споживання енергії. Публікації останніх років демонструють, що впровадження енергоефективних систем аерації може забезпечити економію електроенергії від 25 % до 40 % без шкоди для якості очищення [18], [32], [23]. Для міста Дунаївці воно означає не лише зниження експлуатаційних витрат, але й стабільніші умови роботи біореактора з розширеною аерацією. Дійсно рівномірний розподіл повітря та можливість регулювати подачу кисню відповідно до фактичного навантаження допомагають підтримувати оптимальні стан біоценозу активного мулу та біоплівки.

Важливим фактором є впровадження базової автоматизованої системи контролю та керування основними параметрами, що, перш за все, передбачає встановлення датчиків розчиненого кисню в аеротенку, споживання повітря та електроенергії, а також рівнів у резервуарах та подальшу інтеграцію сигналів у просту систему керування повітродувками та мішалками. Запропонований рівень автоматизації набагато простіший та дешевший, ніж повноцінні SCADA-комплекси, одночасно зменшує вплив людської помилки, підвищує стабільність режимів аерації, зменшує споживання енергії та дозволяє швидко реагувати на коливання навантаження, що особливо важливо у випадку щоденних та сезонних коливань швидкості потоку, що надходить.

Обґрунтований вибір визначених напрямів удосконалення спирається на поєднанні високої ефективності, адаптивності та можливості поступової інтеграції в існуючу систему. Впровадження біореактора подовженого аерування з рухомими носіями біоплівки стабілізує біологічний процес за умов змішаних стоків та низького навантаження; мембранна доочистка забезпечує постійно високу якість скиду. Модернізована, енергоефективна система аерації зменшує споживання енергії та підвищує експлуатаційну надійність, базова автоматизація створює передумови для гнучкого керування та подальшої цифровізації процесу. Сукупність цих рішень дає змогу реалізувати оптимізовану технологічну схему очищення стічних вод міста. Дунаївці, що відповідає сучасним екологічним та енергетичним вимогам і може бути застосована без повної реконструкції всього комплексу споруд.

2.5 Розрахункова частина удосконаленої системи очищення КП «Міськводоканал»

Розрахункова частина спрямована на визначення основних параметрів удосконаленої технологічної схеми: гідравлічних характеристик, об'єму біореактора з подовженою аерацією і рухомими носіями біоплівки. навантаження за органічними речовинами, потреби в кисні та повітрі для аерації, а також площу поверхні мембранного модуля доочистки. Для цього використано фактичні дані про об'єм стічних вод від комунального підприємства «Міськводоканал», а також сформульовано розрахункові припущення з урахуванням потенційного зменшення інфільтрації та майбутнього збільшення концентрації забруднюючих речовин.

Спочатку вибрано базові дані, необхідні для розрахунків. Згідно з документами підприємства, річний об'єм стічних вод становить приблизно від 273 000 до 277 000 м³. Для розрахунків використано середнє значення, усі вихідні дані занесено в таблицю 2.1.

Середньодобова витрата стічних вод визначається за формулою 2.1:

$$Q_{\text{сер}} = \frac{V_{\text{рік}}}{365}. \quad (2.1)$$

Підставляємо попередньо розраховані дані:

$$Q_{\text{сер}} = \frac{275\,000}{365} \approx 753 \text{ м}^3/\text{добу}.$$

Для спрощення розрахунків приймаємо:

$$Q_{\text{сер}} = 750 \text{ м}^3/\text{добу}.$$

Розрахункову максимальну добову витрату визначаємо за формулою 2.2:

$$Q_{\text{макс}} = k_{\text{д}} \cdot Q_{\text{сер}} \quad (2.2)$$

$$Q_{\text{макс}} = 1,3 \cdot 750 = 975 \text{ м}^3/\text{добу}.$$

Для подальших розрахунків приймаємо:

$$Q_{\text{макс}} \approx 980 \text{ м}^3/\text{добу}.$$

Матеріальний баланс за органічними речовинами виконується на основі різниці концентрацій на вході та виході біореактора, отже визначаємо за формулою 2.3:

$$\Delta C_{\text{БСК}} = C_{\text{БСК,вх}} - C_{\text{БСК,вих}}, \quad (2.3)$$

$$\Delta C_{\text{БСК}} = 60 - 8 = 52 \text{ мг/дм}^3.$$

Таблиця 2.1 – Вихідні дані для розрахунків удосконаленої схеми очищення КП «Міськводоканал»

№	Найменування показника	Позначення	Одиниця вимірювання	Прийняте значення
1	Річний обсяг стічних вод	$V_{\text{рік}}$	м ³ /рік	275 000
2	Середньодобова витрата	$Q_{\text{сер}}$	м ³ /добу	750
3	Коефіцієнт добової нерівності	k_d	-	1,3
4	Розрахункова БСК на вході	$C_{\text{БСК,вх}}$	мг/дм ³	60
5	Допустима БСК на виході	$C_{\text{БСК,вих}}$	мг/дм ³	8
6	Час перебування в біореакторі	$t_{\text{реакт}}$	год	12
7	Частка потоку, що подається на мембранну доочистку	f	-	0,30
8	Фільтраційний потік мембрани	j	л/(м ² ·год)	25

Масова витрата БСК, що підлягає видаленню в біореакторі, розраховується за формулою 2.4:

$$G_{\text{БСК}} = Q_{\text{сер}} \cdot \Delta C_{\text{БСК}} \cdot 10^{-3}, \quad (2.4)$$

де $G_{\text{БСК}}$ – масова витрата БСК, кг/добу;

$Q_{\text{сер}}$ – середньодобова витрата, м³/добу;

$\Delta C_{\text{БСК}}$ – зниження концентрації БСК, мг/дм³;

10^{-3} – коефіцієнт переходу з (м³·мг/дм³) у кг.

Підставляємо дані:

$$G_{\text{БСК}} = 750 \cdot 52 \cdot 10^{-3} = 39 \text{ кг/добу.}$$

Виходить, що біореактор подовженого аерування з рухомими носіями біоплівки повинен забезпечувати окиснення близько 39 кг БСК на добу у розрахункових умовах.

Об'єм біореактора визначається за гідравлічним часом перебування стічних вод, формула 2.5:

$$V_{\text{реакт}} = \frac{(Q_{\text{сер}} \cdot t_{\text{реакт}})}{24}, \quad (2.5)$$

де $V_{\text{реакт}}$ – розрахунковий об'єм біореактора, м³;

$Q_{\text{сер}}$ – середньодобова витрата, м³/добу;

$t_{\text{реакт}}$ – час перебування, год;

24 – кількість годин у добі.

Підставляємо дані:

$$V_{\text{реакт}} = \frac{(750 \cdot 12)}{24} = 375 \text{ м}^3.$$

Гідравлічне навантаження на біореактор визначається за формулою 2.6:

$$q_{\text{гідр}} = \frac{Q_{\text{сер}}}{V_{\text{реакт}}}, \quad (2.6)$$

$$q_{\text{гідр}} = 750 / 375 = 2,0$$

Результат відповідає часу перебування $t_{\text{реакт}} \approx 0,5$ доби (12 год) і є прийнятним для режиму подовженого аерування з нітрифікацією.

Для забезпечення стабільної роботи МБР приймається об'ємна частка заповнення біореактора носіями біоплівки, яку визначаємо за формулою 2.7:

$$V_{\text{носіїв}} = \varphi \cdot V_{\text{реакт}}, \quad (2.7)$$

де $V_{\text{носіїв}}$ – об'єм носіїв, м³;

φ – частка заповнення об'єму біореактора носіями.

Приймаємо $\varphi = 0,40$, тоді:

$$V_{\text{носіїв}} = 0,40 \cdot 375 = 150 \text{ м}^3,$$

Приймаємо, що питомий захищений поверхневий розвиток носіїв становить:

$$a_{\text{сп}} = 500 \text{ м}^2/\text{м}^3,$$

Тоді сумарну поверхню біоплівки розраховуємо за формулою 2.8:

$$A_{\text{заг}} = V_{\text{носіїв}} \cdot a_{\text{сп}}, \quad (2.8)$$

$$A_{\text{заг}} = 150 \cdot 500 = 75\,000 \text{ м}^2.$$

Питоме поверхнєве навантаження за БСК визначаємо за формулою 2.9:

$$q_{\text{пов}} = \frac{G_{\text{БСК}}}{A_{\text{заг}}}, \quad (2.9)$$

$$q_{\text{пов}} = \frac{39}{75\,000} = 0,00052 \text{ кг}/(\text{м}^2 \cdot \text{добу}) = 0,52 \text{ г}/(\text{м}^2 \cdot \text{добу}).$$

Отримане значення свідчить про значний запас площі біоплівки та високий резерв стійкості біореактора до можливого збільшення органічного навантаження в майбутньому, наприклад, при зменшенні інфільтрації або появі додаткових стоків.

Потреба в кисні для окиснення органічних речовин визначається за питомою витратою кисню на одиницю БСК. Для аеротенків подовженого аерування приймаємо коефіцієнт:

$$k_{O_2} = 1,1 \text{ кг } O_2/\text{кг БСК}.$$

Тоді добова потреба в кисні визначається за формулою 2.10:

$$G_{O_2} = k_{O_2} \cdot G_{\text{БСК}}, \quad (2.10)$$

$$G_{O_2} = 1,1 \cdot 39 = 42,9 \text{ кг } O_2/\text{добу}.$$

Для розрахунку об'єму повітря, що подається в аеротенк, приймаємо, що 1 м² повітря при нормальних умовах містить приблизно 0,275 кг кисню, а коефіцієнт використання кисню в системі дрібнобульбашкової аерації становить $\eta_{\text{перенес}} \approx 0,15$.

Кількість кисню, яка фактично переходить у воду з 1 м² повітря розраховуємо за формулою 2.11:

$$m_{O_2, \text{вик}} = 0,275 \cdot \eta_{\text{перенес}}, \quad (2.11)$$

$$m_{O_2, \text{вик}} = 0,275 \cdot 0,15 \approx 0,041 \text{ кг } O_2/\text{м}^3 \text{ повітря}.$$

Необхідний добовий об'єм повітря визначаємо за формулою 2.12:

$$L_{\text{пов,доб}} = \frac{G_{O_2}}{m_{O_2, \text{вик}}}, \quad (2.12)$$

$$L_{\text{пов,доб}} = \frac{42,9}{0,041} \approx 1\,046 \text{ м}^3/\text{добу}.$$

Годинна витрата повітря розраховується за формулою 2.13:

$$L_{\text{пов,год}} = \frac{L_{\text{пов,доб}}}{24}, \quad (2.13)$$

$$L_{\text{пов,год}} \approx \frac{1\,046}{24} \approx 43,6 \text{ м}^3/\text{год}.$$

Розрахунок потужності повітродувки може бути виконаний за спрощеною формулою 2.14:

$$N = 0,001 \cdot \frac{L_{\text{пов,год}} \cdot \Delta p}{\eta_{\text{мех}}}, \quad (2.14)$$

де N – необхідна потужність повітродувки, кВт;

$L_{\text{пов,год}}$ – годинна витрата повітря, м³/год;

Δp – повний напір (надлишковий тиск) повітря, кПа

Приймаємо $\Delta p = 60$ кПа;

$\eta_{\text{мех}}$ – ККД повітродувного агрегату (приймаємо $\eta_{\text{мех}} = 0,65$).

Підставляємо дані:

$$N = 0,001 \cdot \frac{43,6 \cdot 60}{0,65} \approx 4,02 \text{ кВт.}$$

Для забезпечення надійності роботи приймається установка двох повітродувок по 5,5 кВт (одна робоча, одна резервна) з можливістю регулювання продуктивності. Середня завантаженість робочої повітродувки в нормальному режимі становитиме близько 70 %, то забезпечує резерв на випадок збільшення навантаження.

Добова витрата електроенергії на аерацію при середній споживаній потужності $N_{\text{сер}} \approx 3,5$ кВт визначається за формулою 2.15:

$$W_{\text{доб}} = N_{\text{сер}} \cdot 24, \quad (2.15)$$

$$W_{\text{доб}} = 3,5 \cdot 24 = 84 \text{ кВт} \cdot \text{год/добу.}$$

Питоме споживання електроенергії на аерацію розраховуємо за формулою 2.16:

$$w_{\text{аер}} = \frac{W_{\text{доб}}}{Q_{\text{сер}}}, \quad (2.16)$$

$$w_{\text{аер}} = \frac{84}{750} \approx 0,112 \text{ кВт} \cdot \text{год/м}^3.$$

З урахуванням додаткових споживачів (насоси, мішалки, допоміжне обладнання) загальне питоме енергоспоживання удосконаленої схеми може бути прийняте на рівні 0.16-0.18 кВт·год/м³, що узгоджується із сучасними показниками для малих споруд біологічного очищення з енергоефективною аерацією.

Розрахунок мембранного модуля доочистки виконується для частини потоку, що подається на мембрану. Розраховуємо за формулою 2.17:

$$Q_{UF, \text{доб}} = f \cdot Q_{\text{макс}}, \quad (2.17)$$

$$Q_{UF, \text{доб}} = 0,30 \cdot 980 \approx 294 \text{ м}^3/\text{добу}.$$

З урахуванням округлення приймаємо:

$$Q_{UF, \text{доб}} = 300 \text{ м}^3/\text{добу}.$$

Продуктивність 1 м² мембрани за добу визначаємо за формулою 2.18:

$$Q_1 = J \cdot 24, \quad (2.18)$$

де Q_1 – добовий обсяг фільтрату з 1 м² мембрани, м³/(м²·добу);

J – фільтраційний потік, м³/(м²·год).

$$Q_1 = 0,025 \cdot 24 = 0,60 \text{ м}^3/(\text{м}^2 \cdot \text{добу}).$$

Необхідна загальна площа мембран визначається за формулою 2.19:

$$A_{UF} = \frac{Q_{UF, \text{доб}}}{Q_1}, \quad (2.19)$$

$$A_{UF} = \frac{300}{0,60} = 500 \text{ м}^2.$$

Один модуль має ефективну площу 50 м², тоді кількість модулів визначаємо за формулою 2.20:

$$n = \frac{A_{UF}}{A_{\text{мод}}}, \quad (2.20)$$

де $A_{\text{мод}}$ – площа одного модуля, м².

$$n = 500 / 50 = 10 \text{ модулів}.$$

Основні результати розрахунків зведені у таблицю 2.2.

Таблиця 2.2 – Розраховані параметри елементів удосконаленої технологічної схеми

№	Показник	Позначення	Одиниця	Значення
1	Максимальна добова витрата стічних вод	$Q_{\text{макс}}$	м ³ /добу	980
2	Об'єм біореактора подовженого аерування	$V_{\text{реакт}}$	м ³	375
3	Гідравлічне навантаження на біореактор	$q_{\text{гідр}}$	1/добу	2
4	Час перебування в біореакторі	$t_{\text{реакт}}$	год	12
5	Об'єм носіїв біоплівки	$V_{\text{носіїв}}$	м ³	150
6	Сумарна поверхня біоплівки	$A_{\text{заг}}$	м ³	75 000
7	Масова витрата БСК, що видаляється	$G_{\text{БСК}}$	кг/добу	39
8	Питоме навантаження за БСК на 1м ³ поверхні носіїв	$q_{\text{пов}}$	г/(м ² /добу)	0,52
9	Добова потреба в кисні	G_{O_2}	кг O ₂ /добу	42,9 ≈ 43
10	Добова витрата повітря	$L_{\text{пов,год}}$	м ³ /добу	1 050
11	Годинна витрата повітря	$L_{\text{пов,год}}$	м ³ /год	44
12	Необхідна потужність повітродувок	N	кВт	4
13	Добова витрата електроенергії на аерацію	$W_{\text{доб}}$	кВт·год/добу	84
14	Питоме споживання електроенергії на аерацію	$w_{\text{аер}}$	кВт·год/м ³	0,11
15	Добова витрата на мембранну доочистку	$Q_{\text{UF,доб}}$	м ³ /добу	300
16	Загальна площа мембран	A_{UF}	м ³	500
17	Кількість мембранних модулів, $A_{\text{мод}} = 50 \text{ м}^2$	n	шт	10

Наведені вище розрахунки демонструють, що з прийнятими параметрами вдосконалена конструкція забезпечує необхідний гідравлічний режим у біореакторі подовженого аерування з рухомими носіями біоплівки. пропонує значний запас площі поверхні біоплівки для потенційного збільшення навантаження, відповідає реальним потребам у кисні та повітрі, а також дозволяє вибрати енергоефективне аераційне обладнання з питомою витратою електроенергії від 0,16 до 0,18 кВт·год/м³ з урахуванням усіх споживачів. Розрахунок мембранної доочистки підтверджує доцільність використання компактної ультрафільтраційної установки для частини потоку із загальною площею поверхні мембрани приблизно 500 м², що технічно та експлуатаційно можливо для невеликих очисних споруд.

3 ОЦІНКА ЕНЕРГОЕФЕКТИВНОСТІ УДОСКОНАЛЕНОЇ СИСТЕМИ ОЧИЩЕННЯ СТІЧНИХ ВОД

3.1 Оцінка ефективності очищення стічних вод базової та удосконаленої системи

Оцінка ефективності очищення стічних вод необхідна для кількісного визначення частки забруднюючих речовин, що затримуються очисними спорудами, та кількості органічних і мінеральних домішок, що скидаються у водний об'єкт. Надалі результати використовуються для розрахунку енергоефективності, питомого споживання електроенергії процесом очищення та для проведення техніко-економічного порівняння базового та удосконаленого варіантів схеми.

Система загального очищення комунального підприємства обслуговує змішані побутові та промислові стоки від міста з населенням близько 16 тисяч мешканців. Стічні води, що надходять переважно з житлових будинків та соціальної інфраструктури, містять органічні домішки та завислі тверді речовини, а також сполуки азоту та фосфору, і невелику кількість нафтопродуктів. Загальні показники якості стічних вод на вході до очисних споруд наведено в таблиці 3.1.

Наведені значення відповідають органічно забрудненим міським стічним водам з характерним співвідношенням БСК і ХСК, підвищеним вмістом завислих речовин та наявністю біогенних елементів. Водневий показник $pH = 7,7$ вказує відсутність кислих або лужних скидів та придатність стічних вод для біологічного очищення. Концентрації амонійного азоту та фосфатів вказують на значний ризик евтрофікації приймаючого водного середовища, якщо очищення недостатнє.

Таблиця 3.1 – Показники якісного складу стічних вод на вході в очисні споруди КП «Міськводоканал»

№ з/п	Показник	Умовне позначення	Одиниці вимірювання	Значення на вході
1	Водневий показник	pH	-	7,7
2	Завислі речовини	$C_{\text{вх,зав.реч.}}$	мг/дм ³	244,7
3	БСК	$C_{\text{вх,БСК}}$		248,6
4	ХСК	$C_{\text{вх,ХСК}}$		379,4
5	Азот амоній	$C_{\text{вх,N-NH}_4^+}$		23,1
6	Нітрити	$C_{\text{вх,NO}_2^-}$		0,3
7	Нітрати	$C_{\text{вх,NO}_3^-}$	мг/дм ³	4,7
8	Фосфати	$C_{\text{вх,PO}_4^{3-}}$		4,5
9	Нафтопродукти	$C_{\text{вх,нафтпрод}}$		0,8
10	Хлориди	$C_{\text{вх,Cl}^-}$		97,3
11	Сульфати	$C_{\text{вх,SO}_4^{2-}}$		58

Для подальших розрахунків важливо знати не лише концентрації, оцінювати масові навантаження на споруди. Добова масова витрата компонента розраховується за формулою 3.1:

$$G = Q_{\text{доб}} \cdot C \cdot 10^{-3}, \quad (3.1)$$

де G – масова витрата, кг/добу;

$Q_{\text{доб}}$ – середньодобова витрата стічних вод, м³/добу;

C – концентрація компонента, мг/дм³;

10^{-3} – коефіцієнт переходу з (м³·мг/дм³) у кг.

За прийнятої витрати $Q_{\text{доб}} = 750 \text{ м}^3/\text{добу}$, добове навантаження БСК перевищує 180 кг/день, як і навантаження завислих речовин, а аміачного азоту становить приблизно 17 кг/добу. Значення характеризують фактичну кількість забруднюючих речовин, що надходять у систему очищення, і будуть використані для оцінки частки навантаження, що утримується кожним із розглянутих технологічних варіантів.

Ефективність очищення для кожного показника кількісно характеризується коефіцієнтом екстракції η , %, який визначається співвідношенням в формулі 3.2:

$$\eta = \frac{C_{\text{вх}} - C_{\text{вих}}}{C_{\text{вх}}} \cdot 100, \quad (3.2)$$

де $C_{\text{вх}}$ – концентрація показника на вході в очисні споруди, мг/дм³;

$C_{\text{вих}}$ – концентрація того самого показника на виході, мг/дм³.

Порівняльні показники якості стічних вод на виході з обох схем представлені в таблиці 3.2.

У роботі порівнюються два варіанти: існуюча схема, що відображає поточний стан очисних споруд стічних вод, та вдосконалений проект, що включає більш інтенсивне біологічне очищення та мембранне доочищення. Для кожного варіанту вказані концентрації на виході з установки, що відповідають типовій роботі установок еквівалентного рівня. У базовому проекті передбачається значне зниження БСК, ХСК та зважених твердих речовин, що досягає рівнів, прийнятних для звичайних установок; однак видалення сполук азоту та фосфору залишається обмеженим. Вдосконалена схема забезпечує посилене очищення за органічними показниками та значне зниження концентрації біогенних елементів завдяки збільшеному часу аерації, наявності біоплівкових опор та мембранному розділенню.

Таблиця 3.2 – Порівняння показників якості стічних вод на виході існуючої та удосконаленої схем очищення

№ з/п	Показник	Одиниці вимірювання	Вихід існуючої системи	Вихід удосконаленої системи	Нормативи скиду
1	Водневий показник	-	7,2	7	6,5-8,5
2	Завислі речовини	мг/дм ³	40	5	30
3	БСК		30	8	15
4	ХСК		80	40	70
5	Азот амоній		10	1,5	2
6	Нітрити		0,05	0,02	0,08
7	Нітрати		4,2	3	4,8
8	Фосфати		2,5	1	1,6
9	Нафтопродукт и		0,05	0,01	0,05
10	Хлориди		97,3	95	300
11	Сульфати		58	55	100
*Нормативи наведено як орієнтир для приблизного порівняння з вимогами до очищення міських стічних вод.					

Для наочного порівняння ефективності очищення обох схем результати розрахунків за основними показниками якості скиду подано у графічному вигляді на рисунку 3.1. Графічна інтерпретація результатів розрахунків дає змогу не лише зіставити абсолютні значення концентрацій, а й оцінити характер відмінностей між технологічними схемами очищення. Зокрема, подання результатів дозволяє виявити показники, за якими модернізація забезпечує найбільший ефект, а також ті параметри, для яких зміни є менш вираженими.

В подальшому, рисунок створює основу для детальнішого аналізу ефективності удосконаленої системи та обґрунтування її технологічних переваг.

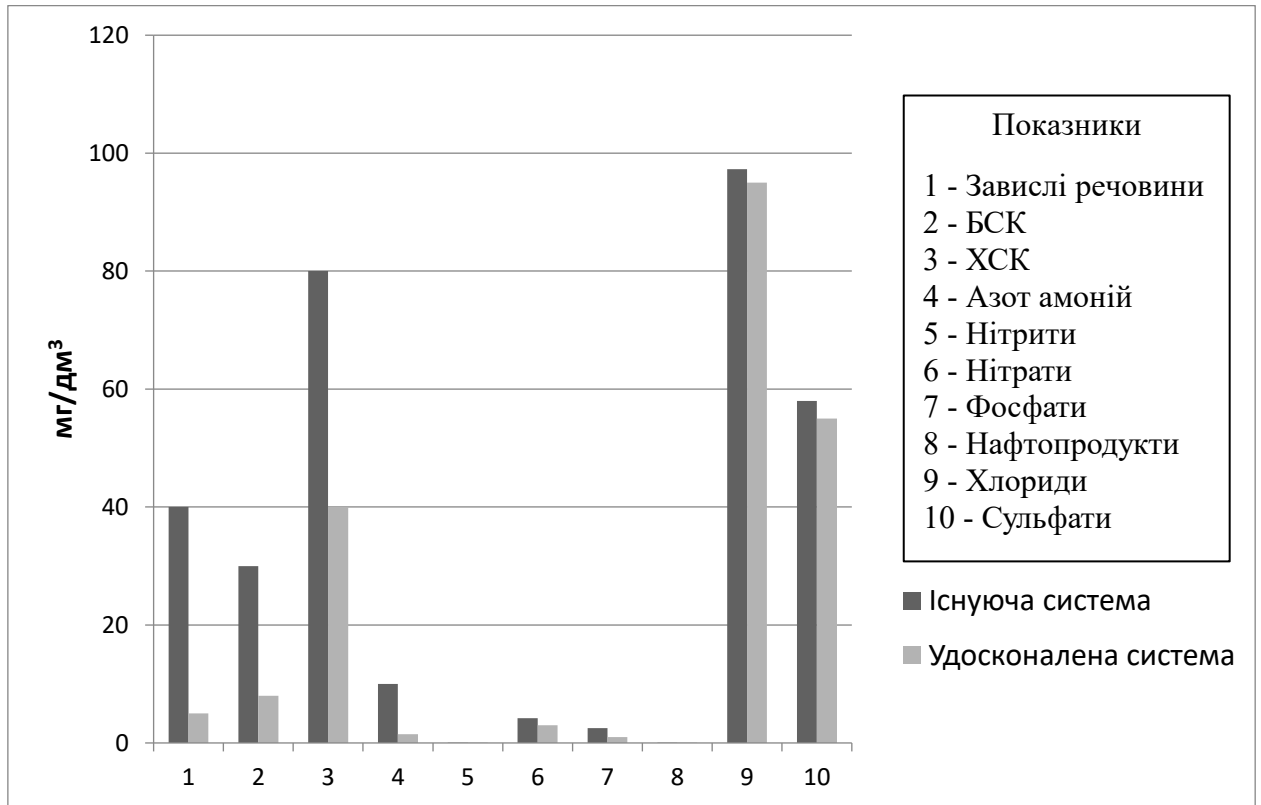


Рисунок 3.1 – Порівняння показників якості очищених стічних вод для існуючої та удосконаленої систем

Аналіз результатів порівняння показників якості очищення стічних вод свідчить, що для таких компонентів, як хлориди та сульфати, коливання концентрації на виході з очисних споруд незначне, як в існуючій, так і в удосконаленій схемах. Відсутність змін пояснюється тим, що іони хлориду та сульфату належать до родини розчинених мінеральних солей, які не беруть участі в біохімічних процесах окислення органічних речовин, майже не адсорбуються на активному мулі та не видаляються під час відстоювання. Відсутність значного зниження вмісту хлоридів та сульфатів є характерною рисою побутових очисних споруд і не свідчить про неефективність процесу,

а лише відображає той факт, що розглянуті варіанти не включають спеціалізованих процесів знесолення.

Порівняння інших показників якості стічних вод виявляє суттєву різницю в очищенні, що забезпечується обома системами. В існуючій системі спостерігається помітне зниження БСК, ХСК та концентрації завислих речовин порівняно з вхідними стічними водами; проте їх концентрації залишаються близькими до гранично допустимих значень. Можна зробити висновок, що очисні споруди працюють невеликим запасом, за якого коливання гідравлічного режиму або складу стічних вод можуть перевищувати норми, збільшуючи екологічні ризики для річки Тернава.

У вдосконаленій системі, завдяки поєднанню інтенсивного біологічного очищення та додаткового ступеня фільтрації, концентрації органічних речовин та зважених частинок значно нижчі. БСК, ХСК та маса зважених речовин на виході мають суттєвий запас порівняно з нормативними вимогами, що забезпечує стабільність якості очищених стічних вод, незважаючи на коливання витрати та складу. Фактично встановлюється стабільний режим роботи, що мінімізує ймовірність систематичних перевищень дозволених концентрацій.

Істотна перевага вдосконаленої системи полягає в управлінні сполуками азоту та фосфору. В існуючій системі вміст аміачного азоту та фосфатів знижується лише частково, що підтримує відносно високе навантаження поживними речовинами у водоймі. У вдосконаленому варіанті рівень цих показників знижується для задоволення підвищених вимог до очищених стічних вод, тоді як концентрація нітритів та нітратів залишається нижчою за встановлені норми. Як наслідок, ризик свтрофікації, виснаження кисню та пов'язаних з цим небажаних біологічних процесів у приймальній водоймі значно знижується.

Ще одним показником екологічної ефективності є вміст нафтопродуктів. В існуючій системі його значення на виході близьке до граничного, що свідчить про низький запас надійності цього показника. У

вдосконаленій системі концентрація нафтопродуктів значно нижча за норму, що зменшує ймовірність утворення вуглеводневої плівки на поверхні водойми та негативного впливу на водні екосистеми. Водневий індекс очищеної води залишається в межах допустимих значень в обох варіантах. Однак вдосконалена система характеризується стабільнішими значеннями рН, що сприяє належному функціонуванню біологічних процесів.

Сукупний аналіз результатів підтверджує, що удосконалена система очищення стічних вод більш екологічно та технологічно ефективною, ніж чинна. Отримані результати обґрунтовують доцільність впровадження вдосконаленої системи як пріоритетного напрямку модернізації очисних споруд та дають основу для більш поглибленої оцінки енергоефективності та економічної доцільності, що розглядається в наступних підрозділах третього розділу.

3.2 Оцінка енергетичної ефективності удосконаленої системи очищення стічних вод

Споживання енергії є значними витратами для очисних споруд стічних вод, особливо для невеликих муніципалітетів з обмеженими фінансовими ресурсами. За даними міжнародних досліджень, частка витрат на електроенергію може становити до 30-60 % загальних операційних витрат станцій очищення стічних вод, при цьому основними споживачами енергії є системи аерації та перекачування [41].

Для Дунаєвецької очисної станції стічних вод важливо не лише забезпечити дотримання нормативних вимог, але й досягти прийняттого рівня енергоефективності, тобто мінімального споживання електроенергії на одиницю очищеної води та на одиницю видаленого забруднювача. У цьому підрозділі представлено кількісну оцінку енергоефективності існуючих та вдосконалених систем очищення.

Основними споживачами електроенергії на очисних спорудах стічних вод є повітродувки системи аерації, насоси подачі та відведення стічних вод, обладнання для вторинної мембранної очистки, змішувачі та допоміжні системи автоматизації та керування. Загальне добове споживання електроенергії визначається як сума добових витрат усіх споживачів електроенергії, отже розраховуємо за формулою 3.3.

$$W_{\text{доб}} = \sum_{i=1}^n P_i \cdot t_i, \quad (3.3)$$

де $W_{\text{доб}}$ – загальне добове споживання електроенергії, кВт·год/добу;

P_i – встановлена або середньодобова потужність i -го електроприймача, кВт;

t_i – тривалість роботи i -го електроприймача протягом доби, год;

n – кількість електроприймачів.

В удосконаленій системі споживання енергії зумовлене переважно системою дрібнобульбашкової аерації біореактора з розширеною аерацією. Згідно з розрахунками в розділі 2, загальна потужність повітродувки становить 4 кВт, а добове споживання електроенергії на аерацію становить 4 кВт·год/день. При середньодобовій витраті стічних вод $Q_{\text{доб}} = 750 \text{ м}^3/\text{день}$ все відповідає питомому споживанню енергій приблизно $0,11 \text{ кВт} \cdot \text{год}/\text{м}^3$ на аерацію. З урахуванням роботи насосів, мембранного обладнання вторинної очистки та допоміжних систем, загальне питома споживання енергії удосконаленою системою становить приблизно $0,17 \text{ кВт} \cdot \text{год}/\text{м}^3$.

Питома споживання електроенергії на очищення 1 м^3 стічних вод визначається співвідношенням в формулі 3.4:

$$w_V = \frac{W_{\text{доб}}}{Q_{\text{доб}}}, \quad (3.4)$$

де w_V – питома витрати електроенергії, кВт·год/м³;

$Q_{\text{доб}}$ – середньодобова витрата стічних вод, м³/добу.

Для існуючої системи питоме споживання електроенергії, засноване на узагальнених даних для традиційних малопродуктивних очисних споруд стічних вод, становить приблизно $0,26 \text{ кВт/м}^2$ [42].

Для $Q_{\text{доб}} = 750 \text{ м}^3/\text{добу}$, добове споживання електроенергії становить:

$$W_{\text{доб,існ}} = 0,26 \cdot 750 = 195 \text{ кВт} \cdot \text{год/добу}.$$

Для удосконаленої системи при $w_{V,\text{удоск}} = 0,17 \text{ кВт} \cdot \text{год/добу}$.

$$W_{\text{доб,удоск}} = 0,17 \cdot 750 = 127,5 \approx 128 \text{ кВт} \cdot \text{год/добу}.$$

Річне споживання електроенергії визначається множенням добового споживання на кількість днів роботи очисних споруд, формула 3.5:

$$W_{\text{річ}} = W_{\text{доб}} \cdot 365, \quad (3.5)$$

де $W_{\text{річ}}$ – річне споживання електроенергії, $\text{кВт} \cdot \text{год/рік}$.

Підставивши значення за формулою, отримуємо:

$$W_{\text{річ,існ}} = 195 \cdot 365 = 71,2 \cdot 10^3 \approx 71,2 \text{ МВт} \cdot \text{год/рік},$$

$$W_{\text{річ,удоск}} = 127,5 \cdot 365 = 46,5 \cdot 10^3 \approx 46,5 \text{ МВт} \cdot \text{год/рік}.$$

Перехід до вдосконаленого технологічного процесу супроводжується зниженням річного споживання електроенергії приблизно на $24\text{-}25 \text{ МВт} \cdot \text{год}$, що відповідає зниженню питомих витрат приблизно на 35% на 1 м^2 очищених стічних вод.

Отримані результати узгоджуються із сучасними підходами до оцінки енергоефективності очисних споруд, які базуються на порівнянні питомого споживання енергії з кількістю фактично видалених забруднюючих речовин. Згідно з рекомендаціями Міжнародної водної асоціації, найбільш енергоефективними системами очищення є ті, що забезпечують максимальне видалення органічних речовин та поживних речовин з мінімальним

споживанням електроенергії, навіть якщо абсолютне споживання енергії зростає через складність процесу [43].

Досвід експлуатації очисних споруд у країнах Європейського Союзу показує, що впровадження інтенсивних біологічних процесів у поєднанні з вторинною мембранною обробкою дозволяє значно знизити питомі витрати енергії на одиницю видаленого БСК, що більш репрезентативним показником ефективності, ніж вартість 1 м² стічних вод. Виходячи з цього, результати, отримані для вдосконаленої системи очищення стічних вод у місті Дунаївці, відповідають сучасним міжнародним тенденціям розвитку енергоефективних очисних споруд.

Окрім оцінки вартості 1 м², доцільно враховувати енергоефективність з точки зору ефективно видаленого органічного забруднення. Масова витрата БСК, що видаляється на біологічних очисних спорудах, визначається за формулою 3.1. Для існуючого процесу, зі зниженням концентрації БСК з 60 до 30 мг/дм³ та витратою 750 м³/день, маса видаленого БСК становить приблизно 22,5 кг/день; для вдосконаленого процесу, з вихідною концентрацією 8 мг/дм³, вона становить приблизно 39 кг/добу.

Питома витрата електроенергії на 1 кг видаленого БСК визначається співвідношенням в формулі 3.6:

$$w_{\text{БСК}} = \frac{W_{\text{доб}}}{G_{\text{БСК}}}, \quad (3.6)$$

де $w_{\text{БСК}}$ – електроенергії на видалення БСК, кВт·год/кг;

$G_{\text{БСК}}$ – масова витрата БСК, що вилучається у системі, кг/добу.

Для існуючої системи:

$$w_{\text{БСК,існ}} = \frac{195}{22,5} \approx 8,7 \text{ кВт} \cdot \text{год/кг},$$

Для удосконаленої системи:

$$W_{\text{БСК,існ}} = \frac{127,5}{39} \approx 3,3 \text{ кВт} \cdot \text{год/кг.}$$

Результати показали, що удосконалена система не лише зменшує споживання електроенергії на кубічний метр стічних вод, але й значно підвищує енергоефективність процесу, виходячи з критерію «кВт·год на 1 кг вилученого БСК». Питоме споживання електроенергії на видалення органічних речовин зменшується більш ніж у 2.5 рази, що демонструє ефективніше використання енергетичних ресурсів для вищого ступеня очищення.

Наприклад, за поточного тарифу на електроенергію 6,0 грн/кВт·год річна вартість електроенергії існуючої системи становить приблизно 0,43 млн. грн. порівняно з приблизно 0,28 млн. грн. для вдосконаленої системи. Вартість електроенергії розраховується за формулою 3.7:

$$C_{\text{ел}} = W_{\text{річ}} \cdot T_{\text{ел}}, \quad (3.7)$$

де $C_{\text{ел}}$ – річні витрати на електроенергію, грн;
 $T_{\text{ел}}$ – тариф на електроенергію, грн/кВт·год.

Удосконалена система очищення стічних вод у м. Дунаївці одночасно підвищує екологічну ефективність завдяки ретельнішому видаленню органічних речовин та біогенних елементів та зменшує питоме споживання електроенергії як на одиницю об'єму, так і на одиницю очищеного забруднення. Так створюють необхідні умови для зниження вартості послуг водовідведення та підвищення довгострокової економічної та енергетичної доцільності експлуатації очисних споруд.

3.3 Оцінка капітальних витрат на модернізацію системи очищення стічних вод м. Дунаївці

Економічна доцільність впровадження вдосконаленої системи очищення стічних вод залежить не лише від досягнутого впливу на навколишнє середовище зниження споживання енергії, але й від обсягу необхідних капітальних вкладень. Для невеликих громад, таких як Дунаївці, важливо, щоб модернізація очисних споруд не передбачала повної заміни інфраструктури, а радше спиралася на оптимальне використання існуючих споруд з модернізацією та адаптацією певних компонентів системи.

Вдосконалена система очищення передбачає використання існуючих резервуарів та споруд з їх частковою реконструкцією. Основні інвестиційні витрати пов'язані з придбанням нового обладнання: компонентів системи дрібнопухирчастої аерації, повітряних підсилювачів, сировини для біореактора з рухомим шаром, мембранного модуля доочищення, насосного обладнання та системи автоматизацій та управління. Доцільно надати загальні дані про перелік основного обладнання, його кількість та орієнтовну вартість у таблиці 3.3.

Загальні капітальні вкладення в технологічне обладнання відповідають сумі витрат на всі агрегати, що входять до складу вдосконаленої системи. формула 3.8:

$$K_{об} = \sum(C_i \cdot n_i), \quad (3.8)$$

де $K_{об}$ – загальна вартість технологічного обладнання, грн;

C_i – вартість одиниці i -го виду обладнання, грн/од;

n_i – кількість одиниць i -го виду обладнання, шт.

Окрім вартості самого обладнання, капітальні вкладення включають витрати на будівництво та монтаж, проектування, введення в експлуатацію, забезпечення та витрати на непередбачені обставини. Під час техніко-

економічного обґрунтування доцільно враховувати їх, застосовуючи до вартості обладнання нормативні агреговані коефіцієнти. Розрахуємо за формулою 3.9:

$$K_{\text{кап}} = K_{\text{об}} \cdot (1 + k_{\text{буд}} + k_{\text{монт}} + k_{\text{ін}}), \quad (3.9)$$

де $K_{\text{кап}}$ – загальні капітальні вкладення на модернізацію, грн;

$k_{\text{буд}}$ – відносні витрати на будівельні роботи;

$k_{\text{монт}}$ – відносні витрати на монтаж обладнання;

$k_{\text{ін}}$ – відносні витрати на проектні, введення в експлуатацію та інші супутні роботи.

Для невеликих очисних споруд, модернізованих з існуючих об'єктів, значення коефіцієнтів можуть знаходитися в таких діапазонах:

$$k_{\text{побуд}} \approx 0,15 - 0,20;$$

$$k_{\text{встанов}} \approx 0,10 - 0,15;$$

$$k_{\text{вхід}} \approx 0,05 - 0,10.$$

Наприклад, якщо $k_{\text{побуд}} = 0,20$; $k_{\text{встанов}} = 0,10$; $k_{\text{вхід}} = 0,10$, загальний множник становитиме:

$$1 + 0,20 + 0,10 + 0,10 = 1,40.$$

Якщо, згідно з результатами вибору обладнання в таблиці 3.3, загальна кошторисна вартість обладнання становить $K_{\text{об}} \approx 850\,000$ грн, то загальні інвестиційні витрати на модернізацію оцінюються як:

$$K_{\text{кап}} = 850\,000 \cdot 1,40 \approx 1\,190\,000 \text{ грн.}$$

Таблиця 3.3 – Оцінка капітальних витрат на основне обладнання вдосконаленої системи очищення стічних вод м. Дунаївці

№	Найменування обладнання	Кількість	Орієнтовна вартість одиниці, грн	Загальна вартість
1	Система аерації	1 компл.	180 000	180 000
2	Повітродувка	2 шт.	95 000	190 000
3	Носії біоплівки для МБР	1 компл.	120 000	120 000
4	Мембранний модуль	10 шт.	210 000	210 000
5	Насосне обладнання	2 шт.	35 000	70 000
6	Система автоматизації	1 компл.	80 000	80 000
Разом				850 000

Одним із узагальнених показників є питомі капітальні вкладення, віднесені до річного обсягу очищених стічних вод, які розраховуємо за формулою 3.10:

$$K_{\text{уд}} = \frac{K_{\text{кап}}}{Q_{\text{річ}}}, \quad (3.10)$$

де $K_{\text{уд}}$ – питомі капітальні вкладення, грн/м³;

$Q_{\text{річ}}$ – річний обсяг очищених стічних вод, м³/рік.

За попередніми даними, річний обсяг стічних вод для КП «Міськводоканал» становить $Q_{\text{річ}} = 275\,000$ м³/рік. Тоді питомі капітальні витрати дорівнюють:

$$K_{\text{уд}} = \frac{1\,190\,000}{275\,000}$$

$$K_{\text{уд}} \approx 4,3 \text{ грн/м}^3$$

Отримане значення вказує на те, що одноразові витрати на модернізацію, що розподіляються на кубічний метр очищених стічних вод щорічно, відносно низькими та можуть бути компенсовані за рахунок зменшення експлуатаційних витрат.

Для оцінки терміну окупності проекту модернізації капітальні Інвестиції порівнюються з річною економією експлуатаційних витрат. У цьому випадку основним джерелом економії є зниження витрат на електроенергію, а також потенційне зниження штрафів за недотримання норм скидання. Термін окупності розраховується за формулою 3.11:

$$T_{OK} = \frac{K_{КАП}}{\Delta C_{РІЧ}}, \quad (3.11)$$

де T_{OK} – простий термін окупності, роки;

$\Delta C_{РІЧ}$ – річна економія експлуатаційних витрат, грн/рік.

Виходячи з розрахунків енергоефективності, представлених у підрозділі 3.2, зниження річних витрат на електроенергію при переході на вдосконалену систему становить приблизно $\Delta C_{РІЧ} \approx 150\,000$ грн/рік. Термін окупності інвестицій можна оцінити наступним чином:

$$T_{OK} = \frac{1\,190\,000}{150\,000} \approx 7,9 \text{ років.}$$

Навіть за умови консервативних припущень щодо вартості обладнання та тарифів на електроенергію, термін окупності модернізації Дунаєвецької очисної станції становить приблизно 8 років, що є прийнятним показником для муніципальної інфраструктури. Слід зазначити, що ця оцінка не враховує додаткові непрямі вигоди: зменшення екологічних ризиків, підвищення надійності системи та ймовірне уникнення штрафів та витрат на надзвичайні ситуації. Завдяки врахуванню таких факторів фактична економічна вигода від впровадження вдосконаленої системи очищення може бути ще більшою, а фактичний термін окупності коротшим.

У підрозділах 3.1-3.3 окремо розглянуто ефективність очищення стічних вод, показники енергоефективності очисних споруд та оцінені інвестиційні витрати на впровадження вдосконаленої технологічної системи. На основі отриманих результатів рекомендується провести комплексну оцінку, яка дозволить ретельно порівняти існуючі та вдосконалені системи очищення стічних вод у місті Дунаївці.

З екологічної точки зору, головною перевагою вдосконаленої системи є забезпечення постійно низьких концентрацій основних забруднюючих речовин на виході з очисної споруди. Як зазначалося в підрозділі 3.1, для існуючої системи рівні БСК, ХСК та зважених речовин, хоча й нижчі, ніж у вхідних стічних водах, залишаються близькими до максимально допустимих значень. Рівень аміачного азоту та фосфатів знижується не повністю, що не відповідає стандартам та зберігає ризик забруднення водотоку поживними речовинами. Вдосконалена система дозволяє проводити поетапне видалення органічних речовин, зважених частинок, а також сполук азоту та фосфору. Усі контрольовані показники якості стічних вод демонструють значний запас вище нормативних вимог, а тому означає, що модернізована система здатна забезпечити екологічно безпечний скид у водотік, навіть у разі коливань потоку стічних вод або навантаження забруднювачами.

Енергетичні показники, представлені в підрозділі 3.2, вказують на те, що удосконалена система характеризується меншим питомим споживанням електроенергії, ніж існуюча система. За того ж середньодобового об'єму стічних вод питоме споживання на 1 м³ зменшується, відповідно річне споживання електроенергії також знизиться. Водночас збільшується маса видалених органічних забруднювачів. Вдосконалена система не тільки ефективніше очищує стічні води, але і робить це з більш ефективним використанням енергетичних ресурсів.

З економічної точки зору, результати в підрозділі 3.3 показують, що модернізація очисних споруд вимагає певних інвестицій, пов'язаних з придбанням та встановленням нового технологічного обладнання. Водночас,

розрахунковий термін окупності завдяки зниженню витрат на електроенергію залишається в межах допустимих для міської інфраструктури. Після цього періоду підприємство отримує вигоду від сталої економії на експлуатаційних витратах та підвищення екологічної надійності. Важливо зазначити, що вдосконалена система опирається на використання існуючих, частково відремонтованих споруд, що знижує загальну вартість проекту порівняно з будівництвом нової станції очищення стічних вод.

Експлуатаційна надійність та гнучкість є ще одним важливим аспектом. Вдосконалена система, яка поєднує біореактор з мобільними опорами біоплівки та вторинною мембранною обробкою, пропонує більшу технологічну гнучкість завдяки своїй здатності регулювати навантаження біореактора, адаптуватися до коливань потоку та складу стічних вод, а також досягати високоякісного очищення стічних вод перед скиданням у водотік. Отже, створюються кращі умови для довгострокової експлуатації та зменшується ймовірність перевищення стандартів під час пікових навантажень.

Підсумовуючи, вдосконалена система очищення стічних вод у Дунаївцях пропонує незаперечні переваги порівняно з попередньою системою з екологічної, енергетичної та економічної точки зору. Вона дозволяє забезпечити більш глибоке очищення, ефективніше використовувати електроенергію, прийнятний рівень інвестиційних витрат та задовільну окупність інвестицій. Фактори спонукають розглядати запропонований технологічний підхід як доцільний шлях модернізації міських очищення стічних вод.

Висновки

Під час кваліфікаційної роботи було розглянуто практичні проблеми вдосконалення загальної системи очищення стічних вод у місті Дунаївці з урахуванням поточного технічного стану очисних споруд комунального підприємства «Міськводоканал», екологічних вимог щодо якості стічних вод та обмежених фінансових ресурсів цього невеликого місцевого органу влади. Робота проводилася з метою використання існуючої інфраструктури без необхідності повної реконструкції очисних споруд, відповідно до сучасних підходів щодо модернізації комунальних очисних споруд в Україні.

У дослідженні проаналізовано поточний стан систем очищення стічних вод в Україні та синтезовано досвід країн Європейського Союзу, яка приділяють особливу увагу поєднанню екологічної ефективності, енергозбереження та експлуатаційної надійності. Було помічено, що більшість очисних споруд у малих та середніх містах України експлуатуються понад свій проектний термін служби, демонструючи значний знос обладнання та не забезпечують стабільного виконання вимог щодо видалення біогенних матеріалів. В наслідок чого відбувається збільшення антропогенного навантаження на водні шляхи регіонального значення.

Було проведено аналіз існуючої системи очищення стічних вод на прикладі міста Дунаївці, а значить встановлено, що стічні води є змішаними та містять високу концентрацію органічних речовин, завислих частинок, а також сполук азоту та фосфору. Виявлено, що поточний процес очищення лише частково знижує концентрації забруднюючих речовин, а споруди працюють з мінімальним запасом відносно нормативних вимог. Режим експлуатації створює ризики погіршення якості води у приймальному водотоці, особливо у разі нерегулярного потоку стічних вод або аварійних ситуацій.

На основі результатів аналізу було сформульовано технічні та екологічні вимоги до вдосконаленої системи очищення. Вимоги спрямовані

на підвищення стабільності біологічного процесу, ретельне видалення органічних речовин та біогенних елементів, зниження питомих енергоспоживань та забезпечення економічної доцільності модернізації. Виходячи з цих вимог, обґрунтовано вибір вдосконаленого технологічного процесу, що поєднує біореактор з рухомими носіями біоплівки та мембранний ступінь доочищення.

Порівняльна оцінка ефективності очищення показала, що вдосконалена система забезпечує значно вищі показники якості очищених стічних вод, ніж існуюча система. Спостерігалось значне зниження концентрацій БСК, ХСК, завислих речовин, амонійного азоту та фосфатів, що забезпечує запас міцності відносно нормативних значень та зменшує ризик невідповідності вимогам до скидання. Відсутність значних коливань концентрацій хлоридів та сульфатів пояснюється їхньою природою як розчинених мінеральних солей, які не підлягають біологічному видаленню та не є цільовими показниками для планованої модернізації.

Оцінка впливу на навколишнє середовище від впровадження вдосконаленої системи має наступне значення: зменшення скидання органічних речовин та поживних речовин у водотік допомагає зменшити ризик евтрофікації, стабілізувати кисневий режим та покращити екологічний стан річки Тернава. Відповідно, має велике регіональне значення, оскільки водойми в малих водозборах є найбільш чутливими до антропогенного навантаження та одночасно відіграють ключову роль у формуванні місцевих екосистем та забезпеченні якості водних ресурсів для населення.

Результати оцінки енергоефективності підтвердили, що вдосконалена система зменшує питоме споживання електроенергії як на одиницю об'єму очищених стічних вод, так і на одиницю видаленого органічного забруднення, що демонструє більш раціональне використання енергетичних ресурсів та зниження довгострокових експлуатаційних витрат, які є вирішальним моментом для комунальних підприємств у сучасних економічних умовах.

Економічний аналіз підтвердив, що модернізація системи очищення стічних вод вимагає помірних інвестицій, з розрахунковий термін окупності інвестицій є прийнятним для місцевої інфраструктури. Використання існуючих, реконструйованих споруд значно знижує загальну вартість проекту порівняно з будівництвом нової станції очищення стічних вод, тим самим підтверджуючи доцільність запропонованих рішень.

Екологічні, енергетичні та економічні оцінки показали, що запропонована вдосконалена система очищення стічних вод для міста Дунаївці технічно обґрунтованою, екологічно чистою та економічно вигідною. Впровадження запропонованих заходів допоможе зменшити антропогенне навантаження на водні ресурси регіону, підвищити надійність роботи очисних споруд та покращити якість життя населення. Отримані результати можуть слугувати практичною основою для планування модернізації аналогічних систем очищення у менших містах по всій Україні та інформувати про майбутні наукові дослідження щодо сталого розвитку очищення стічних вод.

Перелік джерел посилання

1. Директива Ради 91/271/ЄЕС від 21 травня 1991 р. про очищення міських стічних вод [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=CELEX%3A31991L0271>
2. Державна служба статистики України. Довкілля України : збірник статистичних даних за 2022 рік [Електронний ресурс]. – Київ : Держстат, 2023. – Режим доступу: https://ukrstat.gov.ua/druk/publicat/kat_u/2023/zb/10/zb_dov_22.pdf
3. Water Sector Ukraine. About the water sector in Ukraine [Електронний ресурс]. – VD-ST, 2024. – Режим доступу: <https://www.vd-st.org.ua/en/water-sector-ukraine/>
4. Vasylykivskyi I. Municipal wastewater management in Ukraine // Water Practice & Technology. – 2023. – DOI: 10.2166/wpt.2023.045.
5. EcoPolitic. В Україні хочуть ввести більш жорсткі правила щодо очищення стічних вод [Електронний ресурс]. – 2023. – Режим доступу: <https://ecopolitic.com.ua/en/news/v-ukraini-hochut-vvesti-bilsh-zhorstki-pravila-shhodo-ochishhennya-stichnih-vod-2/>
6. NEFCO. Modernising water supply systems in Ukraine [Електронний ресурс]. – 2023. – Режим доступу: <https://www.nefco.int/news/energy-efficiency-and-sustainability-modernising-water-supply-systems-in-ukraine/>
7. Державне агентство водних ресурсів України. Національна доповідь про стан водних ресурсів України за 2023 рік [Електронний ресурс]. – Київ, 2024.
8. Кабінет Міністрів України. Постанова № 378 від 2 квітня 2024 р. «Про затвердження Порядку очищення стічних вод перед скиданням в уразливих зонах» [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://zakon.rada.gov.ua/go/378-2024-%D0%BF>

9. Клименко І. В., Іванченко А. В., Волошин М. Д. New improved structural solution devices biological wastewater treatment // Water and Water Purification Technologies. – 2024. – DOI: 10.20535/2218-93001922016122593.
10. European Environment Agency. Urban Waste Water Treatment in Europe – 2024 Update [Електронний ресурс]. – Copenhagen : EEA, 2024. – Режим доступу: <https://www.eea.europa.eu/publications/urban-wastewater-treatment-2024>
11. Waternet. Sustainable Wastewater Management Projects in the Netherlands [Електронний ресурс]. – Amsterdam : Waternet, 2023. – Режим доступу: <https://www.waternet.nl>
12. U.S. Environmental Protection Agency. Energy-Water Nexus Program Report 2023 [Електронний ресурс]. – Washington, D.C. : EPA, 2023. – Режим доступу: <https://www.epa.gov/energy-water-nexus>
13. Ministry of the Environment, Japan. Johkasou Systems Modernization Report 2022 [Електронний ресурс]. – Tokyo : MOE Japan, 2022. – Режим доступу: <https://www.env.go.jp/en/water/johkasou>
14. Swedish Environmental Protection Agency. Advanced Biological Filtration in Urban WWTPs [Електронний ресурс]. – Stockholm : SEPA, 2023. – Режим доступу: <https://www.naturvardsverket.se>
15. European Water Association. Performance Evaluation of MBR Systems in Medium Cities [Електронний ресурс]. – Brussels : EWA, 2023. – Режим доступу: <https://www.ewa-online.eu>
16. Vienna Utility Services. Operational Report of Vienna WWTP with ZeeWeed Modules [Електронний ресурс]. – Vienna : Stadt Wien, 2022. – Режим доступу: <https://www.stadtwien.at>
17. LG Chem Water Solutions. Low-Pressure Membrane Technology White Paper [Електронний ресурс]. – Seoul : LG Chem, 2024. – Режим доступу: <https://www.lgwatersolutions.com>

18. European Water Association (EWA). Membrane Bioreactors in Municipal Wastewater Treatment [Електронний ресурс]. – Brussels : EWA, 2023. – Режим доступу: <https://www.ewa-online.eu>
19. Finnish Water Forum. Electrocoagulation Systems for Industrial Wastewater Treatment [Електронний ресурс]. – Helsinki : FWF, 2022. – Режим доступу: <https://www.finnishwaterforum.fi>
20. Water Research Institute of Canada. Electrochemical Oxidation Using Boron-Doped Diamond Electrodes [Електронний ресурс]. – Ottawa : WRIC, 2023. – Режим доступу: <https://www.wric.ca>
21. Norwegian Water Association. Implementation of MBBR Systems in Small WWTPs [Електронний ресурс]. – Oslo : NWA, 2023. – Режим доступу: <https://www.norsk vann.no>
22. German Water Partnership. Activated Carbon Filtration in Combined Treatment Plants [Електронний ресурс]. – Berlin : GWP, 2022. – Режим доступу: <https://www.germanwaterpartnership.de>
23. European Institute for Water Technologies. Predictive Control in Smart Water Systems [Електронний ресурс]. – Prague : EIWT, 2022. – Режим доступу: <https://www.eiwt.eu>
24. Organization for Economic Co-operation and Development (OECD). Water Resource Recovery Facilities: Global Trends [Електронний ресурс]. – Paris : OECD, 2024. – Режим доступу: <https://www.oecd.org>
25. Міністерство захисту довкілля та природних ресурсів України. Національний план управління водними ресурсами до 2030 року [Електронний ресурс]. – Київ : Міндовкілля, 2023. – Режим доступу: <https://mepr.gov.ua>
26. Клименко М. О., Вознюк Н. М. Очищення міських стічних вод : навчальний посібник. – Рівне : НУВГП, 2019. – 312 с.
27. ДП «Укрводоканалпроект». Звіт про впровадження MBBR у малих містах України [Електронний ресурс]. – Київ : Укрводоканалпроект, 2023. – Режим доступу: <https://www.ukrvodproekt.gov.ua>

28. Polish Waterworks Association. Industrial Wastewater Treatment in Legnica and Olomouc [Электронный ресурс]. – Warsaw : PWA, 2023. – Режим доступа: <https://www.pwik.pl>

29. Lithuanian Water Agency. Anaerobic Sludge Stabilization in Small-Scale WWTPs [Электронный ресурс]. – Vilnius : LWA, 2022. – Режим доступа: <https://www.lwa.lt>

30. Di Biase A., Kowalski M. S., Devlin T. R., Oleszkiewicz J. A. Moving bed biofilm reactor technology in municipal wastewater treatment: A review // *Journal of Environmental Management*. – 2019. – Том. 247. – С. 849–866. – DOI: 10.1016/j.jenvman.2019.06.104.

31. Ghonimy M., Hegab M., El-Sayed E. Improving wastewater quality using ultrafiltration for advanced treatment and reuse // *Water*. – 2025. – Том. 17, №. 6. – С. 870–883. – DOI: 10.3390/w17060870.

32. Benstoem F., Nahrstedt A., Boehler M., et al. Performance of granular activated carbon to remove micropollutants from municipal wastewater: A review // *Chemosphere*. – 2017. – Том. 173. – С. 750–765. – DOI: 10.1016/j.chemosphere.2016.12.067.

33. Sturm M. T., Reineke F., Künkler L., et al. Comparative study on the removal of micropollutants by granular activated carbon and advanced oxidation in tertiary wastewater treatment // *Sustainability*. – 2022. – Том. 14, №. 18. – Art. 11605. – DOI: 10.3390/su141811605.

34. Campo G., Fazzini P., Capodaglio A. G. Enhancing the energy efficiency of wastewater treatment plants: A critical review // *Energies*. – 2023. – Том. 16, №. 6. – Art. 2819. – DOI: 10.3390/en16062819.

35. Madan S., Srivastava R. K., Bhargava R. Advancement in biological wastewater treatment using moving bed biofilm reactors: A review // *Applied Water Science*. – 2022. – Том. 12. – Art. 126. – DOI: 10.1007/s13201-022-01659-3.

36. Ødegaard H. Innovations in wastewater treatment: The moving bed biofilm process // *Water Science and Technology*. – 2006. – Том. 53, №. 9. – С. 17–33.
37. Andreottola G., Foladori P., Ragazzi M. Upgrading of a small wastewater treatment plant in a cold climate region using a moving bed biofilm reactor (MBBR) system // *Water Science and Technology*. – 2000. – Том. 41, №. 1. – С. 177–185.
38. Judd S. *The MBR Book: Principles and Applications of Membrane Bioreactors for Water and Wastewater Treatment*. – 2nd ed. – Oxford : Elsevier, 2011. – С. 497.
39. Lozano Avilés A. B., del Cerro F., Llorens J. Methodology for Energy Optimization in Wastewater Treatment Plants. Phase I: Control of the Best Operating Conditions // *Sustainability*. – 2019. – Том. 11, №. 14. – Art. 3919.
40. Benstoem F., Nahrstedt A., Boehler M., та ін. Performance of granular activated carbon to remove micropollutants from municipal wastewater – a meta-analysis of pilot- and large-scale studies // *Chemosphere*. – 2017. – Том. 185. – С. 105–118.
41. Water Environment Federation (WEF). *Energy Conservation in Water and Wastewater Facilities*. – Alexandria, VA : WEF Press, 2024. – С. 420.
42. International Water Association (IWA). *Energy Efficiency in Wastewater Treatment Plants: Best Practice Guide*. – London : IWA Publishing, 2023. – 156 p.
43. International Water Association (IWA). *Energy efficiency in wastewater treatment plants: technologies, benchmarking and optimisation strategies*. – London : IWA Publishing, 2023. – 356 p.
44. Методичні рекомендації щодо підготовки та виконання кваліфікаційної роботи магістра здобувачами вищої освіти спеціальності 161 «Хімічні технології та інженерія» / уклад. О. А. Параска, Т. В. Іванішена. – Хмельницький : Хмельницький національний університет, 2024. – С. 43.

45. Текстові документи. Загальні вимоги і правила оформлення : стандарт Хмельницького національного університету СОУ 207.01:2025. – Хмельницький : ХНУ, 2025.

46. Бібліографічний запис. Загальні вимоги та правила складання : стандарт Хмельницького національного університету СОУ 207.02:2025. – Хмельницький : ХНУ, 2025.