

© О.М. Назаренко¹, А.О. Березовська¹, Є.І. Буякова¹, А.В. Башкіров¹, Є.А. Шерстюк²

¹Національний університет «Запорізька політехніка», Запоріжжя, Україна

² Національний технічний університет «Дніпровська політехніка», Дніпро, Україна

ОБҐРУНТУВАННЯ БУДІВНИЦТВА РЕКРЕАЦІЙНИХ ВОДОЙМИЩ ЯК ІНСТРУМЕНТАРІЙ ЕКОСИСТЕМНИХ ПОСЛУГ СМАРТ МІСТА

O. Nazarenko¹, <https://orcid.org/0000-0002-2738-9891>

A. Berezovska¹, <https://orcid.org/0000-0002-2738-9891>

Ye. Buyakova¹, <https://orcid.org/0000-0002-6600-4733>

A. Bashkirov¹, <https://orcid.org/0000-0005-5952-9608>

Ye. Sherstiuk² <https://orcid.org/0000-0002-1844-1985>

¹National University Zaporizhzhia Polytechnic, Zaporizhzhia, Ukraine

² Dnipro University of Technology, Ukraine

JUSTIFICATION OF THE CONSTRUCTION OF RECREATION RESERVOIRS AS A MEANS OF PRESERVING AND RESTORATION OF ECOSYSTEM SERVICES

Метою дослідження є аналіз доцільності будівництва рекреаційних водоймищ для забезпечення екосистемних послуг, підвищення їх ефективності та довгострокової стійкості.

Методика. Дослідження базувалося на обробці даних багаторічних спостережень за кліматичними та гідрологічними показниками басейнів річок в південних регіонах України. Для збору даних використовувалися батиметричні датчики, встановлені у каналах для моніторингу рівня води, кількості опадів та змін у водному балансі, датчики вологості ґрунтів для вимірювання вологості на різних глибинах, з триразовим контролем критичних літніх температур, що дозволило отримати дані про розподіл вологи у ґрунті під час посухи.

Результати. Отримано математичну модель седиментації осаду та підвищення продуктивності кавітаційної седиментації з 14 до 7,6 годин для різних техногенних сумішей, запропоновано методологію підвищення концентрації донних відкладень залежно від коефіцієнту тертя від 0,0025 до 0,125, виявлено оптимальну довжину водоймища для максимізації наносів. Підтверджується можливість економії більш ніж 1350000 м³/рік відновленої води та біля 250000 кг осаду/рік по одному металургійному регіону.

Наукова новизна. Запропоновано математичні моделі другого та третього порядку для опису процесів осадоутворення у рекреаційних водоймах. Вперше досліджено вплив сольового змішування на процеси осадоутворення в умовах технопарків. Встановлені залежності між довжиною сольового вторгнення, глибиною водойми та її геометричними параметрами. Запропоновано оптимальні геометричні параметри водойм для забезпечення максимальної ефективності осадження забруднень. Розроблено нові алгоритми моделювання седиментації осадів з урахуванням впливу геометричних та фізико-хімічних параметрів водойми. Виявлена залежність між ерозійними характеристикам дна водойм та їх здатністю накопичувати донні відкладення у різних умовах експлуатації.

Практична значимість. Результати дослідження дозволяють впроваджувати сучасні методи управління водними ресурсами у технопарках знижуючи техногенне навантаження на довкілля, запропоновані рекомендації щодо геометричних параметрів водойм можуть бути використані для проєктування нових або реконструкції існуючих рекреаційних водойм. Запропоновані підходи сприяють зниженню концентрації забруднень у воді, покращенню її якості та створенню умов для відновлення біорізноманіття.

Ключові слова: водні ресурси, седиментація осаду, геометричні параметри водойм, техногенне навантаження.

Вступ. Зміни клімату та погіршення стану водних екосистем вимагають пошуку нових способів захисту та відновлення природних ресурсів. У цьому контексті рекреаційні водоймища стають важливим елементом стратегії забезпечення стійкості довкілля.

Дослідження зосереджується на вивченні седиментації осадів, моделюванні способів оптимізації управління донними відкладеннями та оцінці екологічної й економічної ефективності проєктів. Розгляд таких аспектів дозволяє визначити оптимальні рішення для забезпечення довгострокового функціонування водоймищ.

Рекреаційні водоймища виконують важливу роль у забезпеченні сталого розвитку регіонів, сприяючи відновленню екосистем і покращенню умов життя населення. Вони надають можливість зберігати екосистемні послуги, які включають очищення води, нівелювання впливу кліматичних змін, зменшення ризиків повеней та збереження біорізноманіття. В сучасних умовах, коли техногенний вплив і зміни клімату спричиняють деградацію природних екосистем, створення водоймищ стає нагальною потребою. Вони виступають природними фільтрами для води, зменшують ерозію ґрунтів і забезпечують стійке водопостачання для населення.

Соціальні аспекти також підтверджують актуальність таких проєктів. Рекреаційні водоймища створюють умови для відпочинку, підвищують туристичну привабливість регіонів, а також стають місцем для проведення культурних та освітніх заходів. Це сприяє не лише підвищенню якості життя місцевих громад, але й розвитку економіки через залучення інвестицій і зростання туристичного потоку. Окрім цього, такі водоймища можуть слугувати як місця для досліджень і моніторингу екологічного стану довкілля. Це дозволяє зосередитися на розробці стратегій збереження біорізноманіття і раціонального використання водних ресурсів. Таким чином, будівництво рекреаційних водоймищ є актуальним і багатоаспектним рішенням, яке відповідає сучасним екологічним і соціальним викликам. Це є важливим кроком на шляху до забезпечення сталого розвитку регіонів і покращення добробуту населення.

Основна частина. Рекреаційні водоймища відіграють важливу роль у відновленні та збереженні екологічного балансу регіонів. Одним із ключових завдань таких об'єктів є очищення води. Водойми затримують осади, зменшують кількість забруднюючих речовин і сприяють природному фільтруванню води.

Це актуально для регіонів, де інтенсивна господарська діяльність призводить до значного забруднення водних ресурсів [1–5]. Ще одним важливим екологічним аспектом є збереження біорізноманіття. Водоймища створюють сприятливі умови для розвитку флори й фауни, виступаючи природними середовищами існування для багатьох видів, підтримують екосистемну стабільність у межах регіонів. Також рекреаційні водоймища виконують функцію буфера між урбанізованими зонами та природними екосистемами, знижуючи негативний вплив людської діяльності на довкілля.

Рекреаційні водоймища мають значний вплив на соціально-економічний розвиток. Вони підвищують туристичну привабливість регіонів, створюючи можливості для активного відпочинку, спорту й екотуризму. Розвиток туристичної інфраструктури, своєю чергою, сприяє створенню нових робочих місць і стимулює місцеву економіку. Окрім туризму, такі водоймища забезпечують покращення якості життя місцевого населення. Вони стають місцями для дозвілля, культурних і освітніх заходів, що сприяє зміцненню соціальних зв'язків у громадах. Економічна ефективність також полягає в довгостроковій окупності проєктів через зростання податкових надходжень і залучення інвестицій. Створення таких об'єктів відповідає принципам сталого розвитку, поєднуючи екологічну стійкість і економічну вигоду.

Одним із ключових технічних аспектів є ефективне управління донними відкладеннями. З часом у водоймищах накопичуються осади, які можуть знижувати їхню функціональність. Для вирішення цієї проблеми використовуються інноваційні методи, такі як кавітаційна седиментація [2, 3], які забезпечують оптимізацію обсягів осадів та підвищення якості води. Також важливим є моделювання та прогнозування змін у водоймищах для своєчасного прийняття рішень щодо їхнього обслуговування [1–8]. Це дозволяє забезпечити довготривале функціонування рекреаційних об'єктів із мінімальними витратами.

В частині опису процесу осадоутворення до розгляду було прийнято зміну концентрації солей у водоймі залежно від швидкості руху води (рис. 1). Опускаючи конвективний член від рівняння імпульсу, можна описати розповсюдження сольової концентрації в озері:

$$\frac{\partial U}{\partial t} + g \frac{\partial \zeta}{\partial x} + v \frac{\partial \xi}{\partial x} + f \frac{U|U|}{H} = 0 \quad (1)$$

$$B \frac{\partial \xi}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} AU = 0 \quad (2)$$

де U – швидкість потоку в напрямку x , м/с; ζ – рівень води, м; ξ – приливні амплітуди, м, D – глибина води, м, H – загальна глибина води ($H = D + \xi$), м; f – коефіцієнт тертя шару осаду (0,0025), д.од.; B – ширина каналу, м; A – площа поперечного перерізу, м; g – гравітаційне прискорення, м/с²; t – час дослідження, с.

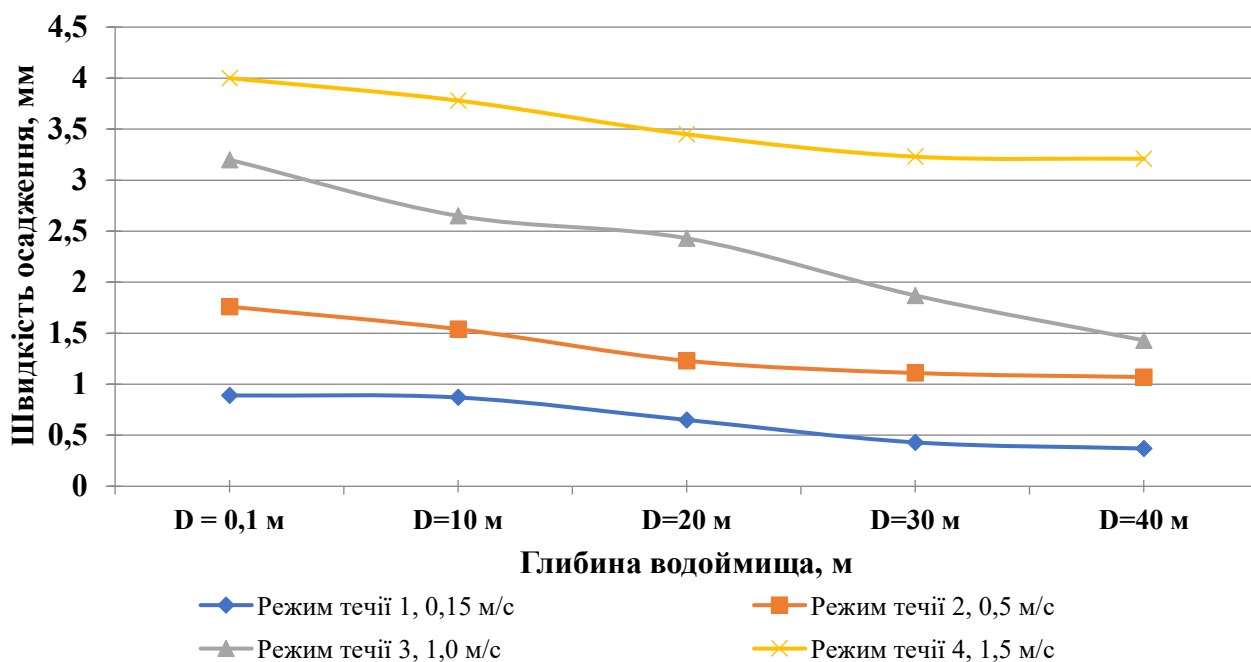


Рис. 1. Амплітуда подачі стоків, U^* (м/с); $f(D, \xi^*) = 0,0025$

Профіль глибини і довжина водоймища L досліджуються на рис. 2 [3], використовуючи значення SL , довжину L озера розраховують чисельно, послідовно оновлюючи SL , оскільки D зменшується поступово. Припускаючи $F \gg \omega$, еквівалент може бути визначено простим аналітичним рішенням:

$$D = \frac{5}{7} \times \frac{(1,33 \times \xi^* f \omega)^{0,5}}{2g^{1,76}} x^{\frac{3}{7}f}, \quad (3)$$

де ω – частота подачі стоків.

Попередні дослідження амплітуд швидкості стоку дозволяє безпосередньо оцінювати критерій $D/U^{*3} > 50 \text{ м}^2/\text{с}^3$ [3] для розшарування з оновленням корективом для шламових вод $1/2D/U^{*4,2} > 50 \text{ м}^2/\text{с}^3$ [4].

Результати, наведені на рис. 2 [3,4], вказують на те, що водоймища з приливними амплітудами $\xi^* > 1,0$ м зазвичай будуть змішані.

Дослідження доводить, що річковий компонент швидкості в сольовому вторгненні ілюструє типові значення довжини органічного вторгнення. Крім того, поєднання цього останнього результату для довжини озера L , рис. 2 [3,4] показано співвідношення L_1/L .

Подачу стічних вод в рекреаційні водоймища природної форми розглядають для транспортування дрібних домішок нижче за течією через нелінійні припливні відшарування. Процес буде обмежений або відсутній відповідними відкладеннями ресуспензійованого шару або протидіючим впливом річкового потоку.

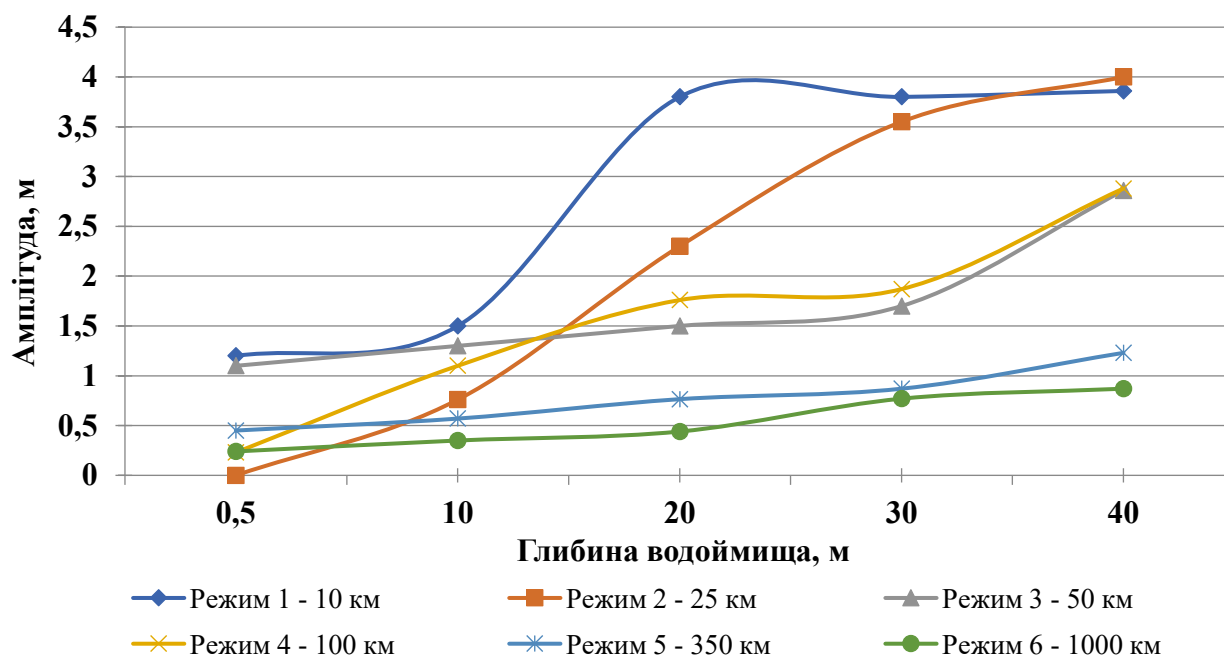


Рис. 2. Довжина водоймища L (км), як $f(D, \xi^*)$, $f = 0,0025$

Припускаючи, що неапаратне очищення весняних приливних варіацій можна охарактеризувати як єдина напівдобова складова різної частоти, коливання будуть транспортувати значно більше відкладень; крім того, максимальний розмір осаду осаджуватися більше, ніж в бухтах. Для підтримки морфологічної стабільності чистих джерел неапаратне (хімічне) очищення має бути врівноважене балансом речовин. Однак це спрощене наближення весняно-неаппільного циклу не враховує роль супутніх складових, зокрема, компонент MSf , який може значно підвищити (очевидну) z_0 в цьому спрощеному дослідженні неаппільної мінливості.

Процес природної дифузії ламінарного потоку техногенної суміші

$$\frac{\partial}{\partial x} K_u(\psi) \frac{\partial \psi}{\partial t} = c(\psi) \frac{\partial \psi}{\partial t} \quad (4)$$

$$\frac{\partial \theta}{\partial x} = \frac{\partial \theta}{\partial \psi} + \frac{\partial \psi}{\partial x}, \quad (5)$$

$$\frac{\partial \psi}{\partial x} = \frac{1}{c(\psi)} \frac{\partial \theta}{\partial x}$$

$$\frac{\partial \psi}{\partial x} = \frac{1}{c(\psi)} \frac{\partial \theta}{\partial x} \quad (6)$$

Розподіл завислих речовин

$$q_x = -D(\psi) \frac{\partial \theta}{\partial x} \quad (7)$$

Одномірний потік

$$\frac{\partial}{\partial x} D(\psi) \frac{\partial \theta}{\partial x} = \frac{\partial \theta}{\partial t} \quad (8)$$

$$D\nabla^2\theta = \frac{\partial\theta}{\partial t}; \frac{\partial\psi}{\partial t} = D\nabla^2\psi. \quad (9)$$

Зміни клімату впливають на біотичні умови для багатьох організмів. Влітку стан озер в значній мірі визначається тривалими періодами літньої стратифікації. Розширена стратифікація збільшить ймовірність аноксії в прохолодних, глибоководних середовищах [6,7].

Збільшення осадоутворення середньої концентрації грубодисперсних речовин планується біля 100 мг/л на 10 м глибини води і становить близько 0,35 мм, або 25 см на рік.

Припливний діапазон в річці Конка варіюється 2...4 м над екстремальними подіями від осені до весни. Річка була достатньо широко вивчена через її життєво важливу роль у судноплаванні. Вузькі ділянки в гирлі 4,5-кілометрового відрізка річки завширшки приблизно 15 м мають середню глибину 1,5 м (Назаренко, 2019). Припливні течії через подібні ділянки можуть перевищувати 0,2 м/с.

За другим сценарієм (техногенне середовище), ця величина може збільшитися втричі в обмеженому часовому просторі.

Третій запропонований сценарій (кавітаційне очищення промислових стоків в рекреаційному озері) дає результати 146 мг/л на 6 м глибину, що становить 0,39 мм (28 см/рік). Таким чином, моделювання відпрацює майбутні сценарії для охоплення відповідей на весь спектр примусових циклів.

На рис. 3 наглядно представлені результати досліджень відновлення води кавітаційним методом до 35 м³/год при 0,0001 мкм завислих речовин для техногенного сценарію. Зниження обсягу при 0,001 мкм до 22 м³/год характеризує екологічний сценарій.

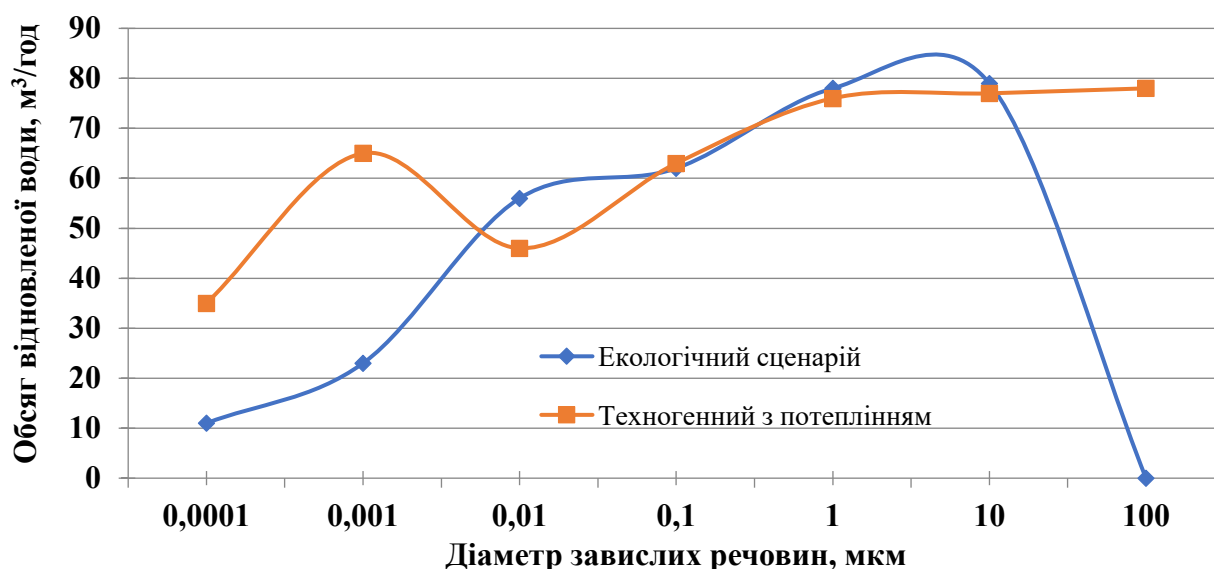


Рис. 3. Соціальний та технологічний ефект седиментаційного відновлення стічних потоків

Виконаними під час поточного дослідження розрахунками підтверджена економія більш ніж 1350000 м³/рік відновленої води та близько 250000 кг осаду по одному металургійному регіону.

Висновки. Будівництво рекреаційних водоймищ є важливим елементом стратегії сталого розвитку регіонів. Вони забезпечують екологічну рівновагу, підвищують якість життя населення та сприяють економічному зростанню. Подальше впровадження таких проєктів вимагає міждисциплінарного підходу та врахування специфіки кожного регіону.

У підсумку дослідження отримано математичну модель седиментації осаду та підвищення продуктивності кавітаційної седиментації з 14 до 7,6 годин для різних техногенних сумішей, запропоновано методологію підвищення концентрації донних відкладень залежно від коефіцієнту тертя від 0,0025 до 0,125, виявлено оптимальну довжину водоймища для максимізації наносів. Результати дослідження підтверджують можливість економії більш ніж 1350000 м³/рік відновленої води та біля 250000 кг осаду/рік по одному металургійному регіону.

Перелік посилань

1. Назаренко, О.М. (2018). *Ризик менеджмент водокористувачів річки Дніпро. Монографія.* Запоріжжя.
2. Prandle, D. (2009). *Estuaries: Dynamics, mixing, sedimentation and morphology.* Cambridge: Cambridge University Press. <https://doi.org/10.1017/CBO9780511576096>
3. Prandle, D. (2004). Saline intrusion in partially mixed estuaries. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 59(3), 385–397.
4. Simpson, J., & Hunter, J. (1974). Fronts in the Irish Sea. *Nature*, 250, 404–406. <https://doi.org/10.1038/250404a0>
5. Бондар, О.І., Закорчевна, Н.Б., & Цветкова, А.М. (2021). *Проблеми водозабезпечення населення питною водою у зв'язку із поглибленням дефіциту доступних водних ресурсів.*
6. Назаренко, О. М., & Березовська, А. О. Стратегія живлення водного режиму басейну інтегральним методом. *Матеріали регіональної науково-практичної конференції (22 березня 2024 р.)*[Текст]:[До Всесвітнього дня води].–Дніпро: ДДАЕУ, 2024.–112 с. Матеріали збірника наукових праць друкуються за результатами проведення регіональної науково-практичної конференції 22 березня 2024 р., 70.
7. Рябенко, О. А., Назаренко, О. М., Назаренко, І. А., & Кушнарченко, О. П. (2018). Моделювання відновлення прісних вод екосистеми в умовах зміни клімату. *Вісник Національного університету водного господарства та природокористування. Технічні науки*, (2), 126–134.
8. Назаренко, О. М., Назаренко, І. А., & Копакова, Л. А. (2018). Моделювання сталості водно-хімічного режиму системи водопостачання в умовах глобального потепління. *Науковий вісник будівництва*, (93, № 3), 236–240.

ABSTRACT

Purpose. The study is a feasibility analysis of recreational reservoir constructions to provide ecosystem services, increase their efficiency, and long-term sustainability.

Methods. The study is based on the processing of data from long-term observations on climatic and hydrological indicators of river basins in the southern regions of Ukraine. Bathymetric sensors installed in channels to monitor water level, precipitation and changes in water balance were used to collect data, soil moisture sensors to measure moisture at different depths, with three-time control of

critical summer temperatures, which allowed obtaining data on the distribution of moisture in the soil during drought.

Findings. A mathematical model of sedimentation was defined and productivity rise of cavitation sedimentation from 14 to 7.6 hours for various technogenic mixtures was obtained, a methodology for increasing the concentration of bottom sediments depending on the friction coefficient from 0.0025 to 0.125 was proposed, and the optimal length of the reservoir for maximizing sediments was identified. The possibility of saving more than 1,350,000 m³/year of reclaimed water and about 250,000 kg of sludge/year per metallurgical region is confirmed.

The originality. Second- and third-order mathematical models to describe sedimentation processes in recreational reservoirs were proposed. The influence of salt mixing on sedimentation processes in techno park conditions was investigated for the first time. Dependences between length of salt intrusion and geometric parameters of the reservoir were determined. Optimal geometric parameters of reservoirs to ensure maximum efficiency of pollution sedimentation were proposed. New algorithms for sedimentation modeling considering impact of geometric and physicochemical parameters of the reservoir were developed. Dependence between the bottom erosion characteristics of the reservoirs and their ability to accumulate sediments under different operating conditions was determined.

Practical implementation. the results of the study allow to implement modern methods of water resources management in techno parks, reducing the man-made load on the environment. The proposed recommendations on the geometric parameters of water bodies can be used for the design of new or reconstruction of existing recreational water bodies, the proposed approaches contribute to a significant reduction in the concentration of pollutants in water, improving its quality and creating conditions for biodiversity restoration.

Keywords: *water resources, sedimentation of sediment, geometric parameters of water bodies, man-made load.*

дата першого надходження статті до видання	01.07.2025
дата прийняття до друку статті після рецензування	03.08.2025
дата публікації (оприлюднення)	06.09.2025