

УДК 628.3:712.3

DOI [https://doi.org/10.15589/znp2024.1\(494\).23](https://doi.org/10.15589/znp2024.1(494).23)**STUDY OF THE INFLUENCE OF THE MAIN PARAMETERS OF THE RAIN GARDEN ON ITS HYDROLOGICAL PARAMETERS BY MODELING****ДОСЛІДЖЕННЯ ВПЛИВУ ОСНОВНИХ ПАРАМЕТРІВ ДОЩОВОГО САДУ НА ЙОГО ГІДРОЛОГІЧНІ ПОКАЗНИКИ МЕТОДОМ МОДЕЛЮВАННЯ****Marina V. Kravchenko**

marina-diek@ukr.net

ORCID: 0000-0003-0428-6440

Tetiana M. Tkachenko

tkachenkoknuba@gmail.com

ORCID: 0000-0003-2105-5951

Viktor O. Mileikovskiy

v_mil@ukr.net

ORCID: 0000-0001-8543-1800

М. В. Кравченко,

канд. техн. наук, доцент

Т. М. Ткаченко,

д-р техн. наук, професор

В. О. Мілейковський,

д-р техн. наук, професор

*Kyiv National University of Construction and Architecture, Kyiv
Київський національний університет будівництва і архітектури, м. Київ*

Abstract. Despite a large number of scientific studies and practical implementation of rain gardens as an effective practice of rainwater management worldwide, there is a lack of knowledge about the peculiarities of the hydrological process, methods of calculating the main parameters, and their impact on the efficiency of such systems.

Purpose. Investigation of the influence of the main parameters of the rain garden design on its hydrological parameters and rainwater retention efficiency by modeling dynamic processes based on Darcy's law

Methods. Methods of mathematical modeling and experimental study of the main parameters of the pilot design of the rain garden using simulation of a rain event.

Results. A simplified mathematical model based on Darcy's law was developed to analyze the dynamic processes of passage and saturation of the layers of the rain garden structure at a particular time. The presented model is implemented in the Scilab software based on the simulation of a real rain event using parameters determined from experimental studies of the pilot rain garden installation. It was found that reducing the area of the rain garden structure compared to the area of the catchment basin contributes to its faster achievement of full water saturation, and increasing the thickness of the layers and adjusting their water-holding capacity can increase the efficiency of water retention while reducing the ratio of areas.

Scientific novelty. The proposed model is a valuable tool for understanding the hydrological processes in a rain garden and designing efficient structures based on local climatic conditions.

Practical significance. Studying the functional features of rain gardens during precipitation with different characteristics is an important aspect of engineering practice. This allows us to consider key factors when determining the size of the structure and the choice of bulk materials for its layers and expands the possibilities when developing recommendations for the design and implementation of such systems.

Key words: «green» structures; rain garden; rainwater; infiltration; saturation; hydrological behavior; filtration coefficient; catchment area.

Анотація. Незважаючи на велику кількість наукових досліджень та практичне впровадження конструкцій дощових садів, як ефективної практики управління дощовими водами у всьому світі, існує нестача знань щодо особливостей протікання гідрологічного процесу, методів розрахунку основних параметрів та їх впливу на ефективність таких систем.

Мета. Дослідження впливу основних параметрів конструкції дощового саду на його гідрологічні показники та ефективність утримання дощової води методом моделювання динамічних процесів на основі закону Дарсі.

Методика. Методи математичного моделювання та експериментального дослідження основних параметрів пілотної конструкції дощового саду з використанням симуляції дощової події.

Результати. В рамках роботи розроблено спрощену математичну модель з урахуванням закону Дарсі, яка дозволяє аналізувати динамічні процеси проходження та насичення водою шарів конструкції дощового саду в конкретний момент часу. Представлену модель реалізовано у програмному забезпеченні *Scilab* на основі симуляції реальної дощової події з використанням параметрів, визначених з експериментальних досліджень пілотної установки дощового саду. Встановлено, що зменшення площі конструкції дощового саду, порівняно з площею водозбірного басейну, сприяє швидшому досягненню нею повного водонасичення, а збільшення товщини шарів та регулювання їх водоутримуючої здатності дозволяють підвищити ефективність утримання води за умови зменшення співвідношення площ.

Наукова новизна. Запропонована модель є цінним інструментом для розуміння гідрологічних процесів у дощовому саду та проектування ефективних конструкцій з урахуванням місцевих кліматичних умов.

Практична значимість. Дослідження функціональних особливостей дощових садів під час опадів з різними характеристиками є важливим аспектом для інженерної практики. Це дозволяє враховувати ключові фактори при визначенні розмірів конструкції та виборі сипучих матеріалів для її шарів, а також розширює можливості при розробці рекомендацій щодо проектування та впровадження таких систем.

Ключові слова: «зелені» конструкції; дощовий сад; дощова вода; інфільтрація; насичення; гідрологічна поведінка; коефіцієнт фільтрації; площа водозбірного басейну.

ПОСТАНОВКА ЗАДАЧІ

Водопроникність шарів ґрунту постійно знижується внаслідок стрімкого процесу урбанізації міст та значного розширення будівельних об'єктів, які зменшують відсоток природної поверхні землі в міських районах. Такі об'єкти, як будівлі та дороги, є необхідними життєвими елементами, потреба в яких зростає по мірі зростання населення. Крім того, зміна клімату, непередбачуване збільшення кількості опадів, недостатня наявність існуючих дренажних систем для збору зливових стоків і низька очисна здатність каналізаційної мережі призводять до тривалого застою води на поверхні територій, їх заболочування, впливаючи на життєдіяльність суспільства та рух транспорту в містах (рис. 1). Таким чином, методи підвищення швидкості інфільтрації на існуючих ділянках поверхні землі є реальною перспективою для вирішення таких проблем, що дозволить зменшити ризик ерозії ґрунтів, покращити водно-екологічний баланс і сприяти сталому розвитку урбанізованого середовища.



Рис. 1. Затоплення місцевості внаслідок переповнення каналізаційної системи: а) м. Бровари (Україна); б) м. Салонік (Греція)

Для послаблення несприятливих наслідків урбанізації, було розроблено та впроваджено багато передових світових практик, таких як «LID» (Low Impact Development, США), «SuDS» (Sustainable Drainage Systems, Великобританія), «LIUDD» (Low Impact Urban Design and Development, Нова Зеландія),

«WSUD» (Water Sensitive Urban Design, Австралія), «Sponge City» («місто-губка», Китай), «Green» Infrastructure.

У 1990-х роках, у відповідь на потребу в управлінні зливовими стоками з особливим акцентом на зменшення високого рівня забруднюючих речовин, що характерно для початку дощу і називається ефектом «першого змиву», в окрузі Принс-Джордж (штат Меріленд) було вперше побудовано конструкцію дощового саду. Зараз ця технологія становить невід'ємну частину практик LID, SuDS, WSUD і «Green» Infrastructure та відома під кількома назвами, включаючи такі як: система біоутримання, біоутримувальна установка, біоінфільтраційна технологія, біофільтр, система біоінфільтраційної обробки тощо.

Перші конструкції дощових садів-смуг вже є і в Україні. Як приклад можна привести дощовий сад у Львові, створений активістами громадської організації «Плато» (рис. 2, а) та дощовий сад на Подолі у Києві (рис. 2, б).



Рис. 2. Приклади перших конструкцій дощових садів-смуг в Україні: а) м. Львів; б) м. Київ

В сучасній інтерпретації, дощові сади – це вид «зелених» конструкцій, що встановлюються уздовж проїзної частини дороги, біля певного житлового, чи іншого типу, об'єкту, автозаправок, місць паркування, тротуарів, дахів тощо та призначені для утримання води з обох боків. Складаються з багаторічних рослин, які накопичують та повертають дощову

воду до екосистеми завдяки спеціальній дренажній системі [1].

Незважаючи на активне використання дощових садів, як однієї з найкращих практик управління зливовими водами у всьому світі, та велику кількість наукових досліджень в цій галузі, існує дефіцит знань щодо особливостей гідрологічного процесу, що в них протікає, методів розрахунку їх основних параметрів та методів оцінки їх ефективності.

АНАЛІЗ ОСТАННІХ ДОСЛІДЖЕНЬ І ПУБЛІКАЦІЙ

Конструкція дощового саду складається з трьох основних шарів: 1) шару ґрунтового середовища для висадки рослинного покриву, 2) перехідного шару або інфільтраційного шару та 3) гравійного шару для тимчасового утримання води (рис. 1).

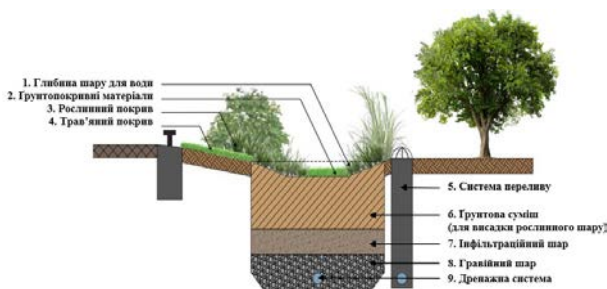


Рис. 3. Основні елементи конструкції дощового саду – поперечний переріз (авторська розробка)

1. *Глибина шару для води*: шар, призначений для стікання і утворення стовпа води, що дозволяє зменшити швидкість її потоку для інфільтрації в нижні шари конструкції. Глибина шару залежить від інтенсивності та кількості опадів для конкретного кліматичного регіону і в середньому становить від 0 до 80 см.

2. *Ґрунтопокривні матеріали*: шар мульчі/гальки/каміння, товщиною до 7 см (для мульчі) [2], який використовується для пом'якшення ерозії ґрунту та забезпечення естетичного вигляду дощового саду. Додатково може бути доповнений гравієм для зменшення поверхневої ерозії.

3. *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.

4. *Трав'яний покрив*: додатковий шар трав'яного покриву для доповнення дизайну дощового саду та зменшення швидкості потоку зливної води.

5. *Система переливу*: конструкція, що доповнює дренажну систему дощового саду, сприяючи відведенню надлишку води. Необхідність її використання визначається рівнем опадів і місцевими гідрологічними умовами. Може містити такі елементи, як додаткові водостійкі шари, ретенційні структури або системи підземних каналів для збирання та відведення зайвої води.

6. *Ґрунтова суміш*: поживне середовище для вирощування рослин, яке, зазвичай, є сумішшю ґрунту, піску, супіску чи суглинку. Загальні характеристики цього шару залежать на 25% від пористості, а глибина для висадки рослин становить в середньому діапазоні 10–50 см.

7. *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 дренованим, він має бути і достатньо міцним, щоб витримати вагу верхніх шарів. Пористість повинна бути в середньому 20–40% [3], а глибина шару – 20–120 см.

8. *Гравійний шар*: шар середнього чи крупного гравію, призначений для утримання та тимчасового зберігання води з подальшим відведенням до дренажної системи. Товщина гравійного шару розраховується відповідно до щільності інфільтраційного шару, але становить не менше 30 см. В гравійному шарі може бути розміщена дренажна труба, обмотана геотекстильним полотном або кокосовим волокном, як показано на рис. 3.

9. *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 розташовано біля житлового будинку), для миття автомобілів (якщо дощовий сад розташовано біля СТО, автозаправки), для поливу та зрошення ділянок із зеленими насадженнями магистральних вулиць, де подача води обмежена (якщо дощовий сад розташовано вздовж автомагістралей).

Структура дощового саду може приймати різноманітні форми, оскільки її конфігурація може варіюватися від простих прямокутних до більш складних та оригінальних варіантів. Враховуючи різноманітність геометричних областей, доступних для втілення проекту, форма прямокутника, зазвичай, є найбільш поширеною та економічно доцільною.

Чисельні наукові дослідження за останні десятиліття показали, що конструкції дощових садів можуть: сприяти зменшенню об'єму дощового стоку [4], контролювати піковий стік [5], поповнювати рівень підземних вод [6], підсилувати процес евапотранспірації [7], а також сприяти зменшенню кількості забруднюючих речовин, що надходять у поверхневі та підземні води [8].

Співвідношення між площею басейну водозбору та площею конструкції дощового саду, як засобу-глибини (далі як співвідношення площ), глибина шару для стовпа води, інфільтраційна здатність шару ґрунтового середовища, тип і щільність рослинності дощового саду є основними факторами, які впливають на ефективність утримання зливної води, яка, за результатами різних наукових досліджень, може коливатися від 67,9 до 99,2% [9].

Для досягнення різних цілей управління кількістю та якістю дощової води, дощові сади проектуються із співвідношенням площ, що змінюється від 45:1 до 5:1, глибиною шару для стовпа води – від 0,15 до 0,52 м, глибиною інфільтраційного шару – від 0,5 до 1,2 м. Різними науковцями були проведені дослідження для кількісної оцінки гідрологічних показників дощових садів. Так, автори [10] розробили алгоритм методу, що дозволяє оцінити ефективність конструкції дощового саду щодо зменшення об'єму зливового стоку, інфільтрації/ексфільтрації та випаровування. В результаті їхнього дослідження було зроблено висновок, що навіть дощові сади зі співвідношенням площ 10:1, побудовані на ґрунтах з низькою водопроникністю (1,0 мм/год), можуть зменшити об'єм стоку на 55% під час опадів. Вінстоном [11] було досліджено три дощові сади, побудовані на ґрунті з низькою водопроникністю, та виявлено, що конструкції дощових садів сприяли зменшенню об'єму дощової води на 36–59%, головним чином завдяки ексфільтрації та конструктивним особливостям гравійного шару. Інші автори [12] вивчали ефекти зменшення пікового стоку конструкцією дощового саду, завглибшки 1,2 м, у Північній Кароліні протягом двох років і дійшли висновку, що ця технологія може ефективно зменшити піковий стік під час опадів середньої інтенсивності (15–20 мм/год) із середнім рівнем зниження на 99%.

В рамках дослідження [13] було встановлено, що характеристики ґрунту можуть сильно впливати на продуктивність дощових садів. Крім того, Андерсон та ін. [14] використовували симулятор стоку дощової води для оцінки гідрологічних характеристик дощового саду (об'єму гравійного шару, швидкості інфільтрації, глибини шару для стовпа води та характеристик переливу), вказуючи на те, що регулювання параметрів гравійного шару може сприяти уникненню переповнення конструкції. Інші автори [15] провели лабораторні експерименти та досліджували вплив типу ґрунту і характеру течії на інфільтрацію і випаровування (евапотранспірацію). Вони виявили, що в одновимірних (вертикальний потік) системах дощового саду переважає процес інфільтрації, тоді як у двовимірних системах (горизонтальний потік) зменшення об'єму води залежить від інфільтрації та евапотранспірації.

Підходи до чисельного моделювання залишаються найбільш широко використовуваним методом прогнозування наслідків «зеленої» інфраструктури, а підходи до моделювання особливо корисні для оцінки сценаріїв «що, якщо». У XXI столітті моделювання різних явищ та процесів є невід'ємним інструментом, що дозволяє підтримувати та вдосконалювати процеси планування, проєктування і управління в напрямку концепції сталого розвитку. Зокрема моделювання процесів, необхідних для оцінки гідравлічної ефективності дощових садів в управлінні дощовою водою, є завданням, вирішення якого сприяє підтримці їх широкого впровадження в міському середовищі.

Автори [16] розробили гідрологічну модель за допомогою HYDRUS-1D для оцінки продуктивності дощового саду, побудованого в міській зоні, і виявили, що в холодну пору року максимальний коефіцієнт навантаження може досягати при співвідношенні площ 15:1. В рамках іншого дослідження [17] автори використовували програму EPA-SWMM для моделювання гідрологічних характеристик дощового саду в різних умовах навколишнього середовища. Вони встановили, що товщина ґрунтового середовища для висадки рослин та пористість ґрунту в дощовому саду є значними показниками, які впливають на процес переливу в природних ґрунтах, що мають низький коефіцієнт водопровідності.

ВІДОКРЕМЛЕННЯ НЕВИРШЕНИХ РАНІШЕ ЧАСТИН ЗАГАЛЬНОЇ ПРОБЛЕМИ

Незважаючи на існуючі моделі, які дозволяють описати гідрологічні показники дощових садів, важливим аспектом, який залишається недостатньо вивченим, є врахування ключових фізичних процесів, таких як: проходження та насичення водою шарів системи дощового саду в певний момент часу; втрати напору вертикального фільтраційного потоку, з урахуванням коефіцієнта фільтрації, що особливо важливо для правильного опису гідродинаміки в системі та визначення оптимальних умов і конструктивних особливостей дощового саду.

МЕТА ДОСЛІДЖЕННЯ

Дослідження залежності ефективності утримання дощової води конструкцією дощового саду від зміни його основних параметрів на основі розробленої авторами моделі динамічних гідрологічних процесів, що протікають у конструкції дощового саду з урахуванням закону Дарсі.

ОСНОВНИЙ МАТЕРІАЛ

Для досягнення поставленої мети було проведено лабораторні вимірювання основних параметрів шарів пілоотної установки конструкції дощового саду (рис. 4) та розроблено спрощену математично-гідрологічну модель, яка дозволяє описати процеси проходження та насичення водою шарів системи в певний момент часу.

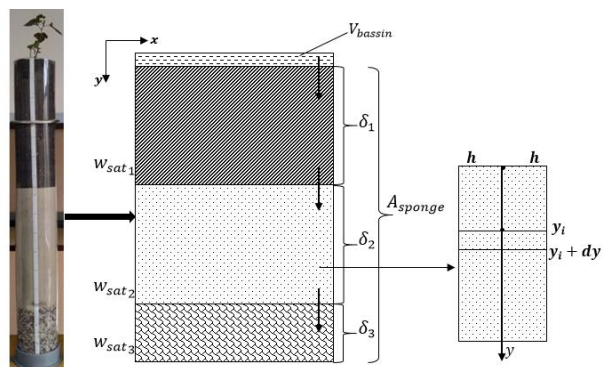


Рис. 4. Концептуальна схема конструкції дощового саду та пов'язаних з ним потоків води

На початку дощової події, частина води у вигляді поверхневого стоку стікає з площі водозабірною басейну A_{bassin} (м²) і спрямовується до конструкції дощового саду, площею A_{sponge} (м²), проникаючи через шари в процесі інфільтрації зі швидкістю v_r (м/с). При умові, що швидкість припливу води перевищує інфільтраційну здатність шарів дощового саду, у заглибленні на його поверхні виникає рівень стовпа води h . Під час інтенсивної дощової події поверхневе заглиблення може бути повністю заповнене водою, а її надлишок відводиться у вигляді переливу. Інфільтрація відбувається протягом усього часу, коли в дощовому саду є приплив або рівень стовпа води.

Для запису диференціальних рівнянь виділимо нескінченно-тонкий шар ґрунту або субстрату (рис. 4) між рівнями y та $y + dy$. Для спрощення вважаємо, що вода одразу рівномірно розподіляється всією площею засобу-губки A_{sponge} . В іншому випадку доведеться скористатися програмами обчислювальної гідродинаміки з розрахунком потоків в двох фазах. У шарах ґрунту або субстрату, товщиною δ (м) відбувається спочатку насичення водою на рівні y_i (м), зі зростанням вологовмісту w (м³/м³) до насиченого стану w_{sat} (м³/м³) без просування потоку, а далі, відповідно до рівняння нерозривності, потік проходить транзитом через насичені шари без зміни швидкості. Час заповнення конструкції дощового саду складає τ (с). Таким чином, задача спрощується до одновимірної.

Процес проходження-насичення води через шари конструкції описується згідно системи рівнянь (1):

$$\begin{cases} v = v_r \cdot \frac{A_{bassin}}{A_{sponge}} - \frac{d(h_0 \cdot A_{h0})}{A_{sponge} \cdot dr}, & y < y_i \\ v \cdot d\tau = w_{(y_i)} \cdot dy, w_{(y_i)} < w_{sat}, & y = y_i \\ v = 0, & y > y_i \end{cases} \quad (1)$$

Відповідно до закону Дарсі, втрати напору вертикального фільтраційного потоку описуються з використанням коефіцієнту фільтрації $k_f(i)$, що змінюється вздовж y ступінчасто, відповідно до шарів:

$$v = k_f(y) \cdot \frac{dh(y_i)}{dy}, \quad (2)$$

звідки

$$\left(v_r \cdot \frac{A_{bassin}}{A_{sponge}} - \frac{d(h_0 \cdot A_{h0})}{A_{sponge} d\tau} \right) \cdot dy = k_f(y) \cdot dh(y). \quad (3)$$

Тоді закон Дарсі (3) з урахуванням рівняння (4) запишемо:

$$v_r \cdot \frac{A_{bassin}}{A_{sponge}} \cdot dy = k_f(y) \cdot dh(y). \quad (4)$$

Інтегруємо рівняння проходження-насичення від зовнішньої поверхні до рівня y_i :

$$\frac{A_{bassin}}{A_{sponge}} \cdot \left(\int_0^\tau v_r \cdot d\tau \right) - h_0(\tau) \cdot \frac{A_{h0}(\tau)}{A_{sponge}} = \int_0^{y_i} w_{sat} \cdot dy_i = \sum_{j=1}^{m-1} (w_{sat,j} \cdot \delta_j) + w_{sat,m} \cdot \left(y_i - \sum_{j=1}^{m-1} \delta_j \right) \quad (5)$$

Інтегруємо закон Дарсі від рівня y_a в шарі n_a до рівня y_b в шарі n_b :

$$v_r \cdot \frac{A_{bassin}}{A_{sponge}} - \frac{d(h_0 \cdot A_{h0})}{A_{sponge} d\tau} = k_f(y) \cdot \frac{dh}{dy}. \quad (6)$$

Будь-яку багат шарову конструкцію можна представити як одношарову зі змінною функцією насичення $w_{sat(y)}$, тоді сума $\sum_{j=1}^{m-1} \delta_j$ втрачає зміст і рівняння набуває вигляду:

$$y_i(\tau) = \frac{\frac{A_{bassin}}{A_{sponge}} \cdot \left(\int_0^\tau v_r \cdot d\tau \right) - h_0(\tau) \cdot \frac{A_{h0}(\tau)}{A_{sponge}}}{w_{sat(y)}}. \quad (7)$$

Формула (7) є спрощеною, в порівнянні з (6), якщо прийняти просторову сітку відповідно до шарів конструкції без їхнього ділення, що зручно для інженерних задач розрахунку часу заповнення конструкції водою, але за умови апроксимації функції швидкості дощу, наприклад сплайном Ерміта. При цьому необхідно побудувати графік цього сплайну і впевнитись у відсутності додаткових осциляцій.

При умові, що інтенсивність дощу протягом дощової події можна апроксимувати функцією, то крок сітки не має принципового значення. Для кожного кроку сітки (між вузлами) можна застосувати рівняння (7) у вигляді:

$$y_{i,i+1} = \frac{\frac{A_{bassin}}{A_{sponge}} \cdot \int_{\tau_i}^{\tau_{i+1}} v_r \cdot d\tau - h_0(\tau_{i+1}) \cdot \frac{A_{h0}(\tau_{i+1})}{A_{sponge}} + h_0(\tau_i) \cdot \frac{A_{h0}(\tau_i)}{A_{sponge}}}{w_{sat(y_i)}}. \quad (8)$$

При умові, що $y_{i,\tau+1}$ опиняється в наступному шарі, то в рівнянні (8), замість y_i , підставляється сума товщин шарів від рівня ґрунту до поточного шару включно і рівняння розв'язується відносно τ_{i+1} .

Процес триватиме до тих пір, поки не буде охоплено всю товщину шарів. Якщо y_{i+1} перевищує товщину конструкції дощового саду, то в момент часу τ_{cr} конструкція буде повністю заповнена водою. Глибина занурення визначатиметься сумарною товщиною всіх шарів, а швидкість v_r визначатиметься за формулою (6).

Отримана модель є спрощеною та дозволяє описувати такі динамічні процеси, як проходження та насичення водою шарів системи дощового саду в певний момент часу, що особливо важливо для коректного опису гідродинаміки в системі та визначення оптимальних умов для ефективного функціонування конструкції дощового саду.

Розроблену в рамках роботи модель було реалізовано у програмному забезпеченні *Scilab* на основі симуляції дощової події з використанням параметрів, визначених з експериментальних досліджень пілотної установки дощового саду. Пілотна конструкція дощового саду виконана з прозорої труби з ПВХ, діаметром 10 см і висотою 0,86 м у вигляді циліндричного стовпчика. Оскільки конструкція дощового саду є шаруватою, було обрано наступні шари експериментальної установки:

ТЕХНОЛОГІЇ ЗАХИСТУ НАВКОЛИ

– верхній ґрунтовий шар для висадки рослин: завглибшки $\delta_1=0,33$ м та водоутримувальною здатністю $w_{sat1}=0,33$ м³/м³;

– проміжний піщаний шар: $\delta_2=0,33$ м та $w_{sat2}=0,31$ м³/м³;

– донний гравійний шар: $\delta_3=0,2$ м та $w_{sat3}=0,1$ м³/м³.

Верхній ґрунтовий матеріал для висадки рослин було зібрано з поверхневого шару на глибині 50–100 мм незабрудненої території в одному із районів м. Києва у вересні 2023 року. Відібраний зразок ґрунту висушено на повітрі, просіяно крізь сито розміром 2×2 мм. За текстурою ґрунт супіщаний зі складом піску 40–60%, мулу 30–45%, глини 10–20%. Насипна щільність складає 1477 г/см³, що вважається оптимальним показником для росту рослин [18].

Пісок було обрано річковий дрібнозернистий. Попередньо визначено початкову водонасиченість ґрунту і піску, яка дорівнює 3,7% та 6%, відповідно. Вологість ґрунту і піску визначали шляхом висушування у сушильній шафі при 105°C протягом 3 годин, після чого зразки зберігали в ній протягом 30 хвилин перед зважуванням. Вміст води розраховували як співвідношення між m_w (маса води в зразку = маса вологого зразку – маса сухого зразку) і m_d (маса сухого зразку). Фракційний склад гравійного щебню, що використовувався як заповнювач останнього шару конструкції дощового саду, у розмірах основних фракцій складав 5–7 мм, розміри супутніх фракцій – 1–3 мм.

Для того, щоб інтерпретувати результати вимірювань рівня води та часу проникнення в шари конструкції дощового саду, необхідно було отримати детальні дані про характеристики опадів, тобто інтенсивність та час їх початку і закінчення (тривалості). Тому дощову подію було змодельовано на основі реальних даних спостережень метеостанції Центральної геофізичної обсерваторії імені Бориса Срезневського, згідно з якими 22 липня 2023 у м. Києві (Україна) було зафіксовано рекордну за останні 16 років кількість

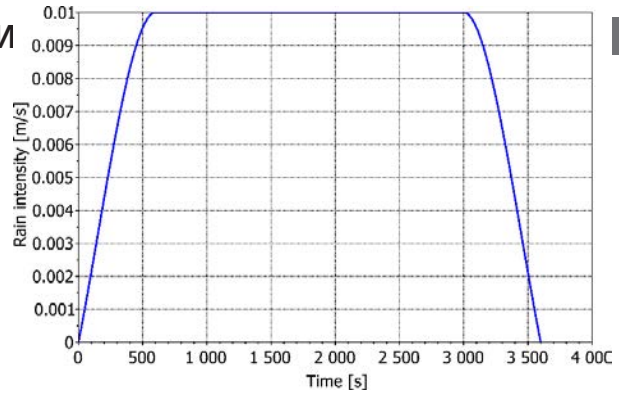


Рис. 5. Крива зміни інтенсивності дощу з часом

Використовуючи розроблену модель та програмне забезпечення *Scilab* при заданих величинах водоутримуючої здатності сипучих шарів дощового саду (0,33/0,33/0,1 м³/м³) було розраховано гідрологічну ефективність конструкції, в залежності від зміни товщини шарів, та запропоновано оптимальне співвідношення площ, при якому конструкція дощового саду дозволяє повністю утримувати стік води при заданій інтенсивності опадів (табл. 1).

З отриманих результатів видно, що збільшення товщини шарів конструкції дощового саду дозволяє досягнути максимальної ефективності утримання води при зменшенні величини співвідношення площ. Так, при товщині шарів 0,33/0,33/0,2 м повне насичення конструкції дощового саду спостерігається при значенні співвідношення площ 7,5. Це вважається неефективним показником, тому що при площі конструкції дощового саду 13,3 м², що становить 13% від площі водозбірного басейну, конструкція не дозволяє повністю утримувати дощову воду, інтенсивністю 0,00001 м/год. При цьому дощовий сад буде повністю заповнено водою за 3413 с (рис. 6).

Оптимальною величиною площі конструкції дощового саду вважається 4–7% від площі території, з якої буде збиратися стік (площа водозбірного басейну) [19]. Збільшення товщини шарів дозволяє досягнути цієї величини і при значеннях 0,5/0,8/0,4 м повне

Таблиця 1. Залежність ефективності утримання дощової води конструкцією дощового саду від зміни товщини шарів

Параметри	Конструкція дощового саду								
	1			2			3		
H_{sponge} , м	0,86			1,3			1,7		
δ_1 , м	0,33			0,4			0,5		
δ_2 , м	0,33			0,6			0,8		
δ_3 , м	0,2			0,3			0,4		
w_{sat1} , м ³ /м ³	0,33			0,33			0,33		
w_{sat2} , м ³ /м ³	0,31			0,31			0,31		
w_{sat3} , м ³ /м ³	0,1			0,1			0,1		
A_{bassin} , м ²	100			100			100		
A_{sponge} , м ²	13,3			8,9			6,8		
A_{bassin} / A_{sponge}	5	7	7,5	5	10	11,2	10	12	14,5
τ , с	-	-	3413	-	-	3489	-	-	3520

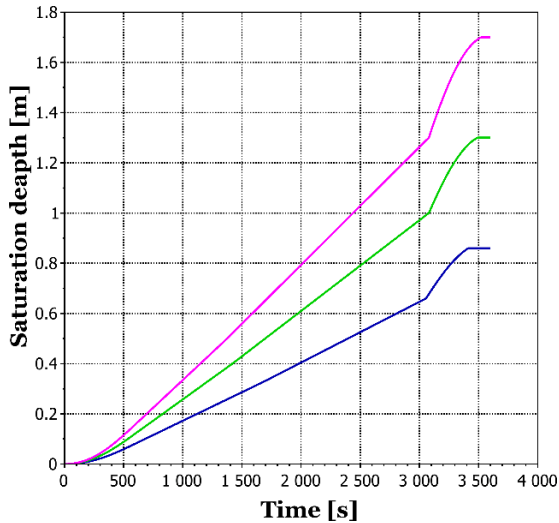


Рис. 6. Криві зміни глибини насичення конструкцій дощового саду в часі в залежності від товщини шарів δ (м) для співвідношення A_{bassin}/A_{sponge} :

— 7,5 — 11,2 — 14,5

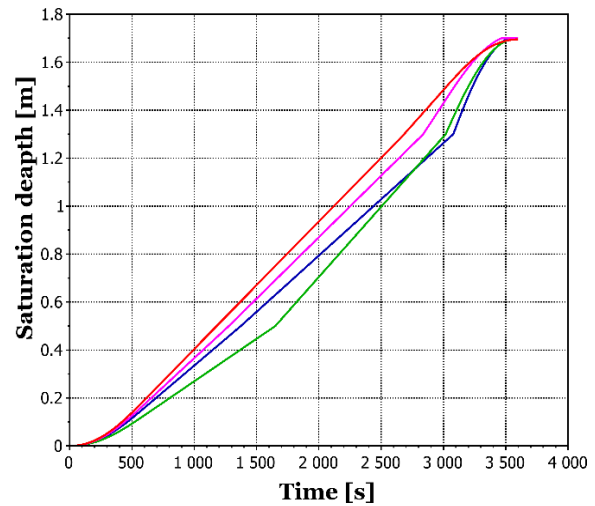


Рис. 7. Криві зміни глибини насичення конструкцій дощового саду в часі в залежності від водоутримуючої здатності шарів w_{sat} (M^3/M^3) для співвідношення площ A_{bassin}/A_{sponge} :

— 11,7 — 14,5 — 15,9 — 17,6

Таблиця 2. Залежність ефективності утримання дощової води конструкцією дощового саду від зміни водоутримуючої здатності шарів

Параметри	Конструкція дощового саду			
	1	2	3	4
H_{sponge} , м	1,7	1,7	1,7	1,7
δ_1 , м	0,5	0,5	0,5	0,5
δ_2 , м	0,8	0,8	0,8	0,8
δ_3 , м	0,4	0,4	0,4	0,4
w_{sat_1} , M^3/M^3	0,33	0,33	0,33	0,33
w_{sat_2} , M^3/M^3	0,2	0,31	0,31	0,33
w_{sat_3} , M^3/M^3	0,1	0,1	0,2	0,3
A_{bassin} , M^2	100	100	100	100
A_{sponge} , M^2	8,5	6,8	6,3	5,7
A_{bassin} / A_{sponge}	11,7	14,5	15,9	17,6
τ , с	3581	3520	3465	3574

насичення конструкції дощового саду спостерігається при значенні співвідношення площ 14,5 за 3520 с. Тобто якщо площа водозбірного басейну складає 100 м^2 , то для утримання води при заданій інтенсивності опадів, буде досить конструкції дощового саду, площею $6,8\text{ м}^2$. При цьому конструкцію можна проектувати прямокутною, наприклад, завглибшки $1,7\text{ м}$, завдовжки $3,4\text{ м}$ та завширшки 2 м .

Окрім впливу таких конструктивних особливостей дощового саду, як товщина шарів, ефективність його гідрологічного процесу можна регулювати, змінюючи водоутримуючу здатність шарів. При заданій товщині шарів дощового саду ($0,5/0,8/0,4\text{ м}$), змінюючи величину водоутримуючої здатності інфільтраційного та гравійного шарів конструкції, було розраховано співвідношення площ та час, при яких відбувається повне насичення конструкції дощового саду (табл. 2).

Величина водоутримуючої здатності верхнього ґрунтового шару конструкції була не змінна, так як ґрунт для висадки рослин характеризується більш-менш однорідними фізико-хімічними властивостями по всій території Київської області.

Водоутримуючу здатність перехідного інфільтраційного (піщаного) та заключного (гравійного) шару можна збільшити методом змішування цих матеріалів з матеріалами дрібнішої фракції, що призведе до зміни пористості і, як наслідок, інтенсивності проникнення води в шари [20].

Як видно з отриманих результатів, збільшення величини водоутримуючої здатності шарів конструкції дощового саду дозволяє підвищити ефективність гідрологічного процесу при вищих величинах співвідношення площ (рис. 7).

Наприклад, при значеннях водоутримуючої здатності $0,33/0,33/0,3\text{ м}^3/\text{м}^3$ повне насичення конструкції

дощового саду спостерігається при величині співвідношення площ 17,6 за 3574 с. Це означає, що при площі водозбірного басейну 100 м², для утримання води при заданій інтенсивності опадів, буде досить конструкції дощового саду, площею 5,7 м². При цьому розміри конструкції можна проектувати, наприклад, завглибшки 1,7 м, завдовжки 3,8 м та завширшки 1,5 м.

ОБГОВОРЕННЯ ОТРИМАНИХ РЕЗУЛЬТАТІВ

Сучасні проекти конструкцій дощових садів часто не враховують той аспект, що різні підходи до їх проектування, залежно від кліматичних умов, можуть приводити до різних результатів [21]. Визначення основних факторів гідрологічної продуктивності дощових садів може сприяти розробці рекомендацій щодо їх проектування та впровадження. Існує багато факторів, які впливають на ефективність дощових садів. Серед них різні дослідники вказують на розмір конструкції по відношенню до площі водозбірного басейну, типу та глибини фільтрувального матеріалу, типів рослинності, конструкції та обслуговування системи [22]. Характеристики опадів є ще одним важливим фактором, який слід враховувати на етапі проектування дощових садів, оскільки незалежно від розташування конструкції дощового саду, тривала дощова подія високої інтенсивності може сприяти перевищенню швидкості інфільтрації ґрунтових шарів, що призводить до переповнення конструкції.

Отримані результати моделювання в рамках представленої роботи узгоджуються з дослідженнями, проведеними авторами [23]. Випробовуючи функціональність дощових садів з трьома різними відсотками площі стоку 10, 15 і 20%, розташованих на території кампусу Університету Падуї (Італія), вони продемонстрували, що навіть у невеликому дощовому саду майже всі об'єми стоку з площі водозбірного басейну проникають у землю. Ці дослідження, як і результати моделювання в рамках цієї статті, підтверджують, що під час опадів високої інтенсивності відбувається утворення стовпа води в шарі заглиблення дощового саду, що спричиняє активне проходження і насичення шарів водою, починаючи зверху вниз і від центру до зони периметра.

З іншого боку, автори [24] показали, що дощові сади можуть підтримувати роботу недостатньої каналізаційної інфраструктури, особливо під час дощових явищ середньої інтенсивності.

Наші власні дослідження, а також дослідження інших авторів підтверджують, що вивчення функціональних особливостей дощового саду під час опадів з різними характеристиками є важливим аспектом для інженерної практики, що дозволяє визначати ключові фактори при визначенні розмірів конструкції, а також фізико-хімічних властивостей сипучих шарів.

Автори [25], використовуючи теоретичний сценарій моделювання в SWMM, розроблений Агентством

з охорони навколишнього середовища США (EPA), показали, що характер опадів має значний вплив на гідрологічні характеристики дощового саду, особливо на процеси переливу і поведінки підземного стоку. Аналіз результатів, отриманих авторами цього дослідження з урахуванням кількості опадів 2021 року, не дозволяє однозначно визначати, який з параметрів характеристик опадів (тривалість, глибина опадів або інтенсивність) має найбільший вплив на гідрологічний процес дощового саду. Оскільки під час жодної з дощових подій в межах експерименту не спостерігалось переливу конструкції на досліджуваній ділянці, можна припустити, що ефективність утримання стоку становила 100%. Це свідчить про те, що під час усіх дощових подій об'єм води всередині конструкції дощового саду завжди був нижчим за максимальну місткість, підтверджуючи, що система працює нижче запроєктованої продуктивності. Це можна пояснити типами фільтруючих матеріалів, які впливають на процес інфільтрації води. Проте, на думку авторів, важливо продовжувати дослідження дощового саду з моніторингом кількості опадів, рівня води, а також часу повного насичення конструкції в наступні періоди експлуатації системи, що дозволить визначити в майбутньому характеристики дощових подій і їх вплив на ефективність гідрологічної поведінки дощового саду.

Крім гідрологічних характеристик, дощові сади також забезпечують ряд соціальних та екологічних переваг [26]. Вони сприяють збільшенню міського біорізноманіття, зменшують ефект міського теплового острова та покращують відеоекологічне сприйняття середовища [27]. Будь-які дослідження, що проводяться на таких об'єктах, сприяють оптимізації їх проектування та розташування в міському просторі, максимізуючи вищезгадані переваги і забезпечуючи при цьому гідрологічні характеристики на відповідному рівні. Тому авторами в подальших дослідженнях буде вдосконалено розроблену гідрологічну модель, враховуючи процеси динаміки стоку дощової води, висоту стовпа води на поверхні конструкції дощового саду, а також враховуючи процес евапотранспірації і наявність рослинного покриву, оскільки це одні із важливих змінних, які можуть впливати на складові водного балансу таких об'єктів.

ВИСНОВКИ

В рамках цього дослідження на основі закону Дарсі та розробленої гідрологічної моделі, яка дозволяє описувати динамічні процеси проходження та насичення водою шарів дощового саду в певний момент часу, було перевірено вплив конструктивних факторів на ефективність гідрологічного процесу в конструкції. Найбільша кількість опадів за останні 16 років у м. Києві становила 36 мм/год або 0,00001 м/год. Зазвичай опади такої інтенсивності, які тривають майже добу, спричиняють локальні підтоплення міст.

У випадку цієї дощової події цього явища не спостерігалось, оскільки опади, незважаючи на високу інтенсивність, характеризувались не значною тривалістю. У цій ситуації модель дощового саду може повністю вмістити весь стік дощової води на протязі години, тимчасово утримуючи воду без переповнення конструкції, при умові, що співвідношення площ $\ll E_{qn069.eps} \gg$ буде не менше, ніж 14,5 (при цьому площа конструкції дощового саду становитиме 6,8 м²), конструкція буде завглибшки, не менше 1,7 м, а величина водоутримуючої здатності шарів конструкції буде не менше 0,33/0,31/0,1 м³/м³. З отриманих результатів видно, що чим менша площа конструкції дощового саду, у порівнянні з площею водозбірного басейну, тим швидше вона досягає свого повного насичення. Збільшення товщини шарів конструкції дощового саду та

регулювання величини їх водоутримуючої здатності дозволяє підвищити ефективність утримання води при зменшенні величини співвідношення площ. Проте ця залежність потребує додаткових досліджень, оскільки такі фактори, як тип ґрунтових сумішей, їх гідрофобність та фізико-хімічні властивості, мають безпосередній вплив на процес проникнення води. Результати дослідження можуть бути корисними на етапі планування та реалізації майбутніх інвестицій у дощові сади, які можна розташовувати в міських районах. Незважаючи на деякі обмеження, вони, безумовно, є основою для порівняння з іншими дослідженнями, проведеними в різних місцях і в різних умовах, що дозволяє встановити закономірності в продуктивності дощових садів для підвищення їх гідрологічної ефективності як стратегії адаптації до зміни клімату.

REFERENCES

- [1] Kravchenko, M.V., Tkachenko, T.M. (2023). Problemy udoskonalennya terminolohiyi ta suchasnoyi klasyfikatsiyi "zelenykh" konstruktsiy dlya stvorennia ukrayinskykh «zelenykh» standartiv. [Problems of improving the terminology and modern classification of «green» structures for the creation of Ukrainian «green» standards]. Collection of scientific works of the Admiral Makarov National University of Shipbuilding, no. 4 (493), pp. 194 – 204. Retrieved from: [https://doi.org/10.15589/znp2023.4\(493\).26](https://doi.org/10.15589/znp2023.4(493).26)
- [2] Dudrick, R., Hoffman, M., Antoine, J., Austin, K., Bedoya, L., Clark, S., Dean, H., Medina, A., Gotsch, S. (2024). Do plants matter?: Determining what drives variation in urban rain garden performance. *Ecological Engineering*, no. 201, 107208. Retrieved from: <https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2024.107208>
- [3] Rinchumphu, D., Anambutr, R. (2017). Determination of stormwater runoff infiltration on rainwater absorbing garden for landscape architecture. *Journal of Environmental Design*, no. 4 (2), pp. 84–101. <https://so02.tcithaijo.org/index.php/jed/article/view/111299>
- [4] Zhang, L., Ye, Z., Shibata, S. (2020). Assessment of rain garden effects for the management of urban storm runoff in Japan. *Sustainability*, no. 12, 9982. Retrieved from: <https://doi.org/10.3390/su12239982>
- [5] 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*, no. 11, 1415. Retrieved from: <https://doi.org/10.3390/w11071415>
- [6] Bąk, J., Barjenbruch, M. (2022). Benefits, Inconveniences, and Facilities of the Application of Rain Gardens in Urban Spaces from the Perspective of Climate Change—A Review. *Water*, no. 14 (7), 1153. Retrieved from: <https://doi.org/10.3390/w14071153>
- [7] Yuan, J., Dunnett, N., Stovin, V. (2017). The influence of vegetation on rain garden hydrological performance. *Urban Water Journal*, no. 14 (10), 1083–1089. Retrieved from: DOI: 10.1080/1573062X.2017.1363251
- [8] Jiang, C., Zhang, J., Peng, X., Li, J., Yang, X. (2024). Simulation of pollutant deep transport characteristics in a partially infiltrated bioretention system. *Journal of Water Process Engineering*, no. 58, 104928. Retrieved from: <https://doi.org/10.1016/j.jwpe.2024.104928>
- [9] Zhou, Z.; Guo, Q. (2022). Drainage alternatives for rain gardens on subsoil of low permeability: balance among ponding time, soil moisture, and runoff reduction. *J. Sustainable Water Built Environ.*, no. 8 (3), 05022002. Retrieved from: <https://doi.org/10.1061/JSWBAY.0000988>
- [10] Jennings, A.A., Berger, M.A., Hale, J.D. (2015). Hydraulic and hydrologic performance of residential rain gardens. *J. Environ. Eng.*, no. 141 (11), 04015033. Retrieved from: [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)EE.1943-7870.0000967](https://doi.org/10.1061/(ASCE)EE.1943-7870.0000967)
- [11] Winston, R.J., Dorsey, J.D., Hunt, W.F. (2016). Quantifying volume reduction and peak flow mitigation for three bioretention cells in clay soils in northeast Ohio. *Sci. Total Environ.*, no. 553, pp. 83–95. Retrieved from: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2016.02.081>
- [12] Ying-Chu Chen, Zih-An Chen (2021). Water retention capacity and runoff peak flow duration of the urban food garden: A city-based model and field experiment. *Ecological Engineering*, no. 159, 106073. Retrieved from: <https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2020.106073>
- [13] Tang, S., Luo, W., Jia, Z., Li, S., Wu, Y., Zhou, M. (2015). Effect of rain gardens on storm runoff reduction Shuikexue Jinzhan. *Water Sci.*, no. 26 (6), pp. 787–794. Retrieved from: <https://doi.org/10.14042/j.cnki.32.1309.2015.06.004>
- [14] Anderson, A.R., Franti, T.G., Shelton, D.P. (2018). Hydrologic evaluation of residential rain gardens using a stormwater runoff simulator. *Trans. ASABE*, no. 61 (2), pp. 495–508. Retrieved from: <https://doi.org/10.13031/trans.12213>
- [15] DelVecchio, T., Welker, A., Wadzuk, B.M. (2020). Exploration of volume reduction via infiltration and evapotranspiration for different soil types in rain garden lysimeters. *J. Sustainable Water Built Environ.*, no. 6 (1), 04019008. Retrieved from: <https://doi.org/10.1061/JSWBAY.0000894>

- [16] Nichols, W., Welker, A., Traver, R., Tu, M.C. (2021). Modeling seasonal performance of operational urban rain garden using HYDRUS-1D. *J. Sustainable Water Built Environ.*, no. 7 (3), 04021005. Retrieved from: <https://doi.org/10.1061/JSWBAY.0000941>.
- [17] Bethke, G.M., William, R., Stillwell A.S. (2022). Rain garden performance as a function of native soil parameters. *J. Sustainable Water Built Environ.*, no. 8 (1), 04021021. Retrieved from: <https://doi.org/10.1061/JSWBAY.0000967>.
- [18] Indoria, A.K., Sharma, K.L., Sammi Reddy, K., Rao, S. (2017). Role of soil physical properties in soil health management and crop productivity in rainfed systems-I: soil physical constraints and scope. *Current Science*, no. 112, pp. 2405-2414. Retrieved from: 10.18520/cs/v112/i12/2405-2414
- [19] Rinchumphu, D., Suriyanon, N., Phichetkunbodee, N., Munlikawong, S., Wanitchayapaisit, C., Sitthikankun, S. (2024). Economics and cost-effectiveness of a rain garden for flood-resistant urban design. *Global Journal of Environmental Science and Management*, no. 10 (1), pp. 1 – 12. Retrieved from: <https://doi.org/10.22034/gjesm.2024.01.01>
- [20] Sittisom, P., Tangsongsuwan, R., Munlikawong, S., Wongsapai, W., Sitthikankun, S., Rinchumphu, D. (2022). The Determination of Soil Infiltration Rate of Urban Bioretention Design Process in Chiang Mai, Thailand. *Journal of Environmental Design and Planning*, no. 21 (3), 228. Retrieved from: <https://doi.org/10.54028/NJ202221228>
- [21] Vijayaraghavan, K., Biswal, B.K., Adam, M.G., Soh, S.H., Tsen-Tieng, D.L., Davis, A.P., Chew, S.H., Tan, P.Y., Babovic, V., Balasubramanian, R. (2021). Bioretention systems for stormwater management: recent advances and prospects. *J. Environ. Manag.*, no. 292. Retrieved from: 10.1016/j.jenvman.2021.112766
- [22] Winston, R.J., Dorsey, J.D., Hunt, W.F. (2016). Quantifying volume reduction and peak flow mitigation for three bioretention cells in clay soils in northeast Ohio. *Sci. Total Environ.*, no. 553, pp. 83-95. Retrieved from: 10.1016/j.scitotenv.2016.02.081
- [23] Bortolini, L., Zanin, G. (2018). Hydrological behavior of rain gardens and plant suitability: a study in the Veneto plain (north-eastern Italy) conditions. *Urban Forestry and Urban Greening.*, no. 34, pp. 121-133. Retrieved from: 10.1016/j.ufug.2018.06.007
- [24] Basdeki, A., Katsifarakis, L., Katsifarakis, K.L. (2016). Rain gardens as integral parts of urban sewage systems case study in Thessaloniki, Greece. *Procedia Engineering, Elsevier Ltd*, pp. 426-432. Retrieved from: 10.1016/j.proeng.2016.11.084
- [25] Sun, Y., Pomeroy, C., Li, Q., Xu, C. (2019). Impacts of rainfall and catchment characteristics on bioretention cell performance. *Water Sci. Eng.*, no. 12, pp. 98-107. Retrieved from: 10.1016/j.wse.2019.06.002
- [26] Trojanowska, M. (2020). Health-promoting places: Rain gardens and sustainable water management. *IOP Conf. Ser. Mater. Sci. Eng.*, no. 960, 022025. Retrieved from: DOI 10.1088/1757-899X/960/2/022025
- [27] Siwiec, E., Erlandsen, A., Vennemo, H. (2018). City greening by rain gardens-costs and benefits. *Environmental Protection and Natural Resources*, no. 29, pp. 1–5. Retrieved from: DOI: <https://doi.org/10.2478/oszn-2018-0001>

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

- [1] 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*. № 4 (493). С. 194 – 204. DOI: [https://doi.org/10.15589/znп2023.4\(493\).26](https://doi.org/10.15589/znп2023.4(493).26)
- [2] Dudrick, R., Hoffman, M., Antoine, J., Austin, K., Bedoya, L., Clark, S., Dean, H., Medina, A., Gotsch, S. (2024) Do plants matter?: Determining what drives variation in urban rain garden performance. *Ecological Engineering*. Vol. 201. 107208. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2024.107208>
- [3] Rinchumphu, D., Anambutr, R. (2017) Determination of stormwater runoff infiltration on rainwater absorbing garden for landscape architecture. *Journal of Environmental Design*. Vol. 4 (2). P. 84–101. URL: <https://so02.tcithaijo.org/index.php/jed/article/view/111299>
- [4] Zhang, L., Ye, Z., Shibata, S. (2020) Assessment of rain garden effects for the management of urban storm runoff in Japan. *Sustainability*. Vol. 12. 9982. DOI: <https://doi.org/10.3390/su12239982>
- [5] 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*. Vol. 11. 1415. DOI: <https://doi.org/10.3390/w11071415>
- [6] Bakk, J., Barjenbruch, M. (2022) Benefits, Inconveniences, and Facilities of the Application of Rain Gardens in Urban Spaces from the Perspective of Climate Change – A Review. *Water*. Vol. 14 (7). 1153. DOI: <https://doi.org/10.3390/w14071153>
- [7] Yuan, J., Dunnett, N., Stovin, V. (2017) The influence of vegetation on rain garden hydrological performance. *Urban Water Journal*. Vol. 14 (10). P. 1083-1089. DOI: 10.1080/1573062X.2017.1363251
- [8] Jiang, C., Zhang, J., Peng, X., Li, J., Yang, X. (2024) Simulation of pollutant deep transport characteristics in a partially infiltrated bioretention system. *Journal of Water Process Engineering*. Vol. 58. 104928. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jwpe.2024.104928>
- [9] Zhou, Z.; Guo, Q. (2022) Drainage alternatives for rain gardens on a subsoil of low permeability: balance among ponding time, soil moisture, and runoff reduction. *J. Sustainable Water Built Environ*. Vol. 8 (3). 05022002. DOI: <https://doi.org/10.1061/JSWBAY.0000988>
- [10] Jennings, A.A., Berger, M.A., Hale, J.D. (2015) Hydraulic and hydrologic performance of residential rain gardens. *J. Environ. Eng.* Vol. 141 (11). 04015033. DOI: [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)EE.1943-7870.0000967](https://doi.org/10.1061/(ASCE)EE.1943-7870.0000967).
- [11] Winston, R.J., Dorsey, J.D., Hunt, W.F. (2016) Quantifying volume reduction and peak flow mitigation for three bioretention cells in clay soils in northeast Ohio. *Sci. Total Environ*. Vol. 553. P. 83–95. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2016.02.081>

- [12] Ying-Chu Chen, Zih-An Chen (2021) Water retention capacity and runoff peak flow duration of the urban food garden: A city-based model and field experiment. *Ecological Engineering*. Vol. 159. 106073. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2020.106073>
- [13] Tang, S., Luo, W., Jia, Z., Li, S., Wu, Y., Zhou, M. (2015) Effect of rain gardens on storm runoff reduction Shuikexue Jinzhan. *Water Sci.* Vol. 26 (6). P. 787–794. DOI: <https://doi.org/10.14042/j.cnki.32.1309.2015.06.004>.
- [14] Anderson, A.R., Franti, T.G., Shelton, D.P. (2018) Hydrologic evaluation of residential rain gardens using a stormwater runoff simulator. *Trans. ASABE*. Vol. 61 (2). P. 495–508. DOI: <https://doi.org/10.13031/trans.12213>.
- [15] DelVecchio, T., Welker, A., Wadzuk, B.M. (2020) Exploration of volume reduction via infiltration and evapotranspiration for different soil types in rain garden lysimeters. *J. Sustainable Water Built Environ.* Vol. 6 (1). 04019008. DOI: <https://doi.org/10.1061/JSWBAY.0000894>
- [16] Nichols, W., Welker, A., Traver, R., Tu, M.C. (2021) Modeling the seasonal performance of operational urban rain garden using HYDRUS-1D. *J. Sustainable Water Built Environ.* Vol. 7 (3). 04021005. DOI: <https://doi.org/10.1061/JSWBAY.0000941>.
- [17] Bethke, G.M., William, R., Stillwell A.S. (2022) Rain garden performance as a function of native soil parameters. *J. Sustainable Water Built Environ.* Vol. 8 (1). 04021021. DOI: <https://doi.org/10.1061/JSWBAY.0000967>.
- [18] Indoria, A.K., Sharma, K.L., Sammi Reddy, K., Rao, S. (2017) Role of soil physical properties in soil health management and crop productivity in rainfed systems-I: soil physical constraints and scope. *Current Science*. Vol. 112. P. 2405–2414. 10.18520/cs/v112/i12/2405-2414
- [19] Rinchumphu, D., Suriyanon, N., Phichetkunbodee, N., Munlikawong, S., Wanitchayapaisit, C., Sitthikankun, S. (2024) Economics and cost effectiveness of a rain garden for flood-resistant urban design. *Global Journal of Environmental Science and Management*. Vol. 10 (1). P. 1 – 12. DOI: <https://doi.org/10.22034/gjesm.2024.01.01>
- [20] Sittisom, P., Tangsongsuwan, R., Munlikawong, S., Wongsapai, W., Sitthikankun, S., Rinchumphu, D. (2022) The Determination of Soil Infiltration Rate of Urban Bioretention Design Process in Chiang Mai, Thailand. *Journal of Environmental Design and Planning*. Vol. 21 (3). P. 228. DOI: <https://doi.org/10.54028/NJ202221228>
- [21] Vijayaraghavan, K., Biswal, B.K., Adam, M.G., Soh, S.H., Tsen-Tieng, D.L., Davis, A.P., Chew, S.H., Tan, P.Y., Babovic, V., Balasubramanian, R. (2021) Bioretention systems for stormwater management: recent advances and future prospects. *J. Environ. Manag.* Vol. 292. 10.1016/j.jenvman.2021.112766
- [22] Winston, R.J., Dorsey, J.D., Hunt, W.F. (2016) Quantifying volume reduction and peak flow mitigation for three bioretention cells in clay soils in northeast Ohio. *Sci. Total Environ.* Vol. 553. P. 83–95. 10.1016/j.scitotenv.2016.02.081
- [23] Bortolini, L., Zanin, G. (2018) Hydrological behavior of rain gardens and plant suitability: a study in the Veneto plain (north-eastern Italy) conditions. *Urban Forestry and Urban Greening*. Vol. 34. P. 121–133. 10.1016/j.ufug.2018.06.007
- [24] Basdeki, A., Katsifarakis, L., Katsifarakis, K.L. (2016) Rain gardens as integral parts of urban sewage systems—a case study in Thessaloniki, Greece. *Procedia Engineering, Elsevier Ltd.* P. 426–432. 10.1016/j.proeng.2016.11.084
- [25] Sun, Y., Pomeroy, C., Li, Q., Xu, C. (2019) Impacts of rainfall and catchment characteristics on bioretention cell performance. *Water Sci. Eng.* Vol. 12. P. 98–107. 10.1016/j.wse.2019.06.002
- [26] Trojanowska, M. (2020) Health-promoting places: Rain gardens and sustainable water management. *IOP Conf. Ser. Mater. Sci. Eng.* Vol. 960. 022025. DOI 10.1088/1757-899X/960/2/022025
- [27] Siwiec, E., Erlandsen, A., Vennemo, H. (2018) City greening by rain gardens—costs and benefits. *Environmental Protection and Natural Resources*. Vol. 29. P. 1–5. DOI: <https://doi.org/10.2478/oszn-2018-0001>

© Кравченко М. В., Ткаченко Т. М., Мілейковський В. О.
Дата надходження статті до редакції: 27.02.2024
Дата затвердження статті до друку: 07.03.2024