

UDK 628.3:712.3

**Tetiana Tkachenko**, Doctor of technical sciences, Professor of the Department of Environmental Protection and Labor Protection Technologies  
ORCID ID: 0000-0003-2105-5951 *e-mail*: tkachenkoknuba@gmail.com

**Viktor Mileikovskiy**, Doctor of technical sciences, Professor of the Department Heat Gas Supply and Ventilation  
ORCID ID: 0000-0001-8543-1800 *e-mail*: v\_mil@ukr.net

**Marina Kravchenko**, Cand. Sc. (Tech.), Associate Professor of the Department of Environmental Protection and Labor Protection Technologies  
ORCID ID: 0000-0003-0428-6440 *e-mail*: marina-diek@ukr.net

Kyiv National University of Construction and Architecture, Kyiv, Ukraine

## **IMPACT OF "GREEN" ROOFS ON RAINWATER MANAGEMENT: REVIEW OF SCIENTIFIC RESEARCH AND PERSPECTIVES OF USE**

***Abstract.** The multifaceted advantages of "green" technologies are analyzed, one of which is the effective management of rainwater in urbanized regions, which allows solving a number of important problems, such as: local waste disposal; reduction of runoff volumes due to evapotranspiration from vegetation and open surfaces; retention of rainwater in the soil; reduction of peak flow values due to temporary storage of water in the substrate and drainage layer; improving the quality of rainwater, which then falls into the soil or is collected in separate reservoirs for further use for technical or domestic purposes. Based on the analysis of experimental studies by world-class scientists, it is shown that for extensive "green" roofs, the average efficiency of rainwater retention is estimated between 45% and 60%, and the cumulative annual retention is about 50% and 60%, depending on the local climate. The results of a study on determining the degree of reduction of rainwater runoff from the surfaces of "green" roofs, which were conducted on two model roofs (extensive and intensive) in Poland, are given. It is well-founded that the rainwater absorbed by the layers of the "green" roof slowly evaporates over a long period of time, which means maintaining a more stable relative air humidity in the vicinity of the building. The method of determining the amount of rainwater runoff from the surface of "green" roofs, as well as determining the daily load of rainwater drainage on the analyzed site, is presented. It was established that about 44% of rainwater from torrential rains is retained in the layers of the "green" roof, and in the case of an intensity not exceeding 5 mm/day, rainwater is completely retained by both intensive and extensive roofs. The advantages of "green" technologies in the process of filtering rainwater, which can be collected in tanks and used for technical needs, are considered. The prospects of rainwater management using "green" roofing systems on roofs in different countries of the world and, in particular, in Ukraine, were analyzed. The ranking of the total area and density of "green" roofs used for rainwater management in different cities of the world for 2022 is given. The authors developed and presented a recommended system of measures for the development and implementation of "green" roofs in Ukraine.*

***Keywords:** "green" constructions; "green" roofing; rainwater; stormwater runoff; average retention efficiency; management; prospects of use.*

Т.М. Ткаченко, В.О. Мілейковський, М.В. Кравченко

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

## ВПЛИВ «ЗЕЛЕНИХ» ПОКРІВЕЛЬ НА УПРАВЛІННЯ ДОЩОВИМИ ВОДАМИ: ОГЛЯД НАУКОВИХ ДОСЛІДЖЕНЬ ТА ПЕРСПЕКТИВИ ВИКОРИСТАННЯ

***Анотація.** Проаналізовано багатогранні переваги «зелених» технологій, однією з яких є ефективне управління дощовими водами в урбанізованих регіонах, що дозволяє вирішити ряд важливих проблем, таких як: локальна утилізація стоків; зменшення обсягів стоку, за рахунок еванотранспірації з рослинності та відкритих поверхонь; затримка дощової води в ґрунті; зменшення пікових значень стоку за рахунок тимчасового зберігання води в субстраті і дренажному шарі; поліпшення якості дощових вод, які дали потрапляють в ґрунт або збираються в окремі резервуари з метою подальшого використання в технічних чи побутових цілях. На основі аналізу експериментальних досліджень науковців світового рівня показано, що для екстенсивних «зелених» дахів середня ефективність утримання дощової води оцінюється між 45% і 60%, а сукупні річні утримання становлять близько 50% і 60%, залежно від місцевого клімату. Наведено результати досліджень по визначенню ступеня зниження стоку дощової води з поверхонь «зелених» покрівель, які проводилися на двох модельних дахах (екстенсивному та інтенсивному) у Польщі. Обґрунтовано припущення, що дощова вода, поглинена шарами «зеленого» даху, повільно випаровується протягом тривалого періоду часу, що означає підтримку більш стабільної відносної вологості повітря в околицях будівлі. Представлено методика визначення кількості відтоку дощової води з поверхні «зелених» покрівель, а також визначення добового навантаження відведення дощової води на аналізованій ділянці. Було встановлено, що близько 44% дощової води від проливних дощів затримується в шарах «зеленої» покрівлі, а в разі інтенсивності, що не перевищує 5 мм/добу, дощова вода повністю затримується як інтенсивними, так і екстенсивними дахами. Розглянуто переваги «зелених» технологій в процесі фільтрації дощової води, яку можна збирати в резервуари і використовувати для технічних потреб. Проаналізовано перспективи управління дощовими стоками з використанням систем «зеленого» покриття на дахах у різних країнах світу і, зокрема, в Україні. Наведено рейтинг загальної площі та щільності «зелених» дахів, які використовуються для управління дощовими водами, у різних містах світу за 2022 рік. Авторами розроблено та представлено рекомендовану систему заходів для розвитку та впровадження «зелених» дахів в Україні.*

***Ключові слова:** «зелені» конструкції; «зелена» покрівля; дощові води; зливові стоки; середня ефективність утримання; управління; перспективи використання.*

<https://doi.org/10.32347/2411-4049.2023.2.35-53>

### Вступ

Наслідком швидкої урбанізації міста є поява низки екологічних проблем, в тому числі пошук оптимальних, стійких та економічно вигідних рішень для управління дощовими водами у високорозвинених міських районах. Це критично важлива проблема, яка має місце через негативний вплив міських

дощових вод на водні та наземні екосистеми і, безпосередньо, на людину через забруднення води і повені.

Крім того, більшість міст мають окремі каналізаційні системи, призначені спеціально для обробки інтенсивного стоку, але багато з них знаходяться під землею і були побудовані багато років назад, тому дуже часто великі обсяги води затоплюють вулиці, транспортні шляхи та підвали будівель.

Існує декілька напрямів забезпечення стійкості міських територій до сильних злив та дощів.

Перший з них – використання «зелених» інфраструктурних рішень, таких як «зелені» покрівлі та «зелені» стіни, завдяки яким певна кількість води вбирається рослинами, ще деяка – залишається в субстраті, а інша частина – фільтрується за рахунок декількох шарів конструкції під рослинами, що відповідно її рух до систем дощової каналізації.

Другий метод полягає в збиранні дощової води в спеціальні накопичувальні баки, які знаходяться на покрівлі або біля будинку, чи в конструкції ґрунту на прибудинковій території. Накопичену воду можна використовувати для побутових та технічних потреб: полив газонів, прання, змивання туалетів, миття підлог, очищення тротуарів тощо.

Третій метод полягає в поглинанні води та її відведенні природними біологічними наземними засобами-губками: водопроникні поверхні, рельєф з ухилом, природне рослинне покриття, «зелені» конструкції, дощові сади, що відповідає сучасній концепції «місто-губка» [1].

Існує ряд стратегій світового масштабу, в компетентність яких входить управління дощовими стоками, такі як:

- «LID» (Low Impact Development, США) – підхід до управління поверхневими стоками, який враховує гідрологічні процеси в природі та використовує принципи управління дощовими водами, які найбільш близькі до природних процесів.

- «SuDS» (Sustainable Drainage Systems, Великобританія) – це підхід до управління дощовими водами, який включає використання методів, що знижують обсяг дощових стоків на місці, де вони утворюються, а також забезпечують очищення води.

- «LIUDD» (Low Impact Urban Design and Development, Нова Зеландія) – система управління дощовою водою на міських територіях, зокрема, за допомогою використання технологій зберігання, затримання та очищення дощової води.

- «WSUD» (Water Sensitive Urban Design, Австралія) – це сукупність принципів, які можна застосовувати для сталого управління водними ресурсами, надаючи можливості розвитку індустрії для забезпечення більш зручних умов для життя із ефективною системою водовідведення.

Кожна стратегія має унікальні переваги та значні досягнення в області управління дощовими водами. Проте варто зазначити, що розглянуті концепції мають свої обмеження. Наприклад, їх впровадження може вимагати великих інвестицій, а також технічної та інженерної підтримки. Крім того, більшість інженерних рішень вимагають додаткового простору на периферії міських районів, який, в іншому випадку, може бути використаний для корисної інфраструктури, що робить ці технології відносно складними для впровадження.

У роботі [2] стверджується, що запровадження «зелених» конструкцій, відповідно до рекомендацій *WSUD/SuDS/LIUDD*, може бути перспективним рішенням для зменшення негативних наслідків урбанізації і, зокрема, для управління дощовими водами.

**Метою роботи** є розробка аналітичного імовірнісного підходу до дослідження характеристик «зеленого» даху для управління зливовими водами шляхом оцінки функції розподілу ймовірностей стоку, а також аналіз перспектив використання в різних країнах світу і, зокрема, в Україні.

## Основна частина

«Зелені» конструкції – це біотехнології, які поєднують в собі архітектурні конструкції та живі рослини. В залежності від розташування, конструкції можуть бути вертикальні або горизонтальні. До вертикальних відносяться вертикальне озеленення та фітостіни, до горизонтальних – «зелені» покрівлі, зелені схили, екопарковки, дощові зелені сади та зелені придорожні дощові смуги. Для більш детального пояснення нашого підходу до класифікації та термінології «зелених» конструкцій, Ткаченко Т.М. [3, 4] розроблена схема екологізації сучасних міст. Такі конструкції можуть бути створені на нових та вже існуючих будівлях (вертикальне озеленення, «зелені» дахи, «зелені» тераси) або знизу на рельєфі («зелені» схили, екопарковки, дощові зелені сади, зелені придорожні дощові смуги).

«Зелений» дах – це один з видів «зелених» конструкцій, що являє інженерні багат шарові технології, з вегетованою верхньою поверхнею. Остання складається з субстрату та рослин. Основними підготовчими шарами для створення якісної «зеленої» покрівлі є гідроізоляція та єдина дренажна система, на яку потім накладаються інші технологічні шари, які мають різну будову, в залежності від типу «зеленої» покрівлі та виконуваних нею функцій (інтенсивна, екстенсивна), типу субстрату та рослинності. Деякі технологічні шари пристосовано для поглинання, накопичення та поступового вивільнення дощової води.

Для будівництва «зеленого» даху вибір конструкції та матеріалів надзвичайно важливий, оскільки може безпосередньо впливати на гідрологічні та теплові показники, яких необхідно досягти, а також на термін корисної експлуатації конструкції [5].

Впровадження системи «зеленого» покриття на даху є ефективним та вигідним рішенням, в порівнянні з іншими стратегіями, через можливість влаштування їх на вже існуючу конструкцію [6].

«Зелені» дахи останніми роками привертають увагу спеціалістів в різних галузях завдяки своїм різним функціям, пов'язаним з гідрологією, зеленим середовищем, енергоефективністю, якістю повітря та екологією.

Багатогранні переваги цих технологій включають: управління дощовими водами [7]; зменшення споживання енергії в будівлях [8, 9], контроль забруднення повітря, секвестрування CO<sub>2</sub> [10, 11], збільшення біорізноманіття [12] та зменшення ефекту міського теплового острова [13].

«Зелені» дахи, на відміну від традиційних, зберігають значну кількість дощової води і є значно привабливими для міських регіонів, де необхідно усунути серйозні екологічні наслідки надмірного або неконтрольованого стоку [14].

Як показали багато авторів [15-18], системи «зелених» дахів пропонують рішення таких проблем, пов'язаних з управлінням дощовими водами, як:

- локальна утилізація стоків;
- зменшення обсягів стоку, за рахунок евапотранспірації з рослинності та відкритих поверхонь;
- затримка дощової води в ґрунті;
- зменшення пікових значень стоку за рахунок тимчасового зберігання води в субстраті і дренажному шарі;
- поліпшення якості дощових вод, які фільтруються через мембрани «зелених» дахів, а потім потрапляють в ґрунт або збираються в окремі резервуари з метою подальшого використання в технічних чи побутових цілях.

Тобто, вони дозволяють воді випаровуватися і поглинатися ґрунтом та рослинами на даху, тим самим зменшуючи кількість води, що стікає в систему дощової каналізації. Таким чином, лише частина дощової води фільтрується через ґрунтовий та дренажний шари, а потім спрямовується в каналізацію [19].

Багато науковців проводили дослідження систем «зелених» дахів в усьому світі з точки зору їх продуктивності в управлінні зливовими водами. Так, для екстенсивних «зелених» дахів (з глибиною підкладки < 15 см) середня ефективність утримання дощової води оцінюється між 45% [20] і 60% [21], а сукупні річні утримання становлять близько 50% [22] і 60% [23].

Автори [7] розробили гідрологічну модель «зеленої» покрівлі та дослідили довгострокові показники з точки зору вмісту вологи, випаровування та утримання. Було виявлено, що рівень утримання дощової води коливався від 28 до 84% ( $\pm 5\%$ ) залежно від місцевого клімату, а продуктивність утримання можна покращити за допомогою оптимізації конфігурації.

Інші автори [24] розробили модель водного балансу для вивчення показників утримання дощової води «зеленою» покрівлею на основі метеорологічних даних за 11 років. Середньорічне утримання становило від 30 до 73,8%, залежно від місцевих кліматичних умов, які відіграють першочергове значення для гідрологічних характеристик «зелених» дахів.

Так, у дослідженні [25] була розроблена модель водного балансу для оцінки швидкості випаровування з поверхні «зелених» дахів, з метою моделювання річної ефективності утримання води цими конструкціями. Чотири міста, розташовані в різних кліматичних регіонах Китаю, були відібрані для порівняння їхніх середньорічних і сезонних показників утримування стоку великими «зеленими» дахами з використанням 11-річних метеорологічних даних, а також оцінки впливу накопичувальної ємності субстрату, параметрів типів рослинності та режиму опадів. Результати показали, що середньорічне утримання стоку в сухому континентальному кліматі Ланьчжоу становило 73,8%, що було вище, ніж у вологих кліматичних регіонах Пекіна (48,9%), Чунціна (45,2%) і Шеньчженя (30,0%). Ефективність утримування стоку екстенсивними «зеленими» дахами значно знизилася зі збільшенням кількості опадів, а більш тривалий період сухої погоди – призвів до кращого утримання стоку.

Інше дослідження, проведене дослідницькою групою в Канаді, прийшло до висновку, що показники утримання дощової води «зеленими» дахом

становили 21 і 100% під час вологого та літнього сезонів, відповідно [26]. Хоч дослідження і дало суттєві результати про характеристики «зеленого» даху, проте щодо інтенсивності опадів у роботі не повідомлялося.

В цілому, водоутримуюча здатність «зелених» покрівель є непостійною і коливається від низького відсотка до 100%, що залежить від таких факторів, як ухил «зеленої» покрівлі, товщина і тип підкладкового шару, вид рослинності, а також кількість води, накопиченої в її структурі, до наступних дощових опадів [27]. Утримання дощових вод різними типами «зелених» покрівель в залежності від місця розташування та типу субстрату представлено в таблиці 1, з якої слідує, що не обов'язково влаштовувати велику інтенсивну «зелену» покрівлю для управління дощовими стоками, а ефективний результат, щодо відсотку утримання, можна досягнути за допомогою екстенсивних дахів.

Табл. 1. Утримання дощових вод різними типами «зелених» покрівель в залежності від місця розташування та типу субстрату

Тип «зеленої» покрівлі	Місце розташування «зеленої» покрівлі	Тип субстрату	Товщина підкладки, см	Утримання дощового стоку, %
Екстенсивний та інтенсивний	Нідерланди	Дрібний пісок, підгрунтовий торф, верхній шар ґрунту – глинистий торф, мох-сфагнум	5, 10, 20, 40, 60 і 80	Від 55 до 75
Інтенсивний	Гонконг, Китай	Суглинний пісок, супіщаний ґрунт, розкладений граніт, природний сапролітний ґрунт з гідрофільним мінеральним шаром кам'яної вати	40 і 80	Від 39 до 43
Екстенсивний	Лондон, Великобританія	Легкий субстрат, що перекриває дренажний шар	5	В середньому 34
Екстенсивний	Йоркшир, Великобританія	Дрібна подрібнена цегла, дрібна подрібнена черепиця	20	44
Екстенсивний	Сеул, Корея	Вулканічні матеріали і ґрунт з мохом-сфагнумом, перлітом і дренажною плитою	20	Від 43 до 61

Тип «зеленої» покрівлі	Місце розташування «зеленої» покрівлі	Тип субстрату	Товщина підкладки, см	Утримання дощового стоку, %
Екстенсивний	Салерно, Італія	Суміш білявого і бурого торфу, цеолітів і некомпостованого ґрунту (кокосових волокон) і мінерального добрива	15	Від 50 до 100
Екстенсивний	Генуя, Італія	Гравій вулканічної породи (70%) з пемзою і торфом або з пемзою, цеолітом і торфом	20	В середньому 85
Інтенсивний	Варшава, Польща	Промитий пісок з мінеральними домішками (халцедоніт, цегла), торфом і компостом	4	В середньому 54
Екстенсивний	Тарту, Естонія	Торф'яний субстрат (66%) з гумусом (30%) і глиною (4%)	10	87,5
Інтенсивний	Варшава, Польща	Промитий пісок, халцедон, глина, торф і компост з керамзитом	15	67,5

Більшість досліджень, присвячених дослідженням впливу «зелених» дахів на управління дощовою водою, спрямовані лише на встановлення швидкості утримання дощових стоків «зеленими» дахами або на визначення відсоткового зменшення стоку води через шари даху (інтенсивний або екстенсивний) [28]. Найчастіше автори не розглядають проблему мінливості добової кількості опадів і те, як вона впливає на процес зменшення дощової води, що стікає із «зеленого» даху в систему водовідведення.

В роботі [29] було проведено дослідження по визначенню ступеня зниження стоку дощової води з поверхонь «зелених» покрівель на двох модельних дахах у Польщі, які відповідають, відповідно, екстенсивним (рис. 1, а) і інтенсивним покрівельним конструкціям (рис. 1, б). Дощова вода з дренажного шару скидалась у мірні резервуари під кожною моделлю (рис. 1, в).

В дослідженнях також вимірювали відносну вологість повітря безпосередньо над рослинністю, що покриває «зелені» моделі даху. У бездощові дні було встановлено, що відносна вологість повітря біля «зеленого» даху до 5% вище, ніж в околицях будівлі, де розташовувалися моделі. Це підтверджує припущення про те, що дощова вода, поглинена шарами «зеленого» даху, повільно випаровується протягом тривалого періоду часу, що означає більш стабільну (сприятливу для якості повітря) відносну вологість повітря в околицях будівлі.

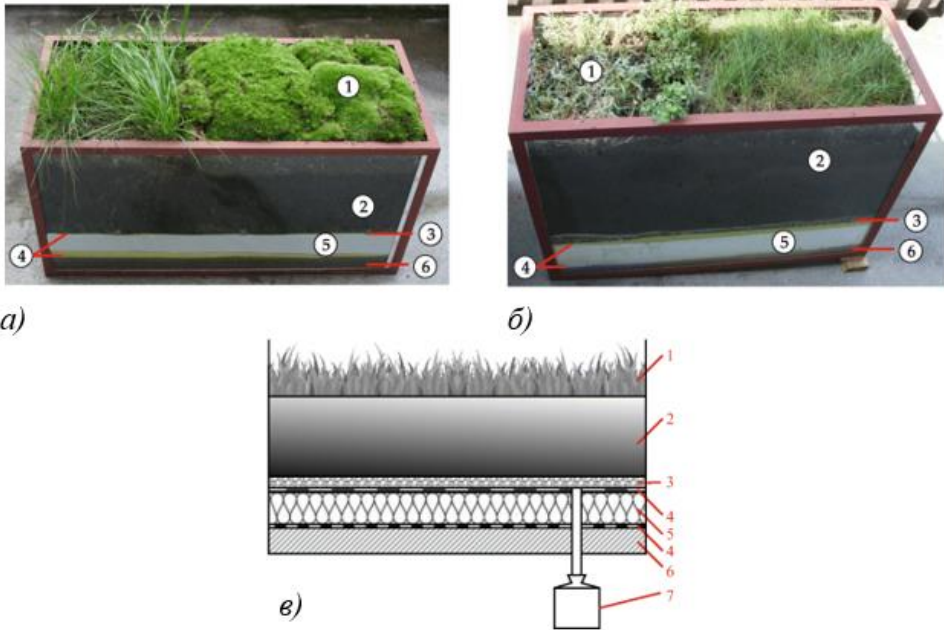


Рис. 1. Модель «зеленої» покрівлі, що використовувалась в експериментальних дослідженнях роботи [29]:

*a* – екстенсивна модель даху; *б* – інтенсивна модель даху; *в* – схема в розрізі, де: 1 – рослини, 2 – шар ґрунту, 3 – дренажний шар, 4 – шар контролю пари, 5 – ізоляційний шар, 6 – бетонна плита, 7 – вимірювальний бак

Як показали багато авторів у своїх дослідженнях, інтенсивні дахи зменшують стік дощової води в каналізаційну систему більше, ніж великі (екстенсивні) дахи [28].

Для того щоб визначити кількість відтоку дощової води з поверхні «зелених» покрівель на аналізованій ділянці, авторами [28] запропоновано наступну методику розрахунку:

$$LDR = \sum_i A_i \cdot RR_i \cdot CMC \cdot R, \text{ дм}^3/\text{день} , \quad (1)$$

де: *i* – тип зеленого даху: 1 – екстенсивний, 2 – інтенсивний;

*A* – поверхня покрівель заданого типу в аналізованій зоні;

*R* – добова кількість опадів (мм/добу).

Також була запропонована формула для визначення добового навантаження відведення дощової води на аналізованій ділянці, у вигляді:

$$LD = A_R \cdot R - LDR, \text{ дм}^3/\text{день} , \quad (2)$$

де: *A<sub>R</sub>* – випробувальний майданчик, обладнаний каналізацією дощової води (м<sup>2</sup>).

За даною методикою було встановлено [30], що близько 44% дощової води від проливних дощів затримується в шарах «зеленої» покрівлі, а в разі інтенсивності, що не перевищує 5 мм/добу, дощова вода повністю затримується як інтенсивними, так і екстенсивними дахами.



Перевага «зелених» покрівель в урбоценозах полягає не тільки в зниженні навантаження на зливові стоки, а й у фільтрації дощової води, яку можна збирати в резервуари і використовувати для технічних потреб [31].

Через зростання тарифів на воду використання дощової води стає все більш виправданим рішенням. Науковці в різних країнах світу вважають, що незабаром можливість використання дощової води буде так само актуально, як, наприклад, розділення відходів. За статистикою, 60% питної води можна заощадити, використовуючи дощову воду, що є не лише економічно вигідним, а й дозволяє зберегти найцінніший ресурс [32].

У роботі [32] розраховано, що з інтенсивної плоскої «зеленої» покрівлі, площею 200 м<sup>2</sup>, можна зібрати 5 м<sup>3</sup> очищеної дощової води, що вистачить на технічні потреби сім'ї з 4 чоловік. У цьому випадку загальна потреба для будинку і поливу саду становить 111 м<sup>3</sup>/рік та добова потреба – 0,341 м<sup>3</sup>/день.

В рамках іншої роботи [33] за оригінальною авторською методикою професора Ткаченко Т.М. було зроблено розрахунок утриманого поверхневого стоку покрівлею німецького виробника, який показав, що для збору дощової води з інтенсивної плоскої покрівлі площею 150 м<sup>2</sup> для офісного колективу з 8 осіб необхідний резервуар об'ємом 4 м<sup>3</sup>. При цьому сумарні потреби на будинок і полив саду становлять 178,5 м<sup>3</sup>/рік, а щоденні потреби – 0,5035 м<sup>3</sup>/добу.

Збирання дощової води є загальновідомою практикою, яка сягає доісторичних часів [34] та визначається як збір дощової води з поверхні дахів з метою забезпечення водою побутового або іншого використання.

Однією з проблем, пов'язаних із впровадженням таких систем, є переповнення резервуарів, що порушує будь-яку передбачувану вигоду від управління зливовими водами.

Щоб вирішити цю проблему, автори [35] проконтролювали роботу резервуару для збору дощової води з технологією управління в реальному часі, які часто називають «розумними» технологіями, що збирає стік зливових вод із «зеленого» даху протягом періоду, близького до п'яти років. Було кількісно оцінено ряд додаткових переваг управління зливовими водами, які надає резервуар в межах «зеленого» даху.

Щодо питання фільтрації дощової води, у роботі [36] експериментально проаналізовано якість дощової води, що зливається в прототип «зеленого» даху, для цілей повторного використання. Отримані результати, які аналізувалися, включають колірність, каламутність, рН, аміак, азот, нітрити, нітрати, ортофосфати, загальне число коліформ та термотолерантних коліформ. Більшість оцінених параметрів були в межах ГДК, тоді як ортофосфатів, фекальних коліформ, показників кольорності та каламутності не було виявлено, тому авторами зроблено висновок, що залучення «зелених» дахів в систему менеджменту дощовими водами демонструє потенціал та переваги – як альтернативу для боротьби з водною кризою.

Управління дощовими стоками з використанням систем «зеленого» покриття на дахах сьогодні стрімко розвивається у багатьох країнах світу, проте деякі з них виділяються своїми досягненнями та популярністю даного підходу.

З глобальної точки зору, політика впровадження систем «зелених» дахів для управління дощовими водами, в основному, зосереджена в Європі та Північній Америці, а зобов'язання згідно із законами є єдиною політикою поширення цих технологій, доступною на всіх чотирьох континентах.

Згідно зі статистикою, у 2022 році (рис. 2) більшість міст зі значною щільністю «зелених» дахів, які використовуються для управління дощовими стоками, знаходяться в Австрії, Німеччині та Швейцарії, які вперше прийняли політику впровадження та поширення цих технологій. Серед них Базель (Швейцарія) має найбільшу площу «зелених» дахів на душу населення (5,71 м<sup>2</sup>), за ним йдуть Штутгарт і Лінц. Відповідно до будівельного законодавства 1996 року, Базель зобов'язує до встановлення «зелених» конструкцій на плоскі дахи всіх нових і відремонтованих об'єктів, виділяючи матеріальні кошти на підтримку цієї ініціативи [37].

З глобальної точки зору, найбільш рання індустрія «зелених» дахів з'явилася в Німеччині, яка вже понад 40 років проводить політику їх впровадження та є найдосконалішою країною у світі в цій галузі.

Німеччина почала просувати будівництво «зелених» дахів ще в 1970-х роках. У 1975 році утворення Forschungsgesellschaft Landschaftsentwicklung, Landschaftsbau (FLL), що базується в Бонні, Німеччина, зміцнило ядро національних інтересів щодо розвитку «зелених» дахів [38], а в 1982 році законодавство зробило їх впровадження обов'язковим.

Якщо розглядати кількість «зелених» дахів у абсолютних значеннях, то в Німеччині існує понад 10 000 «зелених» дахів, загальною площею 14 млн м<sup>2</sup>. За останніми даними, на 2022 рік у Німеччині близько 14% дахів облаштовано зеленими насадженнями, які можуть використовуватись для керування дощовими водами. Однак у деяких містах цей відсоток може бути значно вищим, наприклад у Берліні понад 25% дахів облаштовано «зеленими» конструкціями.

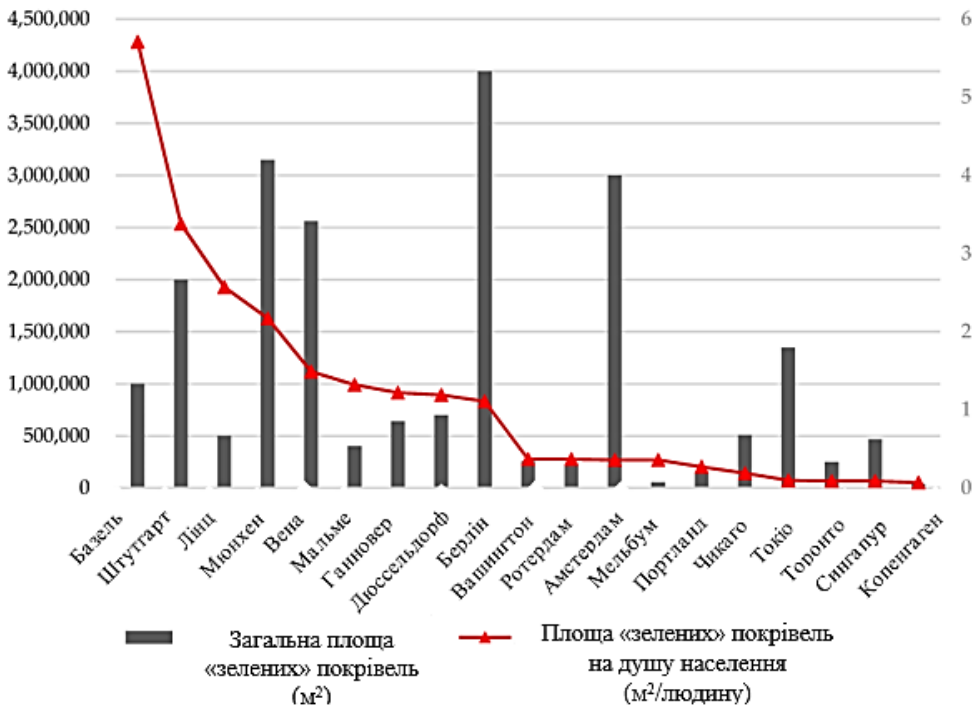


Рис. 2. Рейтинг загальної площі та щільності «зелених» дахів, які використовуються для управління дощовими водами, у різних містах світу (2022 рік)

Крім того, окрім рекомендацій FLL [39], які широко використовуються як еталонна основа для проектування, будівництва, обслуговування та регулювання «зелених» дахів у всьому світі, у Німеччині існує декілька програм та документів, які стимулюють використання «зелених» дахів для управління дощовими водами та зменшення негативного впливу антропогенної діяльності на довкілля. Основні з них: закон про підтримку використання «зелених» дахів (Dachbegrünungsgesetz); програма підтримки «зелених» дахів в містах (Green Roof Program for Cities); програма підтримки «зелених» дахів для приватних осіб (Green Roof Program for Private Individuals); закон про «зелені» дахи та «зелені» стіни (Gründach- und Fassadenbegrünungsgesetz). Всі ці нормативні документи стимулюють використання «зелених» конструкцій в будівництві та надають фінансову підтримку для їх встановлення і реконструкції.

За останні 15 років, у зв'язку зі зростанням ризику порушення екологічної стійкості, впровадження систем «зелених» дахів значно зросло. В даний час такі країни, як США, Канада, Австралія, Сінгапур і Японія, активно виступають за поширення «зелених» технологій [40].

Лінц, Австрія, було одним з перших міст у світі, яке запровадило політику поширення «зелених» дахів з метою ефективного керування зливовими водами. У 1989 році муніципальний уряд надав субсидії для заохочення розвитку цих технологій, а міські будівельні норми вимагали встановлення «зелених» дахів на нові будівлі [38].

Хоча розвиток «зелених» конструкцій в Північній Америці почався пізніше, ніж в Європі, в останні роки цей напрямок швидко розвивається. Green Roofs for Healthy Cities (GRHC), найбільша організація з поширення «зелених» дахів в Північній Америці, зіграла важливу роль у сприянні розвитку цієї галузі. В останні роки GRHC бере безпосередню участь у розробці політики в декількох містах і, навіть, розробила калькулятор «зелених» дахів (GreenSave Calculator) для вирішення питання вартості [41].

Крім того, GRHC і Фонд «зеленої» інфраструктури (Green Infrastructure Foundation) працюють над розробкою комплексної системи оцінки продуктивності для «зелених» дахів і «зелених» стін під назвою «The Living Architecture Performance Tool (LAPT)» [41].

Згідно зі звітом Green Roofs for Healthy Cities 2020 Industry Survey, у США було встановлено близько 4,3 млн м<sup>2</sup> «зелених» дахів у 2019 році, що становить приблизно 13% ринку «зелених» дахів у світі.

В Азії, на відміну від європейських та американських країн, міська забудова з високою щільністю, що призводить до знищення зелених насаджень, прискорила впровадження «зелених» технологій. Хоча Сінгапур визнаний на міжнародному рівні лідером за створенням зелених насаджень на даху, щільність «зелених» дахів є невелика в порівнянні з європейськими та американськими містами. Його програма Skyrise Greenery заохочує до розвитку «зелених» технологій, а схема стимулювання зелених насаджень Skyrise (SGIS), випущена в 2009 році, підтримує 50% витрат на встановлення «зелених» дахів.

Японський уряд почав надавати позики під низькі відсотки власникам садів на даху в 1999 році. Національний закон про будівництво 2005 року вимагає, щоб нові квартири або офісні будівлі в міських районах покривали 20% «зелені» дахи [37].

Китай є однією із країн з найбільш концентрованим розподілом міст високої щільності забудов [38]. Зі стрімким розвитком урбанізації щільність забудови збільшується, а міські зелені насадження зменшуються. Незважаючи на деякі заходи, які були вжиті провідними містами Китаю, практика впровадження «зелених» конструкцій все ще відстає, в порівнянні з західними країнами та іншими азійськими аналогами, такими як Сінгапур і Японія. Згідно з глобальною статистикою за 2018 рік, площа «зелених» дахів на душу населення в розвинених містах Європи та Америки становить понад 1,0 м<sup>2</sup>, в той час як у таких містах Китаю, як Шеньчжень, Пекін та Шанхай, лише 0,21 м<sup>2</sup>, 0,1 м<sup>2</sup> і 0,09 м<sup>2</sup>, відповідно.

Пекін є одним з перших міст, в якому було побудовано «зелені» дахи в Китаї, а також є лідером у просуванні цих конструкцій у північних містах. У 1983 році сад на даху пекінського готелю Great Wall став першим масштабним проєктом «зеленого» даху на півночі Китаю. У 2004 році «Пекінське планування будівництва міського середовища» вимагало, щоб 30% дахів багатопверхівок і 60% дахів малоповерхових будинків були озеленені, в першу чергу, з метою керування дощовими стоками. У 2005 році «Пекінський кодекс «зеленого» даху (DB11/T281-2005)» став важливою основою для будівництва та управління в галузі «зелених» технологій у Пекіні та північних містах.

Щодо України, останніми роками спостерігається зростання інтересу до використання «зелених» технологій і можливостей регулювання ними дощових стоків, проте науково-технічні розробки, результати досліджень щодо їх впровадження та методики щодо розрахунку вторинного використання дощових вод на сьогодні практично відсутні.

Вагомий внесок у галузь досліджень «зелених» конструкцій внесла автор [42], розробивши та вдосконаливши ряд методологій: оцінки рівня секвестрації CO<sub>2</sub> біомасою «зелених конструкцій»; визначення термічного опору рослинного шару та «охладжувального ефекту»; розрахунку утриманого поверхневого стоку «зеленою» покрівлею; розрахунок об'єму резервуара на базі методики Wilo, адаптованої до кліматичних умов України.

Крім того, автори Ткаченко Т.М. та Мілейковський В.О. беруть безпосередню участь у формуванні нормативної бази впровадження «зелених» технологій в Україні, зокрема розробляють проєкт ДБНВ.2.6-\_:202\_ «Зелені» конструкції, одним із позицій якого є управління зливовими водами.

Для того щоб впровадження «зелених» дахів в Україні в майбутньому набувало більшої актуальності та поширення, необхідно розробити та реалізувати комплексну програму, яка б охоплювала систему заходів, запропоновану авторами і представлену на рис. 3.

*Обов'язкова політика* передбачає дві складові: *законодавчу* політику, в межах якої необхідно створювати та впроваджувати законодавчу базу щодо впровадження «зелених» конструкцій в Україні (нормативні акти, кодекси та стандарти) та *регуляторну* політику, яка передбачає державне регулювання в сфері інноваційного використання інструменту планування фактора зелених насаджень.

*Політика стимулювання* повинна включати два напрямки реалізації: *фінансову* політику (створення дослідницьких фондів для «зелених» конструкцій, запуск схеми фінансування, виділення низьковідсоткових кредитів) та *оціночну* політику (включення елементів «зелених» конструкцій в

існуючі або новостворені системи, пов'язані з екологічним сталим розвитком, розробка комплексної системи оцінки ефективності «зелених» конструкцій, встановлення системи маркування).



Рис. 3. Рекомендована система заходів для розвитку та впровадження «зелених» дахів в Україні

*Політика допомоги* на державному та регіональному рівнях має на меті реалізацію політики *організації* (створення асоціацій, організацій та установ для дослідження «зелених» конструкцій, забезпечення професійної підготовки, сприяння підвищенню обізнаності громадськості) та *інформаційну* політику (надавати платформи для обміну знаннями, організація конференцій різного рівня, семінарів, конкурсів тощо).

Крім цього, велике значення має формування загальної громадської думки з використанням засобів масової інформації, проведенням опитувань, експерсій на наявні «зелені» конструкції тощо.

## Висновки

«Зелені» дахи можуть стати ефективним засобом управління дощовими водами, покращуючи їх кількісні та якісні показники, зменшуючи ризики повеней та інших проблем, пов'язаних з надмірним накопиченням води. Результати численних наукових досліджень свідчать про те, що «зелені» дахи дозволяють значно зменшувати кількість дощових вод, що надходять до каналізації та дренажних систем, а також фільтрувати дощову воду до фізико-хімічного складу, придатного для використання у технічних цілях. Водостримуюча здатність «зеленої» покрівельної системи залежить від кількох причинно-наслідкових факторів, таких як: місцеві кліматичні умови (включаючи обсяг і характер опадів, середні температури і вологість), попередні умови вологості, глибина субстрату та його гідралічні

характеристики, ємність накопичувального/дренажного шару, характеристики рослинного покриву та нахил «зеленого» даху, а також щільності забудови в міських умовах.

З кожним роком публікується все більше і більше статей на тему впливу «зелених» дахів на керування дощовими водами, але широких оглядів, які дають такий необхідний переріз цієї галузі досліджень і систематично подають дані та визначають існуючі прогалини, мало.

У зв'язку з цим науково-практична співпраця між науковцями, політиками та практиками в майбутньому є важливою для передачі нових знань про «зелені» технології, допомагаючи містам та міським регіонам, зокрема в Україні, розробляти відповідні стратегії їх впровадження.

## СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Глушенко Р.О., Ткаченко Т.М., Мілейковський В.О. Ефективне відведення дощової води з доріг дощовими садами-смугами у концепції міста-губки // Екологічна безпека та природокористування. 2021. № 4 (40). С. 46-59. <https://doi.org/10.32347/2411-4049.2021.4.46-59>
2. Mohammad A. Alim, Aatur Rahman, Zhong Tao, Brad Garner, Robert Griffith, Mark Liebman. 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. 2022. Volume 362. 132561. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2022.132561>
3. Ткаченко Т.М. Проблеми класифікації та використання «зелених конструкцій» в екологізації сучасних міст // Екологічні науки: науково-практичний журнал. 2018. № 1(20). Т.2. С. 21-24.
4. Ткаченко Т.М. Проблеми класифікації та використання «зелених конструкцій» у екологізації сучасних міст. Архітектура. Будівництво. Дизайн // III Міжнар. наук.-практичн. конгрес: «Міське середовище – XXI ст.», тези доповідей. 2018. С. 50-52.
5. Florence Rezende Leite, Maria Lúcia Pereira Antunes. Green roof recent designs to runoff control: A review of building materials and plant species used in studies // Ecological Engineering. 2023. Volume 189. 106924. <https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2023.106924>
6. Mohammad A. Alim. Experimental investigation of a multilayer detention roof for stormwater management // Journal of Cleaner Production. 2023. Volume 395. 136413. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2023.136413>
7. Jing Yan, Shouhong Zhang, Jianjun Zhang. Stormwater retention performance of green roofs with various configurations in different climatic zones // Journal of Environmental Management. 2022. Volume 319. 115447. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2022.115447>
8. Dorin Maier. Perspective of using green walls to achieve better energy efficiency levels. A bibliometric review of the literature // Energy and Buildings. 2022. Volume 264. 112070. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2022.112070>
9. Elmira Jameia. Review on the cooling potential of green roofs in different climates // Science of The Total Environment. 2021. Volume 791. <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0048969721034781>
10. Mohammad Reza Seyedabadi, Mohsen Karrabi, Jafar Nabati. Investigating green roofs' CO<sub>2</sub> sequestration with cold- and drought-tolerant plants (a short- and long-term carbon footprint view) // Environmental Science and Pollution Research. 2022. Volume 29. P. 14121–14130. <https://link.springer.com/article/10.1007/s11356-021-16750-w>
11. Victor G. Pessoa, Cristiane Guiselini, Abelardo A. de A. Montenegro, Heliton Pandorfi, José A. D. Barbosa Filho, Thais F. da S. Vicente. Carbon sequestration by plant species used in green roofs across different periods // Rev. bras. eng. agríc. ambient. 2022. Volume 26 (6). <https://doi.org/10.1590/1807-1929/agriambi.v26n6p407-411>

12. Wooster E.I.F., Fleck R., Torpy F., Ramp D., Irga P.J. Urban green roofs promote metropolitan biodiversity: A comparative case study // *Building and Environment*. 2022. Volume 207, Part A. 108458. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2021.108458>
13. Jiawei Fu, Karine Dupre, Silvia Tavares, David King, Zsuzsa Banhalmi-Zakar. Optimized greenery configuration to mitigate urban heat: A decade systematic review // *Frontiers of Architectural Research*. 2022. Volume 11, Issue 3. P. 466-491. <https://doi.org/10.1016/j.foar.2021.12.005>
14. Wen Liu, Qi Feng, Weiping Chen, Wei Wei, Ravinesh C. Deo. The influence of structural factors on stormwater runoff retention of extensive green roofs: new evidence from scale-based models and real experiments // *Journal of Hydrology*. 2019. Volume 569. P. 230-238. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2018.11.066>
15. Agnieszka Szpak, Joanna Modrzyńska, Joanna Piechowiak. Resilience of Polish cities and their rainwater management policies // *Urban Climate*. 2022. Volume 44. 101228. <https://doi.org/10.1016/j.uclim.2022.101228>
16. Gilbert Osayemwenre, Otolorin Adelaja Osibote. A Review of Health Hazards Associated with Rainwater Harvested from Green, Conventional and Photovoltaic Rooftops // *International Journal of Environmental Science and Development*. 2021. Vol. 12, No. 10. e7e6639410ac4d63ba8569f7e40cda02550c.pdf (semanticscholar.org)
17. Sylvana Melo dos Santos, Érika Pinto Marinho, Glenda Cordeiro de Oliveira Lima, Everton Santos de Barros, Yan Ranny Machado Gomes. Green roof drained rainwater quality assessment: a physicochemical analysis from a case study in Northeastern Brazil // *Sustainable Water Resources Management*. 2022. Volume 8. <https://link.springer.com/article/10.1007/s40899-022-00698-x>
18. Procaccini G., Monticelli C. a Green Roof Case Study in the Urban Context of Milan: Integrating the Residential and Cultivation Functions for Sustainable Development // *Water*. 2021. Vol. 13(2), 137. doi: <https://doi.org/10.3390/w13020137>
19. Baryła A., Karczmarczyk A., Bus A. Role of substrates used for green roofs in limiting rainwater runoff // *Journal of Ecological Engineering*. 2018. 19(5):86-92. <https://doi.org/10.12911/22998993/91268>
20. Jeroen Mentens, Dirk Raes, Martin Hermy. Green roofs as a tool for solving the rainwater runoff problem in the urbanized 21st century? // *Landscape and Urban Planning*. 2006. Volume 77. Issue 3. P. 217-226. <https://doi.org/10.1016/j.landurbplan.2005.02.010>
21. Haowen Xie, Jun Liu, Mark Randall. Impact of structural factors on green roof runoff – A field investigation and statistical analysis // *Journal of Hydrology*. 2022. Volume 613, Part A. 128345. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2022.128345>
22. Virginia Stovin, Simon Poë, Christian Berretta. A modelling study of long term green roof retention performance // *Journal of Environmental Management*. 2013. Volume 131. P. 206-215. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2013.09.026>
23. Ju Young Lee, Min Jung Lee, Mooyoung Han. A pilot study to evaluate runoff quantity from green roofs // *Journal of Environmental Management*. 2015. Volume 152. P. 171-176. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2015.01.028>
24. Yongwei Gong, Dingkun Yin, Junqi Li et al. Performance assessment of extensive green roof runoff flow and quality control capacity based on pilot experiments // *Science of The Total Environment*. 2019. Volume 687. P. 505-515. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.06.100>
25. Wen Liu, Bernard A. Engel, Qi Feng, Ruolin Li. Simulating annual runoff retention performance of extensive green roofs: A comparison of four climatic regions in China // *Journal of Hydrology*. 2022. Volume 610. 127871. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2022.127871>
26. Fitsum Tariku, Sara Hagos. Performance of green roof installed on highly insulated roof deck and the plants' effect: An experimental study // *Building and Environment*. 2022. Volume 221. 109337. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2022.109337>

27. Agnieszka Bus, Anna Szelałowska. Green Water from Green Roofs – The Ecological and Economic Effects // Sustainability. 2021. Vol. 13(4). 2403. <https://doi.org/10.3390/su13042403>
28. Zhang Z., Szota C., Fletcher T., Williams N., Farrell C. Green roof storage capacity can be more important than evapotranspiration for retention performance // J Environ Management. 2019. 232:404–412. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2018.11.070>
29. Alicja Kolasa-Więcek, Dariusz Suszanowicz. The green roofs for reduction in the load on rainwater drainage in highly urbanised areas // Environmental Science and Pollution Research. 2021. 28:34269–34277. <https://doi.org/10.1007/s11356-021-12616-3>
30. Kaiser D., Köhler M., Schmidt M., Wolff F. Increasing evapotranspiration on extensive green roofs by changing substrate depths, construction, and additional irrigation // Buildings. 2019. 9:173. <https://doi.org/10.3390/buildings9070173>
31. Cipolla S.S., Altobelli M., Maglionico M. Decentralized Water Management: Rainwater Harvesting, Greywater Reuse and Green Roofs within the GST4Water Project // Proceedings. 2018. Vol. 2. P. 673–680. DOI:10.3390/proceedings2110673
32. Tkachenko T. The reuse of rainwater drains by using «green roofs» // USEFUL online journal. Discipline: Water Supply & Treatment. 2019. Volume 3, Issue 1. <https://journals.indexcopernicus.com/api/file/viewByFileId/631224.pdf>
33. Ткаченко Т.М., Прокопенко І.О. Розрахунок утриманого поверхневого стоку покрівлю німецького виробника // Екологічна безпека та природокористування, 2020. № 3 (35). С. 44–56. <https://doi.org/10.32347/2411-4049.2020.3.44-56>
34. Velasco-Munoz J.F., Aznar-Sanchez J.A., Batiles-de la Fuente A., Fidelibus M.D. Rainwater harvesting for agricultural irrigation: An analysis of global research // Water. 2019. Vol. 11. 1320. <https://doi.org/10.3390/w11071320>
35. Nandan Shetty, Mark Wang, Robert Elliott, Patricia Culligan. Examining How a Smart Rainwater Harvesting System Connected to a Green Roof Can Improve Urban Stormwater Management // Water. 2022. Vol. 14(14). 2216. <https://doi.org/10.3390/w14142216>
36. Thomas Schatzmayr Welp Sa, Mohammad K. Najjar, Ahmed W. A. Hammad, Elaine Vazquez, Assed Haddad. Assessing rainwater quality treated via a green roof system // Clean Technologies and Environmental Policy. 2022. Volume 24. P. 645–660. <https://link.springer.com/article/10.1007/s10098-021-02144-6>
37. Irga P.J., Braun J.T., Douglas A.N.J., Pettit T., Fujiwara S., Burchett M.D., Torpy F.R. The distribution of green walls and green roofs throughout Australia: Do policy instruments influence the frequency of projects? // Urban Forestry & Urban Greening. 2017. Volume 24. P. 164–174. <https://doi.org/10.1016/j.ufug.2017.03.0264>
38. Jing Dong, Jin Zuo, Jiancheng Luo. Development of a Management Framework for Applying Green Roof Policy in Urban China: A Preliminary Study // Sustainability. 2020. Vol. 12(24). 10364. <https://doi.org/10.3390/su122410364>
39. Guidelines for the Planning, Construction and Maintenance of Green Roofs; Landscape Development and Landscaping Research Society e.v. (FLL): Bonn, Germany. 2018. URL: <https://bit.ly/3QCoLzG>
40. Xi Chen, Chenyang Shuai, Zhenhao Chen, Yu Zhang. What are the root causes hindering the implementation of green roofs in urban China? // Science of The Total Environment. 2019. Volume 654. P. 742–750. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.11.051>
41. Maya S., Steven W.P., Jeff. J. Green Roof and Wall Policy in North America-Regulations, Incentives, and Best Practices. 2019. Available online: <https://greenroofs.org/policy-resources> (дата звернення: 08.03.2023).
42. Ткаченко Т.М. Науково-методологічні основи підвищення рівня екологічної безпеки урбоценозів шляхом створення енергоефективних технологій «зеленого» будівництва : дис. ... д-ра техн. наук : 21.06.01 / Ткаченко Т.М.; Київ. нац. ун-т буд-ва і архітектури. Київ, 2018. 311 с.

*Стаття надійшла до редакції 22.03.2023 і прийнята до друку після рецензування 09.06.2023*



## REFERENCES

1. Hlushchenko, R. O., Tkachenko, T. M., & Mileikovskiy, V. O. (2021). Effective drainage of rainwater from roads by rain garden-strips in the concept of the city-sponge. *Environmental Safety and Natural Resources*, 40(4), 46–59. <https://doi.org/10.32347/2411-4049.2021.4.46-59>
2. Mohammad A. Alim, Ataur Rahman, Zhong Tao, Brad Garner, Robert Griffith, Mark Liebman. (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*. Volume 362. 132561. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2022.132561>
3. Tkachenko T.M. (2018). Problems of classification and use of "green constructions" in greening of modern cities. *Ecological sciences: scientific and practical journal*. No. 1(20). T.2. P. 21-24.
4. Tkachenko T.M. (2018). Problems of classification and use of "green constructions" in greening of modern cities. *III International scientific-practical congress: "Urban environment - XXI century"*. P. 50-52.
5. Florence Rezende Leite, Maria Lúcia Pereira Antunes. (2023). Green roof recent designs to runoff control: A review of building materials and plant species used in studies. *Ecological Engineering*. Volume 189. 106924. <https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2023.106924>
6. Mohammad A. Alim. (2023). Experimental investigation of a multilayer detention roof for stormwater management. *Journal of Cleaner Production*. Volume 395. 136413. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2023.136413>
7. Jing Yan, Shouhong Zhang, Jianjun Zhang. (2022). Stormwater retention performance of green roofs with various configurations in different climatic zones. *Journal of Environmental Management*. Volume 319. 115447. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2022.115447>
8. Dorin Maier. (2022). Perspective of using green walls to achieve better energy efficiency levels. A bibliometric review of the literature. *Energy and Buildings*. Volume 264. 112070. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2022.112070>
9. Elmira Jameia. (2021). Review on the cooling potential of green roofs in different climates. *Science of The Total Environment*. Volume 791. <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0048969721034781>
10. Mohammad Reza Seyedabadi, Mohsen Karrabi, Jafar Nabati. (2022). Investigating green roofs' CO<sub>2</sub> sequestration with cold- and drought-tolerant plants (a short- and long-term carbon footprint view). *Environmental Science and Pollution Research*. Volume 29. P. 14121–14130. <https://link.springer.com/article/10.1007/s11356-021-16750-w>
11. Victor G. Pessoa, Cristiane Guiselini, Abelardo A. de A. Montenegro, Heliton Pandorfi, José A. D. Barbosa Filho, Thais F. da S. Vicente. (2022). Carbon sequestration by plant species used in green roofs across different periods. *Rev. bras. eng. agric. ambient*. Volume 26 (6). <https://doi.org/10.1590/1807-1929/agriambi.v26n6p407-411>
12. Wooster E.I.F., Fleck R., Torpy F., Ramp D., Irga P.J. (2022). Urban green roofs promote metropolitan biodiversity: A comparative case study. *Building and Environment*. Volume 207, Part A. 108458. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2021.108458>
13. Jiawei Fu, Karine Dupre, Silvia Tavares, David King, Zsuzsa Banhalmi-Zakar. (2022). Optimized greenery configuration to mitigate urban heat: A decade systematic review. *Frontiers of Architectural Research*. Volume 11, Issue 3. P. 466-491. <https://doi.org/10.1016/j.foar.2021.12.005>
14. Wen Liu, Qi Feng, Weiping Chen, Wei Wei, Ravinesh C. Deo. (2019). The influence of structural factors on stormwater runoff retention of extensive green roofs: new evidence from scale-based models and real experiments. *Journal of Hydrology*. Volume 569. P. 230-238. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2018.11.066>
15. Agnieszka Szpak, Joanna Modrzyńska, Joanna Piechowiak. (2022). Resilience of Polish cities and their rainwater management policies. *Urban Climate*. Volume 44. 101228. <https://doi.org/10.1016/j.uclim.2022.101228>

16. Gilbert Osayemwenre, Otolorin Adelaja Osibote. (2021). A Review of Health Hazards Associated with Rainwater Harvested from Green, Conventional and Photovoltaic Rooftops. *International Journal of Environmental Science and Development*. Vol. 12, No. 10. e7e6639410ac4d63ba8569f7e40cda02550c.pdf (semanticscholar.org)
17. Sylvana Melo dos Santos, Érika Pinto Marinho, Glenda Cordeiro de Oliveira Lima, Everton Santos de Barros, Yan Ranny Machado Gomes. (2022). Green roof drained rainwater quality assessment: a physicochemical analysis from a case study in Northeastern Brazil. *Sustainable Water Resources Management*. Volume 8. <https://link.springer.com/article/10.1007/s40899-022-00698-x>
18. Procaccini G., Monticelli C. (2021). A Green Roof Case Study in the Urban Context of Milan: Integrating the Residential and Cultivation Functions for Sustainable Development. *Water*. Vol. 13(2), 137. <https://doi.org/10.3390/w13020137>
19. Baryła A., Karczmarczyk A., Bus A. (2018). Role of substrates used for green roofs in limiting rainwater runoff. *Journal of Ecological Engineering*. 19(5):86-92. <https://doi.org/10.12911/22998993/91268>
20. Mentens J., Raes D., Hermy M. (2006). Green roofs as a tool for solving the rainwater runoff problem in the urbanized 21st century? *Landscape and Urban Planning*. Volume 77. Issue 3. P. 217-226. <https://doi.org/10.1016/j.landurbplan.2005.02.010>
21. Haowen Xie, Jun Liu, Mark Randall. (2022). Impact of structural factors on green roof runoff – A field investigation and statistical analysis. *Journal of Hydrology*. Volume 613, Part A. 128345. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2022.128345>
22. Stovin V., Poč S., Berretta C. (2013). A modelling study of long term green roof retention performance. *Journal of Environmental Management*. Volume 131. P. 206-215. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2013.09.026>
23. Ju Young Lee, Min Jung Lee, Mooyoung Han. (2015). A pilot study to evaluate runoff quantity from green roofs. *Journal of Environmental Management*. Volume 152. P. 171-176. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2015.01.028>
24. Yongwei Gong, Dingkun Yin, Junqi Li et al. (2019). Performance assessment of extensive green roof runoff flow and quality control capacity based on pilot experiments. *Science of The Total Environment*. Volume 687. P. 505-515. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.06.100>
25. Wen Liu, Bernard A. Engel, Qi Feng, Ruolin Li. (2022). Simulating annual runoff retention performance of extensive green roofs: A comparison of four climatic regions in China. *Journal of Hydrology*. Volume 610. 127871. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2022.127871>
26. Fitsum Tariku, Sara Hagos. (2022). Performance of green roof installed on highly insulated roof deck and the plants' effect: An experimental study. *Building and Environment*. Volume 221. 109337. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2022.109337>
27. Agnieszka Bus, Anna Szelągowska. (2021). Green Water from Green Roofs - The Ecological and Economic Effects. *Sustainability*. Vol. 13(4). 2403. <https://doi.org/10.3390/su13042403>
28. Zhang Z., Szota C., Fletcher T., Williams N., Farrell C. (2019). Green roof storage capacity can be more important than evapotranspiration for retention performance. *J. Environ Management*. 232:404–412. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2018.11.070>
29. Alicja Kolasa-Więcek, Dariusz Suszanowicz. (2021). The green roofs for reduction in the load on rainwater drainage in highly urbanised areas. *Environmental Science and Pollution Research*. 28:34269–34277. <https://doi.org/10.1007/s11356-021-12616-3>
30. Kaiser D., Köhler M., Schmidt M., Wolff F. (2019). Increasing evapotranspiration on extensive green roofs by changing substrate depths, construction, and additional irrigation. *Buildings*. 9:173. <https://doi.org/10.3390/buildings9070173>
31. Cipolla S.S., Altobelli M., Maglionico M. (2018). Decentralized Water Management: Rainwater Harvesting, Greywater Reuse and Green Roofs within the GST4Water Project. *Proceedings*. Vol. 2. P. 673-680. <https://doi.org/10.3390/proceedings2110673>
32. Tkachenko Tatiana. (2019). The reuse of rainwater drains by using «green roofs». *USEFUL online journal. Discipline: Water Supply & Treatment*. Volume 3, Issue 1. <https://journals.indexcopernicus.com/api/file/viewByFileId/631224.pdf>

33. Tkachenko T.M., Prokopenko I.O. (2020). Calculation of retained surface runoff by the roof of a German manufacturer. *Ekologichna bezpeka ta pryrodokorystuvannya*. No. 3 (35), P. 44–56. <https://doi.org/10.32347/2411-4049.2020.3.44-56> [in Ukrainian].
34. Velasco-Munoz J.F., Aznar-Sanchez J.A., Batiles-de-laFuente A., Fidelibus M.D. (2019). Rainwater harvesting for agricultural irrigation: An analysis of global research. *Water*. Vol. 11. 1320. <https://doi.org/10.3390/w11071320>
35. Nandan Shetty, Mark Wang, Robert Elliott, Patricia Culligan. (2022). Examining How a Smart Rainwater Harvesting System Connected to a Green Roof Can Improve Urban Stormwater Management. *Water*. Vol. 14(14). 2216. <https://doi.org/10.3390/w14142216>
36. Thomas Schatzmayr Welp Sa, Mohammad K. Najjar, Ahmed W. A. Hammad, Elaine Vazquez, Assed Haddad. (2022). Assessing rainwater quality treated via a green roof system. *Clean Technologies and Environmental Policy*. Volume 24. P. 645–660. <https://link.springer.com/article/10.1007/s10098-021-02144-6>
37. Irga P.J., Braun J.T., Douglas A.N.J., Pettit T., Fujiwara S., Burchett M.D., Torpy F.R. (2017). The distribution of green walls and green roofs throughout Australia: Do policy instruments influence the frequency of projects? *Urban Forestry & Urban Greening*. Volume 24. P. 164-174. <https://doi.org/10.1016/j.ufug.2017.03.0264>
38. Jing Dong, Jin Zuo, Jiancheng Luo. (2020). Development of a Management Framework for Applying Green Roof Policy in Urban China: A Preliminary Study. *Sustainability*. Vol. 12(24). 10364. <https://doi.org/10.3390/su122410364>
39. Guidelines for the Planning, Construction and Maintenance of Green Roofs; Landscape Development and Landscaping Research Society e.v. (FLL): Bonn, Germany. 2018. Retrieved from: <https://bit.ly/3QCoLzG>
40. Xi Chen, Chenyang Shuai, Zhenhao Chen, Yu Zhang. (2019). What are the root causes hindering the implementation of green roofs in urban China? *Science of The Total Environment*. Volume 654. P. 742-750. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.11.051>
41. Maya S., Steven W.P., Jeff. J. (2019). Green Roof and Wall Policy in North America-Regulations, Incentives, and Best Practices. Retrieved March, 8, 2023 from: <https://greenroofs.org/policy-resources>.
42. Tkachenko, T. M. (2018). Naukovo-metodolohichni osnovy pidvyshchennia rivnia ekolohichnoi bezpeky urbotsenoziv shliakhom stvorennia enerhoefektyvnykh tekhnolohii «zelenoho» budivnytstva. dys. ... d-ra tekhn. Nauk. Kyiv: Kyivskiy natsionalnyi universytet budivnytstva i arkhitektury [in Ukrainian].

*The article was received 22.03.2023 and was accepted after revision 09.06.2023*

#### **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 Повітрофлотський, 31

ORCID ID: 0000-0003-2105-5951 **e-mail:** tkachenkoknuba@gmail.com

#### **Мілейковський Віктор Олександрович**

д.т.н., професор кафедри теплогазопостачання і вентиляції Київського національного університету будівництва і архітектури

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

ORCID ID: 0000-0001-8543-1800 **e-mail:** v\_mil@ukr.net

#### **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 Повітрофлотський, 31

ORCID ID: 0000-0003-0428-6440 **e-mail:** marina-diek@ukr.net