



UDC 504.053:628.316.12:504.06

WEAP BASED ASSESSMENT OF SELF-PURIFICATION PROCESSES IN THE DNIPRO RIVER WITHIN THE CITY OF DNIPRO: ECOTECHNOLOGIES AND DIGITAL WATER MANAGEMENT

Danilo O. Kryachkov¹, Olena V. Hruzdieva^{*1}, Viktoriya V. Arhipova¹, Larisa V. Dmitrikova²,
Marina F. Seferova², Maksym V. Malook¹

¹Ukrainian State University of Science and Technologies, 8, Gagarina Ave., Dnipro, 49005, Ukraine

²Dnipro State Medical University, Volodymyr Vernadsky St., 9, Dnipro, 49044, Ukraine

Received 15 September 2025; accepted 1 December 2025; available online 23 March 2026

Abstract

This article examines the self-purification processes of the Dnipro River within the Lower Dnipro sub-basin using the WEAP (Water Evaluation and Planning system) modelling environment. The study area is characterized by complex hydrogeological conditions and limited infiltration recharge. Through simulation modelling, the efficiency of biochemical decomposition of organic matter was calculated, and the dynamics of key hydrochemical indicators – biochemical oxygen demand, chemical oxygen demand, and dissolved oxygen – were assessed at control sections located upstream and downstream of the city of Dnipro. The results reveal a extremely low level of natural recovery of the aquatic environment, indicating significant impacts from industrial and municipal discharges, climate change, and the inflow of decomposition products from munitions during military actions. The study underscores the necessity of implementing a comprehensive suite of environmental protection measures – including the application of nature-based solutions, modernization of treatment facilities, digitalization, and automated monitoring – to enhance the river's self-purification capacity and ensure the sustainable use of water resources. The work also highlights the need for integrated management of the Dnipro River's water resources within the city of Dnipro in accordance with the provisions of the EU Water Framework Directive, aimed at supporting the region's sustainable ecological development.

Keywords: self-purification; Dnipro River; water quality; pollution indicator; BOD; COD; water quality modelling; WEAP; environmental protection measures; digitalization.

WEAP-МОДЕЛЮВАННЯ САМООЧИЩЕННЯ ВОД РІЧКИ ДНІПРО В МЕЖАХ МІСТА ДНІПРА В КОНТЕКСТІ ЕКОТЕХНОЛОГІЙ ТА ЦИФРОВІЗАЦІЇ ВОДНОГО МЕНЕДЖМЕНТУ

Данило О. Крячков¹, Олена В. Груздева^{*1}, Вікторія В. Архипова¹, Лариса В. Дмитрікова²,
Марина Ф. Сеферова², Максим В. Малоок¹

¹Український державний університет науки і технологій, проспект Гагаріна, 8, м. Дніпро, 49005, Україна

²Дніпровський Державний Медичний Університет, вул. Володимира Вернадського, 9, м. Дніпро, 49044, Україна

Анотація

У статті розглянуті процеси самоочищення річки Дніпро в межах суббасейну Нижнього Дніпра з використанням програмного середовища WEAP (Water Evaluation And Planning system). Досліджувана територія характеризується ускладненими гідрогеологічними умовами та недостатнім інфільтраційним живленням. За допомогою імітаційного моделювання проведений розрахунок ефективності біохімічного розкладу органічних речовин та проведена оцінка динаміки основних гідрохімічних показників (БСК, ХСК, розчинений кисень) у контрольних створах до та після міста Дніпро. Результати дослідження показали надзвичайно низький рівень природного відновлення водного середовища, що свідчить про істотний вплив промислових і комунальних стоків, кліматичних змін та потрапляння продуктів розпаду боєприпасів у водотік під час військових дій. Проведене дослідження підкреслює нагальну потребу в впровадженні комплексу заходів, що включають застосування природоорієнтованих рішень, модернізацію очисних споруд, а також цифровізацію й автоматизований моніторинг стану водного середовища. Реалізація цих кроків спрямована на підвищення здатності річки до самовідновлення та забезпечення сталого використання її водних ресурсів. Крім того, в роботі акцентована важливість впровадження інтегрованого управління водними ресурсами Дніпра в межах міста Дніпро відповідно до положень Водної рамкової директиви ЄС, що є ключовою умовою для досягнення сталого екологічного розвитку регіону.

Ключові слова: самоочищення; річка Дніпро; якість води; індикатор забруднення; БПК; ХПК; WEAP; природоохоронні заходи; цифровізація.

*Corresponding author: e-mail: Hruzdievaolena@gmail.com

Вступ

В умовах інтенсивного антропогенного навантаження на водні ресурси України актуальною є проблема оцінки екологічного стану річок та їхньої здатності до природного самоочищення або самовідновлення. Річки – складні динамічні екосистеми, що мають властивість до самовідновлення завдяки фізичним, хімічним і біологічним процесам, які зменшують концентрацію забруднюючих речовин у воді. Однак інтенсивність цих процесів залежить від багатьох чинників: від хімічного складу води, типу забруднень, гідрологічного режиму, антропогенного впливу та кліматичних змін.

Самоочищення річок – це комплекс фізичних, хімічних та біологічних процесів, що відбуваються в водному середовищі та сприяють зменшенню концентрації забруднюючих речовин до безпечного для екосистем рівня. Ці процеси є частиною техногенного обігу речовин, які входять до біогеохімічних циклів таких елементів як Карбон, Нітроген, Сульфур тощо. Їхня ефективність залежить від властивостей самих забруднюючих речовин, їх фазового стану та ступеня чужорідності для навколишнього середовища. За сприятливих умов ці процеси можуть відбуватися досить швидко, що забезпечує помітне поліпшення якості води в короткі терміни [1].

На ефективність самоочищення впливають наступні фактори: тип водойми (річка, озеро, ставок, болото), наявність біоценозу, температура, кисневий режим, склад і кількість забруднень.

Останнє має визначальний вплив на стан річкових екосистем. Саме органічні речовини, сполуки азоту та фосфору, важкі метали, поверхнево-активні речовини та мікробіологічні домішки – змінюють гідрохімічні показники води, знижують концентрацію розчиненого кисню, пригнічують водну флору і фауну, а в деяких випадках призводять до накопичення токсичних речовин у донних відкладах. Надмірне надходження таких речовин, особливо з точкових джерел (комунальні та промислові скиди), значно гальмують здатність річок до самовідновлення. Оцінка інтенсивності самоочищення дозволяє об'єктивно визначити екологічний стан різних ділянок водотоку, виявити території з критично низькою здатністю до самовідновлення, забезпечити наукове

обґрунтування природоохоронних заходів, проводити моніторинг ефективності впроваджених екологічних стратегій, адаптувати управління водними ресурсами до умов змін клімату. Таким чином, систематичний аналіз ефективності самоочищення в контрольних створах є ключовим інструментом для збереження та сталого використання водних ресурсів річок.

Проблема впливу різних факторів на процеси самоочищення річкових екосистем є предметом постійної уваги в наукових дослідженнях, особливо в умовах зростаючого антропогенного навантаження та ускладнення проблем, пов'язаних зі скиданням стічних вод [2–5]. У численних працях вітчизняних і зарубіжних дослідників аналізується роль фізико-хімічних, біологічних та гідрологічних чинників у підтриманні або порушенні природного балансу водойм. Особлива увага приділяється встановленню взаємозв'язків між інтенсивністю самоочищення та факторами, що на нього впливають: температурними режимами, кисневим забезпеченням, структурою біоценозу, а також типом забруднюючих речовин [6–9].

Аналіз останніх досліджень та публікацій. Автор [10] вивчав здатність до самоочищення річки Муї (Південна Америка) в залежності від швидкості зміни кількості розчиненого в воді кисню. Методика включала прямі вимірювання концентрації кисню та температури, а також лабораторний аналіз біохімічного споживання кисню. На основі отриманих даних були розраховані коефіцієнти деоксигенації та реоксигенації, що дозволило кількісно оцінити здатність річки до природного очищення. Було встановлено, що процес самоочищення значною мірою залежить від сезонних чинників, гідравлічних властивостей потоку, особливо під час сезону дощів, та складу стічних вод [10].

Наявність мікроорганізмів та їх роль у процесах самоочищення водних об'єктів, зокрема їх здатність до біодеструкції органічних забруднювачів, частіше за все розглядається одночасно із аналізом фізико-хімічних параметрів водного середовища, таких як температура, рівень розчиненого кисню, рН та вміст біогенних елементів, оскільки саме ці фактори визначають активність та ефективність мікробних спільнот [11].

Авторами [12] був проведений аналіз моніторингу самоочищення акваторії дельти Дунаю і малої річки Мерло (приток Ворскли) за мікробіологічними показниками. Встановлено, що найінтенсивніше самоочищення спостерігалось у акваторії дельти Дунаю вище м. Рені й в рукаві Бистрий. Найбільш забруднені водні ділянки – в Кілійському рукаві біля м. Ізмаїл, нижче м. Кілія і вище м. Вилкове (9-ий км). Проведений моніторинг річки Мерло в районі скиду стічних вод підприємства харчової промисловості. За гідробіологічними і мікробіологічними показниками визначили, що річка дуже забруднена, знаходиться під великим антропогенним навантаженням і має низький показник співвідношення загального мікробного числа автохтонних і алохтонних сапрофітних мікроорганізмів. За ступенем сапробності і трофності в зоні скиду стічних вод вона відноситься до гіпертрофної і полісапробної. Водні екосистеми дельти Дунаю мають більш виражені тенденції до самовідновлення, ніж екосистеми малої річки Мерло.

У своєму дослідженні автори [13] порівняли здатність до самоочищення природних і регульованих ділянок водотоків, взявши за основу концентрацію нітратів. Встановлено, що природні ділянки демонструють значно вищу ефективність самоочищення (коефіцієнт 0.57 проти 0.09). Для покращення якості води пропонується відновлення регульованих водотоків, зокрема відновлення рослинності та природної гідроморфології. Аналогічні дослідження проводилися авторами щодо природних водотоків Західного (Жамойтійського) нагір'я, Прибережних низовин та Південно-Східного нагір'я на території Литви [14]. Було показано, що самоочищення водотоків від нітратів і фосфатів є ефективнішим на природних ділянках, ніж на ділянках, регульованих для дренажних цілей. Середній коефіцієнт самоочищення від нітратів був досягнений на 95 % на природних ділянках водотоків і становить 0.50 ± 0.22 , а на регульованих – -0.15 ± 0.21 , що є суттєвою різницею.

Цікаве дослідження було проведено авторами [15] – із застосуванням багатовимірної статистичної аналізу з метою оцінки рівня органічного забруднення та здатності до самоочищення річки Потреро-де-лос-Фунес (Аргентина). Зокрема за допомогою аналізу головних компонент,

кластерного аналізу та дисперсійного аналізу (ANOVA) було встановлено, що основними джерелами забруднення є побутові стічні води та інші наслідки урбанізації. Для моделювання процесів самоочищення водного об'єкта авторами було використано модель Стрітера-Фелпса. Отримані результати показали низьку здатність річкової води до реаерації на ділянці перед греблею, що супроводжувалося зниженими концентраціями розчиненого кисню у воді. Погіршення здатності до самоочищення також було підтверджено результатами оцінки бентосного індексу, що підкреслює важливу роль біоіндикаторів у комплексному моніторингу якості води [15].

Використання авторами [16] моделі QUAL2KW для дослідження якості води та здатності до самоочищення гірської річки Аббасабад в Ірані, яка забезпечує населення питною водою та використовується для сільськогосподарських потреб, показало, що визначальними чинниками моделювання якості води є параметри швидкості окиснення, нітрифікації та денітрифікації. Модель була відкалібрована та верифікована на основі польових даних, зібраних на п'яти моніторингових станціях уздовж річки. Авторами розраховано шість основних показників – хімічне споживання кисню (COD), біохімічне споживання кисню (BOD), розчинений кисень (DO), фосфор фосфатний ($P-PO_4$), нітроген нітратний ($N-NO_3$) та нітроген амонійний ($N-NH_4$), які порівняли з фактичними результатами вимірювань.

Слід зазначити, що QUAL2KW є розширеною версією моделі QUAL2K, яка інтегрована в систему WEAP як додатковий інструмент для моніторингу та моделювання складу й якості води. Водночас QUAL2K та QUAL2KW охоплюють ширший спектр параметрів оцінки якості води порівняно з базовим функціоналом WEAP [17], однак у випадках, коли розглядається обмежена кількість показників, можливостей WEAP цілком достатньо [18].

Застосування нейронних мереж дозволило авторам [19] ефективно змоделювати процеси самоочищення, прогнозувати зміни водного середовища та розробляти оптимальні заходи для збереження екологічного балансу для басейну річки Богота. В роботі був виявлений зв'язок між значеннями часових рядів моніторингу якості річкової води та фізичними характеристиками басейну та дренажної мережі за допомогою

багатовимірних статистичних інструментів (штучна нейронна мережа).

Постанова проблеми. Річка Дніпро є головною водною артерією України, яка забезпечує питне водопостачання, функціонування промислового та аграрного секторів, а також виконує ключову роль у підтриманні екологічної рівноваги в межах басейну. Водночас її екологічний стан зазнає значного погіршення під впливом як локальних, так і транзитних джерел забруднення, що надходять з верхніх ділянок водозбору. Особливо уразливою є нижня частина басейну Дніпра (території суббасейну Нижнього Дніпра), де ускладнені гідрогеологічні умови та низьке інфільтраційне живлення території обмежують природні механізми самоочищення водотоку. Значні забруднення нижньої частини річкового басейну є типовим явищем для всіх великих річок, адже до локального навантаження додається забруднення, що транспортується з верхньої частини басейну [20].

У сучасних умовах інтенсивного техногенного навантаження, зокрема скидів недостатньо очищених стічних вод, зайві надходження добрив, гербіцидів і нафтопродуктів, а також під впливом кліматичних змін (порушення гідрологічного режиму, екстремальні погодні явища) і наслідків воєнних дій проблема деградації якості води набуває особливої гостроти [21; 22]. Зростання рівня забруднення вод Дніпра фіксується на контрольних створах моніторингу в межах суббасейну Нижнього Дніпра та підтверджується даними, отриманими в ході виконання державних програм оцінки екологічного стану річкових масивів [21; 23].

З огляду на це, визначення поточного стану річки та розрахунок ефективності її природного самоочищення є не лише актуальним науковим завданням, а й необхідною умовою розробки ефективних заходів управління водними ресурсами. Проведення комплексного екологічного аналізу річки Дніпро, з урахуванням просторово-часових змін і чинників антропогенного впливу, має важливе значення для забезпечення сталого розвитку регіонів та екологічної безпеки України в цілому.

Мета дослідження. Оцінка екологічного стану річки Дніпро в межах суббасейну

Нижнього Дніпра та аналіз ефективності процесів її природного самоочищення за допомогою імітаційної моделі для комплексного планування водних ресурсів «Water Evaluation And Planning» system (WEAP) [24] в умовах зростаючого техногенного навантаження, кліматичних змін та антропогенного впливу з подальшим обґрунтування необхідності впровадження заходів для покращення екологічного стану водного басейну.

Практична значущість результатів полягає в обґрунтуванні необхідності впровадження природоохоронних заходів, серед яких: модернізація систем водоочистки, зменшення обсягів промислових і комунальних стоків, створення буферних прибережних смуг, відновлення гідроморфології русла, застосування природоорієнтованих рішень (біоплато, фільтраційних систем).

Методика дослідження.

Об'єктом дослідження є річка Дніпро як водна екосистема в межах її Нижнього суббасейну та як складна природна водна система, що зазнає впливу антропогенних та природних чинників. Предметом дослідження є процеси самоочищення, їхня ефективність, динаміка змін та залежність від гідрохімічних показників і зовнішніх впливів на досліджуваній ділянці водотоку.

Для моделювання процесу самоочищення та розрахунку показника ефективності самоочищення водного басейну річки (Ес) за місяцями протягом року на досліджуваній ділянці водотоку був створений сценарій якості води в програмі WEAP [24].

Під час створення сценарію якості води використовували такі вихідні данні: графічні, офіційні місячні та річні данні спостережень значень ХСК (хімічне споживання кисню), БПК (біохімічне споживання кисню) та РК (розчинений кисень) у визначених створах, метеорологічні данні.

Графічні данні. Для розрахунків були використані данні Гугл карти для визначення контрольних створів (рис. 1 а), вбудовану систему ГІС та графічні файли, що включають басейн річки Дніпро та місто Дніпро для покращення візуалізації роботи моделювання процесу в WEAP. Були використані дані для двох контрольних створів:

- № 1, р. Дніпро, 462 км смт. Аули, м. Дніпро, питний водозабір м. Дніпро та м. Кам'янське;

- № 4, р. Дніпро, 404 км, м. Дніпро, ВП "ПдТЕС" ПАТ "ДТЕК Дніпроенерго", питний водозабір (рис. 1).

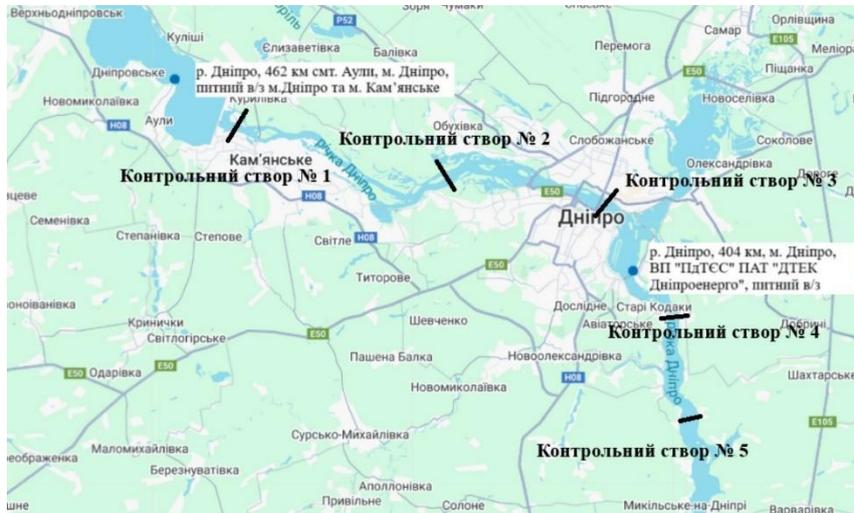


Fig.1 Formation of control on the territory of the Lower Dnieper sub-basin
Рис.1 Контрольні створи на території суббасейну Нижнього Дніпра

Для моделювання в системі WEAP були використані офіційні середньомісячні та річні дані спостережень. Показники БСК₅, ХСК та РК отримані з державних систем моніторингу якості води в контрольних створах річки

Дніпро та з офіційних звітів [25; 26]. Ці дані слугували основою для розрахунків екологічних індикаторів (табл. 1) у межах досліджуваного періоду.

Table 1

Baseline data on organic pollution indicators and water quality assessment for water supply the Dnipro River intake in 2024

Таблиця 1

Вихідні дані показників органічного забруднення води та оцінки її якості для водозабору р. Дніпро на 2024 р

Month	462 km, the urban-type settlement of Auly			404 km, PJSC "DTEK Dniproenergo"		
	BOD, kg/m ³	COD, kg/m ³	DO, kg/m ³	BOD, kg/m ³	COD, kg/m ³	DO, kg/m ³
January	2.20	29.00	9.41	2.70	31.40	10.25
February	2.70	29.20	10.24	2.50	31.00	9.32
March	-	-	-	-	-	-
April	3.10	31.20	9.83	3.20	31.00	8.77
May	3.10	32.60	7.08	2.97	31.90	6.88
June	3.50	33.80	5.82	3.50	34.20	6.61
July	3.00	32.70	6.32	2.70	33.70	5.92
August	3.60	34.20	5.64	3.29	32.50	4.99
September	3.12	31.40	8.04	3.77	33.10	6.77
October	3.83	31.90	9.24	3.85	32.80	6.40
November	1.91	31.20	9.82	2.33	30.90	10.03
December	2.52	30.40	11.43	2.40	30.70	11.16

Ці параметри є базовими критеріями, що визначають екологічний стан водних екосистем, відображають рівень органічного забруднення та інтенсивність біохімічних процесів у водоймах. БСК₅ відображає кількість кисню, що витрачається мікроорганізмами на окиснення органічних речовин протягом п'яти діб. Зростання цього показника вказує на підвищений рівень органічного забруднення, що може призвести

до дефіциту кисню в водному середовищі. ХСК характеризує сумарну кількість органічних і неорганічних речовин, здатних до окиснення в хімічних реакціях. Цей інтегральний показник дає уявлення про загальне навантаження на водну екосистему і, в поєднанні з БСК₅, використовується для комплексної оцінки якості води. РК виступає фундаментальним показником «екологічного здоров'я» річки. Він є критично необхідним для життєдіяльності

водних організмів. Високі значення РК свідчать про належну аерацію та ефективний газообмін, тоді як його зниження може бути ознакою інтенсивного розкладу органічних речовин, підвищення температури або впливу антропогенних чинників.

За даними таблиці 1 (створ 462 км, смт Аули) простежується чітка сезонна залежність концентрації розчиненого кисню. Максимальні значення фіксуються в зимово-весняний період (січень–лютий, 9.41–10.24 кг/м³, грудень – 11.43 кг/м³), що пов'язано з низькими температурами води та кращою її аерацією. Найнижчі показники (5.64–5.82 кг/м³) спостерігаються в літньо-осінній період, особливо в серпні, що може бути наслідком підвищення температури води, цвітіння фітопланктону та інтенсивного розкладу органіки. БСК₅ у цьому створі протягом року коливається в межах 1.91–3.83 кг/м³, демонструючи тенденцію до підвищення в теплі місяці, тоді як ХСК зростає з 29.0–29.2 кг/м³ на початку року до максимуму 34.2 кг/м³ у серпні.

Відповідно для створу на 404 км, ПАТ «ДТЕК Дніпроенерго» спостерігається схожа картина, проте літні показники розчиненого кисню є ще нижчими – до 4.99 кг/м³ у серпні, що може вказувати на більший антропогенний тиск у цій ділянці річки. БСК₅ у літні місяці сягає 3.77–3.85 кг/м³, а ХСК коливається в межах

30.7–34.2 кг/м³, перевищуючи оптимальні нормативи для водойм культурно-побутового та рибогосподарського призначення.

Дані для моделювання водних процесів у системі WEAP. Показники, наведені в таблицях 2–4, становлять ключову основу для розробки та калібрування гідродинамічних і гідрохімічних моделей річки Дніпро в програмному середовищі WEAP. Зокрема середньомісячні температури води (табл. 2) використовуються для аналізу температурного режиму водойми, який визначає швидкість перебігу біохімічних реакцій, впливає на розчинність кисню, регулює інтенсивність розвитку фітопланктону та опосередковано формує перебіг інших екосистемних процесів.

За середньорічними спостереженнями в 2024 році (табл. 2) температура води змінювалася від 3.0 °C в холодний період (січень–лютий) до 23.5 °C в найтепліші місяці (липень–серпень) [27]. Весняний перехідний сезон характеризувався швидким зростанням температури (від 5.0 °C в березні до 15.5 °C в травні), що є сигналом початку інтенсивної біологічної активності в водоймі. В літній період стабільно високі температури сприяли прискоренню процесів евтрофікації та зниженню концентрації розчиненого кисню, що підтверджується даними ХСК і БСК₅ (табл. 1).

Table 2
Monthly temperature data for the Dnipro River and the atmosphere [27]

Таблиця 2
Данні середньомісячної температури річки Дніпро та атмосферного повітря [27]

Month	Water temperature, °C	Air temperature, °C
January	3.2	1.6
February	3.1	-0.5
March	3.5	6.9
April	7.3	10.6
May	14.5	16.2
June	20.0	20.1
July	24.8	25.1
August	24.7	25.9
September	17.0	21.0
October	9.7	14.0
November	6.7	5.7
December	3.9	2.1

БСК безпосередньо залежить від температури, оскільки швидкість біохімічного розкладання органічних речовин мікроорганізмами зростає під час підвищення

температури води. В теплий період активність гідробіонтів та бактерій істотно підвищується, що забезпечує швидший розклад органічних речовин і, відповідно, зростання значення

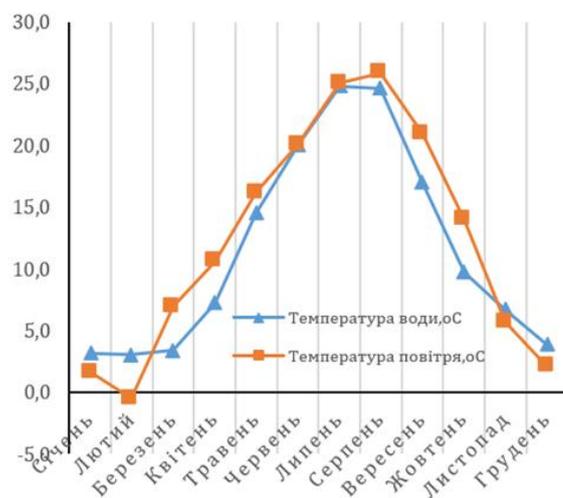


Fig. 2. Dynamics of water and air temperature in the Dnipro River region over the year 2024.

Рис. 2. Графіки змін температури води річки Дніпро та атмосферного повітря протягом 2024 р.

БСК₅. Взимку, за низьких температур, метаболічна активність мікроорганізмів знижується, тому й показник БСК має нижчі значення.

На відміну від БСК, показник ХСК є менш чутливим до сезонних змін температури. Водночас у природних умовах підвищення температури може опосередковано впливати на його величину: інтенсивний біорозклад у літній період зумовлює надходження в воду додаткових продуктів розпаду органіки, що збільшує загальну кількість окислюваних речовин (табл. 1).

Моделювання фізичних процесів у контрольних створах річки здійснювалося з урахуванням її геометричних параметрів (табл. 3) та середніх витрат води. Досліджувана ділянка відповідає відрізьку

річки в районі Кам'янської ГЕС, для якої характерна середня витрата 1510 м³/с [26–30].

Глибинні характеристики визначалися на основі карт глибин [28], а параметри ширини – за допомогою функції вимірювання відстані в сервісі Google Maps. Середні глибини в п'яти контрольних створах змінювалися від 10.0 м (створ №3) до 27.0 м (створ №5), а ширина русла коливалася в межах від 528 м до 1870 м. Отримані параметри визначають площу поперечного перерізу потоку, що безпосередньо впливає на його гідравлічні характеристики: швидкість течії, здатність до розбавлення та самоочищення від забруднюючих речовин, інтенсивність теплообміну, а також умови перенесення завислих і розчинених речовин.

Table 3

Geometric dimensions of the river at control points

Таблиця 3

Геометричні розміри річки в контрольних точках

Control Target	Medium depth, m	River width, m
1	13.25	528
2	16.00	1200
3	10.00	1230
4	20.00	1180
5	27.00	1870

Розрахунки, виконані в моделі, показали середню швидкість течії 0.92 м/с, що добре узгоджується з типовими для річки Дніпро значеннями (0.4–1.2 м/с) [26–30], підтверджуючи коректність використаного підходу до гідравлічного моделювання. Додатково було встановлено, що за таких параметрів формується достатня турбулентна дифузія, яка забезпечує інтенсивне перемішування водних мас і сприяє рівномірному розподілу температури та концентрацій домішок у межах контрольного сегмента. Це створює умови для подальшого якісного та кількісного аналізу процесів перенесення забруднюючих речовин і дозволяє з високим ступенем достовірності проводити калібрування гідродинамічної моделі.

Для забезпечення максимальної точності розрахунків у системі WEAP були використані дані метеорологічних спостережень, отримані на території м. Дніпро. До моделі були введені основні кліматичні параметри, необхідні для адекватного відтворення гідрологічних та гідротермічних процесів, а саме: середня відносна вологість повітря – 65 %, середня швидкість вітру – 2 м/с, географічна широта –

48°, а також середньомісячні значення атмосферної температури [31; 32] (табл. 2, рис. 2).

Вологість повітря та температура визначають інтенсивність випаровування, що безпосередньо впливає на водний баланс моделюваної ділянки. Середня швидкість вітру модулює процеси переносу вологи та тепла між водною поверхнею та атмосферою, впливаючи на охолодження води та розподіл теплової енергії у водному стовпі. Географічна широта використовується для коректного розрахунку сонячної радіації та сезонних коливань температури, що важливо для моделювання біологічної активності та гідрохімічних процесів у водоймі.

Розрахунки в системі WEAP показника ефективності самоочищення водного басейну річки (Ес) або ефективності біохімічного розкладу органічних речовин у воді проводилися за рівнянням [33]:

$$E_c = \frac{BCK_{\text{повн}}}{ХСК}, \quad (1)$$

де: БСК_{повн} – повне біологічне споживання кисню річки в досліджуваному гідростворі, розраховується як 1.33·БСК₅;

ХСК – хімічне споживання кисню в показником Ес згідно з узагальненою досліджуваному гідростворі. класифікацією (табл. 4).

Інтенсивність процесів самоочищення водного басейну річки визначали за

Table 4

Classification of the intensity of self-cleaning of the river according to the values of Ec

Таблиця 4

Ec	Characteristics of self-cleaning processes
0.00...0.30	процеси самоочищення на даній ділянці річки (в басейні річки) мають низький рівень інтенсивності
0.31...0.70	середній рівень інтенсивності самоочищення
0.71...1.00	високий рівень інтенсивності самоочищення

Цей підхід дозволяє не лише кількісно охарактеризувати екологічний стан річки, а й виявити ділянки з пониженою здатністю до природного очищення, які потребують додаткових заходів екологічного регулювання [5].

Результати дослідження та їх обговорення

На основі результатів моделювання, проведеного в програмному комплексі WEAP, здійснено оцінку щомісячної самоочисної здатності річки Дніпро в межах міста Дніпро, що належить до території суббасейну Нижнього Дніпра. Для створення сценарію моделювання були введені показники якості води, серед яких:

- розчинений кисень (PK, DO), кг/м³;
- біологічне споживання кисню (БСК, BOD), кг/м³;
- температура води (Т), °С.

Враховувалися як консервативні речовини, що практично не піддаються біологічному розкладанню, так і речовини, схильні до розкладу. Розрахунки виконували на основі рівнянь масового балансу першого порядку, що дозволило змодельувати динаміку водного балансу та процеси змішування уздовж ділянок річки.

Розрахунок розчиненого кисню (DO):

$$\frac{dDO}{dt} = K_2 \cdot (DO_{sat} - DO) - K_1 \cdot BOD, \quad (2)$$

де: DO – концентрація розчиненого кисню, кг/м³;

DO_{sat} – насичена концентрація кисню в воді, кг/м³;

BOD – біологічне споживання кисню, кг/м³;

K₁ – константа швидкості розкладу БСК, 1/доба;

K₂ – константа швидкості реаерації, 1/доба.

Розрахунок біологічного споживання кисню (BOD):

$$\frac{dBOD}{dt} = -K_1 \cdot BOD, \quad (3)$$

де: BOD – концентрація біологічного споживання кисню, кг/м³;

K₁ – константа швидкості розкладу БСК, 1/доба.

Розрахунок температури води (Т):

$$\frac{dT}{dt} = K_T \cdot (T_a - T), \quad (4)$$

де: Т – температура води в водотоці, °С;

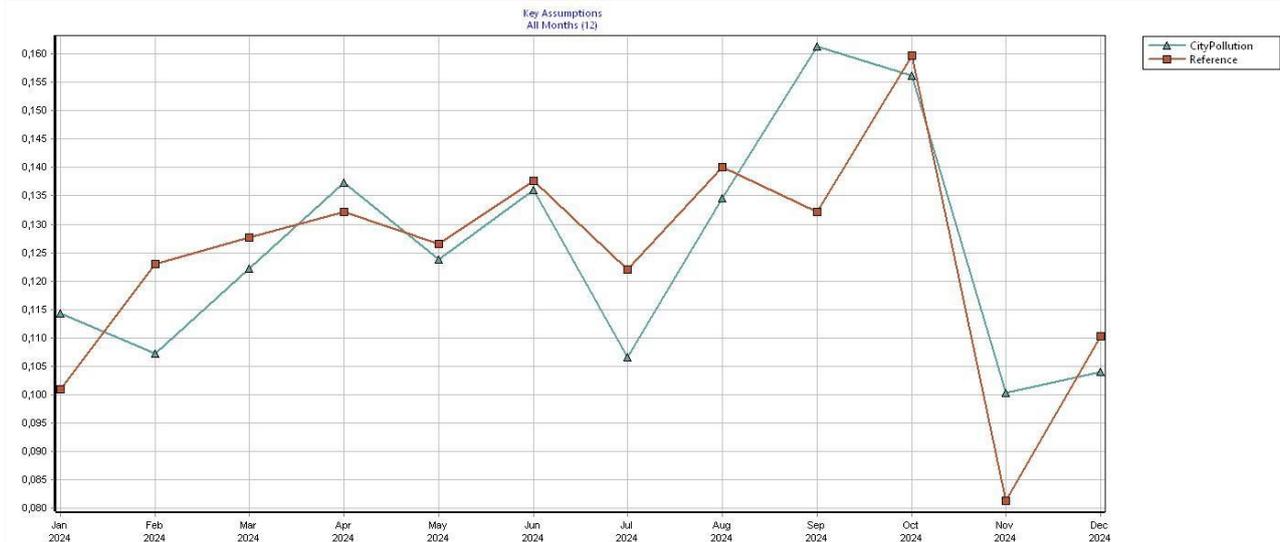
T_a – середньодобова температура повітря, °С;

K_T – коефіцієнт теплового обміну, 1/доба.

Таким чином, побудована модель дала змогу описати зміну розчиненого кисню, БСК та температури води вздовж ділянок річки Дніпро, що дозволило повніше оцінити її самоочисний потенціал у межах досліджуваної території.

Враховуючи конкретні показники якості води в двох найбільш значущих створах, були розраховані та графічно представлені показники ефективності самоочищення річки Дніпро за місяцями на 2024 рік (рис. 3 а, б).

Key Assumptions																			
All Months (12) Selected Scenarios (2/5) Branch: Key Assumptions\Self purification effectiveness No comparison Annual Total Monthly Average																			
Scenario	Jan 2024	Feb 2024	Mar 2024	Apr 2024	May 2024	Jun 2024	Jul 2024	Aug 2024	Sep 2024	Oct 2024	Nov 2024	Dec 2024	Sum	Min	Max	Mean	Median	SD	RMS
CityPollution	0,1144	0,1073	0,1223	0,1373	0,1238	0,1361	0,1066	0,1346	0,1612	0,1561	0,1003	0,1040	1,5039	0,1003	0,1612	0,1253	0,1231	0,0202	0,1268
Reference	0,1009	0,1230	0,1277	0,1321	0,1265	0,1377	0,1220	0,1400	0,1322	0,1597	0,0814	0,1103	1,4935	0,0814	0,1597	0,1245	0,1271	0,0200	0,1259



б

Fig. 3. Tabular data (a) and graph (b) of the efficiency of self-treatment of the Dnieper River in control areas by months: brown line – the value of the self-healing efficiency for the control unit to the city of Dnipro (upstream, 462 km of the village of Auly); blue line – the value of the self-healing efficiency for the control site after the city of Dnipro (downstream, 404 km, Dnipro, SE "PdTPP" of PJSC "DTEK Dniproenergo").

Рис. 3. Табличні дані (а) та графік (б) ефективності самоочищення р. Дніпро в контрольних створах за місяцями: коричнева лінія – значення ефективності самовідновлення для контрольного створу до м. Дніпро (вище за течією, 462 км смт. Аули); синя лінія – значення ефективності самовідновлення для контрольного створу після м. Дніпро (нижче за течією, 404 км, м. Дніпро, ВП «ПдТЕС» ПАТ «ДТЕК Дніпроенерго»)

На наведеному графіку спостерігається низький рівень інтенсивності процесів самоочищення вод річки, який не перевищує 0.3. Водночас варто зазначити, що на ділянці річки на відстані 404 км, поблизу м. Дніпро (ВП «ПдТЕС» ПАТ «ДТЕК Дніпроенерго»), середні показники дещо вищі – на 0.0291. Це пояснюється вищою концентрацією біохімічного споживання кисню, зумовленим значною концентрацією забруднювальних речовин (скиди стічних вод), що надходять із міста Дніпро та території Дніпропетровської області.

Результати моделювання підтвердили, що в літній період, коли підвищується температура води, відбувається зниження концентрації розчиненого кисню та зменшення активності аеробних мікроорганізмів, які забезпечують розклад органічних забруднень. Одночасно посилюється процес евтрофікації – інтенсивного розвитку водоростей. У нічний час або під час масового відмирання фітопланктону різко зростає споживання кисню, що створює небезпечні анаеробні умови.

Ці негативні явища посилюються в умовах мінімального водообміну, порушеного кисневого режиму та низького рівня води, характерних для літнього сезону. Повільна течія, слабка аерація та обмежене розбавлення

забруднюючих речовин істотно знижують ефективність природних механізмів самоочищення. Аналіз показує, що протягом одного року природні процеси відновлення не забезпечують достатнього рівня очищення. Головними причинами цього є надмірне антропогенне навантаження від комунальних та промислових стоків, концентрація яких нерідко перевищує гранично допустимі норми, деградація прибережних екосистем, негативний вплив кліматичних змін, а також потрапляння боєприпасів та продуктів їх розпаду в водотік під час військових дій [34].

Слід зазначити, що такий аналіз не є репрезентованим та вимагає більш широкого вивчення проблеми: розрахунку ефективності самоочищення р. Дніпро в більшій кількості контрольних створів та за більший часовий період; додавання інших процесів, які призводять до відновлення екосистеми водойми, а не лише очищення води та ін. Попри це, навіть отримані результати переконливо свідчать, що якісні показники водної екосистеми в контрольному створі, розташованому вище міста Дніпро, практично не відрізняються від показників нижчого за течією створу. Відсутність помітної різниці вказує на вкрай низький рівень природної здатності річки до самоочищення на досліджуваній ділянці.

Такий стан водної екосистеми вимагає більш рішучих та системних дій, спрямованих на відновлення і підтримання екологічного балансу річки Дніпро. Відповідно до положень «Водної стратегії України на період до 2050 року», для підвищення здатності річкової екосистеми до самоочищення необхідно впроваджувати комплекс природоохоронних заходів, зокрема:

- здійснення безперервного моніторингу хімічного стану води протягом року, в тому числі цільового скринінгу та контролю потенційно небезпечних речовин;
- поліпшення гідрологічного режиму водотоку з метою відновлення гідрогеоморфологічних характеристик русла та зменшення негативного впливу межени;
- відновлення прибережних екосистем шляхом створення буферних смуг природної рослинності;
- застосування природоорієнтованих рішень – штучних фільтраційних систем, біоплато та екотехнічних споруд, що імітують природні механізми очищення води;
- скорочення обсягів частково очищених та неочищених скидів шляхом модернізації та реконструкції очисних споруд.

Позитивний ефект від впровадження таких заходів підтверджується низкою українських та європейських наукових досліджень [35–39].

Окремої уваги потребують дії у сфері очищення промислових і комунальних стоків, що регулюються законом України «Про охорону навколишнього природного середовища» та законом України «Про води». Зокрема, йдеться про впровадження в існуючі виробництва новітніх технологій:

- очищення стічних вод (СВ) до нормативних показників перед скиданням у водні об'єкти удосконаленням процесів коагуляції шляхом поєднання її з флокуляцією або флотацією [40–43], використання синергетичних комбінацій коагулянтів, застосування технології розчинної повітряної флотації (DAF) [44–46], а також удосконалення процесів механічного очищення (впровадження високопродуктивних центрифуг безперервної дії, використання дискових або мембранних фільтрів нового покоління, автоматизація контролю частоти обертання, навантаження та вологості осаду) [47–49];

- модернізація технологічних ліній біологічного очищення для скорочення обсягів частково очищених скидів шляхом впровадження аеротенків з дрібнопухирчастою аерацією, використання біореакторів із завантаженням (MBBR) та контролю в реальному часі концентрацій кисню, азоту й фосфору [50–52];

- повторне використання промислових стоків із застосуванням комбінованих методів очищення – ультрафільтрації та одноступеневого зворотного осмосу (RO) або технологій мембранного біореактора (MBR) у поєднанні з RO [53; 54];

- впровадження технологій MLD (Minimal Liquid Discharge) – максимальне відновлення промислових вод із використанням ультрафільтрації та багатоступеневого RO (3–6 ступенів) [55–57];

- застосування систем ZLD (Zero Liquid Discharge) – повне відновлення промислових вод через поєднання RO з термічними процесами (випарювання та кристалізація) [58; 59].

Впровадження цифровізації та автоматизованого моніторингу в технологічні процеси очищення СВ також сприятиме покращенню ситуації: встановлення онлайн-датчиків якості води, системи SCADA для управління режимами очищення, аналіз Big Data для прогнозування аварійних ситуацій та пікових навантажень [60–63].

Крім того, відповідно до статті 110 Водного кодексу України, необхідно посилити дисциплінарну, адміністративну, цивільно-правову та кримінальну відповідальність за порушення вимог водного законодавства, що сприятиме підвищенню рівня екологічної безпеки, раціональному використанню водних ресурсів і відновленню природного потенціалу річки Дніпро [64].

Висновки

Розрахунок ефективності процесів самоочищення річки Дніпро на досліджених ділянках дав змогу глибше оцінити інтенсивність внутрішньоводоймних процесів та виявив нагальну потребу в впровадженні комплексних заходів для поліпшення якості води в межах міста Дніпро. Підвищення здатності річки до самоочищення можливе лише за умов поєднання екологічних, технічних та управлінських рішень,

спрямованих на зниження антропогенного навантаження й відновлення природних механізмів функціонування водної екосистеми.

Для оцінювання результатів запропонованих природоохоронних і

технологічних заходів доцільним є використання програмного забезпечення WEAP, яке дозволяє моделювати сценарії водокористування, оцінювати ефективність різних стратегій управління та визначати їхній вплив на стан водного середовища.

References

- [1] Romanenko, V. D. [Osnovi gidroekologiyi]. Kyiv: Oberegi (in Ukrainian).
- [2] Zhang, X., Chen, P., Han, Y., Chang, X., Dai, S. (2022). Quantitative analysis of self-purification capacity of non-point source pollutants in watersheds based on SWAT model, *Ecological Indicators*, 143, 109425. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2022.109425>.
- [3] Vasenko, O. G., Zinchenko, I. V., Karlyuk, A. A. (2018). [Doslidzhennya procesiv samooczishchennya vodnih ob'ektiv Harkivskoyi oblasti (na prikladi ozer Limanskoyi Grupi i dilyanki r. Siverskij Donec) za mikrobiologichnimi charakteristikami]. *Problemi ohoroni navkolishnogo prirodnogo seredovisha ta ekologichnoyi bezpeki*, 40, 85–98 (in Ukrainian).
- [4] Nzar, Y. H. S., Anwar, O. M., Fahmy, O. M. (2021). Study on the Self-purification of Tanjaro River. *Tikrit Journal for Agricultural Sciences*, 21(4). <https://doi.org/10.25130/tjas.21.4.7>.
- [5] Romanenko, V. D., Zhukinskij, V. M., Oksiyuk, O. P., Yacik, A.V. (1998). [Metodika ekologichnoyi ocinki yakosti poverhnevih vod za vidpovidnimi kategoriyami]. Kyiv: Simvol-T. (in Ukrainian).
- [6] Zubaidah, T., Karmaningroem, N., Slamet, A. (2019). The self-purification ability in the rivers of Banjarmasin, Indonesia. *Journal of Ecological Engineering*, 20(2). DOI: <https://doi.org/10.12911/22998993/97286>
- [7] Babamiri, O., Dinpashoh, Y. (2024). Assessment of Management Scenarios for the Remediation of River Water Quality Based on Self-Purification (Case Study: Dez River). *Journal of Water and Wastewater*, 34(6), 23–38. DOI: [10.22093/wwj.2024.407654.3360](https://doi.org/10.22093/wwj.2024.407654.3360).
- [8] Margaryan, I., Arakelyan, A., Khachatryan, A., Simonyan, G., Banyan, L., Hayrapetyan, S. (2024). Assessment of a self-purification capacity of voghji river under the environmental risk. *Journal of Environmental Protection and Ecology*, 25(2), 374–381. <https://doi.org/10.18411/DOICODE-2024.296>.
- [9] Vasenko, O. G., Bruk, V. V., Karlyuk, A. A., Sviridov, Yu. V. (2019). [Prognozuvannya yakosti vodi v richkah Dunaj ta Siverskij Donec za dopomogoyu geoinformacijnih tehnologij]. *World science*, 11(51), 45–49. DOI: [10.31435/rsglobal_ws/30112019/6766](https://doi.org/10.31435/rsglobal_ws/30112019/6766) (in Ukrainian).
- [10] Mmutle, T. G. (2022). *Assessment of the self-purification capacity of the Mooi river catchment* (Doctoral dissertation). <https://cutscholar.cut.ac.za/server/api/core/bitstreams/edbe235a-43a6-48da-a4ac-47ccf33e1a00/content>
- [11] Nugraha, W. D., Sarminingsih, A., Alfisy, B. (2020). The Study of Self Purification Capacity Based on Biological Oxygen Demand (BOD) and Dissolved Oxygen (DO) Parameters. *IOP Conf. Ser.: Earth Environ. Sci.*, 448, 012105. DOI: [10.1088/1755-1315/448/1/012105](https://doi.org/10.1088/1755-1315/448/1/012105)
- [12] Zinchenko, I. V., Vasenko, O.H., Babich, E. V., Anhina, L.S. (2023). [Self-purification monitoring of the Danube delta and Merlo river aquaticwater according to microbiological indicators]. *Man and Environment. Issues of Neoecology*, (39), 39–54. <https://doi.org/10.26565/1992-4224-2023-39-04> (in Ukrainian).
- [13] Survilė, O., Šaulys, V., Stanionytė, A. (2017). An assessment of self-purification of regulated and natural streams. "Environmental Engineering" 10th International Conference, Vilnius Gediminas Technical University. Lithuania, 27–28. <https://doi.org/10.3846/enviro.2017.090>
- [14] Šaulys, V., Survilė O., Stankevičienė R. (2020). An Assessment of Self-Purification in Streams. *Water*, 12, 87. DOI: [10.3390/w12010087](https://doi.org/10.3390/w12010087).
- [15] González, S. O., Almeida, C. A., Calderón, M., Mallea, M. A., González, P. (2014). Assessment of the water self-purification capacity on a river affected by organic pollution: application of chemometrics in spatial and temporal variations. *Environmental Science and Pollution Research*, 21, 10583–10593. DOI: [10.1007/s11356-014-3098-y](https://doi.org/10.1007/s11356-014-3098-y).
- [16] Marimón-Bolívar, W., Jiménez, C., Toussaint-Jiménez, N., Domínguez, E. (2022). Use of Neural Networks to estimate a global self-purification capacity index for Mountain rivers: a case study in Bogota River Basin. *Earth Systems and Environment*, 6(3), 631–643. DOI: [10.1007/s41748-021-00248-z](https://doi.org/10.1007/s41748-021-00248-z).
- [17] Babamiri, O., Vanaei, A., Guo, X., Wu, P., Richter, A., Ng, K. (2021). Numerical Simulation of Water Quality and Self-Purification in a Mountainous River Using QUAL2KW. *Journal of Environmental Informatics*. 37. 26–35. DOI: [10.3808/jei.202000435](https://doi.org/10.3808/jei.202000435).
- [18] Goshime, D. W., Haile, A. T.; Rientjes, T., Absi, R., Ledésert, B., Siegfried, T. (2021). Implications of water abstraction on the interconnected Central Rift Valley Lakes sub-basin of Ethiopia using WEAP Citation Data, *Journal of Hydrology: Regional Studies*, 38, 100969. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ejrh.2021.100969>
- [19] Gruzdeva, O. V., Kryachkov, D. O., Smotraev, R. V. (2023). [Imitacijne modelyuvannya v upravlinni vodnimi resursami]. *Journal of Chemistry and Technologies*, 31(3), 530–551. DOI: <https://doi.org/10.15421/jchemtech.v31i3.287777> (in Ukrainian).
- [20] [Pro golovni vodno-ekologichni problemi subbasejnu Nizhno Dnipra]. <https://davr.gov.ua/news/pro-golovni-vodnoekologichni-problemi-subbasejnu-nizhnogo-dnipra#:~:text=%D0%A1%D1%83%D0%B1%D0%B1%D0%B0%D1%81%D0%B5%D0%B9%D0%BD%20%D0%9D%D0%B8%D0%B6%D0%BD%D1%8C%D0%BE%D0%B3%D0%BE%20%D0%94%D0%BD%D1%96%D0%BF%D1%80%D0%B0%20%E2%80%93%20%D0%B4%D1%80%D1%83%D0%B3%D0%B8%D0%B9%20%D0%B7%D0%B0.%D0%94%D0%BD%D1%96%D0%BF%D1%80%D0%BE%D0%B2%D1%81%D1%8C%D0%BA%D0%BE%D0%B3%D0%BE%20%D0%BA%D0%B0%D1%81%D0%BA%D0%B0%D0%B4%D1%83%3A%20%D0%94%D0%BD%D1%96%D0%BF%D1%80%D0%BE%D0%B2%D1%81%D1%8C%D0%BA%D0%B5%20%D1%82%D0%B0%20%D0%9>

- [A%D0%B0%D1%85%D0%BE%D0%B2%D1%81%D1%8C%D0%BA%D0%B5](#) (in Ukrainian).
- [21] Khilchevskiy, V. K. (2022). Water and armed conflicts—classification features: in the world and in Ukraine. *Hydrology, Hydrochemistry, Hydroecology*, 1, 6–18. <https://doi.org/10.17721/2306-5680.2022.1.1>
- [22] Shumilova, O., Tockner, K., Sukhodolov, A., et al. (2023). Impact of the Russia–Ukraine armed conflict on water resources and water infrastructure. *Nature Sustainability*, 6, 578–586. <https://doi.org/10.1038/s41893-023-01068-x>
- [23] [Plan upravlinnya richkovim basejnom Dnipro ta ocinki riziku nedosyagnennya dobrogo ekologichnogo stanu masivami poverhnevih vod] https://www.davr.gov.ua/fls18/lowerdnipro_summar_y_23072020.pdf (in Ukrainian).
- [24] Water Evaluation and Adaptation Planning www.weap21.org
- [25] [Environmental Monitoring Center] <https://ecomonitoring.info/%d0%b0%d1%80%d1%85%d1%96%d0%b2-%d0%b4%d0%b0%d0%bd%d0%b8%d1%85/#> (in Ukrainian).
- [26] [State Agency for Water Resources of Ukraine] https://data.gov.ua/dataset/surface-water-monitoring>Data_zvernennya_15.05.2024 (in Ukrainian).
- [27] [Klimatichna informaciya shodo richki Dnipro] https://ukr.seatemperature.net/zaraz/ukraine/dnipro-river-near-dnepropetrovsk-sea-temperature>Data_zvernennya_16.03.2025 (in Ukrainian).
- [28] [Fishermap. Karta glibin richki Dnipro] <https://ua.fishermap.org/depth-map/dnepr-reaka-ukraina/> (in Ukrainian).
- [29] [Oficijnij sajt m. Dnipro Klimatichni pokazniki mista] <https://gorod.dp.ua/pogoda/?pageid=46> (in Ukrainian).
- [30] Copernicus Atmosphere Monitoring Service (CAMS) <https://atmosphere.copernicus.eu/>
- [31] [Seredni pokazniki dennoyi ta nichnoyi temperatur protyagom roku] <https://tur-pogoda.com.ua/ukraine/dnepropetrovsk/monthly> (in Ukrainian).
- [32] [Temperatura vodi v richci Dnipro] <https://ukr.seatemperature.net/zaraz/ukraine/dnipro-river-near-dnepropetrovsk-sea-temperature> (in Ukrainian).
- [33] Udod, V. M., Yaciv, M. Yu. (2011). [Stalij rozvitok gidroekosistem — osnova ekobezpechnogo vodokoristuvannya]. *Ekologichna bezpeka ta prirodokoristuvannya: Zb. nauk. pr. 7. C.* 136-154. (in Ukrainian).
- [34] Khilchevskiy V.K. (2022). Water and armed conflicts – classification features: in the world and in Ukraine. *Hydrology, Hydrochemistry and Hydroecology*, 1(63). <https://doi.org/10.17721/2306-5680.2022.1.1> (in Ukrainian).
- [35] Zaborowski, S., Kałuza, T., Jusik, S. (2023). The Impact of Spontaneous and Induced Restoration on the Hydromorphological Conditions and Macrophytes, Example of Flinta River. *Sustainability*, 15(5), 4302. <https://doi.org/10.3390/su15054302>
- [36] García-Herrero, L., Lavrić, S., Guerrieri, V., Toscano, A., Milani, M., Cirelli, G. L., Vittuari, M. (2022). Cost-benefit of green infrastructures for water management: A sustainability assessment of full-scale constructed wetlands in Northern and Southern Italy, *Ecological Engineering*, 185, 106797. <https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2022.106797>
- [37] Piégay, H., Arnaud, F., Belletti, B., Cassel, M., Marteau, B., Riquier, J., Rousson, C., Vazquez-Tarrio, D. (2023). Why Consider Geomorphology in River Rehabilitation? *Land*, 12(8), 1491. <https://doi.org/10.3390/land12081491>
- [38] Müller, H., Hörbinger, S., Franta, F., Mendes, A., Li, J., Cao, P., Baoligao, B., Xu, F., Rauch, H. P. (2022). Hydromorphological Assessment as the Basis for Ecosystem Restoration in the Nanxi River Basin (China). *Land*, 11(2), 193. <https://doi.org/10.3390/land11020193>
- [39] Li, J., Hoerbinger, S., Weissteiner, C., Peng, L., Raucher H.P. (2020). River restoration challenges with a specific view on hydromorphology. *Front. Struct. Civ. Eng.* 14, 1033–1038. <https://doi.org/10.1007/s11709-020-0665-9>
- [40] Sukhatskyi, Yu. V., Znak, Z. O. (2019). Flotation as a stage of cavitation-flotation technology for the treatment of aqueous heterogeneous media from dispersive solids and organic compounds. *Chemistry, Technology and Application of Substances*. 2(1). <https://doi.org/10.23939/ctas2019.01.053>
- [41] Wang, H., Zhang, O., Bian, J., Zhang, D. (2023). Synergistic coagulation effect of the cationic coagulant and anionic flocculant on fluorite tailings, *Environmental Technology & Innovation*, 30, 103096. <https://doi.org/10.1016/j.eti.2023.103096>
- [42] Li, E., Dong, J., Jia, Y., Pan, Z., Lv, H., Du, Z., Gao G., Cheng, F. (2025). Synergistic enhancement of pollutant removal from high-salt wastewater using coagulation-flotation combined process, *Green Chemical Engineering*, 6(3), 410–419. <https://doi.org/10.1016/j.gce.2024.09.006>
- [43] El Ouadrhiri, F., Saleh, E. A. M., Lahkimi, A. (2025). From Mineral Salts to Smart Hybrids: Coagulation–Flocculation at the Nexus of Water, Energy, and Resources—A Critical Review. *Processes*, 13(11), 3405. <https://doi.org/10.3390/pr13113405>
- [44] Ribeiro dos Santos, P., Dibbern Sacchi, G., Daniel, L. A., Penalva Reali, M.A. (2025). Treatment of secondary effluent using dissolved air flotation on a pilot-scale: Assessing operating conditions, *Journal of Water Process Engineering*, 70, 107033. <https://doi.org/10.1016/j.jwpe.2025.107033>
- [45] Muñoz-Alegría, J. A., Muñoz-España, E., Flórez-Marulanda, J. F. (2021). Dissolved Air Flotation: A Review from the Perspective of System Parameters and Uses in Wastewater Treatment, *Tecnológicas*, 24(52), e2111. <https://doi.org/10.22430/22565337.2111>
- [46] Rajapakse, N., Zargar, M., Sen, T., Khiadani, M. (2022). Effects of influent physicochemical characteristics on air dissolution, bubble size and rise velocity in dissolved air flotation: A review, *Separation and Purification Technology*, 289. <https://doi.org/10.1016/j.seppur.2022.120772>.
- [47] Ginisty, P., Mailler, R., Rocher, V. (2021). Sludge conditioning, thickening and dewatering optimization in a screw centrifuge decanter: Which means for which result? *Journal of Environmental Management*, 280, 111745. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2020.111745>.
- [48] Obotey Ezugbe, E., Rathilal, S. (2020). Membrane Technologies in Wastewater Treatment: A Review. *Membranes*, 10(5), 89. <https://doi.org/10.3390/membranes10050089>

- [49] Sanchis-Perucho, P., Aguado, D., Ferrer, J., Seco, A., Robles, A. (2024). A comprehensive review of the direct membrane filtration of municipal wastewater, *Environmental Technology & Innovation*, 35, 103732. <https://doi.org/10.1016/j.eti.2024.103732>.
- [50] Uddin, M., Islam, M. K., Dev, S. (2024). Investigation of the performance of the combined moving bed bioreactor-membrane bioreactor (MBBR-MBR) for textile waste water treatment. *Heliyon*, 10(10), e31358. DOI: 10.1016/j.heliyon.2024.e31358.
- [51] Četković, J., Knežević, M., Vujadinović, R., Tombarević, E. Grujić, M. (2023). Selection of Wastewater Treatment Technology: AHP Method in Multi-Criteria Decision Making. *Water*, 15, 1645. <https://doi.org/10.3390/w15091645>
- [52] Gzar, H. A., Al-Rekabi, W.S., Shuhaieb, Z. K (2021). Application of Moving Bed Biofilm Reactor (MBBR) for Treatment of Industrial Wastewater: A mini Review. *J. Phys.: Conf. Ser.* 1973, 012024. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1973/1/012024>
- [53] Santos Mesquita, I., Piasek Borges, C., da Fonseca, F. V. (2022) Membrane bioreactor, reverse osmosis and UV/H₂O₂ process integration for ethinylestradiol removal: A cost-benefit analysis, *Journal of Environmental Management*, 310, 114760. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2022.114760>
- [54] Lozier, J., Fernandez, A. (2001). Using a membrane bioreactor/reverse osmosis system for indirect potable reuse. *Water Science and Technology: Water Supply*, 1, 303–313. <https://doi.org/10.2166/ws.2001.0127>
- [55] Panagopoulos, A., Haralambous, K-J. (2020). Minimal Liquid Discharge (MLD) and Zero Liquid Discharge (ZLD) strategies for wastewater management and resource recovery – Analysis, challenges and prospects, *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 8(5), 104418. <https://doi.org/10.1016/j.jece.2020.104418>
- [56] Panagopoulos, A. (2021). Techno-economic assessment of minimal liquid discharge (MLD) treatment systems for saline wastewater (brine) management and treatment. *Process Safety and Environmental Protection*. 146. 656-669. <https://doi.org/10.1016/j.psep.2020.12.007>
- [57] Horňák, D., Procházková, M., Miklas, V., Vondra, M., Touš, M., Kollmann, M., Jia, X., Říhová, M., Pišánová, M., Máša, V. (2025) Minimal Liquid Discharge system for sustainable dairy wastewater management, *Separation and Purification Technology*, 373, 133556. <https://doi.org/10.1016/j.seppur.2025.133556>
- [58] Panagopoulos, A., Michailidis, P. (2025). Membrane Technologies for Sustainable Wastewater Treatment: Advances, Challenges, and Applications in Zero Liquid Discharge (ZLD) and Minimal Liquid Discharge (MLD) Systems. *Membranes*, 15(2), 64. <https://doi.org/10.3390/membranes15020064>
- [59] Gangavarapu, S., Ganguru, U. M. R., Kulkarni, S., Brahmandam, N. M. (2015). Studies on Zero Liquid Discharge (ZLD) plant in API Manufacturing Unit, *International Journal of Innovative Research in Engineering and Management (IJIREM)*, 2(5). 33–36.
- [60] Deepak, T. J, Norashikin, A. K, Goyal, S., Rajawat, A. (2024). Digital Transformation for the Management of Water Resources in Malaysia. *Proceedings of the International Conference on Innovation & Entrepreneurship in Computing, Engineering & Science Education Advances in Computer Science Research*, 117. https://doi.org/10.2991/978-94-6463-589-8_16
- [61] Wongburi, P., Park, J. K. (2021). Big Data Analytics from a Wastewater Treatment Plant. *Sustainability*, 13(22), 12383. <https://doi.org/10.3390/su132212383>
- [62] Dwarakanath, B., Kalpana, P., Anandan, R., Sayed, A., Ashraf, G., Thamineni, B. (2023). Smart IoT-based water treatment with a Supervisory Control and Data Acquisition (SCADA) system process. *Water Reuse*, 13, 411–431. <https://doi.org/10.2166/wrd.2023.052>
- [63] Wang, A-J., Li, H., He, Z., Tao, Y., Wang, H., Yang, M., Savic, D., Daigger, G.T., Ren, N. (2024). Digital Twins for Wastewater Treatment: A Technical Review, *Engineering*, 36, 21–35. <https://doi.org/10.1016/j.eng.2024.04.012>
- [64] [Vodnii kodeks Ukraini]. <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/213/95-%D0%B2%D1%80#Text>. (in Ukrainian).