

УДК 712.5:631.347:502.5

**Marina Kravchenko**, Candidate of Technical Sciences (PhD), Associate Professor of the Department of Environmental Protection Technologies and Labour Protection  
ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0003-0428-6440> **e-mail:** [marina-diek@ukr.net](mailto:marina-diek@ukr.net)

**Tetiana Tkachenko**, Doctor of Technical Sciences, Professor of the Department of Environmental Protection Technologies and Labour Protection  
ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0003-2105-5951> **e-mail:** [tkachenkoknuba@gmail.com](mailto:tkachenkoknuba@gmail.com)

Kyiv National University of Construction and Architecture, Kyiv, Ukraine

## DEVELOPMENT OF METHODS FOR QUANTIFYING THE EFFECTIVENESS OF RAIN GARDEN DESIGN IN THE CONTEXT OF RAINWATER MANAGEMENT

**Abstract.** Rain gardens are a common green infrastructure practice used in urban environments to address water quality and hydrological impacts of stormwater. This goal is achieved by designing structures that consist of an upper plant layer planted in a soil environment with or without a drainage system. Rain gardens provide three main functions in stormwater management: reducing the volume of rainwater runoff from the catchment area; reducing the rate of peak water flows in the sewer system, which is of particular importance for preventing hydrological overloading of the sewer network; and controlling water quality, which contributes to groundwater conservation. The design of rain gardens is based on the parameters and requirements associated with these functions. The structure is defined in detail and an appropriate design method is chosen to ensure optimal parameters such as size and depth. A scientometric analysis of studies, including various numerical models, shows that key original scientific contributions come from different countries, so most rain garden designs installed in different geographical areas are based on general recommendations, which often leads to operational failures. This work aims to model the calculation of the main parameters of rain garden design and methods for quantifying hydrological efficiency for stormwater management and support widespread implementation in the urban environment. A numerical model has been developed that allows calculating the effective area of a rain garden structure for a single rain event under the condition that the structure is not overfilled and does not leak. Methods for assessing the three main functions of rain gardens in the field of stormwater management are proposed: a method for assessing the reduction of stormwater runoff; a method for assessing the reduction of annual runoff; a method for assessing the reduction of peak runoff; and a method for assessing the reduction of the total amount of pollutants by the rain garden structure.

**Keywords:** rain garden, rainwater, stormwater management, modeling, rain garden parameters.

М.В. Кравченко, Т.М. Ткаченко

Київський національний університет будівництва і архітектури, м. Київ, Україна

## РОЗРОБКА МЕТОДІВ КІЛЬКІСНОЇ ОЦІНКИ ЕФЕКТИВНОСТІ КОНСТРУКЦІЇ ДОЩОВОГО САДУ У КОНТЕКСТІ УПРАВЛІННЯ ДОЩОВИМИ ВОДАМИ

**Анотація.** Дощові сади – це поширена практика «зеленої» інфраструктури, яка використовується в міських умовах навколишнього середовища для вирішення проблем, пов'язаних з якістю води та гідрологічним впливом зливових вод. Ця мета досягається проєктуванням конструкцій, які складаються з верхнього рослинного шару, висадженого в ґрунтового середовищі з дренажною системою або без неї. Конструкції дощових садів забезпечують три основні функції в галузі управління зливовими водами: зменшення обсягу стоку дощової води з площі водозбірного басейну; зменшення швидкості пікових потоків води в каналізаційній системі, що має особливе значення для запобігання гідрологічному перевантаженню каналізаційної мережі; контроль якості води, що сприяє збереженню підземних вод. Проєктування дощових садів ґрунтується на параметрах та вимогах, пов'язаних із зазначеними функціями. При цьому детально визначається його структура та обирається належний метод розрахунку, спрямований на забезпечення оптимальних параметрів, таких як розмір і глибина. Наукометричний аналіз досліджень, включаючи різні числові моделі, показує, що ключові оригінальні наукові внески походять від різних країн, тому більшість конструкцій дощових садів, встановлених у різних географічних районах, базуються на загальних рекомендаціях, що часто призводить до операційних збоїв. Метою роботи є моделювання розрахунку основних параметрів конструкції дощового саду та методів кількісної оцінки гідрологічної ефективності для управління зливовою водою і підтримки широкого впровадження в міському середовищі. Розроблено числову модель, яка дозволяє розраховувати ефективну площу конструкції дощового саду для однієї дощової події та при умові відсутності переповнення конструкції з уникненням її витікання. Запропоновано методи оцінки трьох основних функцій дощових садів в сфері управління зливовими водами: метод оцінки зменшення об'єму зливого стоку; метод оцінки скорочення річного об'єму стоку; метод оцінки зниження об'єму пікового стоку та метод оцінки зниження загальної кількості забруднюючих речовин конструкцією дощового саду.

**Ключові слова:** дощовий сад, дощова вода, управління зливовими водами, моделювання, параметри дощового саду.

<https://doi.org/10.32347/2411-4049.2024.2.19-35>

### Вступ

Управління дощовими водами стало важливим питанням у міських та приміських районах завдяки швидкому урбанізованому розвитку, що значно збільшує непроникність поверхні та призводить до підвищення частоти міських повеней [1]. Однією з найбільш проблематичних змін у кругообігу води в міських умовах є зниження швидкості інфільтрації, тобто швидкості, з якою вода рухається вертикально в ґрунтове середовище. Без поверхневої інфільтрації зменшується поповнення ґрунтових вод, випаровування та збільшується поверхневий стік, що призводить до втрати води з місцевої

системи. Зменшення інфільтрації є особливо актуальною проблемою у містах з комбінованими каналізаційними системами, які швидше перевантажуються стоками, що призводить до викиду неочищеної води безпосередньо в навколишні водні шляхи. Проте ці проблеми можуть бути частково вирішені за допомогою заходів, які дозволяють сповільнювати рух води через міські екосистеми за допомогою «сірої» або «зеленої» інфраструктури. Сіра інфраструктура, до якої відноситься система каналізаційних трубопроводів та водоочисні споруди, є ефективною, але досить дорогою з фінансової точки зору, особливо коли потрібен ремонт або повна модернізація [2].

«Зелена» інфраструктура (ЗІ) відноситься до методів, спрямованих на відновлення гідрологічного циклу шляхом включення природних компонентів у міський ландшафт, що може збільшити перехоплення та інфільтрацію опадів [3]. Це відносно новий підхід, який набув популярності як ефективний засіб зменшення руйнівних наслідків повеней та досягнення кращого балансу між потребами урбанізації та потребами природи [4].

Останніми роками кількість досліджень, що стосуються практики ЗІ в управлінні дощовими водами, прогресивно зростає. Як нещодавній приклад, автори [5] провели всебічний огляд літератури, що стосується ЗІ, дослідивши статті, опубліковані з 1995 по 2019 рік. Аналіз робіт, пошук яких автори здійснювали на основі ключових слів, вказує на те, що більшість статей зосереджено на дослідженні «зеленої» інфраструктури в сфері управління зливовими водами. Наукометричний огляд робіт, пов'язаних з ЗІ, опублікованих у 1999–2021 роках, нещодавно завершили і автори [6], надавши багато корисної інформації з цієї тематики. А в рамках дослідження [7] було вивчено роль ЗІ в управлінні ризиками міських повеней. Автори проаналізували особливості використання ЗІ для зменшення проблем затоплення міст, дослідивши низку викликів і пріоритетів, які необхідно вирішити, щоб включити ЗІ у поточні системи управління зливовими водами.

«Зелена» інфраструктура включає будь-яку систему, яка забезпечує позитивні або стійкі екологічні переваги, включаючи такі як водопроникний тротуар, резервуари для дощової води та сонячні панелі, проте термін «зелений» безпосередньо відноситься до типів інфраструктури, де рослинність є невід'ємною частиною їх дизайну та функціонального забезпечення. До таких систем ЗІ відносяться міські сади, парки, ліси, заповідники, а також системи, які включають інженерні компоненти, такі як «зелені» конструкції, біозахисні смуги, водно-болотні угіддя [8, 9].

«Зелені» конструкції – це біотехнічні системи, в яких конструкції будівель і споруд та окремі елементи поєднані з живими рослинами, складаючи єдину систему живої і неживої складової біогеоценозів сучасних міст в концепції сталого розвитку [10].

Такі види «зелених» конструкцій, як «зелені» дахи та дощові сади, належать до біоретенційних систем на основі вертикальної інфільтрації води з поверхневим її утриманням шаром рослинності. Вони широко обговорюються в технічній і науковій літературі [11, 12], де стверджується, що запровадження «зелених» конструкцій може бути перспективним рішенням для зменшення негативних наслідків урбанізації і, зокрема, для управління дощовими опадами, особливо низької та середньої інтенсивності, які можуть становити більшу частину річного обсягу [13, 14].

Дощові сади, які часто називають системами біоутримання або біоінфільтрацією, були рекомендовані для локального контролю зливових стоків, безпосередньо біля джерела, через їх економічну ефективність і позитивний вплив на відновлення екосистем [15].

Зазвичай ці конструкції розташовують у місцевості низовин, і завдяки процесам інфільтрації та адсорбції, що відбуваються в системі «рослини – мікробна популяція – структурні шари», досягається ефективне очищення дощової води на обмеженій площі. Дощові сади, в основному, використовуються для управління дощовою водою, що стікає з поверхні до 1 га. До основних переваг дощових садів можна віднести:

- зменшення обсягу стоку дощової води з площі водозбірного басейну [16];
- зменшення швидкості пікових потоків води в каналізаційній системі, що має особливе значення для запобігання гідрологічному перевантаженню каналізаційної мережі [17];
- контроль якості води, що сприяє збереженню підземних вод [18].

Наприклад, авторами [19] було оцінено ефективність дощового саду, в який стікає злизова вода з території автостоянки, та показано зниження пікових швидкостей потоку води з паркінгу на 99%. Дослідження, проведене авторами [20] за допомогою моделі Storm Water Management Model (SWMM) Агентства з охорони навколишнього середовища США з використанням дощових садів, вказує на те, що навіть незначні зміни параметрів дощового саду, такі як ступінь водопроникності, розміри шарів та вибір матеріалів, суттєво впливають на змодельований піковий потік.

Відсоткове зменшення об'єму злизової води, що відводиться з площі водозбірного басейну за рахунок використання дощових садів, залежить від інтенсивності опадів та їх тривалості, а також від конструктивних особливостей дощового саду. Ефективність зменшення об'єму стоку була досліджена в окремих роботах [21–23].

За даними авторів [22], загальний відсоток зменшення обсягу стоку знаходиться в діапазоні від 50 до 98% для різних досліджень. За даними [23], зменшення обсягу стоку за допомогою дощових садів знаходиться в діапазоні від 23 до 97%, залежно від кліматичних умов, в яких проводились дослідження. Отже, використання таких рішень, як конструкції дощових садів, дозволяє знизити ймовірність перевантаження дощової або комбінованої каналізаційної інфраструктури, частково вирішивши проблему управління міськими дощовими водами [24].

Інші переваги конструкцій дощового саду включають: покращення естетики району за рахунок озеленення, покращення середовища існування дикої природи, зменшення ерозії ґрунту та поповнення ґрунтових вод [25] і, таким чином, збільшення базових потоків до місцевих водних шляхів.

Класична конструкція дощового саду складається з наступних елементів (рис. 1):

- *глибина шару для води* або шар для утворення стовпа води – це шар, призначений для стікання і утворення стовпа води, що дозволяє зменшити швидкість її потоку для інфільтрації в нижні шари конструкції;
- *ґрунтопокривні матеріали*: шар мульчі/гальки/каміння, який використовується для пом'якшення ерозії ґрунту та забезпечення естетичного вигляду дощового саду. Додатково може бути доповнений гравієм для зменшення поверхневої ерозії;

- *рослинний покрив*: покрив з багаторічних рослинних видів, які дозволяють ефективно контролювати ерозію ґрунту, стабілізувати його фізико-хімічні властивості, збільшуючи інфільтрацію, а також затримувати забруднюючі речовини у зливових водах, перш ніж вони потраплять у нижні шари конструкції;

- *трав'яний покрив*: додатковий шар трав'яного покриву для доповнення дизайну дощового саду та зменшення швидкості потоку зливової води;

- *ґрунтова суміш*: поживне середовище для вирощування рослин, яке, зазвичай, є сумішшю ґрунту, піску, супіску чи суглинку;

- *інфільтраційний шар*: шар, призначений для підвищення ефективності водопроникності ґрунтового шару. Цей шар, як правило, складається з дрібного гравію або крупнозернистого піску, оскільки, окрім того, що він повинен бути добре дренажним, він має бути і достатньо міцним, щоб витримати вагу верхніх шарів;

- *гравійний шар*: шар середнього чи крупного гравію, призначений для утримання та тимчасового зберігання води з подальшим її відведенням до дренажної системи;

- *дренажна система*: інженерно-технічна конструкція, призначена для збору і відведення інфільтрованої води з дощового саду. Під кожним дощовим садом може бути розташовано резервуари для накопичення відведеної з дренажної системи води, яку можна використовувати як технічну для побутових потреб (якщо дощовий сад розташований біля житлового будинку), для миття автомобілів (якщо дощовий сад розташований біля СТО, автозаправок), для поливу та зрошення ділянок із зеленими насадженнями магістральних вулиць, де подача води обмежена (якщо дощовий сад розташований вздовж автомагістралей).

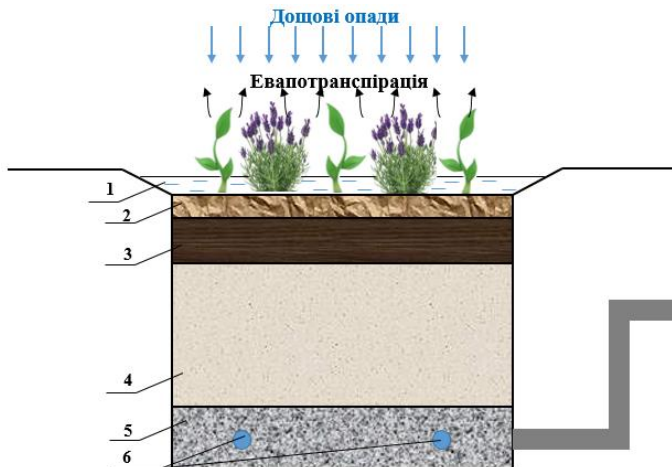


Рис. 1. Основні елементи конструкції дощового саду в перерізі (авторська розробка): 1 – шар для утворення стовпа води; 2 – шар ґрунтопокривних матеріалів; 3 – шар ґрунтової суміші для висадки рослин; 4 – інфільтраційний/проміжний шар; 5 – шар гравію; 6 – дренажна система

Проектування дощових садів ґрунтується на параметрах та вимогах, пов'язаних із зазначеними функціями. При цьому детально визначається його структура та обирається належний метод розрахунку, спрямований на

забезпечення оптимальних параметрів, таких як розмір і глибина. Одним із основних методів таких розрахунків є чисельне моделювання, підходи до якого залишаються найбільш широко використовуваним інструментом, що дозволяє підтримувати та вдосконалювати процеси планування, проєктування і управління в напрямку концепції сталого розвитку.

Моделювання має вирішальне значення для досліджень, пов'язаних із дощовими садами, оскільки цей метод допомагає передбачити та оцінити особливості гідрології і якості води систем, що працюють у різних умовах [26, 27]. Крім того, моделювання допомагає розробити низку робочих умов і отримати відповідні дані для підвищення ефективності застосування дощових садів, що не завжди можна отримати експериментальним шляхом. Ця інформація має важливе значення для інженерів, дизайнерів, проєктувальників систем водовідведення та спеціалістів, які впроваджують конструкції дощових садів, спеціально розроблені для конкретних потреб.

**Метою роботи** є моделювання розрахунку основних параметрів конструкції дощового саду та методів кількісної оцінки гідрологічної ефективності для управління зливовою водою і підтримки широкого впровадження в міському середовищі.

## Основна частина

Розрахунок відповідної площі конструкції дощового саду, як засобу губки, має важливе значення в процесі прийняття рішень щодо вирішення проблем міського управління дощовими водами. Згідно з характеристикою структури дощових садів, метод інфільтрації на основі закону Дарсі є найбільш поширеним у більшості країн світу та дозволяє розраховувати площу дощового саду, яку в літературі позначають як  $A_f$  (м<sup>2</sup>) [28] та визначають згідно з рівнянням:

$$A_f = \frac{A_d \cdot H \cdot \varphi \cdot d_f}{K \cdot (h + d_f) \cdot t_f}, \quad (1)$$

де  $A_d$  – водозбірна площа, м<sup>2</sup>;  $\varphi$  – коефіцієнт стоку;  $d_f$  – глибина дощового саду, включаючи шар ґрунту для висадки рослин, м;  $K$  – коефіцієнт водопроникності шару ґрунту, м/с;  $h$  – середня глибина водоносного шару, що дорівнює половині максимальної глибини ( $h = h_{max}/2$ ), м;  $t_f$  – час просочування води з водоносного шару через ґрунт, с.

Цей метод базується на інфільтраційній здатності та використанні закону Дарсі, але він ігнорує потенціал структурного розташування та вплив рослин на водоносний шар.

Окрім вищезазначеного методу, існують ще два досить поширені підходи, такі як метод розрахунку ефективного об'єму поверхневого утримуючого шару дощових садів, запропонований авторами [29], та метод оцінки пропорцій на основі використання величини площі водозбору, описаний в посібнику з проєктування конструкцій для очищення зливових вод [30].

Метод розрахунку ефективного об'єму поверхневого утримуючого шару базується на рівнянні водного балансу з використанням об'єму водоносного шару для зменшення стоку. Цей метод враховує вплив рослин, але не враховує інфільтраційну та затримувальну здатність дощового саду, яка в основному використовується для обробки стоку першого змиву, при якому опади

становлять близько 12 мм. Метод оцінки пропорцій є простим методом, що врахує площу водозбору, помножену на відповідний коефіцієнт пропорційності. При цьому точність методу невисока і він має обмежену застосовність до характеристик опадів та різних стандартів.

Вищезазначені три методи, які базуються на законі Дарсі, мають свої особливості, але також і обмеження. Вибір методу може бути здійснено шляхом аналізу структурних характеристик дощового саду, його функціональної спрямованості, стандартів проектування, характеристик ґрунту та інших факторів. Метод інфільтрації на основі закону Дарсі підходить для дощових садів з піщаним ґрунтом; метод розрахунку ефективного об'єму поверхневого утримуючого шару підходить для дощових садів з глинистими ґрунтами та достатньо великими площами; метод оцінки пропорцій в основному використовується для оцінки розрахунків з відомими та розгорнутими параметрами дощового саду.

Розрахунок ефективної площі дощового саду повинен включати процес інфільтрації, вплив рослинного покриву на водоносний горизонт, об'єм басейну води та інші фактори, тому було розроблено метод повного водного балансу, що включає інфільтрацію та утримання води. Для того, щоб досягнути максимально ефективного об'єму утримання води дощовим садом, будемо вважати, що коефіцієнт водопроникності  $K \geq 1 \cdot 10^{-5}$ , м/с, а зливовий потік з непроникної поверхні збирається в дощовий сад, що зверху донизу складається з наступних шарів: рослинний покрив, шар для утворення стовпа води, шар ґрунтової суміші для висадки рослин, інфільтраційний/проміжний (піщаний) шар та шар гравію.

До моменту, коли дощовий стік виходить за межі накопичувальних та інфільтраційних можливостей дощового саду і вода починає переповнювати розрахункову область (рис. 2), існує баланс між гідрологічними елементами, який можна описати у вигляді рівняння:

$$V + V_1 = X + Y + Z + V_2 + W_1, \quad (2)$$

де  $V$  – об'єм дощового стоку, що збирається в конструкцію дощового саду за розрахункові періоди, м<sup>3</sup>;  $V_1$  – об'єм стоку, накопичений дощовим садом на початку розрахункових періодів, м<sup>3</sup>;  $X$  – об'єм інфільтрованої дощової води за розрахункові періоди, м<sup>3</sup>;  $Y$  – об'єм випаровування з дощового саду протягом розрахункових періодів, м<sup>3</sup>;  $Z$  – об'єм дощової води, яка насичує товщу сипучої ґрунтової суміші за розрахункові періоди, м<sup>3</sup>;  $V_2$  – об'єм утриманої дощової води конструкцією дощового саду в кінці розрахункових періодів, м<sup>3</sup>;  $W_1$  – об'єм переливу дощової води протягом розрахункових періодів, м<sup>3</sup>.

Оскільки розрахунковий період може не збігатися з моментом початку дощової події, об'єм випаровування можна вважати мінімальним, тому величиною  $Y$  можна знехтувати. При проектуванні конструкції дощового саду об'єм переливу дощової води  $W_1$  можна вважати рівним 0. Якщо припустити, що на початок розрахункового періоду в конструкції дощового саду води не було ( $V_1 = 0$ ) і об'єм рівня води від початку до кінця розрахункового періоду був  $V_{bassin}$ , то, враховуючи, що  $V_{bassin} = V_2 - V_1$ , можна записати  $V_{bassin} = V_2$ . Тоді рівняння (2) приймає вигляд:

$$V = X + Z + V_{bassin}. \quad (3)$$

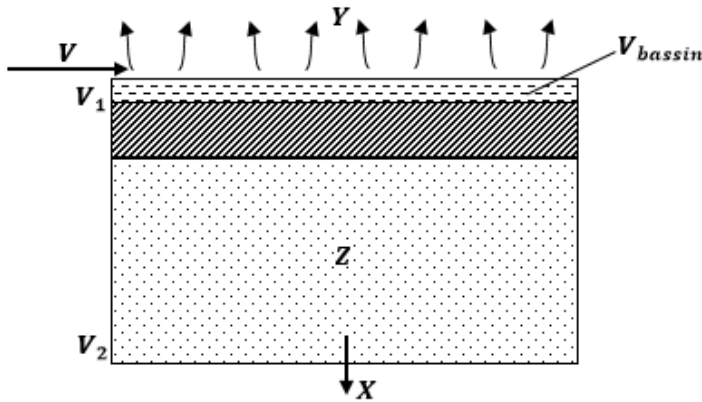


Рис. 2. Схематична модель, яка використовувалась для розробки моделі розрахунку площі конструкції дощового саду

Кількість опадів на одиницю площі дощового саду  $R_Y$ ,  $\text{м}^3/\text{м}^2$ , протягом розрахункових періодів можна визначити, враховуючи інтенсивність опадів  $q(T)$  для відповідного кліматичного району та інтегруючи (3):

$$R_Y = \int_0^{\tau} q(T) dT, \quad (4)$$

де  $\tau$  – розрахунковий період, хв;  $T$  – тривалість опадів, хв.

Об'єм дощового стоку, що збирається в конструкції дощового саду за розрахункові періоди, розраховується згідно з рівнянням (5):

$$V = A_{bassin} \cdot R_Y \cdot \varphi \cdot 10^{-4}, \quad (5)$$

де  $A_{bassin}$  – площа басейну водозбору конструкції дощового саду,  $\text{м}^2$ ;  $\varphi$  – коефіцієнт стоку.

Розрахунок об'єму інфільтрованої дощової води за розрахункові періоди показано у вигляді формули (6):

$$X = \frac{K \cdot (h_{sponge} + h) \cdot A_{sponge} \cdot \tau \cdot 60}{h_{sponge}}, \quad (6)$$

де  $K$  – коефіцієнт водопроникності шару ґрунтової суміші для висадки рослин,  $\text{м}/\text{с}$ ;  $h_{sponge}$  – глибина дощового саду,  $\text{м}$ ;  $h$  – середня глибина водоносного шару (шару для утворення висоти стовпа води),  $\text{м}$ ;  $A_{sponge}$  – площа дощового саду, як засобу-губки,  $\text{м}^2$ ;  $\tau$  – розрахунковий період, хв, який часто розраховується відповідно до кількості опадів протягом 120 хв.

Відповідно до особливостей конструкції дощового саду та різних фізико-хімічних властивостей ґрунтового середовища, значення  $K$ , введене у формулі (6), можна описати, виходячи з наступних трьох умов:

1. При умові, що в конструкції дощового саду передбачено шар з непроникної геотекстильної мембрани або коефіцієнт проникності інфільтраційного шару  $K_2$  значно менше коефіцієнта водопроникності ґрунтової суміші для висадки рослин  $K_1$ , тобто  $K_2 \ll K_1$  (за інших умов, переважно,  $K_2 > K_1$ ),  $K_2$  можна вважати обмежуючим фактором і об'ємом інфільтрованої дощової води  $X$  можна знехтувати, тобто  $X = 0$ .

2. При умові, що в конструкції дощового саду передбачена дренажна система для збору та відведення дощової води або  $K_2 \gg K_1$ , можна вважати, що  $K = K_1$ .

3. При умові, що  $K_2 < K_1$ , можна вважати, що  $K = K_2$ .

При умові, що об'єм стоку в конструкції дощового саду перевищує об'єм інфільтрованої води в шарах конструкції за той самий період, дощовий стік неминуче залишається в системі. Припустимо, що висота рослинного покриву в дощовому саду перевищує висоту шару для утворення стовпа води, тоді розрахунок фактичного об'єму  $V_{bassin}$  показано у вигляді формули (7):

$$V_{bassin} = A_{sponge} \cdot h_{max} \cdot (1 - f_v) \cdot 10^{-3}, \quad (7)$$

де  $h_{max}$  – максимальна глибина шару для утворення стовпа води;  $f_v$  – відсоток площі поперечного перерізу рослинного покриву від площі поверхні шару для утворення стовпа води, що зазвичай дорівнює 20%.

Об'єм дощової води, яка насичує товщу сипучої ґрунтової суміші за розрахункові періоди, визначається як

$$Z = n \cdot A_{sponge} \cdot h_{sponge}, \quad (8)$$

де  $n$  – середня пористість шару ґрунтової суміші для висадки рослин та інфільтраційного шару, яку приймають для розрахунку, зазвичай, 0,3.

Враховуючи наведені вище формули, розрахунок площі дощового саду, як засобу губки, показано за формулою (9):

$$A_{sponge} = \frac{A_{bassin} \cdot R_Y \cdot \varphi \cdot h_{sponge}}{60 \cdot K \cdot \tau (h_{sponge} + h) + h_{max} \cdot (1 - f_v) \cdot h_{sponge} + n \cdot h_{sponge}^2}. \quad (9)$$

При умові, що  $X = 0$ , тобто  $K = 0$ , формула (9) може бути змінена на:

$$A_{sponge} = \frac{A_{bassin} \cdot R_Y \cdot \varphi}{h_{max} \cdot (1 - f_v) + n \cdot h_{sponge}}. \quad (10)$$

Запропонований метод розрахунку площі конструкції дощового саду розроблено для однієї дощової події та при умові відсутності переповнення конструкції дощового саду водою і уникнення її витікання. Розроблений метод рекомендовано також для використання розрахунку ефективної площі конструкції дощового саду для ситуації, коли вода з очищеного дощового стоку буде збиратися в резервуар для повторного використання. Варто враховувати, що дощові сади призначені для часто повторюваних опадів, а не для окремих екстремальних подій, тому при розрахунку ефективної площі конструкції дощового саду кількість опадів слід обирати з урахуванням загальних місцевих характеристик опадів.

Так як конструкція дощового саду забезпечує три основні функції в сфері управління зливовими водами: зменшення об'єму зливого стоку, зменшення швидкості пікового стоку та зменшення загального вмісту забруднюючих речовин у воді, нами розроблено метод оцінки кількісних розрахунків для цих функцій.

Метод оцінки зменшення об'єму зливого стоку конструкцією дощового саду. Припустимо, що розрахунковий період повтору певної дощової події дорівнює  $N_1$ , а відповідна кількість опадів при цьому складає  $R$ , мм. Період

повтору  $N_1$  – це проміжок часу, виражений у роках, за який очікується, що певна дощова подія з відповідною кількістю опадів буде повторена або інтенсивність якої буде перевищено, в порівнянні з попередньою.

Крива, яка описує зміну інтенсивності дощового стоку в залежності від витрат дощової води  $Q$ ,  $\text{м}^3/\text{с}$ , та тривалості опадів  $T$ , хв, представлена на рисунку 3.

Прийнявши відповідну площу дощового саду як  $A_{\text{sponge1}}$  та об'єм утриманої дощовим садом води як  $U_1$ , відповідно до формули (2) рівняння водного балансу можна записати як  $U_1 = X + V_{\text{bassin}} + Z$ . Значенням  $X$  можна знехтувати, якщо на дно конструкції дощового саду влаштувати шар водонепроникної мембрани або при умові, що  $K_2 \ll K_1$ .

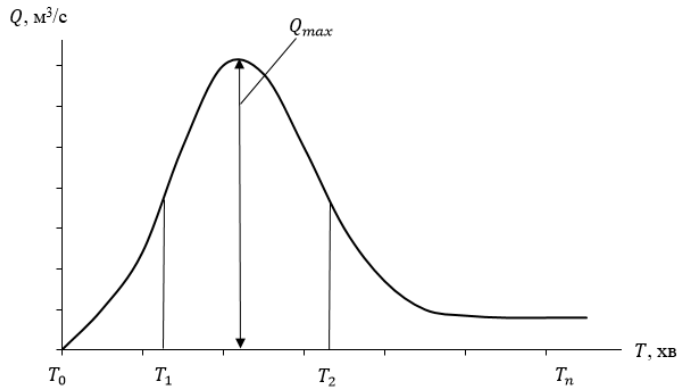


Рис. 3. Крива інтенсивності дощового стоку

При умові, що період повтору дощової події  $N \geq N_1$ , можна вважати, що  $U' = U_1$ . В іншому випадку, при умові, що період повтору  $N \leq N_1$ , можна вважати  $U' = U$ . І коефіцієнт зменшення об'єму зливого стоку можна записати як відношення:

$$\eta = \frac{U'}{U} \cdot 100\%, \quad (11)$$

де  $U'$  – об'єм стоку, утриманого конструкцією дощового саду,  $\text{м}^3$ ;  $U$  – об'єм вихідного стоку,  $\text{м}^3$ .

*Метод оцінки скорочення річного об'єму стоку.* При розробці методу оцінки скорочення річного об'єму стоку було використано метод розрахунку добової кількості опадів. Якщо розрахункова кількість опадів становить  $R$ , мм, то на основі даних кліматичних спостережень та довготривалої статистики опадів можна вважати, що: за рік випало  $n$  опадів; кількість опадів, що перевищувала або дорівнювала  $R$ , мм, становила  $a$ ; кількість опадів, менших за  $R$ , мм, була  $b$ , тоді  $n = a + b$ , а відповідна кількість опадів для кожної дощової події становить  $R_i$  ( $i = 1, 2, \dots, n$ ).

Якщо немає даних про кількість опадів на певній кліматичній території, цю інформацію можна отримати з даних про щоденну кількість опадів, які, у випадку України, оновлюються на сайті [31]. Тоді річний об'єм зменшення стоку та коефіцієнт річного скорочення стоку представлені у формулах (12) та (13) як:

$$U'' = a \cdot \varphi \cdot R \cdot A_{bassin} + \sum_{i=1}^b \varphi \cdot R_i \cdot A_{bassin}. \quad (12)$$

$$\eta' = \frac{U''}{\sum_{i=1}^n \varphi \cdot R_i \cdot A_{bassin}} \cdot 100\% = \frac{a \cdot R + \sum_{i=1}^b R_i}{\sum_{i=1}^n R_i} \cdot 100\%, \quad (13)$$

де  $U''$  – річний об'єм зменшення зливого стоку, м<sup>3</sup>;  $\eta'$  – коефіцієнт річного скорочення стоку.

*Метод оцінки зниження об'єму пікового стоку конструкцією дощового саду.* Враховуючи об'єм утриманої дощовим садом води та об'єм пікового стоку, крива, яка описує процес зменшення пікового стоку води під час дощової події, представлена на рисунку 4.

Об'єм утриманої дощовим садом води  $U_1$  можна записати як:

$$U_1 = \varphi \cdot A_{bassin} \cdot \int_{T_0}^{T_n} q(T) dT, \quad (14)$$

де  $T_0$  – час початку утворення дощового стоку, хв;  $T_n$  – тривалість стоку, хв.

Об'єм стоку, який залежить від об'єму води, утриманої конструкцією дощового саду, відповідає розміру заштрихованої ділянки, як показано на рисунку 4. Тоді об'єм пікового стоку, що відповідає часу  $T_2$ , та відповідний коефіцієнт зниження пікового рівня стоку описані наступними формулами:

$$Q' = Q_{max} - U_1. \quad (15)$$

$$\theta = \frac{Q_{max} - Q}{Q_{max}}, \quad (16)$$

де  $Q'$  – об'єм утриманого пікового стоку, м<sup>3</sup>;  $Q_{max}$  – максимальний об'єм пікового стоку, м<sup>3</sup>;  $U_1$  – об'єм утриманої дощовим садом води, м<sup>3</sup>;  $\theta$  – коефіцієнт зниження пікового рівня стоку.

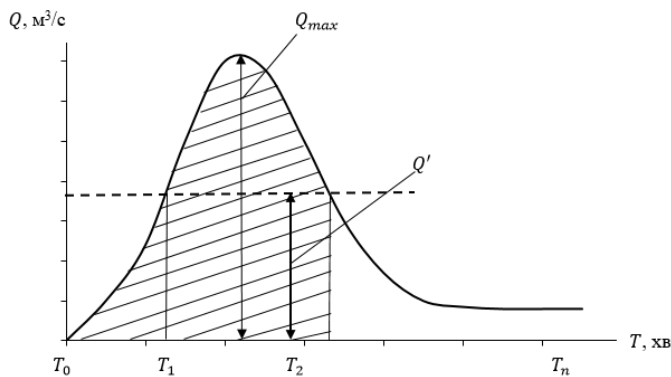


Рис. 4. Крива зменшення пікового стоку води під час дощової події

*Метод оцінки зниження загальної кількості забруднюючих речовин конструкцією дощового саду.* Позначимо зміну інтенсивності та концентрації забруднюючих речовин зливого стоку в часі через параметри  $q(T)$  і  $C(T)$ , причому концентрація зменшується зі збільшенням часу. Залежно від структури та особливостей конструкції дощового саду, загальне зменшення кількості забруднюючих речовин може бути розглянуто у двох випадках.

1. *Метод оцінки зменшення забруднюючих речовин конструкцією дощового саду під час однієї дощової події.*

*Перший випадок.* Якщо в конструкції дощового саду передбачено дренажну систему з непроникних і неперфорованих колекторних труб, які зазвичай встановлюються в шарі ґравію, це означає, що стік, який надходить у дощовий сад, збирається всередині конструкції. У цьому випадку можна вважати, що забруднюючі речовини видаляються конструкцією дощового саду в повному обсязі, що можна описати як:

$$m = M - U' \cdot C_r, \quad (17)$$

$$\varepsilon = \frac{m}{M} \cdot 100\%, \quad (18)$$

де  $m$  – загальна кількість забруднюючих речовин, видалених конструкцією дощового саду, мг;  $M$  – загальна кількість забруднюючих речовин, що надходять до конструкції дощового саду, мг;  $U'$  – об'єм утриманої дощовим садом води;  $C_r$  – середня концентрація забруднюючих речовин у воді однієї дощової події, мг/дм<sup>3</sup>;  $\varepsilon$  – загальний коефіцієнт зменшення забруднюючих речовин у стоці.

Середню концентрацію забруднюючих речовин у воді однієї дощової події можна розрахувати, виходячи з рівняння (19):

$$C_r = \frac{M}{U} = \frac{\int_{T_0}^{T_n} c(T) \cdot q(T) dT}{q(T) \Delta T} = \frac{\sum c(T) \cdot q(T) \Delta T}{\sum q(T) \Delta T}, \quad (19)$$

де  $U$  – загальний об'єм вихідного дощового стоку, м<sup>3</sup>;  $T_0$  – час початку утворення стоку, хв;  $T_n$  – тривалість стоку, хв;  $\Delta T$  – час інтервалу вибірки (період часу між послідовними вимірюваннями або відбором проб), хв.

Тоді, враховуючи рівняння (14), загальна кількість забруднюючих речовин, видалених конструкцією дощового саду, буде визначатись:

$$m = \varphi \cdot A_{bassin} \cdot C_r \cdot \int_{T_0}^{T_n} q(T) dT. \quad (20)$$

*Другий випадок.* Якщо в конструкції дощового саду передбачено водопроникний шар та наявна дренажна система з перфорованих труб у шарі ґравію, то можна вважати, що забруднюючі речовини видаляються конструкцією дощового саду частково.

Тоді:

$$M = m - U' \cdot C, \quad (21)$$

$$\varepsilon = \frac{m}{M} \cdot 100\%, \quad (22)$$

де  $C$  – середня концентрація забруднюючих речовин у стоці на виході з конструкції дощового саду, мг/дм<sup>3</sup>.

2. *Метод оцінки річного зменшення забруднюючих речовин конструкцією дощового саду.*

Для першого випадку загальна річна кількість видалених забруднюючих речовин і коефіцієнт зменшення сумарної їх кількості показано у вигляді формул (23) і (24):

$$M' = (a \cdot \varphi \cdot R \cdot A_{bassin} + \sum_{i=1}^b \varphi \cdot R_i \cdot A_{bassin}) \cdot C_1, \quad (23)$$

$$\varepsilon' = \frac{M'}{\sum_{i=1}^n \varphi \cdot R_i \cdot A_{bassin} \cdot C_1} \cdot 100\% = \frac{a \cdot R + \sum_{i=1}^b R_i}{\sum_{i=1}^n R_i} \cdot 100\%, \quad (24)$$

де  $M'$  – загальна річна кількість видалених забруднюючих речовин, мг;  $C_1$  – середня концентрація забруднюючих речовин у стоці для  $n$  випадків дощових подій, мг/дм<sup>3</sup>;  $\varepsilon'$  – коефіцієнт зменшення сумарної кількості забруднюючих речовин.

Для другого випадку загальна річна кількість видалених забруднюючих речовин і коефіцієнт зменшення сумарної їх кількості показано у вигляді формул (25) і (26):

$$M'' = (a \cdot \varphi \cdot R \cdot A_{bassin} + \sum_{i=1}^b \varphi \cdot R_i \cdot A_{bassin}) \cdot (C_1 - C'), \quad (25)$$

$$\varepsilon' = \frac{M''}{\sum_{i=1}^n \varphi \cdot R_i \cdot A_{bassin} \cdot C_1} \cdot 100\% = \frac{(a \cdot R + \sum_{i=1}^b R_i) \cdot (C_1 - C')}{\sum_{i=1}^n R_i \cdot C_1} \cdot 100\%, \quad (26)$$

де  $C'$  – середня концентрація забруднюючих речовин у стоці для  $n$  випадків дощових подій, мг/дм<sup>3</sup>.

## Висновки

Дощовий сад широко використовується для управління дощовими водами на малих водозбірних площах і має важливе значення у зменшенні швидкості пікових стоків води під час повені, об'єму стічних вод, загального їх забруднення та захисту водних ресурсів. Незважаючи на значну кількість існуючих в науковій літературі моделей, які дозволяють описати гідрологічні параметри дощових садів, важливим аспектом, який залишається недостатньо вивченим, є врахування основних гідрологічних елементів водного балансу. Розроблено числову модель, яка дозволяє розраховувати ефективну площу конструкції дощового саду для однієї дощової події та при умові відсутності переповнення конструкції з уникненням її витікання. Запропоновано методи оцінки трьох основних функцій дощових садів в сфері управління зливовими водами: метод оцінки зменшення об'єму зливого стоку; метод оцінки скорочення річного об'єму стоку; метод оцінки зниження об'єму пікового стоку та метод оцінки зниження загальної кількості забруднюючих речовин конструкцією дощового саду. Запропоновані в рамках роботи числові моделі можуть бути корисним інструментом на етапі планування та реалізації майбутніх інвестицій у дощові сади, які будуть впроваджуватись в міських районах.

## СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Coates, R. (2022). Infrastructural events? Flood disaster, narratives and framing under hazardous urbanization. *International Journal of Disaster Risk Reduction*, 74, 102918. 10.1016/j.ijdrr.2022.102918.
2. Chen, W.; Wang, W.; Huang, G.; Wang, Z.; Lai, C.; Yang, Z. (2021). The capacity of grey infrastructure in urban flood management: A comprehensive analysis of grey infrastructure and the green-grey approach. *International Journal of Disaster Risk Reduction*, 54, 102045. 10.1016/j.ijdrr.2021.102045.

3. Berland, A.; Shiflett, S.A.; Shuster, W.D.; Garmestani, A.S.; Goddard, H.C.; Herrmann, D.L.; Hopton, M.E. (2017). The role of trees in urban stormwater management. *Landscape and Urban Planning*, 162, 167–177. 10.1016/j.landurbplan.2017.02.017.
4. Coleman, S.; Hurley, S.; Rizzo, D.; Koliba, C.; Zia, A. (2018). From the household to watershed: A cross-scale analysis of residential intention to adopt green stormwater infrastructure. *Landscape and Urban Planning*, 180, 195–206. 10.1016/j.landurbplan.2018.09.005.
5. Ying, J.; Zhang, X.; Zhang, Y.; Bilan, S. (2022). Green infrastructure: systematic literature review. *Economic Research-Ekonomska Istraživanja*, 35, 343–366. 10.1080/1331677X.2021.1893202.
6. Gao, M.; Wang, Z.; Yang, H. (2022). Review of Urban Flood Resilience: Insights from Scientometric and Systematic Analysis. *IJERPH*, 19, 8837. 10.3390/ijerph19148837.
7. Green, D.; O'Donnell, E.; Johnson, M.; Slater, L.; Thorne, C.; Zheng, S.; Stirling, R.; Chan, F.K.S.; Li, L.; Boothroyd, R.J. (2021). Green infrastructure: The future of urban flood risk management? *WIREs Water*, 8, e1560. 10.1002/wat2.1560.
8. Bruner, S.G.; Palmer, M.I.; Griffin, K.L.; Naeem, S. (2023). Planting design influences green infrastructure performance: Plant species identity and complementarity in rain gardens. *Ecological Applications*, 33, e2902. 10.1002/eap.2902.
9. Sharma, R.; Malaviya, P. (2021). Management of stormwater pollution using green infrastructure: The role of rain gardens. *WIREs Water*, 8, e1507. 10.1002/wat2.1507.
10. Кравченко, М.В.; Ткаченко, Т.М. (2023). Проблеми удосконалення термінології та сучасної класифікації «зелених» конструкцій для створення українських «зелених» стандартів. *Збірник наукових праць Національного університету кораблебудування імені адмірала Макарова*, 493, 194–204. 10.15589/znп2023.4(493).26.
11. Alim, M.A.; Rahman, A.; Tao, Z.; Garner, B.; Griffith, R.; Liebman, M. (2022). Green roof as an effective tool for sustainable urban development: An Australian perspective in relation to stormwater and building energy management. *Journal of Cleaner Production*, 362, 132561. 10.1016/j.jclepro.2022.132561.
12. Burszta-Adamiak, E.; Biniak-Pieróg, M.; Dąbek, P.B.; Sternik, A. (2023). Rain garden hydrological performance – Responses to real rainfall events. *Science of The Total Environment*, 887, 164153. 10.1016/j.scitotenv.2023.164153.
13. Кравченко, М.В.; Ткаченко, Т.М.; Мілейковський, В.О. (2023). Модифікація «зеленої» покрівлі з використанням технічних рішень для зменшення негативного впливу зливових вод в міських умовах. *Проблеми водопостачання, водовідведення та гідраліки*, 16–28. 10.32347/2524-0021.2023.43.16-28.
14. Ткаченко, Т.М.; Мілейковський, В.О.; Кравченко, М.В. (2023). Вплив «зелених» покрівель на управління дощовими водами: огляд наукових досліджень та перспективи використання. *Екологічна безпека та природокористування*, 46, 35–53. 10.32347/2411-4049.2023.2.35-53.
15. Oshen; Singh, K.K. (2019). Rain Garden – A Solution to Urban Flooding: A Review. In *Sustainable Engineering; Agnihotri, A.K., Reddy, K., Bansal, A., Eds.; Lecture Notes in Civil Engineering; Springer Singapore: Singapore, Vol. 30, pp. 27–35. ISBN 9789811367168. 10.1007/978-981-13-6717-5\_4.*
16. Shafique, M. (2016). A review of the bioretention system for sustainable storm water management in urban areas. *Materials and Geoenvironment*, 63, 227–236. 10.1515/rmzmag-2016-0020.
17. Shuster, W.; Darner, R.; Schiffman, L.; Herrmann, D. (2017). Factors Contributing to the Hydrologic Effectiveness of a Rain Garden Network (Cincinnati OH USA). *Infrastructures*, 2, 11. 10.3390/infrastructures2030011.
18. Morash, J.; Wright, A.; LeBleu, C.; Meder, A.; Kessler, R.; Brantley, E.; Howe, J. (2019). Increasing Sustainability of Residential Areas Using Rain Gardens to Improve Pollutant Capture, Biodiversity and Ecosystem Resilience. *Sustainability*, 11, 3269. 10.3390/su11123269.

19. DeBusk, K.M.; Wynn, T.M. (2011). Storm-Water Bioretention for Runoff Quality and Quantity Mitigation. *J. Environ. Eng.*, 137, 800–808. 10.1061/(ASCE)EE.1943-7870.0000388.
20. Rezaei, A.R.; Ismail, Z.; Niksokhan, M.H.; Dayarian, M.A.; Ramli, A.H.; Shirazi, S.M. (2019). A Quantity-Quality Model to Assess the Effects of Source Control Stormwater Management on Hydrology and Water Quality at the Catchment Scale. *Water*, 11, 1415. 10.3390/w11071415.
21. Brown, R.A.; Hunt, W.F. (2011). Underdrain Configuration to Enhance Bioretention Exfiltration to Reduce Pollutant Loads. *J. Environ. Eng.*, 137, 1082–1091. 10.1061/(ASCE)EE.1943-7870.0000437.
22. Shafique, M.; Kim, R. (2017). Retrofitting the Low Impact Development Practices into Developed Urban areas Including Barriers and Potential Solution. *Open Geosciences*, 9. 10.1515/geo-2017-0020.
23. Zhang, L.; Ye, Z.; Shibata, S. (2020). Assessment of Rain Garden Effects for the Management of Urban Storm Runoff in Japan. *Sustainability*, 12, 9982. 10.3390/su12239982.
24. Wanitchayapaisit, C.; Suppakittpaisarn, P.; Charoenlerthanakit, N.; Surinseng, V.; Yaipimol, E.; Rinchumphu, D. (2022). Rain garden design for stormwater management in Chiang Mai, Thailand: A Research-through-Design Study. *NJEDP*, 21, 222. 10.54028/NJ202221222.
25. Liu, J.; Sample, D.; Bell, C.; Guan, Y. (2014). Review and Research Needs of Bioretention Used for the Treatment of Urban Stormwater. *Water*, 6, 1069–1099. 10.3390/w6041069.
26. Wang, X.; Zhang, J.; Babovic, V.; Gin, K.Y.H. (2019). A comprehensive integrated catchment-scale monitoring and modelling approach for facilitating management of water quality. *Environmental Modelling & Software*, 120, 104489. 10.1016/j.envsoft.2019.07.014.
27. Zhang, L.; Lu, Q.; Ding, Y.; Peng, P.; Yao, Y. (2018). Design and Performance Simulation of Road Bioretention Media for Sponge Cities. *J. Perform. Constr. Facil.*, 32, 04018061. 10.1061/(ASCE)CF.1943-5509.0001209.
28. Li, J.Q.; Xiang, L.L.; Che, W.; Ge, R.L. (2008). Design and Hydrologic Estimation Method of Multi-Purpose Rain Garden: Beijing Case Study. In *Proceedings of the Low Impact Development for Urban Ecosystem and Habitat Protection*; American Society of Civil Engineers: Seattle, Washington, United States, pp. 1–10. 10.1061/41009(333)67.
29. *Stormwater Management for Smart Growth*; Springer-Verlag: New York, 2005; ISBN 978-0-387-26048-8. 10.1007/0-387-27593-2.
30. TP10 Stormwater management devices design guideline manual 2003.pdf.
31. Available online: <http://cgo-sreznevskiy.kyiv.ua/uk/> (accessed on March 17, 2024).

*Стаття надійшла до редакції 23.01.2024 і прийнята до друку після рецензування 03.05.2024*

## REFERENCES

1. Coates, R. (2022). Infrastructural events? Flood disaster, narratives and framing under hazardous urbanisation. *International Journal of Disaster Risk Reduction*, 74, 102918. 10.1016/j.ijdrr.2022.102918.
2. Chen, W.; Wang, W.; Huang, G.; Wang, Z.; Lai, C.; Yang, Z. (2021). The capacity of grey infrastructure in urban flood management: A comprehensive analysis of grey infrastructure and the green-grey approach. *International Journal of Disaster Risk Reduction*, 54, 102045. 10.1016/j.ijdrr.2021.102045.
3. Berland, A.; Shiflett, S.A.; Shuster, W.D.; Garmestani, A.S.; Goddard, H.C.; Herrmann, D.L.; Hopton, M.E. (2017). The role of trees in urban stormwater management. *Landscape and Urban Planning*, 162, 167–177. 10.1016/j.landurbplan.2017.02.017.

4. Coleman, S.; Hurley, S.; Rizzo, D.; Koliba, C.; Zia, A. (2018). From the household to watershed: A cross-scale analysis of residential intention to adopt green stormwater infrastructure. *Landscape and Urban Planning*, 180, 195–206. 10.1016/j.landurbplan.2018.09.005.
5. Ying, J.; Zhang, X.; Zhang, Y.; Bilan, S. (2022). Green infrastructure: systematic literature review. *Economic Research-Ekonomska Istraživanja*, 35, 343–366. 10.1080/1331677X.2021.1893202.
6. Gao, M.; Wang, Z.; Yang, H. (2022). Review of Urban Flood Resilience: Insights from Scientometric and Systematic Analysis. *IJERPH*, 19, 8837. 10.3390/ijerph19148837.
7. Green, D.; O'Donnell, E.; Johnson, M.; Slater, L.; Thorne, C.; Zheng, S.; Stirling, R.; Chan, F.K.S.; Li, L.; Boothroyd, R.J. (2021). Green infrastructure: The future of urban flood risk management? *WIREs Water*, 8, e1560. 10.1002/wat2.1560.
8. Bruner, S.G.; Palmer, M.I.; Griffin, K.L.; Naeem, S. (2023). Planting design influences green infrastructure performance: Plant species identity and complementarity in rain gardens. *Ecological Applications*, 33, e2902. 10.1002/eap.2902.
9. Sharma, R.; Malaviya, P. (2021). Management of stormwater pollution using green infrastructure: The role of rain gardens. *WIREs Water*, 8, e1507. 10.1002/wat2.1507.
10. Kravchenko, M.V.; Tkachenko, T.M. (2023). Problems of improving the terminology and modern classification of “green” constructions for the creation of Ukrainian “green” standards. *Collection of Scientific Publications NUS*, 493, 194–204. 10.15589/znpp2023.4(493).26 [in Ukrainian].
11. Alim, M.A.; Rahman, A.; Tao, Z.; Garner, B.; Griffith, R.; Liebman, M. (2022). Green roof as an effective tool for sustainable urban development: An Australian perspective in relation to stormwater and building energy management. *Journal of Cleaner Production*, 362, 132561. 10.1016/j.jclepro.2022.132561.
12. Burszta-Adamiak, E.; Biniak-Pieróg, M.; Dąbek, P.B.; Sternik, A. (2023). Rain garden hydrological performance – Responses to real rainfall events. *Science of The Total Environment*, 887, 164153. 10.1016/j.scitotenv.2023.164153.
13. Kravchenko, M.; Tkachenko, T.; Mileikovskiy, V. (2023). Modification of the “green” roof using technical solutions to reduce the negative impact of stormwater in urban conditions. *PWSH*, 16–28. 10.32347/2524-0021.2023.43.16-28 [in Ukrainian].
14. Tkachenko, T.M.; Mileikovskiy, V.O.; Kravchenko, M.V. (2023). Impact of “green” roofs on rainwater management: review of scientific research and perspectives of use. *ESANR*, 46, 35–53. 10.32347/2411-4049.2023.2.35-53 [in Ukrainian].
15. Osheen; Singh, K.K. (2019). Rain Garden – A Solution to Urban Flooding: A Review. In *Sustainable Engineering*; Agnihotri, A.K., Reddy, K., Bansal, A., Eds.; Lecture Notes in Civil Engineering; Springer Singapore: Singapore, Vol. 30, pp. 27–35. ISBN 9789811367168. 10.1007/978-981-13-6717-5\_4.
16. Shafique, M. (2016). A review of the bioretention system for sustainable storm water management in urban areas. *Materials and Geoenvironment*, 63, 227–236. 10.1515/rmzmag-2016-0020.
17. Shuster, W.; Darner, R.; Schiffman, L.; Herrmann, D. (2017). Factors Contributing to the Hydrologic Effectiveness of a Rain Garden Network (Cincinnati OH USA). *Infrastructures*, 2, 11. 10.3390/infrastructures2030011.
18. Morash, J.; Wright, A.; LeBleu, C.; Meder, A.; Kessler, R.; Brantley, E.; Howe, J. (2019). Increasing Sustainability of Residential Areas Using Rain Gardens to Improve Pollutant Capture, Biodiversity and Ecosystem Resilience. *Sustainability*, 11, 3269. 10.3390/su11123269.
19. DeBusk, K.M.; Wynn, T.M. (2011). Storm-Water Bioretention for Runoff Quality and Quantity Mitigation. *J. Environ. Eng.*, 137, 800–808. 10.1061/(ASCE)EE.1943-7870.0000388.

20. Rezaei, A.R.; Ismail, Z.; Niksokhan, M.H.; Dayarian, M.A.; Ramli, A.H.; Shirazi, S.M. (2019). A Quantity-Quality Model to Assess the Effects of Source Control Stormwater Management on Hydrology and Water Quality at the Catchment Scale. *Water*, 11, 1415. 10.3390/w11071415.
21. Brown, R.A.; Hunt, W.F. (2011). Underdrain Configuration to Enhance Bioretention Exfiltration to Reduce Pollutant Loads. *J. Environ. Eng.*, 137, 1082–1091. 10.1061/(ASCE)EE.1943-7870.0000437.
22. Shafique, M.; Kim, R. (2017). Retrofitting the Low Impact Development Practices into Developed Urban areas Including Barriers and Potential Solution. *Open Geosciences*, 9, 10.1515/geo-2017-0020.
23. Zhang, L.; Ye, Z.; Shibata, S. (2020). Assessment of Rain Garden Effects for the Management of Urban Storm Runoff in Japan. *Sustainability*, 12, 9982. 10.3390/su12239982.
24. Wanitchayapaisit, C.; Suppakittpaisarn, P.; Charoenlerthanakit, N.; Surinseng, V.; Yaipimol, E.; Rinchumphu, D. (2022). Rain garden design for stormwater management in Chiang Mai, Thailand: A Research-through-Design Study. *NJEDP*, 21, 222. 10.54028/NJ202221222.
25. Liu, J.; Sample, D.; Bell, C.; Guan, Y. (2014). Review and Research Needs of Bioretention Used for the Treatment of Urban Stormwater. *Water*, 6, 1069–1099. 10.3390/w6041069.
26. Wang, X.; Zhang, J.; Babovic, V.; Gin, K.Y.H. (2019). A comprehensive integrated catchment-scale monitoring and modelling approach for facilitating management of water quality. *Environmental Modelling & Software*, 120, 104489. 10.1016/j.envsoft.2019.07.014.
27. Zhang, L.; Lu, Q.; Ding, Y.; Peng, P.; Yao, Y. (2018). Design and Performance Simulation of Road Bioretention Media for Sponge Cities. *J. Perform. Constr. Facil.*, 32, 04018061. 10.1061/(ASCE)CF.1943-5509.0001209.
28. Li, J.Q.; Xiang, L.L.; Che, W.; Ge, R.L. (2008). Design and Hydrologic Estimation Method of Multi-Purpose Rain Garden: Beijing Case Study. In *Proceedings of the Low Impact Development for Urban Ecosystem and Habitat Protection; American Society of Civil Engineers: Seattle, Washington, United States*, pp. 1–10. 10.1061/41009(333)67.
29. *Stormwater Management for Smart Growth*; Springer-Verlag: New York, 2005; ISBN 978-0-387-26048-8. 10.1007/0-387-27593-2.
30. TP10 Stormwater management devices design guideline manual 2003.pdf.
31. Available online: <http://cgo-sreznevskiy.kyiv.ua/uk/> (accessed on March 17, 2024).

*The article was received 23.01.2024 and was accepted after revision 03.05.2024*

### **Кравченко Марина Василівна**

к.т.н., доцент кафедри технологій захисту навколишнього середовища та охорони праці Київського національного університету будівництва і архітектури

**Адреса робоча:** 03037, Україна, м. Київ, пр-т Повітряних Сил, 31

ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0003-0428-6440> **e-mail:** marina-diek@ukr.net

### **Ткаченко Тетяна Миколаївна**

д.т.н., професор кафедри технологій захисту навколишнього середовища та охорони праці Київського національного університету будівництва і архітектури

**Адреса робоча:** 03037, Україна, м. Київ, пр-т Повітряних Сил, 31

ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0003-2105-5951> **e-mail:** tkachenkoknuba@gmail.com