МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ПОЛІСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

Факультет лісового господарства та екології

Кафедра екології

Кваліфікаційна робота
на правах рукопису

ГРИЦАНЮК ОЛЕКСАНДРА АНДРІЇВНА

УДК 504.06:628.16:620.9

КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА

ВПРОВАДЖЕННЯ ЕНЕРГОЕФЕКТИВНИХ ТЕХНОЛОГІЙ ОЧИЩЕННЯ ВОДИ НА КОМУНАЛЬНИХ ПІДПРИЄМСТВАХ ЯК ЗАСІБ ЗМЕНШЕННЯ ЕКОЛОГІЧНОГО СЛІДУ

101 «Екологія»

Подається на здобуття освітнього ступеня бакалавр

Кваліфікаційна робота містить результати власних досліджень. Використання ідей, результатів і текстів інших авторів мають посилання на відповідне джерело _____ Олександра ГРИЦАНЮК

Керівник роботи:
Дмитро ВИСКУШЕНКО,
кандидат біол. наук, доцент

Житомир – 2026

Висновок кафедри екології

за результатами попереднього захисту:
_____

Протокол засідання кафедри екології
№ __ від «___» _____ 2026 р.

Завідувач кафедри

екології Юрій НИКИТЮК

«___» _____ 2026 р.

Результати захисту кваліфікаційної роботи

Здобувач вищої освіти **Олександра Грицанюк** захистила кваліфікаційну роботу з оцінкою:

сума балів за 100-бальною шкалою _____

за шкалою ECTS _____

за національною шкалою _____

Секретар ЕК _____ _____
(підпис)

АНОТАЦІЯ

Грицанюк О.А. Впровадження енергоефективних технологій очищення води на комунальних підприємствах як засіб зменшення екологічного сліду. – Кваліфікаційна робота на правах рукопису.

Кваліфікаційна робота на здобуття освітнього ступеня бакалавра за спеціальністю 101 «Екологія». – Поліський національний університет, Житомир, 2026.

У роботі розглянуто теоретичні та прикладні аспекти впровадження енергоефективних технологій очищення води на комунальних підприємствах у контексті зменшення екологічного сліду. Проаналізовано сучасні підходи до очищення води, зокрема використання енергоощадних технологій та їх роль у підвищенні екологічної безпеки систем водопостачання і водовідведення. Оцінено вплив енергоємності процесів водоочищення на формування екологічного сліду підприємств комунального господарства. Досліджено можливості зниження негативного впливу на довкілля шляхом оптимізації технологічних процесів, впровадження інноваційних рішень та підвищення енергоефективності обладнання. Обґрунтовано заходи щодо зменшення споживання енергетичних ресурсів, скорочення викидів забруднюючих речовин та підвищення екологічної ефективності функціонування водоочисних систем.

Ключові слова: енергоефективність, очищення води, екологічний слід, комунальні підприємства, водопостачання, водовідведення, екологічна безпека, сталий розвиток.

ANNOTATION

Hrytsanyuk O. Implementation of Energy-Efficient Water Treatment Technologies at Municipal Enterprises as a Means of Reducing Environmental Footprint. – Qualification paper manuscript copyrights.

Qualification work for obtaining a Bachelor’s degree in the specialty 101 «Ecology». – Polissia National University, Zhytomyr, 2026.

The paper considers theoretical and applied aspects of implementing energy-

efficient water treatment technologies at municipal enterprises in the context of reducing environmental footprint. Modern approaches to water treatment, including energy-saving technologies and their role in improving environmental safety of water supply and wastewater systems, are analyzed. The impact of energy intensity of water treatment processes on the environmental footprint of municipal enterprises is assessed. The possibilities of reducing environmental impact through optimization of technological processes, implementation of innovative solutions, and improvement of energy efficiency of equipment are investigated. Measures aimed at reducing energy consumption, minimizing pollutant emissions, and enhancing environmental performance of water treatment systems are substantiated.

Key words: energy efficiency, water treatment, environmental footprint, municipal enterprises, water supply, wastewater, environmental safety, sustainable development.

ЗМІСТ

Стор.

ВСТУП **6**

1. ТЕОРЕТИЧНІ ЗАСАДИ ЗМЕНШЕННЯ ЕКОЛОГІЧНОГО СЛІДУ У СФЕРІ ВОДООЧИЩЕННЯ **9**

1.1. Сутність екологічного сліду та підходи до його оцінювання у водному господарстві 9

1.2. Енергоефективність як чинник зниження антропогенного впливу на довкілля 13

1.3. Сучасні технології очищення води та їх екологічна ефективність 17

2. АНАЛІЗ ЕКОЛОГІЧНИХ ТА ЕНЕРГЕТИЧНИХ ХАРАКТЕРИСТИК ВОДООЧИСНИХ ПРОЦЕСІВ НА КОМУНАЛЬНИХ ПІДПРИЄМСТВАХ **20**

2.1. Характеристика діяльності комунальних підприємств у сфері водопостачання та водовідведення 20

2.2. Оцінка енергоємності процесів очищення води та формування екологічного сліду 22

2.3. Виявлення основних екологічних проблем і резервів підвищення енергоефективності 25

3. ВПРОВАДЖЕННЯ ЕНЕРГОЕФЕКТИВНИХ ТЕХНОЛОГІЙ ОЧИЩЕННЯ ВОДИ ЯК ІНСТРУМЕНТ ЗМЕНШЕННЯ ЕКОЛОГІЧНОГО СЛІДУ **29**

3.1. Обґрунтування вибору енергоефективних технологій очищення води 29

3.2. Оцінка екологічного ефекту від впровадження запропонованих рішень 33

ВИСНОВКИ **37**

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ **39**

ВСТУП

Сучасний етап розвитку комунальної інфраструктури характеризується зростаючим навантаженням на природні ресурси, передусім водні, а також значним рівнем енергоспоживання технологічних процесів. Системи очищення води, будучи невід'ємною складовою водопровідно-каналізаційного господарства, одночасно виконують екологічну функцію та виступають джерелом техногенного впливу на довкілля через споживання енергії, утворення відходів і викидів [18]. У цих умовах особливої актуальності набуває пошук рішень, спрямованих на зменшення екологічного сліду діяльності комунальних підприємств.

Зростання вартості енергоресурсів, необхідність підвищення екологічних стандартів та інтеграція принципів сталого розвитку у практику господарювання обумовлюють потребу у впровадженні енергоефективних технологій очищення води [19]. Такі технології дозволяють не лише зменшити експлуатаційні витрати, але й істотно скоротити негативний вплив на навколишнє природне середовище. Особливого значення це набуває для підприємств локального рівня, зокрема комунальних, які функціонують в умовах обмежених ресурсів і застарілої інфраструктури.

Актуальність дослідження посилюється необхідністю адаптації водогосподарських систем до сучасних екологічних викликів, включаючи зміну клімату, погіршення якості водних ресурсів та підвищення вимог до екологічної безпеки. У цьому контексті впровадження енергоефективних рішень у сфері очищення води розглядається як один із дієвих інструментів мінімізації антропогенного навантаження та підвищення екологічної ефективності господарської діяльності.

Метою роботи є обґрунтування можливостей зменшення екологічного сліду комунальних підприємств шляхом впровадження енергоефективних технологій очищення води.

Для досягнення поставленої мети в роботі визначено такі **завдання:**

- проаналізувати теоретичні підходи до оцінювання екологічного сліду у сфері водного господарства;
- розкрити роль енергоефективності у зниженні негативного впливу на довкілля;
- охарактеризувати сучасні технології очищення води з позицій їх екологічної доцільності;
- оцінити енергоємність технологічних процесів та їх внесок у формування екологічного сліду підприємства;
- виявити основні проблеми та резерви підвищення енергоефективності;
- обґрунтувати доцільність впровадження енергоефективних технологій очищення води;
- оцінити очікуваний екологічний ефект від запропонованих заходів та розробити практичні рекомендації.

Об'єктом дослідження є процеси очищення води на комунальних підприємствах.

Предмет дослідження – екологічні та енергетичні аспекти функціонування систем водоочищення та їх вплив на формування екологічного сліду.

У процесі виконання роботи використано комплекс **методів дослідження**, зокрема: аналіз і узагальнення наукових джерел для визначення теоретичних засад проблеми; порівняльний аналіз для оцінки ефективності різних технологій очищення води; елементів системного підходу для дослідження функціонування водоочисних процесів; розрахункові методи для оцінки енергоємності та екологічного сліду; графічні та аналітичні методи для інтерпретації отриманих результатів.

Перелік публікацій автора за темою дослідження.

Грицанюк О.А. Зменшення екологічного навантаження шляхом модернізації технологій очищення води. Виклики сьогодення та наслідки Чорнобильської катастрофи. Екологія. Наука. Практика-2026 : матеріали

XXII Всеукр. наук.-практ. конф. Житомир : Поліський національний університет, 2026. С. 58-60 [9].

Яремчук С.М., Якімчук А.І.**, Грицанюк О.А.**, Козюк О.О. Екологічні ризики та енергетична ефективність водоочисних технологій у контексті стратегічного розвитку міських громад. 3rd International Scientific and Practical Conference: Science, Technology and Industry in the Digital Age. Hamburg: International Scientific Unity, 2026. p. 137-140 [22].

Практичне значення отриманих результатів полягає у можливості використання запропонованих підходів і рекомендацій для підвищення енергоефективності та екологічної безпеки діяльності комунальних підприємств, зокрема КП «Конкурент» (селище Довбиш). Отримані результати можуть бути застосовані при плануванні модернізації водоочисних систем, оптимізації енергоспоживання та розробці заходів зі зменшення екологічного навантаження на довкілля.

Структура та обсяг роботи. Робота викладена на 43 сторінках комп’ютерного тексту, кількість таблиць – 7, кількість рисунків – 8. Список використаної літератури – 40 джерел.

РОЗДІЛ 1
ТЕОРЕТИЧНІ ЗАСАДИ ЗМЕНШЕННЯ ЕКОЛОГІЧНОГО СЛІДУ У СФЕРІ ВОДООЧИЩЕННЯ

1.1. Сутність екологічного сліду та підходи до його оцінювання у водному господарстві

У сучасних умовах трансформації природокористування зростає потреба у кількісному вимірюванні впливу господарської діяльності на довкілля. Одним із узагальнюючих індикаторів, що дозволяє інтегрувати різні види антропогенного навантаження, є екологічний слід [1, 20]. Його застосування у сфері водного господарства дає змогу оцінити не лише пряме використання водних ресурсів, а й супутні витрати енергії, матеріалів та утворення відходів у процесах водопідготовки та очищення стічних вод [29, 30].

За змістом екологічний слід відображає сукупний обсяг природних ресурсів, необхідних для забезпечення функціонування певної системи, а також площу екосистем, потрібну для асиміляції утворених забруднень. У контексті водоочищення це поняття охоплює водоспоживання, енергетичні витрати, використання реагентів, утворення осадів та викиди, пов’язані з експлуатацією обладнання [22]. Такий підхід дозволяє розглядати водоочисні процеси як складні техно-екологічні системи, в яких ресурсні та екологічні аспекти є взаємопов’язаними. Важливою особливістю екологічного сліду є його інтегральний характер. На відміну від окремих показників, таких як обсяг скидів або концентрація забруднюючих речовин, він дає узагальнену оцінку впливу, враховуючи як прямі, так і опосередковані ефекти (рис. 1.1.1). Зокрема, значну частку у структурі екологічного сліду підприємств водного господарства становить енергоспоживання, оскільки виробництво електроенергії супроводжується викидами парникових газів та іншими видами навантаження на довкілля [9].

У практиці екологічних досліджень використовується кілька підходів до оцінювання екологічного сліду, які можуть бути адаптовані до специфіки водного господарства [5]. Найбільш поширеним є ресурсно-потоковий підхід, що базується на аналізі вхідних і вихідних потоків системи. У цьому випадку враховуються обсяги спожитої води, енергії, хімічних реагентів, а також кількість утворених відходів і викидів. Такий підхід є відносно простим у реалізації та дозволяє отримати первинне уявлення про екологічне навантаження.



Рис. 1.1.1. Структура екологічного сліду процесів очищення води (узагальнена схема)

Більш комплексним є підхід життєвого циклу, який передбачає оцінювання впливів на всіх етапах існування технології: від виробництва обладнання до його утилізації, причому результати такого аналізу значною мірою залежать від вибору системних меж дослідження та масштабу оцінювання [33]. У водоочищенні це означає врахування не лише експлуатаційних витрат, а й екологічних наслідків виготовлення насосів, фільтрів, мембранних елементів та інших складових інфраструктури. Застосування такого підходу дозволяє уникнути зміщення впливів між

різними стадіями та забезпечує більш об’єктивну оцінку.

Окрему групу становлять енергетично орієнтовані методики, що фокусуються на визначенні енергоємності процесів і пов’язаних з нею екологічних ефектів. Для підприємств водопостачання та водовідведення цей аспект є критично важливим, оскільки значна частина витрат припадає саме на електроенергію. При цьому рівень енергоефективності очисних споруд безпосередньо впливає на їх екологічні характеристики та загальну ефективність функціонування [28].

Також у наукових дослідженнях застосовуються індикаторні підходи, що базуються на використанні системи узагальнених показників, які формують багатокритеріальну основу оцінювання сталості функціонування водогосподарських систем [38]. Вони можуть включати питоме енергоспоживання на одиницю очищеної води, обсяг утворених відходів, рівень вилучення забруднюючих речовин та інші характеристики. Поєднання таких індикаторів дозволяє сформувати цілісне уявлення про ефективність функціонування водоочисних систем з екологічної точки зору.

Для узагальнення основних підходів до оцінювання екологічного сліду у водному господарстві доцільно представити їх порівняльну характеристику (табл. 1.1.1). Як видно з таблиці 1.1.1, жоден із підходів не забезпечує повної оцінки екологічного сліду окремо, що обумовлює доцільність їх комбінованого використання.

Специфіка оцінювання екологічного сліду у водному господарстві полягає у необхідності врахування локальних умов [13]. До них належать якість вихідної води, технічний стан обладнання, структура енергопостачання та особливості експлуатації систем. Це означає, що універсальні методики потребують адаптації до конкретного підприємства або регіону. У цьому контексті важливого значення набуває використання даних виробничого моніторингу та статистичної звітності. Застосування концепції екологічного сліду у сфері водоочищення має не лише аналітичне, але й прикладне значення. Воно дозволяє виявляти найбільш ресурсоємні та

екологічно навантажені етапи технологічного процесу, що створює передумови для їх оптимізації. Зокрема, результати оцінювання можуть бути використані для обґрунтування впровадження енергоефективних технологій, модернізації обладнання та удосконалення режимів роботи систем.

Таблиця 1.1.1

Порівняння підходів до оцінювання екологічного сліду у водному господарстві

Підхід	**Сутність**	**Показники**	**Переваги / обмеження**
Ресурсно-потоковий	Аналіз вхідних і вихідних потоків	Вода, енергія, реагенти, відходи	+ простота; − не враховує життєвий цикл
LCA	Оцінка впливів на всіх стадіях життєвого циклу	CO_2, енергія, екологічні індикатори	+ комплексність; − складність і дані
Енергетичний	Аналіз енергоємності процесів	кВт·год/м³, CO_2	+ точність для енергії; − вузькість
Індикаторний	Система узагальнених показників	Питомі показники, ефективність	+ гнучкість; − залежність від вибору
Інтегрований	Комбінація підходів	Комплекс показників	+ повнота; − складність реалізації

Таким чином, екологічний слід виступає універсальним інструментом комплексної оцінки впливу водогосподарської діяльності на довкілля. Його використання забезпечує можливість поєднання екологічних і ресурсних аспектів аналізу, що є необхідною умовою для розроблення ефективних заходів зі зменшення негативного впливу [6] та переходу до більш сталих моделей функціонування систем очищення води.

1.2. Енергоефективність як чинник зниження антропогенного впливу на довкілля

У результаті інтенсифікації господарської діяльності питання раціонального використання енергетичних ресурсів набуває не лише економічного, а й виразного екологічного значення [2, 7]. Для систем водопостачання та водовідведення це особливо актуально, оскільки процеси забору, транспортування та очищення води належать до енергоємних і супроводжуються непрямими впливами на довкілля [8, 15]. Відтак рівень енергоефективності таких систем значною мірою визначає масштаб їх антропогенного навантаження, що підтверджується сучасними дослідженнями у сфері декарбонізації водного господарства [23]. Енергоефективність у контексті водного господарства доцільно розглядати як здатність забезпечувати необхідну якість очищення води за мінімальних витрат енергії на одиницю обробленого об’єму [14]. Такий підхід дозволяє поєднати технологічні вимоги з екологічними обмеженнями, оскільки скорочення енергоспоживання безпосередньо пов’язане зі зменшенням викидів, що утворюються при виробництві електроенергії, а також зі зниженням навантаження на енергетичну інфраструктуру (рис. 1.2.1) та узгоджується з сучасними підходами до оцінювання енергетичних характеристик водоочисних систем [24].

Важливою особливістю енергоспоживання у водоочисних процесах є його нерівномірний розподіл між окремими технологічними стадіями [21]. Найбільш енергоємними, як правило, є робота насосного обладнання, механічне перемішування та аераційні процеси, що підтверджується результатами досліджень енергетичної структури очисних споруд [24]. Це означає, що навіть часткове вдосконалення цих елементів може забезпечити відчутний екологічний ефект. Водночас допоміжні процеси, хоча й мають меншу частку у загальному енергобалансі, також можуть бути оптимізовані

шляхом модернізації обладнання та впровадження автоматизованих систем керування.

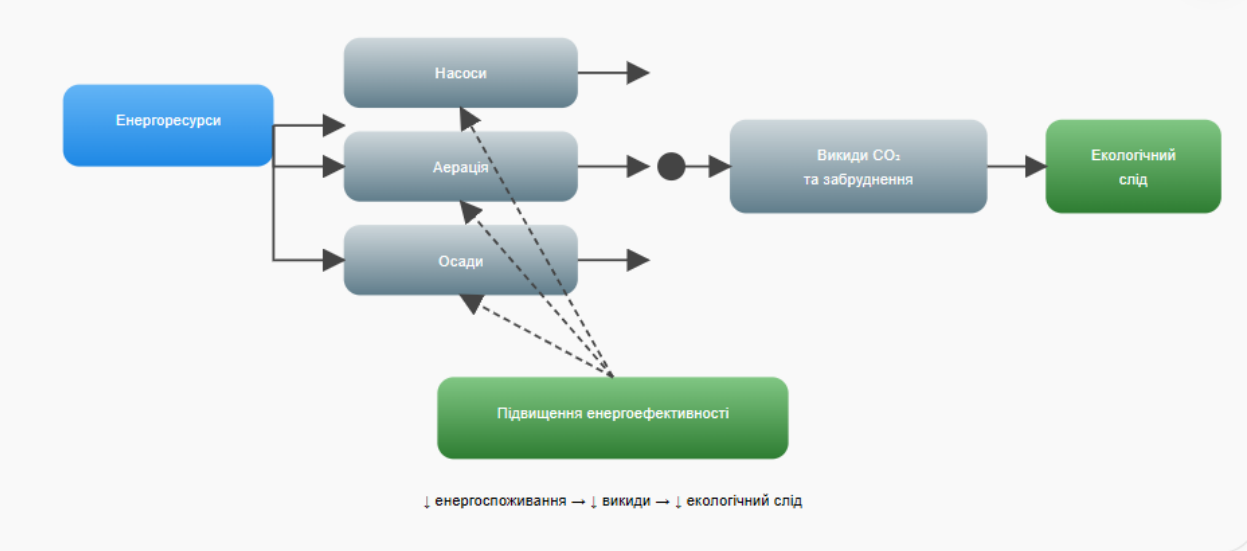


Рис. 1.2.1. Вплив енергоефективності на формування екологічного сліду у водоочищенні (узагальнена схема)

Для більш наочного відображення структури енергоспоживання у процесах очищення стічних вод доцільно узагальнити відповідні дані у вигляді таблиці (табл. 1.2.1), сформованої на основі сучасних наукових досліджень у сфері енергоефективності водоочисних систем [24, 26].

Таблиця 1.2.1

Орієнтовна структура енергоспоживання у водоочисних процесах

Процес	**Частка енергоспоживання, %**	**Особливості для України**
Аерація	50–70	Основний споживач енергії через застарілі аераційні системи
Насосне обладнання	15–25	Високі втрати через зношені мережі та обладнання
Механічне очищення	5–15	Порівняно невелика частка
Обробка осадів	5–10	Часто недостатньо енергоефективна або застаріла

Як видно з табл. 1.2.1, найбільша частка енергоспоживання припадає на процеси аерації, що обумовлює доцільність їх першочергової оптимізації, що

підтверджується результатами сучасних досліджень. Інші технологічні стадії також мають значний потенціал підвищення енергоефективності, однак їх вплив є менш визначальним. Це підтверджує доцільність спрямування заходів енергоефективності насамперед на аераційні системи.

Зниження антропогенного впливу через підвищення енергоефективності реалізується кількома взаємопов'язаними шляхами. По-перше, це безпосереднє скорочення обсягів споживаної енергії, що призводить до зменшення викидів парникових газів, оскільки підвищення енергоефективності прямо пов'язане зі скороченням вуглецевого сліду водоочисних систем [31], і забруднюючих речовин. По-друге, підвищення ефективності використання енергії дозволяє зменшити потребу у додаткових енергетичних потужностях, що опосередковано впливає на скорочення ресурсного навантаження. По-третє, впровадження енергоощадних технологій часто супроводжується підвищенням загальної технологічної надійності систем [10].

Суттєвий потенціал енергозбереження пов'язаний із модернізацією існуючої інфраструктури. Значна частина комунальних підприємств експлуатує обладнання з високим ступенем фізичного та морального зносу, що знижує ефективність використання енергії. Заміна застарілих насосів, впровадження частотного регулювання, оптимізація режимів роботи та використання енергоефективних аераційних систем дозволяють значно зменшити питомі витрати електроенергії. При цьому дослідження ефективності функціонування очисних споруд показують наявність значного потенціалу енергозбереження без погіршення якості очищення [34]. Водночас важливо враховувати, що технічні заходи мають супроводжуватися організаційними рішеннями, зокрема вдосконаленням систем моніторингу та управління. Для кількісного визначення рівня енергоефективності водоочисних систем застосовуються підходи порівняльного аналізу та бенчмаркінгу, що дозволяють ідентифікувати резерви підвищення ефективності функціонування технологічних процесів [36].

Також варто згадати інтеграцію принципів енергоефективності на етапі проєктування водоочисних систем. Вибір технологічних схем, параметрів обладнання та режимів експлуатації повинен здійснюватися з урахуванням не лише технічних, але й екологічних критеріїв. Такий підхід дозволяє уникнути надмірних витрат ресурсів у майбутньому та забезпечити більш стале функціонування системи протягом усього періоду її експлуатації.

Водночас, сучасні тенденції розвитку водного господарства передбачають активне впровадження інноваційних рішень, спрямованих на підвищення енергоефективності [11]. До них належать використання енергоощадних технологій очищення, автоматизація процесів, застосування систем відновлення енергії, а також інтеграція відновлюваних джерел енергії. Зокрема, перспективним напрямом є використання біогазу, що утворюється при обробці осадів, для покриття частини енергетичних потреб підприємства.

Важливим аспектом є також взаємозв’язок між енергоефективністю та екологічною безпекою. Підвищення ефективності використання енергії сприяє не лише зменшенню викидів, але й зниженню ризиків, пов’язаних з аварійними ситуаціями, перевантаженням обладнання та нестабільністю технологічних процесів. Це особливо важливо для комунальних підприємств, діяльність яких безпосередньо впливає на стан довкілля та якість життя населення.

Підсумовуючи, енергоефективність виступає ключовим фактором зниження антропогенного впливу у сфері водоочищення. Її підвищення забезпечує комплексний ефект, що поєднує економічні, екологічні та технологічні переваги. Реалізація відповідних заходів створює передумови для зменшення екологічного сліду комунальних підприємств та переходу до більш раціональних моделей природокористування.

1.3. Сучасні технології очищення води та їх екологічна ефективність

Розвиток водогосподарських систем у сучасних умовах супроводжується поступовим переходом від традиційних підходів до очищення води до більш технологічно складних та ресурсоефективних рішень. Це зумовлено необхідністю підвищення якості очищення, зменшення навантаження на довкілля та оптимізації використання природних і енергетичних ресурсів. У цьому контексті сучасні технології водоочищення розглядаються не лише як інструмент забезпечення нормативних показників якості води, а як складова екологічно орієнтованого управління природокористуванням [37].

Традиційні технології очищення води, зокрема механічне, біологічне та фізико-хімічне очищення [12], залишаються базою функціонування більшості очисних споруд. Водночас їх ефективність значною мірою залежить від технічного стану обладнання та умов експлуатації. У сучасних умовах ці процеси дедалі частіше доповнюються або модернізуються за рахунок впровадження нових технологічних рішень, що дозволяють підвищити ступінь вилучення забруднюючих речовин і зменшити негативний вплив на навколишнє середовище (рис. 1.3.1).

Одним із ключових напрямів розвитку є впровадження мембранних технологій, які забезпечують високий рівень очищення за рахунок використання бар’єрних процесів [37]. До них належать ультрафільтрація, нанофільтрація та зворотний осмос. Їх перевагою є здатність ефективно видаляти як завислі, так і розчинені речовини, включаючи мікрополютанти. Водночас використання мембран пов’язане з певними обмеженнями, зокрема підвищеним енергоспоживанням та необхідністю регулярного обслуговування, що потребує комплексної оцінки їх екологічної доцільності. Перспективним напрямом є також удосконалення біологічних методів очищення, зокрема застосування технологій із закріпленою біомасою та

біореакторів нового покоління. Такі системи дозволяють інтенсифікувати процеси біологічного розкладання органічних речовин, забезпечити більш стабільну роботу та підвищити ефективність видалення азоту і фосфору. Використання сучасних біотехнологій сприяє зниженню утворення вторинних відходів та оптимізації енергоспоживання.

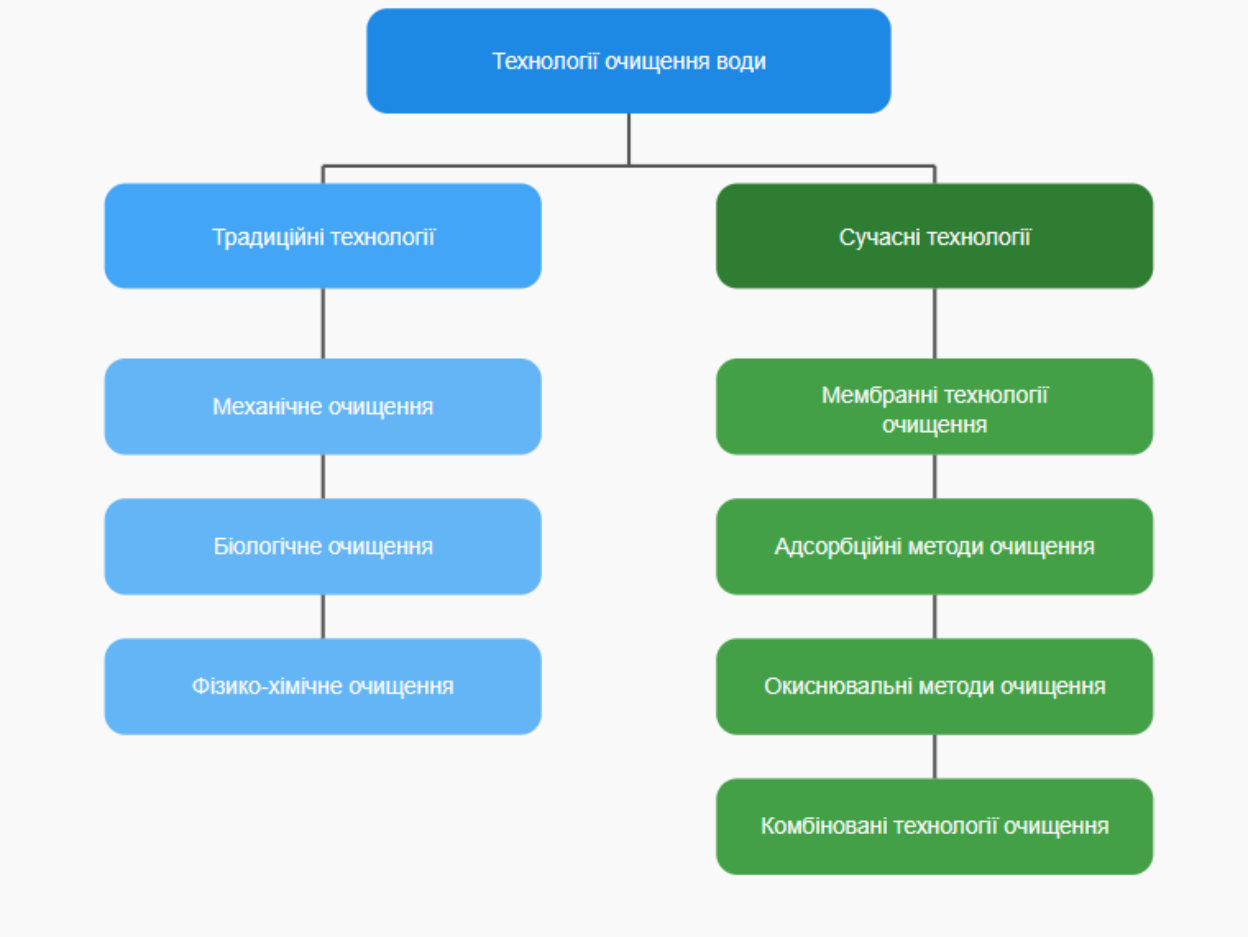


Рис. 1.3.1. Схема класифікації технологій очищення води

Окрему групу становлять технології, спрямовані на глибоке очищення води від специфічних забруднювачів. До них належать адсорбційні процеси, озонування, ультрафіолетове знезараження та інші методи, що дозволяють видаляти мікроорганізми, фармацевтичні речовини та інші стійкі сполуки. Їх застосування особливо актуальне в умовах зростання антропогенного навантаження та ускладнення складу стічних вод.

Значна увага у сучасних дослідженнях приділяється комбінованим технологіям, які поєднують різні методи очищення в єдину систему. Такий

підхід дозволяє досягти синергетичного ефекту, коли недоліки одного методу компенсуються перевагами іншого. Наприклад, поєднання біологічного очищення з мембранною фільтрацією забезпечує високий рівень видалення забруднень при відносно компактних розмірах споруд. Це особливо важливо для модернізації існуючих об’єктів без значного розширення інфраструктури.

Таблиця 1.3.1

Порівняння екологічної ефективності технологій очищення води

Технологія	**Якість очищення**	**Енергоємність**	**Утворення відходів**	**Екологічна оцінка**
Традиційна біологічна	середня	середня	значне	середня
Мембранна	висока	висока	низьке	висока
Адсорбційна	висока	середня	середнє	висока
Окиснювальна (УФ, озон)	дуже висока	висока	низьке	висока
Комбінована	дуже висока	середня	оптимізоване	найвища

Екологічна ефективність сучасних технологій визначається не лише якістю очищення, але й сукупністю ресурсних витрат та побічних ефектів. Важливими критеріями є енергоємність процесів, обсяг утворення відходів, потреба у хімічних реагентах та рівень вторинного забруднення. З цієї точки зору навіть високоефективні технології можуть мати обмежене застосування, якщо їх використання супроводжується значними екологічними витратами. Особливого значення набуває впровадження принципів циркулярної економіки у водному господарстві. Це передбачає повторне використання очищеної води, утилізацію осадів з отриманням енергії або корисних продуктів, а також мінімізацію втрат ресурсів. Сучасні технології дедалі частіше орієнтовані саме на такі підходи, що дозволяє розглядати очисні споруди не лише як елемент інфраструктури, але як потенційне джерело ресурсів. Як видно з табл. 1.3.1, найбільш екологічно ефективними є комбіновані технології, які дозволяють досягти високого ступеня очищення при оптимізації ресурсних витрат.

РОЗДІЛ 2
АНАЛІЗ ЕКОЛОГІЧНИХ ТА ЕНЕРГЕТИЧНИХ ХАРАКТЕРИСТИК ВОДООЧИСНИХ ПРОЦЕСІВ НА КОМУНАЛЬНИХ ПІДПРИЄМСТВАХ

2.1. Характеристика діяльності комунальних підприємств у сфері водопостачання та водовідведення

Функціонування комунальних підприємств у сфері водопостачання та водовідведення є ключовим елементом забезпечення життєдіяльності населених пунктів та підтримання належного санітарно-гігієнічного стану територій. Такі підприємства виконують комплекс взаємопов’язаних завдань, що охоплюють забір води з природних джерел, її підготовку до споживання, транспортування споживачам, а також відведення та очищення стічних вод перед їх поверненням у навколишнє середовище.

Діяльність комунальних водогосподарських підприємств має системний характер і базується на безперервності технологічних процесів. Водопостачання передбачає функціонування водозабірних споруд, насосних станцій, станцій підготовки води та розподільчих мереж. Водовідведення, у свою чергу, включає каналізаційні мережі, насосні станції та очисні споруди різного ступеня складності. Кожен із цих елементів формує єдину технологічну систему, ефективність якої визначає якість наданих послуг та рівень впливу на довкілля.

Особливістю діяльності комунальних підприємств є значна енергоємність виробничих процесів. Основні витрати енергії пов’язані з підйомом і транспортуванням води, а також із забезпеченням функціонування очисних споруд. В умовах зростання вартості енергоресурсів питання енергоефективності набуває особливого значення, оскільки безпосередньо впливає як на економічні показники підприємств, так і на рівень їх екологічного навантаження, що підтверджується сучасними дослідженнями, які вказують на суттєвий вплив технологічних факторів та

зношеності обладнання на рівень енергоспоживання очисних споруд [35]. Водночас значна частина інфраструктури водопостачання та водовідведення в Україні характеризується високим ступенем фізичного зносу. За офіційними даними [17], значна частина об’єктів водопостачання та водовідведення в Україні потребує модернізації, що негативно впливає на ефективність їх функціонування. Аналіз цих даних (табл. 2.1.1) свідчить про наявність суттєвих втрат води у системах водопостачання, що зумовлено високим ступенем зношеності мереж та неефективністю обладнання. Крім того, обсяги води, поданої у мережу, значно перевищують обсяги її реалізації споживачам. Водночас значна частина насосного обладнання та очисних споруд потребує модернізації, що негативно впливає на енергетичні та екологічні показники функціонування підприємств.

Таблиця 2.1.1

Основні характеристики систем водопостачання та водовідведення в Україні

Показник	**Характеристика**	**Екологічне значення**
Стан інфраструктури	Зношеність мереж і обладнання	Втрати води, зростання енерговитрат
Вплив воєнних дій	Пошкодження систем і мереж	Ризики перебоїв і забруднення
Доступ до води	≈ 8,4 % населених пунктів користуються привізною водою	Потенційна небезпека для населення
Якість води	До 18,8 % проб не відповідають нормам	Негативний вплив на здоров’я
Стан водних ресурсів	Фіксуються перевищення $БСК_5$, ХСК, металів	Погіршення екологічного стану
Енергоспоживання	Висока енергоємність процесів	Формування вуглецевого сліду

Важливим аспектом діяльності комунальних підприємств є їхній вплив на стан довкілля. Основними факторами такого впливу виступають скиди недостатньо очищених стічних вод [3], утворення осадів та споживання значних обсягів енергії. У разі недотримання технологічних режимів або перевантаження систем це може призводити до погіршення якості водних

об’єктів, зміни екологічного стану територій та підвищення рівня техногенного навантаження.

Сучасні умови функціонування комунальних підприємств вимагають переходу до більш ефективних моделей управління, що базуються на поєднанні технологічних, економічних та екологічних підходів. Зокрема, дедалі більшого значення набуває впровадження систем моніторингу, автоматизації процесів та оптимізації режимів роботи обладнання, оскільки оцінювання енергоефективності дозволяє виявити значний потенціал зниження витрат енергії та відповідних викидів [36]. Це дозволяє зменшити енергоспоживання, підвищити стабільність роботи систем та знизити ризики негативного впливу на довкілля. Окрему увагу слід приділити інтеграції принципів сталого розвитку у діяльність водогосподарських підприємств. Йдеться про раціональне використання водних ресурсів, мінімізацію втрат, впровадження енергоефективних технологій та зменшення обсягів утворення відходів. У цьому контексті очисні споруди розглядаються не лише як об’єкти інфраструктури, а як елементи комплексних систем управління ресурсами.

Таким чином, діяльність комунальних підприємств у сфері водопостачання та водовідведення характеризується складністю, багатокомпонентністю та високим рівнем взаємозв’язку між окремими процесами. Її ефективність визначається технічним станом інфраструктури, рівнем організації управління та ступенем впровадження сучасних технологічних рішень. Урахування цих аспектів є необхідною умовою для подальшого аналізу екологічних та енергетичних характеристик водоочисних процесів.

2.2. Оцінка енергоємності процесів очищення води та формування екологічного сліду

Енергоємність процесів очищення води є одним із визначальних

параметрів, що характеризують ефективність функціонування водогосподарських підприємств та відповідає сучасним підходам до сталого управління водогосподарськими системами [27]. Вона відображає обсяг енергетичних ресурсів, необхідних для забезпечення повного технологічного циклу: від подачі води до її очищення та відведення. У сучасних умовах зростання вартості енергоресурсів і посилення екологічних вимог оцінка енергоємності набуває особливої актуальності, оскільки безпосередньо пов’язана з формуванням екологічного сліду підприємств.

Структура енергоспоживання у водоочисних процесах є неоднорідною і залежить від типу технологій, технічного стану обладнання та режимів експлуатації. Найбільш енерговитратними є процеси аерації, що забезпечують біологічне очищення стічних вод, а також робота насосного обладнання, пов’язана з транспортуванням води і стоків. Додаткові витрати енергії формуються на стадіях механічного очищення, обробки осадів та забезпечення допоміжних процесів. У сукупності це створює значне енергетичне навантаження на підприємства водопровідно-каналізаційного господарства.

Особливості функціонування комунальних підприємств в Україні зумовлюють підвищений рівень енергоємності. Зокрема, застаріле обладнання, зношені мережі та неефективні технологічні режими спричиняють додаткові втрати енергії. Відсутність достатнього рівня автоматизації процесів і систем оперативного контролю також обмежує можливості оптимізації енергоспоживання. У результаті фактичні витрати енергії часто перевищують нормативні значення, що негативно впливає як на економічні показники підприємств, так і на їх екологічну ефективність.

Енергоємність процесів очищення води тісно пов’язана з формуванням екологічного сліду, який відображає сукупний вплив діяльності підприємства на довкілля, що підтверджується результатами досліджень із застосуванням підходів оцінки життєвого циклу технологій [25]. Основною складовою такого впливу є викиди парникових газів, пов’язані з виробництвом та

споживанням електроенергії. Крім того, енергоспоживання опосередковано впливає на обсяги використання природних ресурсів та утворення вторинних забруднень. Таким чином, зниження енергоємності є одним із ключових напрямів мінімізації екологічного сліду у сфері водоочищення. Для оцінки енергоємності використовуються різні підходи, серед яких найбільш поширеним є визначення питомих витрат енергії на одиницю об'єму очищеної води. Цей показник дозволяє порівнювати ефективність різних технологій та об'єктів, а також виявляти потенціал для оптимізації. Водночас більш комплексну оцінку забезпечує застосування підходів, що враховують життєвий цикл технологій, включаючи стадії виробництва, експлуатації та утилізації обладнання.

Аналіз сучасних тенденцій свідчить про поступовий перехід до інтегрованих підходів оцінювання, які поєднують енергетичні та екологічні показники. Це дозволяє не лише визначити рівень енергоємності, але й оцінити її вплив на стан довкілля. У практиці водогосподарських підприємств дедалі більшого значення набуває використання систем моніторингу енергоспоживання, що дає змогу виявляти неефективні ділянки та приймати обґрунтовані управлінські рішення.

Важливим фактором, що впливає на енергоємність і відповідно на екологічний слід, є технічний стан очисних споруд та їх відповідність сучасним вимогам. Дані «Національної доповіді про якість питної води та стан питного водопостачання в Україні у 2024 році [17] свідчать про наявність значної кількості об'єктів, які потребують модернізації, що обумовлює підвищене енергоспоживання та обмежує ефективність очищення. У цих умовах впровадження енергоефективних технологій та оптимізація режимів роботи обладнання є необхідною передумовою зменшення екологічного навантаження.

Отже, оцінка енергоємності процесів очищення води дозволяє не лише визначити ефективність використання енергетичних ресурсів, але й виступає важливим інструментом аналізу екологічного впливу діяльності комунальних

підприємств. Зниження енергоємності, у поєднанні з впровадженням сучасних технологій, сприяє формуванню більш сталих моделей функціонування водогосподарських систем та зменшенню їх екологічного сліду.

2.3. Виявлення основних екологічних проблем і резервів підвищення енергоефективності

Функціонування комунальних підприємств у сфері водопостачання та водовідведення супроводжується комплексом екологічних викликів, що формуються під впливом як технічних, так і організаційних чинників. Аналіз сучасного стану водогосподарських систем дозволяє виокремити низку проблем, які мають системний характер і безпосередньо впливають на рівень екологічного навантаження та ефективність використання енергетичних ресурсів.

Однією з ключових проблем є незадовільний технічний стан інфраструктури. Значна частина мереж і обладнання експлуатується понад нормативні строки, що призводить до зростання втрат води, частих аварійних ситуацій та нераціонального використання енергії. Втрати у водопровідних мережах зумовлюють необхідність додаткового водозабору та збільшення обсягів перекачування, що, у свою чергу, підвищує енерговитрати та посилює антропогенний вплив на довкілля.

Суттєвою екологічною проблемою є також обмежена ефективність роботи очисних споруд. У багатьох випадках застосовуються технології, які не забезпечують належного рівня видалення забруднюючих речовин, особливо при змінному складі стічних вод. Це може призводити до надходження у водні об’єкти недостатньо очищених стоків, що негативно впливає на якість водних ресурсів та екологічний стан територій. Окремим аспектом є значна енергоємність технологічних процесів, яка часто перевищує оптимальні значення. Причинами цього є використання

застарілого насосного обладнання, неефективні режими роботи систем аерації та відсутність сучасних засобів автоматизованого управління. У результаті споживання електроенергії не відповідає фактичним потребам процесу, що зумовлює як економічні втрати, так і збільшення екологічного сліду.

Як видно з табл. 2.3.1, більшість екологічних проблем при цьому мають технічну природу та можуть бути усунені шляхом модернізації і впровадження енергоефективних рішень.

Таблиця 2.3.1

Основні екологічні проблеми та резерви підвищення енергоефективності

Проблема	**Причина**	**Резерв підвищення ефективності**
Втрати води	Зношені мережі	Реконструкція, контроль витоків
Високе енергоспоживання	Старе насосне обладнання	Заміна насосів, частотне регулювання
Низька ефективність очищення	Застарілі технології	Модернізація очисних споруд
Неефективні режими роботи	Відсутність автоматизації	Впровадження систем керування
Вторинне забруднення	Недостатнє доочищення	Комбіновані технології

Важливим чинником, що ускладнює ситуацію, є недостатній рівень контролю та моніторингу технологічних параметрів. Обмежені можливості збору та аналізу даних не дозволяють оперативно виявляти неефективні ділянки роботи систем і приймати обґрунтовані рішення щодо їх оптимізації. Це знижує загальну керованість процесів і стримує впровадження заходів з підвищення енергоефективності. Водночас проведений аналіз свідчить про наявність значного потенціалу для покращення ситуації. Одним із основних резервів підвищення енергоефективності є модернізація насосного обладнання, що дозволяє зменшити енергоспоживання за рахунок

підвищення коефіцієнта корисної дії та оптимізації режимів роботи. Не менш важливим є вдосконалення систем аерації, які є найбільш енергоємними елементами біологічного очищення.

Суттєвий ефект може бути досягнутий завдяки впровадженню систем автоматизації та диспетчеризації, що забезпечують адаптивне управління технологічними процесами. Використання сучасних сенсорних систем і програмного забезпечення дозволяє оперативно реагувати на зміну навантаження та оптимізувати споживання енергії у реальному часі. одночас ефективність застосування таких рішень значною мірою залежить від рівня підготовки персоналу, здатного працювати з сучасними цифровими інструментами та системами управління. У цьому контексті важливого значення набуває впровадження змішаних форм навчання, які поєднують традиційні та дистанційні підходи до підвищення кваліфікації працівників [4]. Перспективним напрямом є також впровадження принципів ресурсоефективності, зокрема використання вторинних ресурсів, що утворюються у процесі очищення стічних вод та відповідає сучасним підходам до розвитку циркулярної економіки у сфері водоочищення. Йдеться про можливість отримання енергії з осадів, повторне використання очищеної води та зменшення обсягів відходів. Такий підхід дозволяє не лише знизити енергоспоживання, але й підвищити загальну ефективність функціонування підприємств.

Крім того, важливим резервом є зниження втрат води у мережах шляхом їх поетапної реконструкції та впровадження систем контролю витоків. Це дозволяє скоротити обсяги водозабору та зменшити навантаження на насосне обладнання, що безпосередньо впливає на рівень енергоспоживання (рис. 2.3.1).

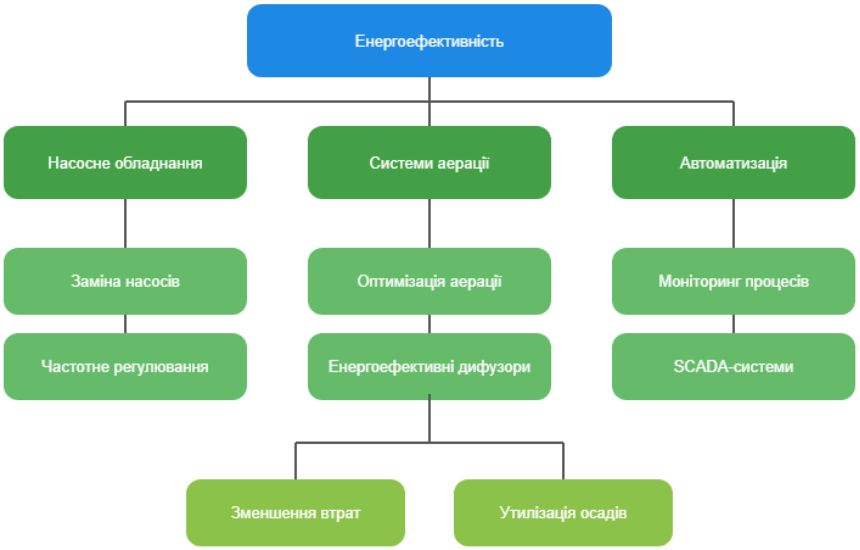


Рис. 2.3.1. Основні резерви підвищення енергоефективності у водоочисних процесах

Таким чином, основні екологічні проблеми у сфері водоочищення тісно пов’язані з високою енергоємністю процесів та недосконалістю технічної бази підприємств. Водночас наявні резерви підвищення енергоефективності створюють передумови для зниження екологічного сліду та переходу до більш сталих моделей функціонування водогосподарських систем. Реалізація зазначених напрямів потребує комплексного підходу, що поєднує технічні, організаційні та управлінські рішення.

РОЗДІЛ 3
ВПРОВАДЖЕННЯ ЕНЕРГОЕФЕКТИВНИХ ТЕХНОЛОГІЙ ОЧИЩЕННЯ ВОДИ ЯК ІНСТРУМЕНТ ЗМЕНШЕННЯ ЕКОЛОГІЧНОГО СЛІДУ

3.1. Обґрунтування вибору енергоефективних технологій очищення води

Вибір енергоефективних технологій очищення води є ключовим етапом формування стратегії зниження екологічного сліду комунальних підприємств. На відміну від загального підходу до модернізації інфраструктури, він передбачає цілеспрямоване визначення таких технологічних рішень, які забезпечують не лише належну якість очищення, але й мінімізацію енергетичних витрат і супутнього екологічного навантаження. У цьому контексті обґрунтування вибору технологій має базуватися на поєднанні технічних, економічних та екологічних критеріїв (рис. 3.1.1).

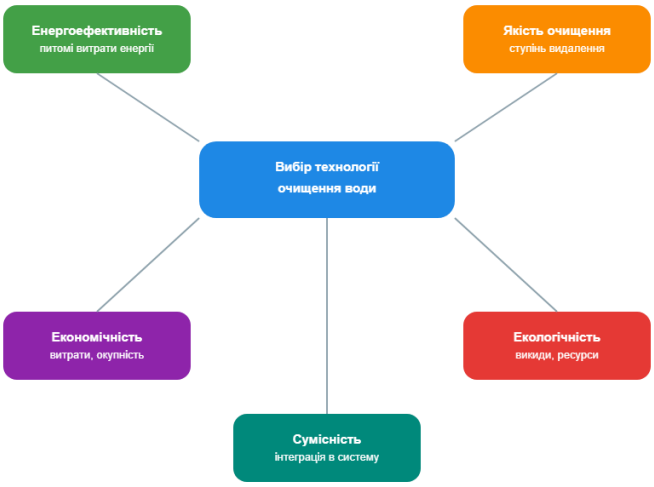


Рис. 3.1.1. Основні критерії вибору енергоефективних технологій очищення води

Першочерговим етапом є визначення вихідних умов функціонування конкретного підприємства. До них належать обсяги і склад стічних вод [39], режим їх надходження, технічний стан існуючих споруд та рівень їх завантаження. Важливе значення мають також характеристики водоприймача та встановлені нормативи якості очищення. Урахування цих факторів дозволяє уникнути впровадження універсальних, але не адаптованих до місцевих умов рішень, які можуть виявитися неефективними з енергетичної точки зору.

Наступним кроком є оцінка технологічних альтернатив за показниками питомого енергоспоживання. Для цього доцільно використовувати порівняльний аналіз, який дозволяє співставити різні варіанти очищення за витратами енергії на одиницю об’єму обробленої води. Такий підхід дає змогу виявити технології, що забезпечують оптимальне співвідношення між ефективністю очищення та енергетичними витратами. При цьому важливо враховувати не лише прямі витрати енергії, але й опосередковані, пов’язані з виробництвом реагентів або утилізацією відходів. Суттєву роль у процесі обґрунтування відіграє аналіз життєвого циклу технологій. Він дозволяє оцінити сукупний вплив технологічних рішень на довкілля на всіх стадіях їх функціонування: від виробництва обладнання до його виведення з експлуатації. Використання такого підходу забезпечує більш об’єктивне порівняння альтернатив і дозволяє уникнути ситуацій, коли енергоефективність досягається за рахунок збільшення інших видів екологічного навантаження. Як видно з табл. 3.1.1, найбільш ефективними з точки зору поєднання якості очищення та енерговитрат є комбіновані технології.

З урахуванням сучасних тенденцій розвитку водоочисних технологій до найбільш перспективних рішень можна віднести модернізацію систем аерації, впровадження енергоефективного насосного обладнання та використання автоматизованих систем управління. Оптимізація аераційних процесів дозволяє значно знизити споживання електроенергії за рахунок

регулювання подачі повітря відповідно до фактичних потреб біологічного очищення. Застосування насосів із частотним регулюванням забезпечує адаптацію режимів роботи до змінних навантажень, що сприяє зменшенню енергетичних витрат.

Таблиця 3.1.1

Порівняльна характеристика технологій очищення води

Технологія	Енергоємність	Якість очищення	Сфера доцільності
Традиційна біологічна	середня	середня	базові системи
Мембранна	висока	дуже висока	доочищення, питна вода
Адсорбційна	середня	висока	видалення мікрозабруднень
Окиснювальна	висока	дуже висока	знезараження
Комбінована	оптимізована	дуже висока	сучасні системи

Важливим напрямом є також інтеграція комбінованих технологій, які поєднують різні методи очищення з метою досягнення більш високої ефективності при помірних енерговитратах. Такі рішення дозволяють оптимізувати використання ресурсів та забезпечити стабільність роботи систем навіть за змінних умов експлуатації. Особливо актуальним це є для комунальних підприємств, які працюють у режимі нерівномірного навантаження.

При обґрунтуванні вибору технологій доцільно враховувати також можливість використання вторинних енергетичних ресурсів. Йдеться, зокрема, про утилізацію осадів із отриманням біогазу або використання теплової енергії стічних вод. Такі підходи дозволяють частково компенсувати енергетичні витрати та зменшити загальний екологічний слід підприємства. Не менш важливим є врахування економічних аспектів, зокрема інвестиційних витрат і термінів окупності впроваджуваних технологій. Енергоефективні рішення, як правило, потребують значних

початкових вкладень, однак їх використання забезпечує довгострокове зниження експлуатаційних витрат. Тому вибір технологій має базуватися на комплексній оцінці їх економічної доцільності з урахуванням очікуваного ефекту від зменшення енергоспоживання. Вибір технології пропонуємо здійснювати відповідно до алгоритму, наведеного на рис. 3.1.2.

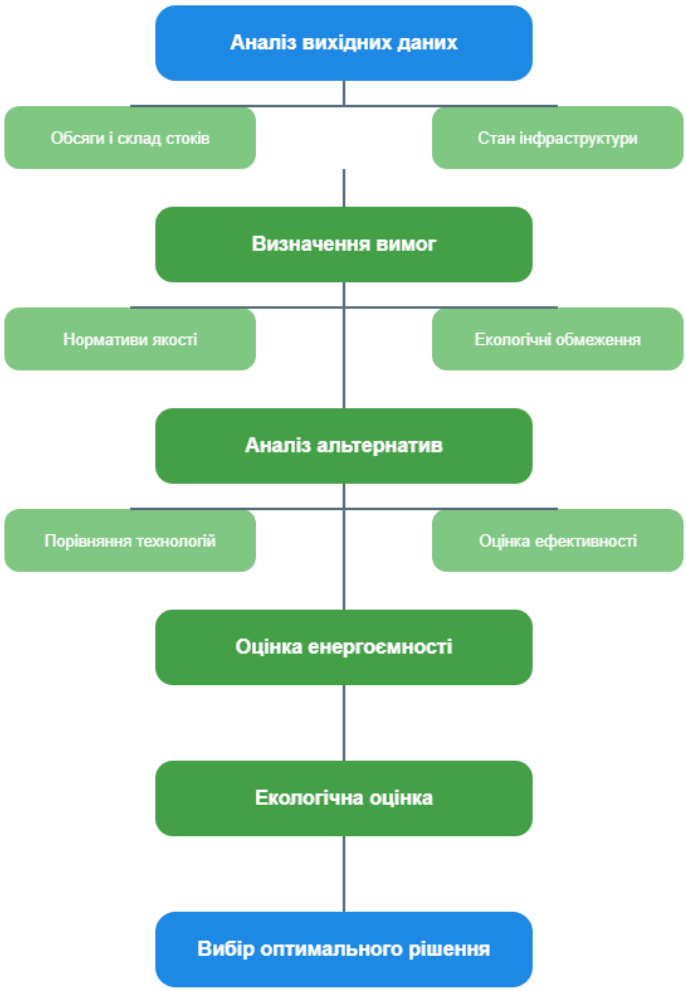


Рис. 3.1.2. Алгоритм обґрунтування вибору енергоефективних технологій очищення води

Таким чином, обґрунтування вибору енергоефективних технологій очищення води є багатокритеріальним процесом, що вимагає системного підходу та врахування специфіки функціонування конкретного підприємства. Застосування комплексних методів оцінки дозволяє визначити оптимальні

технологічні рішення, впровадження яких сприятиме зниженню енергоспоживання, підвищенню ефективності очищення та мінімізації негативного впливу на довкілля.

3.2. Оцінка екологічного ефекту від впровадження запропонованих рішень

Впровадження енергоефективних технологій очищення води супроводжується комплексними змінами у функціонуванні водогосподарських систем, що відображаються не лише у зменшенні енергетичних витрат, але й у зниженні сумарного екологічного навантаження, що підтверджується сучасними дослідженнями ефективності функціонування очисних споруд [24]. Оцінка екологічного ефекту таких змін передбачає аналіз результатів, що виникають унаслідок модернізації технологічних процесів, оптимізації режимів роботи обладнання та підвищення рівня управління системами очищення [16]. Взаємозв’язок між впровадженими енергоефективними заходами, проміжними ефектами та кінцевим екологічним результатом наведено на рис. 3.2.1.

Одним із ключових показників екологічного ефекту є скорочення обсягів викидів парникових газів, пов’язаних із виробництвом та споживанням електроенергії. Зниження енергоємності процесів очищення безпосередньо впливає на обсяги непрямих викидів, оскільки енергетичний сектор залишається вагомим джерелом вуглецевого навантаження. У цьому контексті навіть часткове скорочення споживання електроенергії призводить до помітного зменшення екологічного сліду підприємств [32], оскільки існує прямий зв’язок між енергоспоживанням та обсягами викидів парникових газів у процесах очищення [36]. Важливим результатом впровадження енергоефективних рішень є підвищення стабільності та керованості технологічних процесів. Завдяки застосуванню сучасних систем автоматизації забезпечується більш точне регулювання параметрів

очищення, що дозволяє уникати перевантажень та неефективних режимів роботи. Це, у свою чергу, сприяє покращенню якості очищення стічних вод і зменшенню ризику надходження забруднюючих речовин у водні об’єкти.



Рис. 3.2.1. Основні напрями формування екологічного ефекту від впровадження енергоефективних технологій

Екологічний ефект проявляється також у скороченні обсягів утворення вторинних відходів. Оптимізація процесів очищення та впровадження сучасних технологій обробки осадів дозволяють зменшити їх кількість або забезпечити більш ефективне використання [40]. У результаті знижується навантаження на навколишнє середовище та зменшуються витрати на утилізацію відходів. Суттєвим аспектом є зменшення втрат води у системах водопостачання та водовідведення. Реалізація заходів з модернізації мереж і впровадження систем контролю витоків дозволяє знизити обсяги нераціонального використання водних ресурсів. Це сприяє зменшенню забору води з природних джерел і, відповідно, зниженню антропогенного впливу на водні екосистеми.

Оцінка екологічного ефекту також передбачає врахування непрямих результатів, зокрема покращення санітарно-гігієнічного стану територій та підвищення якості життя населення. Зменшення забруднення водних об’єктів, підвищення надійності водопостачання та зниження ризиків аварійних ситуацій мають довгостроковий позитивний вплив на соціально-екологічну ситуацію в регіоні.

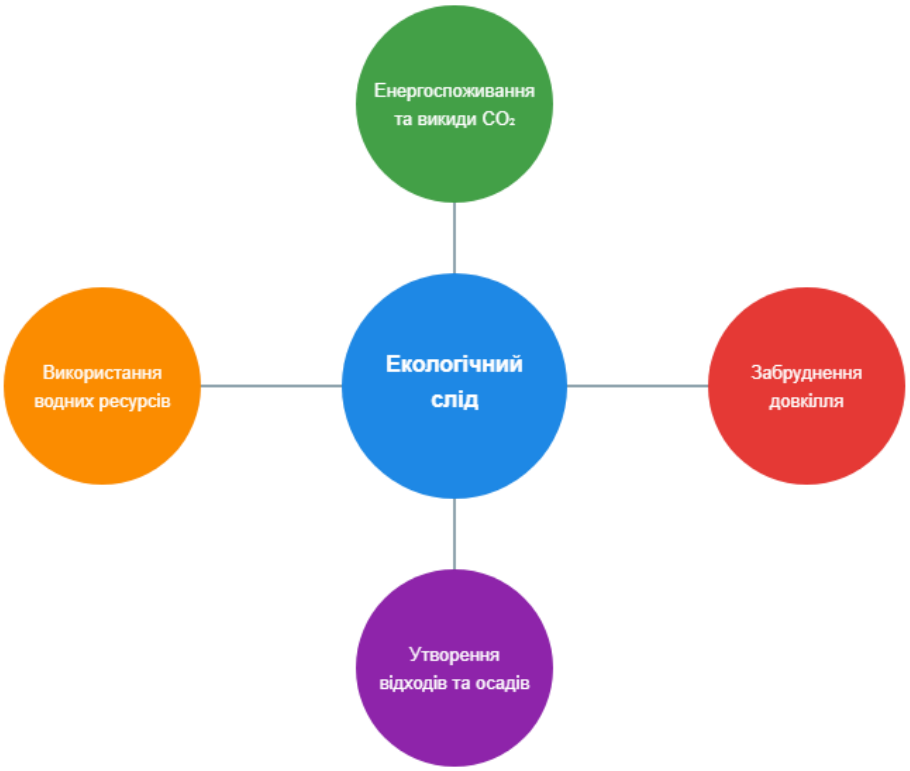


Рис. 3.2.2. Структура екологічного сліду водоочисних процесів

Для кількісної оцінки екологічного ефекту можуть використовуватися показники скорочення енергоспоживання, зменшення викидів, зниження концентрацій забруднюючих речовин у скидах, а також індикатори ефективності використання ресурсів (рис. 3.2.2). Комплексне застосування таких показників дозволяє отримати більш об’єктивне уявлення про результати впровадження запропонованих рішень.

Таблиця 3.2.1

Порівняння екологічних показників до та після впровадження заходів

Показник	До впровадження	Після впровадження	Ефект
Енергоспоживання	високе	знижене	економія енергії
Викиди CO_2	значні	зменшені	скорочення сліду
Якість очищення	нестабільна	стабільна	зниження забруднення
Втрати води	високі	зменшені	економія ресурсу
Утворення осадів	значне	оптимізоване	менше відходів

Важливою складовою є порівняння стану системи до та після впровадження енергоефективних технологій. Такий підхід дає змогу оцінити реальний ефект від проведених заходів і визначити їх доцільність. При цьому необхідно враховувати не лише прямі екологічні вигоди, але й супутні ефекти, пов’язані зі зниженням експлуатаційних витрат та підвищенням ефективності управління (табл. 3.2.1).

Таким чином, впровадження енергоефективних технологій очищення води забезпечує багатовекторний екологічний ефект, що проявляється у зменшенні викидів, скороченні втрат ресурсів, покращенні якості очищення та зниженні загального навантаження на довкілля. Комплексний характер отриманих результатів підтверджує доцільність подальшого впровадження таких рішень у практику діяльності комунальних підприємств.

ВИСНОВКИ

У кваліфікаційній роботі досліджено питання впровадження енергоефективних технологій очищення води на комунальних підприємствах як інструменту зменшення екологічного сліду. Отримані результати дозволяють сформулювати такі висновки:

1. Встановлено, що екологічний слід водоочисних процесів формується під впливом комплексу взаємопов’язаних чинників, серед яких визначальними є енергоспоживання, використання водних ресурсів, утворення відходів та рівень забруднення довкілля. Це обумовлює необхідність їх комплексного врахування при оцінюванні екологічної ефективності діяльності підприємств.
2. Доведено, що енергоємність технологічних процесів очищення води є ключовим фактором формування екологічного навантаження, оскільки вона безпосередньо впливає на обсяги викидів парникових газів, а також опосередковано визначає рівень використання природних ресурсів і утворення вторинних забруднень.
3. Проаналізовано сучасні технології очищення води та встановлено, що найбільш перспективними з точки зору зниження екологічного сліду є рішення, спрямовані на оптимізацію аераційних процесів, модернізацію насосного обладнання та впровадження автоматизованих систем управління, які забезпечують адаптацію режимів роботи до змінних умов експлуатації.
4. Виявлено основні екологічні проблеми функціонування комунальних підприємств водопровідно-каналізаційного господарства, зокрема зношеність інфраструктури, значні втрати води, високу енергоємність процесів та недостатню ефективність очищення. Встановлено, що зазначені проблеми мають системний характер і потребують комплексного вирішення.
5. Обґрунтовано підходи до вибору енергоефективних технологій очищення води, які базуються на поєднанні технічних, екологічних та економічних критеріїв, а також врахуванні умов функціонування

конкретного підприємства. Показано доцільність застосування інтегрованих методів оцінювання, зокрема аналізу життєвого циклу.

6. Визначено основні резерви підвищення енергоефективності водоочисних процесів, серед яких пріоритетними є модернізація обладнання, оптимізація технологічних режимів, зменшення втрат води та впровадження систем моніторингу і управління. Реалізація зазначених заходів створює передумови для істотного зниження енергоспоживання.

7. Оцінено екологічний ефект від впровадження енергоефективних рішень, який проявляється у скороченні викидів парникових газів, зменшенні навантаження на водні ресурси, зниженні обсягів утворення відходів та підвищенні якості очищення стічних вод. Це підтверджує, що впровадження енергоефективних технологій є дієвим інструментом переходу до більш сталого функціонування комунальних підприємств.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Алєксєєв О. О., Мущинська В. І. Міжнародна екологічна політика. Методичні вказівки до виконання практичних робіт за напрямом підготовки 6.040106 «Екологія, охорона навколишнього середовища та збалансоване природокористування» Вінниця : ВНАУ, 2017. 52 с.

2. Васюкова Г.Т., Ярошева О.Г. Екологія. К.: Кондор, 2013. 524 с.

3. Вискушенко Д. А.,. Бенедик С. В., Поповичук О. І. Вплив азотнокислого свинцю на водний баланс ставковика озерного (Mollusca: Pulmonata: Lymnaeidae). Вісник Житомирського державного університету імені Івана Франка, 1999. 4. С. 87-88.

4. Вискушенко, Д. А., Вискушенко, С. А., Никитюк, Ю. А., Дунаєвська, О. Ф. Змішане навчання: баланс між дистанційним та традиційним підходами у закладах вищої освіти України. Суспільство та національні інтереси, 2025. 5(13). С. 55-66. https://doi.org/10.52058/3041-1572-2025-5(13)-55-66

5. Вискушенко Д. А., Никитюк Ю. А., Піціль А. О., Мельник Н. В. Теоретичні та методичні основи наукового дослідження в екологічній освіті. Екологічні науки, 2025. Вип. 63. С. 9-14. https://doi.org/10.32846/2306-9716/2025.eco.6-63.1

6. Вискушенко Д. А., Примаченко Р. О., Федірко Г. А., Яроцький Б. А., Федірко М. П. Європейський досвід екологізації виробництва. The 9th International scientific and practical conference: Development of modern scientific technologies in the era of globalization. Paris: International Science Group, 2025. pp. 116-119.

7. Вискушенко Д. А., Яроцький Б. А., Федірко Г. А., Федірко М. П., Примаченко Р. О. Механізми інтеграції міжнародних принципів сталого розвитку у вітчизняне природокористування. The 8th International scientific and practical conference: Academic research by scientists in the field of modern technologies. Milan: International Science Group, 2025. pp. 69-72.

8. Водний кодекс України: Закон України від 06.06.1995 № 215/95-ВР. URL: https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/en/213/95-%D0%B2%D1%80/ed20150101?lang=uk#Text (дата звернення: 30.03.2026)

9. Грицанюк О.А. Зменшення екологічного навантаження шляхом модернізації технологій очищення води. Виклики сьогодення та наслідки Чорнобильської катастрофи. Екологія. Наука. Практика-2026 : матеріали XXII Всеукр. наук.-практ. конф. Житомир : Поліський національний університет, 2026. С. 58-60

10. Екологічна політика і право ЄС та їх імплементація у правову систему України: збірник тез Міжнародної науково-практичної конференції. К.: Видавничий центр НУБіП України, 2019. 386 с.

11. Заверуха Н.М., Серебряков А.В., Скиба Ю.А. Основи екології: Навч. посібник. К.: Каравела, 2006. 368 с.

12. Запольський А. К. Водопостачання, водовідведення та якість води: підручник Київ : Вища шк., 2005. 671 с.

13. Комунальне підприємство «Конкурент» Довбишської селищної ради: інформація про суб'єкт господарювання. Опендатабот [Електронний ресурс]. Режим доступу: https://opendatabot.ua/c/41342757 (дата звернення 04.03.2026)

14. Кузьменко О. Б. Андрєєв В. І. Основи екологічного менеджменту. навчальний посібник. Миколаїв : Вид-во ЧДУ ім. Петра Могили, 2013. 160 с.

15. Луньова О.В., Герасимчук О.Л., Кагукіна А.М. Аналіз стану водних ресурсів Житомирської області та їх вплив на організм людини. Екологічні науки, 2022. №6(45). С. 31–34. https://doi.org/10.32846/2306-9716/2022.eco.6-45.5

16. Максименко Ю.В., Вискушенко Д.А. Біоетика та біобезпека: навчальний посібник. Житомир : Вид-во ЖДУ імені Івана Франка, 2022. 126 с.

17. Національна доповідь про якість питної води та стан питного водопостачання в Україні. 5 березня 2025 р. [Електронний ресурс]. Режим доступу: ttps://mindev.gov.ua/storage/app/sites/1/uploaded-files/nacionalna-

dopovid-pro-iakist-pitnoyi-vodi-ta-stan-za-2024-rik.pdf (дата звернення 26.02.2026)

18. Про оцінку впливу на довкілля: : Закон України від 23.05.2017 № 2059-VIII. URL: https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/2059-19#Text (дата звернення: 15.03.2026)

19. Сохацька О.М. Екологічна політика в системі публічного управління: виклики сталого розвитку. Філософія та управління. 2024. №2. с. 31-41

20. Степаненко С.М., Владимирова О.Г. Стратегія сталого розвитку: конспект лекцій. Одеса: Одеський державний екологічний університет, 2019. 175 с.

21. Філик Н.В., Грабовська Г.М. Екологічні виклики в контексті кліматичних змін та участь України в їх подоланні. Юридичний вісник, 2021. т. 4(61). с. 30-39

22. Яремчук С.М., Якімчук А.І., Грицанюк О.А., Козюк О.О. Екологічні ризики та енергетична ефективність водоочисних технологій у контексті стратегічного розвитку міських громад. 3rd International Scientific and Practical Conference: Science, Technology and Industry in the Digital Age. Hamburg: International Scientific Unity, 2026. p. 137-140.

23. Capodaglio A. G. Energy use and decarbonisation of the water sector: A comprehensive review of issues, approaches, and technological options. Environmental Technology Reviews, 2025. Vol. 14 (1). P. 40–68. https://doi.org/10.1080/21622515.2024.2440163

24. Cardoso B. J., Rodrigues E., Gaspar A. R., Gomes Á. Energy performance factors in wastewater treatment plants: A review. Journal of Cleaner Production, 2021. Vol. 322. 129107. https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.129107

25. Corominas L., Foley J., Guest J. S., Hospido A., Larsen H. F., Morera S., Shaw A. Life cycle assessment applied to wastewater treatment: State of the art. Water Research, 2013. Vol. 47 (15). P. 5480–5492. https://doi.org/10.1016/j.watres.2013.06.049

26. Faisal M., Khan Z., Ahmed S., Khan S., Khan A. Control technologies of wastewater treatment plants: The state-of-the-art, current challenges, and future directions. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2023. Vol. 181. P. 113324. https://doi.org/10.1016/j.rser.2023.113324

27. Guest J. S., Skerlos S. J., Barnard J. L., Beck M. B., Daigger G. T., Hilger H., Jackson S. J., Karvazy K., Kelly L., Macpherson L., Mihelcic J. R., Pramanik A., Raskin L., Van Loosdrecht M. C. M., Yeh D., Love N. G. A new planning and design paradigm to achieve sustainable resource recovery from wastewater. Environmental Science & Technology, 2009. Vol. 43 (16). P. 6126–6130. https://doi.org/10.1021/es9010515

28. Hernández-Sancho F., Molinos-Senante M., Sala-Garrido R. Energy efficiency in Spanish wastewater treatment plants: A non-radial DEA approach. Science of the Total Environment, 2011. Vol. 409 (14). P. 2693–2699. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2011.04.018

29. Hoekstra A. Y., Mekonnen M. M. The water footprint of humanity. Proceedings of the National Academy of Sciences, 2012. Vol. 109. No. 9. P. 3232–3237. https://doi.org/10.1073/pnas.1109936109

30. ISO 14046:2014. Environmental management. Water footprint/ Principles, requirements and guidelines. [Електронний ресурс]. Режим доступу: https://www.iso.org/obp/ui/#iso:std:iso:14046:ed-1:v1:en (дата звернення 23.02.2026)

31. Jayabal R., Sivanraju R. Wastewater treatment for energy conservation and zero carbon footprint. Energy Science & Engineering, 2025. Vol. 13. P. 3806-3820. https://doi.org/10.1002/ese3.70142

32. Li J., Du Z., Liu J., Xu L., He L., Gu L., Cheng H., He Q. Analysis of factors influencing the energy efficiency in Chinese wastewater treatment plants through machine learning and SHapley Additive exPlanations. Science of the Total Environment, 2024. Vol. 920. 171033. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2024.171033

33. Lundin M., Bengtsson M., Molander S. Life cycle assessment of wastewater systems: Influence of system boundaries and scale n calculated environmental loads. Environmental Science & Technology, 2000. Vol. 34. No. 1. P. 180–186. https://doi.org/10.1021/es990003f

34. Maziotis A., Molinos-Senante M. Benchmarking energy efficiency in wastewater treatment plants: A latent class analysis. Environmental and Sustainability Indicators, 2025. Vol. 28. 101043. https://doi.org/10.1016/j.indic.2025.101043

35. Molinos-Senante M., Maziotis A. Evaluation of energy efficiency of wastewater treatment plants: The influence of technology and aging factors. Applied Energy, 2022. Vol. 310. 118535. https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2022.118535

36. Sala-Garrido R., Mocholi-Arce M., Maziotis A., Molinos-Senante M. Energy efficiency evaluation of wastewater treatment plants: A methodological proposal for its benchmarking. Environmental Science & Policy, 2024. Vol. 162. 103915. https://doi.org/10.1016/j.envsci.2024.103915

37. Shannon M. A., Bohn P. W., Elimelech M., Georgiadis J. G., Mariñas B. J., Mayes A. M. Science and technology for water purification in the coming decades. *Nature*, 2008. Vol. 452. P. 301–310. https://doi.org/10.1038/nature06599

38. Singh R. K., Murty H. R., Gupta S. K., Dikshit A. K. An overview of sustainability assessment methodologies. Ecological Indicators, 2012. Vol. 15. P. 281–299. https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2011.01.007

39. Stadnychenko, A.P., Uvayeva, O.I., Vyskushenko, D.A. The influence of detergents on the cilia locomotion activity of epithelium in Sinanodonta Woodiana (Mollusca, Unionidae). Біологія та екологія, 2019. 5 (1), P. 103–106. https://doi.org/10.33989/2414-9810.2019.5.1.195127

40. Wang C., Deng S-H., You N., Bai Y., Jin P., Han J. Pathways of wastewater treatment for resource recovery and energy minimization towards carbon neutrality and circular economy: technological opinions. Front. Environ. Chem., 2023. Vol. 4. 1255092. https://doi.org/10.3389/fenvc.2023.1255092