

МОДИФІКАЦІЯ «ЗЕЛЕНОЇ» ПОКРІВЛІ З ВИКОРИСТАННЯМ ТЕХНІЧНИХ РІШЕНЬ ДЛЯ ЗМЕНШЕННЯ НЕГАТИВНОГО ВПЛИВУ ЗЛИВОВИХ ВОД У МІСЬКИХ УМОВАХ

Марина Кравченко¹, Тетяна Ткаченко², Віктор Мілейковський³

Київський національний університет будівництва і архітектури
31, пр. Повітрофлотський, м. Київ, Україна, 03037

¹канд. техн. наук, marina-diek@ukr.net, orcid.org/0000-0003-0428-6440

²докт. техн. наук, tkachenko.tm@knuba.edu.ua, orcid.org/0000-0003-2105-5951

³докт. техн. наук, v_mil@ukr.net, orcid.org/0000-0001-8543-1800

DOI: 10.32347/2524-0021.2023.43.16-28

Анотація. Проаналізовано ефективність та недоліки «зеленого» даху в управлінні дощовими водами в міському середовищі. Показано схему конструкції типового «зеленого» даху та його класифікацію з точки зору типів. Обґрунтовано пропозицію підвищення ефективності управління зливовими стоками з допомогою «зелених» покрівель, шляхом їх інтеграції з іншими системами, тобто створення та впровадження «гібридних зелених» дахів (*Hybrid Green Roofs*). Проаналізовано можливість «блакитного» даху, як технології управління дощовими стоками без рослинності, яка дозволяє ефективно утримувати дощову воду. Наведено схему конструкції та принцип роботи «зелено-блакитного» даху, а також зроблено порівняльний аналіз його ефективності в управлінні зливовими стоками з традиційними та «зеленими» покрівлями. Представлено результати досліджень, які показали, що вимірний відтік дощового стоку з «блакитного» даху становить біля 0,45 дм³/с у порівнянні зі звичайним дахом з об'ємом стоку 1,55 дм³/с. З іншого боку, стік із «зелено-блакитної» покрівлі становить біля 0,1 дм³/с, порівняно з контрольною покрівлею (0,3 дм³/с). Обґрунтовано, що «зелено-блакитний» дах є більш ефективним в утриманні дощового стоку під час довготривалих опадів, ніж «блакитний» дах. Однак обидва варіанти можуть бути застосовані до міських будівель – як ефективні методи управління стоком опадів у міських районах. Наведено схему конструкції та принцип роботи «фіолетового» даху – як виду покрівлі, яка включає в себе губчастий шар з гідрофільної мінеральної вати, щільний шар поліефірної тканини, і може включати додатковий стільниковий шар для збільшення обсягу дощової води, яку можна утримувати, зменшуючи тим самим піковий стік до 95 %. Наведено результати дослідження, що підтверджують технічну можливість технології «фіолетового» даху щодо уповільнення стоку та зменшення обсягу зливової води під час опадів різної інтенсивності. «Фіолетовий» дах, заснований на концепції «зберігання», концептуально і технічно відрізняється від «зеленого» даху і може ефективно затримувати пік дощових опадів, що дозволяє знизити тиск на місцеву систему управління зливовими водами. На відміну від «зелено-блакитного» даху, «фіолетова» покрівля має пасивний характер – вода стікає без будь-яких механічних дренажних точок для відведення води. Представлено діаграму, що характеризує ступінь утримання дощового стоку, в залежності від інтенсивності опадів, різними типами покрівель. Авторами запропоновано порівняльний аналіз управління дощовим стоком за допомогою традиційних дахів, «зелених» покрівель та модифікованих з іншими системами «зелених» покрівель.

Ключові слова: «зелений» дах, «зелено-блакитний» дах, «фіолетовий» дах, «блакитна» покрівля, дощові води, зливові стоки, утримання, зберігання, управління

ВСТУП

Кількість населення в містах по всьому світі постійно зростає. На сьогодні близько

50% людей проживає в урбоценозах, що становить майже 2,8% від загальної площі нашої планети [1]. Внаслідок швидкої урбані-

зації, природні поверхні поступово перетворюються на непроникні території (тобто дороги, будівлі, дахи тощо), завдяки чому зменшується інфільтрація та збільшується поверхневий стік, що призводить до затоплення великих територій та виникнення явища «острів тепла» в містах [2].

Крім того, свій внесок у проблему вносять і помітні наслідки зміни клімату, до яких можна віднести підвищення температури, збільшення кількості опадів, їх інтенсивності та частоти дощових явищ. Такі події сприяють появі високого ризику підтоплення міст, при цьому системи зливого водовідведення стають перевантаженими через недостатню пропускну здатність і незадовільний стан.

«Зелені» дахи запроваджуються як перспективна стратегія сталого розвитку міст для вирішення глобально зростаючих проблем урбанізації та зміни клімату. Ця стратегія, яку також ще називають «живим» дахом або «вегетованим» дахом, пропонує широкий спектр екологічних, соціальних та економічних переваг, у порівнянні з традиційними дахами [3].

Хоча «зелені» дахи використовувалися протягом століть у всьому світі, наприклад, на солом'яних і покритих мохом дахах, сучасні будівельні конструкції вимагають спеціально розроблених гідроізоляційних мембран і певної конструктивної здатності забезпечувати цілісність будівлі в процесі експлуатації.

Конфігурації «зелених» дахів відрізняються залежно від їхнього географічного розташування, вимог та цілей, для яких він побудований. Як правило, типовий «зелений» дах складається з наступних шарів (знизу доверху): гідроізоляційна мембрана, дренажний шар, фільтруючий шар, субстрат (середовище для вирощування) і рослинний шар, як показано на рис. 1. Ізоляційний шар є обов'язковим і додається, коли «зелений» дах впроваджують на існуючу покрівлю (тобто модернізація «зеленого» даху). У разі використання довгокорінних рослин – обов'язкові протикореневі шари для захисту як системи «зеленого» даху, так і її нижньої структури [4].



Рис. 1. Схема конструкції типового «зеленого» даху [5]

Fig. 1. Design scheme of a typical "green" roof [5]

З точки зору типів «зеленого» даху, їх класифікують на інтенсивні та екстенсивні (великі). Основною відмінністю між цими двома групами є глибина підкладки. У той час як субстрат для інтенсивних «зелених» дахів має товщину більше 20 см, середо-

вище для вирощування екстенсивних є тоншим, менше 15 см. Отже, інтенсивні «зелені» дахи підходять для переважної більшості рослин, тоді як екстенсивні – здатні підтримувати виживання лише стійких до посухи рослин, таких як сукуленти. І на-

впаки, екстенсивні набагато більш поширені, ніж інтенсивні, з кількох причин, включаючи: не складне технічне обслуговування, меншу вагу та нижчу вартість будівництва [6, 7].

Великі «зелені» дахи можуть бути реалізовані на досить широкому розмаїтті покрівель за рахунок їх більш дрібного ґрунту або зростаючих середовищ і, отже, зниження навантаження на будівельну конструкцію. Хоча цей тип даху, як правило, менш дорогий, він обмежує вибір видів рослин і обмежений у своїх характеристиках зливової води та ізоляційних властивостях. Інтенсивні «зелені» дахи можуть дозволити глибший ґрунт або середовище для вирощування і, таким чином, більшу різноманітність рослин, включаючи потенційно продуктивні культури і навіть дерева. Напівінтенсивні «зелені» покрівлі є поєднанням цих двох типів «зелених» дахів [8].

Метою роботи є проведення аналізу та дослідження ефективності інноваційного поєднання «зеленого» даху з іншими системами для зменшення негативного впливу зливових вод, а також встановлення їх переваг та недоліків для прогнозування перспективи застосування таких систем в міських умовах.

ВИКЛАД ОСНОВНОГО МАТЕРІАЛУ

Менеджмент зливовими водами є однією з основних переваг «зелених» покрівель, які найбільше привертають увагу дослідників. Крім того, «зелений» дах здатний знижувати споживання енергії, покращувати якість повітря і стоку, «пом'якшувати» шумове забруднення [9], а також підсилювати естетичні аспекти будівлі та міську екологію за рахунок перетворення непроникних поверхонь даху на зелені насадження [10].

В джерелах літератури науковці [11] припускають, що конфігурація даху має вирішальне значення для оптимізації гідрологічних характеристик. Однією з критичних проблем для «зелених» дахів є зниження їх продуктивності при насиченні, тобто зменшення ефективності функціонування після

послідовних зливових подій. Для вирішення цієї проблеми може бути реалізована інноваційна технологія, заснована на принципі затримання зливових вод. Враховуючи всі переваги, які пропонує «зелений» дах, інноваційна система для затримання дощової води повинна мати два додаткових шари (наприклад, шар для зберігання води та шар для її затримання), що дозволить вирішити проблему перенасичення.

Тому, сьогодні все більшого контексту серед науковців світового рівня набуває спроба вдосконалити екосистемні послуги, які надають «зелені» технології, шляхом їх інтеграції з іншими системами, тобто створення та впровадження так званих «гібридних зелених» дахів (*Hybrid Green Roofs*).

Одним із таких економічно-ефективних рішень є розширення модифікації та тенденції застосування «зеленої» покрівлі, шляхом поєднання її з «блакитним» дахом, тобто впровадження *«зелено-блакитного» даху* (рис. 2), перший зразок якого був розроблений в Кореї [8].

Традиційні дахи мають непроникні поверхні та створюють велику кількість стоку, що спричиняє раптові повені в міських районах. Щоб уникнути цих несприятливих наслідків, «зелені» та «блакитні» дахи стали відносно поширеною практикою протягом останніх 20 років у багатьох країнах, таких як Німеччина, Швеція, США, Великобританія, Японія та Сінгапур.

Конструкція «блакитного» даху – це технологія управління дощовими стоками без рослинності, яка дозволяє ефективно утримувати дощову воду. Основний акцент цієї системи – це збір дощової води за допомогою резервуару в певній місцевості, для чого здебільшого використовується світлий покрівельний матеріал, оскільки він також добре охолоджує дах. «Блакитний» дах з економічної точки зору є дешевший, ніж «зелений», але дуже ефективний для модернізації варіантів управління зливовою водою в розвинених міських районах [1].

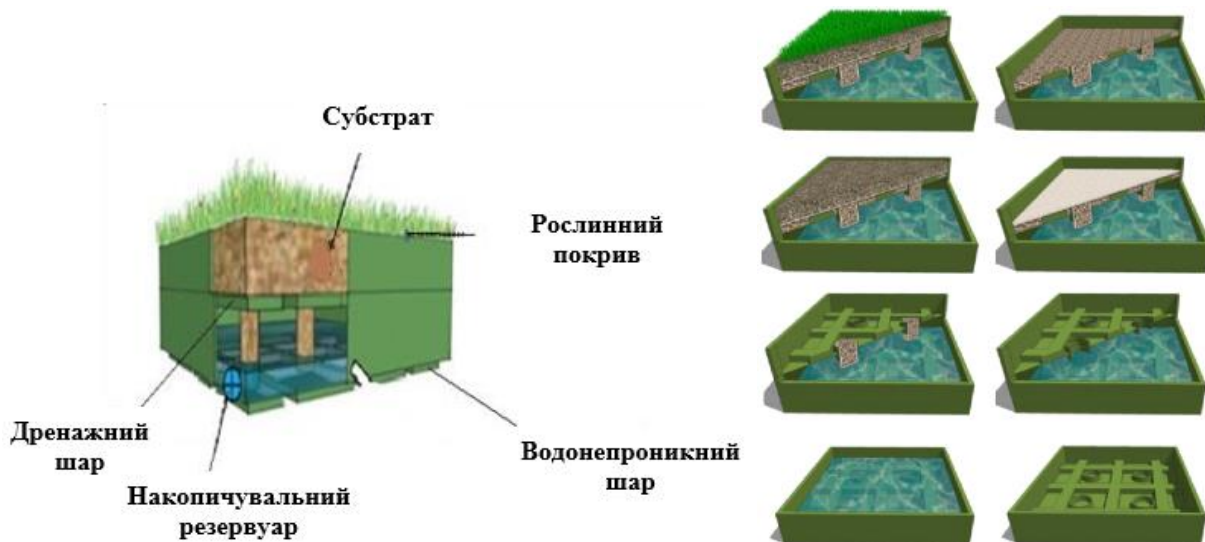


Рис. 2. Схема технології «зелено-блакитного» даху [3]

Fig. 2. Scheme of the "green-blue" roof technology [3]

«Блакитні» дахи призначені для управління зливовими водами, а саме, для утримання дощової води, яка випускається через уповільнений стік дренажу або випаровування. Утримання води може забезпечуватися такими середовищами, як ґрунт, або спеціально розробленими резервуарами для утримання [12].

Проте, як і «зелені» покрівлі, «блакитні» дахи також вимагають особливої уваги до гідроізоляції та здатності конструкції витримувати вагу води на даху. Наприклад, навантаження «зеленої» конструкції, яке можна застосувати до плоских поверхонь покрівель житлових будинків за європейським стандартом, не повинне перевищувати 200 кг/м^2 (приблизно $1,96 \text{ кН/м}^2$) [13].

Особливий інтерес становить проблема максимізації потенціалу «блакитних» дахів не тільки утримувати та/або затримувати воду, але й використовувати її для продуктивного росту рослин. Рослини, з іншого боку, надають можливість поглинати й утримувати деяку кількість вологи у своїй структурі, а також виводити частину води в атмосферу через випаровування (евапотранспірація).

«Зелено-блакитний» дах – це нове інноваційне рішення, яке має ту саму концепцію, що й «зелений» дах, але додатково поєднує сховище води нижче «зеленого» даху, здатне збирати інфільтровані опади, повільно

випускаючи їх із системи, які потім повторно використовуються зеленою рослинністю даху, шляхом капілярного зрошення, що дозволяє рослинам приживлюватися в посушливий період, збільшуючи евапотранспірацію та створюючи охолоджуючий ефект (рис. 3, а) [14].

Завдяки поєднанню «блакитних» дахів із «зеленими» покрівлями мембрана відокремлює резервуар для води від верхнього відсіку, куди додаються ґрунт і рослини. Поглинаючий матеріал дозволяє корінням рослин витягувати воду з резервуара в ґрунт, а коріння з'єднують два відсіки. Поливальна трубка знаходиться в передньому лівому куті.

Потенціал управління зливовими водами як «блакитних» дахів, так і «зелених» дахів покращується за рахунок встановлення додаткових елементів для утримання, затримки та відведення стоку води [15]. Вибір таких елементів може відігравати важливу роль у проектуванні дахової системи для оптимізації продуктивності зливової води, враховуючи як аспекти утримання, так і випаровування на додаток до евапотранспірації, що забезпечується «зеленими» дахами [16]. Випаровування та евапотранспірація сприяють додатковому охолоджуючому ефекту для будівлі, що є ще однією екологічною перевагою, яку можуть забезпечити як «блакитні», так і «зелені» дахи.

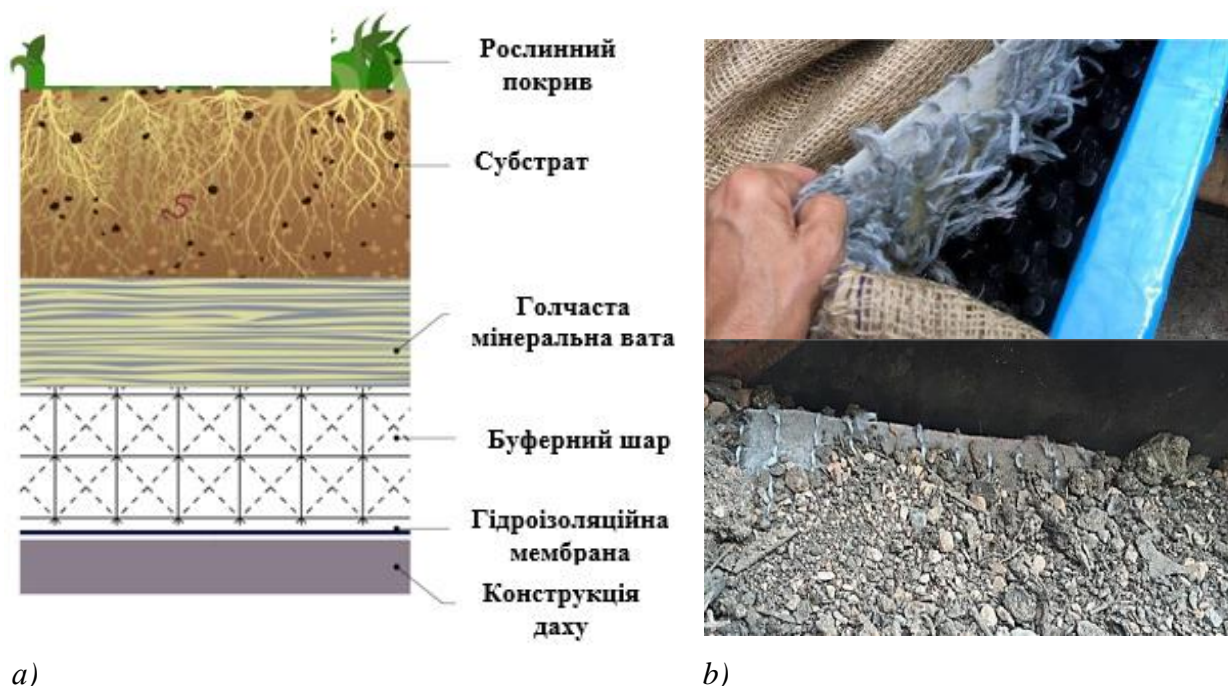


Рис. 3. Схема модифікованих «зелених» покрівель з іншими інноваційними системами: *a)* «зелено-блакитний» дах; *b)* вологопоглинаюча тканина для поглинання води рослинами з резервуара [12]

Fig. 3. Scheme of modified "green" roofs with other innovative systems: *a)* "green-blue" roof; *b)* moisture-absorbing fabric for water absorption by plants from the tank [12]

Тобто, «зелено-блакитні» дахи поєднують синергетичні переваги технологій «блакитного» та «зеленого» даху, а збережена вода підтримує життєдіяльність рослин, які допомагають утримувати та видаляти зливову воду з муніципальної системи управління зливовою водою (каналізації) [17].

На рис. 3 (б) показано елемент для додаткового водопоглинаючого шару [18] та як цей шар може бути розташований між дренажним шаром (у даному випадку гравієм) і утримуючим шаром, який є резервуаром нижче. Гравій також може забезпечити необхідний баласт на дахах, де пориви вітру є основним фактором для конструкції. Дизайнерські компроміси з «зелено-блакитними» дахами включають структурні обмеження, вартість, безпеку, естетику, екологічну стійкість, кліматичну стійкість, а також вимоги та переваги користувачів будівлі.

Концепція "зелено-блакитного" даху є порівняно новою, проте деякі науковці вже отримали результати щодо її ефективності в управлінні дощовими водами.

Так, у роботі [19] представлено моделювання різних технологій поєднання «зеленої» та «зелено-блакитної» покрівлі у Вітербо (Центральна Італія) під час інтенсивних опадів. Результати досліджень, отримані в роботі, демонструють майже подвійну ефективність «зелено-блакитного» даху в зменшенні стоку по відношенню до традиційної «зеленої» покрівлі, а також переваги щодо збільшеної ємності зберігання «зелено-блакитного» даху з точки зору контролю стоку.

У дослідженні [1] автори оцінювали ефективність управління стоком «блакитною» та «зелено-блакитною» покрівлею, порівнюючи дані моніторингу, виміряні на двох різних об'єктах, з контрольним дахом в столичному районі Сеула (Корея).

Дані, використані для цього дослідження, були зібрані під час фактичних дощових подій із інтенсивністю опадів понад 30 мм/год і 60 мм/год на «зелено-блакитному» та «блакитному» даху. Результати досліджень показали, що вимірний відтік дощового стоку з «блакитного» даху становив 0,45 дм³/с у порівнянні зі звичайним дахом, де об'єм

стоку дорівнював $1,55 \text{ дм}^3/\text{с}$. З іншого боку, стік із «зелено-блакитної» покрівлі становив $0,1 \text{ дм}^3/\text{с}$, порівняно з контрольною покрівлею, де стік був $0,3 \text{ дм}^3/\text{с}$.

Результати також показали зниження пікового стоку в обох типах дахів. Було виявлено, що «зелено-блакитний» дах є більш ефективним в утриманні дощового стоку під час довготривалих опадів, ніж «блакитний» дах. Однак обидва варіанти можуть бути застосовані до міських будівель – як відповідні методи управління стоком опадів у міських районах.

Цими ж авторами було проведено ще одне дослідження, пов'язане з технологією «зелено-блакитного» даху в управлінні дощовими водами [3]. В межах цієї роботи «зелено-блакитний» дах, площею 285 м^2 , було встановлено над загальним традиційним дахом будівлі середньої школи в Сеулі, Корея. Принцип роботи «зелено-блакитного» даху такий самий, як і «зеленого» даху, однак він має додатковий шар для зберігання дощової води внизу, як показано на рис. 2. Було виміряно стік «зелено-блакитним» дахом під час інтенсивних опадів та порівняно показники з традиційним плоским дахом.

Результати досліджень показали, що дощовий стік і його пік відведення з «зелено-блакитного» даху були значно меншими, ніж з контрольного традиційного даху. Крім того, стік продовжував надходити з «зелено-блакитного» даху навіть після припинення дощу, що пов'язано з часом фільтрації води через ґрунт, дренажний шар і фільтруючу мембрану, а потім виходу води з даху у вигляді стоку.

Також в рамках роботи було виявлено, що «зелено-блакитний» дах впливає на зниження температури поверхні в літній сезон. Було встановлено, що зниження температури поверхні від «зелено-блакитної» покрівлі більше на 5°C , ніж для контрольного традиційного даху, що ще раз підтверджує можливість «зеленої» покрівлі змінювати мікроклімат і зменшувати витрати на охолодження.

У дослідженні [20] вивчалась гідрологічна ефективність експериментального «зе-

лено-блакитного» даху, яка кількісно оцінювалась за допомогою відповідних показників, заснованих на порівнянні гідрологічної ефективності системи з рівним за розмірами еталонним «сірим» дахом.

Аналіз дослідження був переважно зосереджений на функції утримання зливових вод системою «зелено-блакитного» даху, а також дослідження відносного внеску зеленого шару та шару зберігання води в загальну здатність до утримання.

Результати підкреслюють високий вплив інтенсивності опадів, антецедентної (попередньої) вологості ґрунту «зеленого» шару та початкового запасу води в «блакитному» шарі на утримуючу здатність всієї системи. Встановлено, що у середньому, експериментальний «зелено-блакитний» дах підтримує рівень утримання дощової води біля 77% за добовою шкалою та 61% за шкалою подій, що порівнюється з типовими значеннями традиційних великих «зелених» дахів, проте ці показники можуть бути покращені з використанням «орієнтованого на утримання» управління вихідного клапану. Система змогла повністю зберегти майже половину опадів, що відбулися в період моніторингу, і показати високу ефективність для зменшення та затримки піків стоку.

У дослідженні [12] автори вивчали продуктивність різних конструкцій дахових систем в невеликих модулях на даху центру в Торонто. Один із таких тестових модулів «зеленого» даху з резервуаром для утримання стоку був оснащений контрольно-вимірювальними приладами для отримання результатів експерименту. Блок росту рослин був створений подібно до моделі великої «зеленої» покрівлі, що складається з витривалих сукулентних рослин, таких як *sedums*, сертифікованої суміші ґрунту для «зеленого» даху, дренажної тканини та водопоглинаючого шару для утримання надлишкової кількості води. Під ним розташований додатковий резервуар для уловлювання стоку води з модуля, який оснащений датчиками для спостереження за зміною ваги агрегату при надходженні дощової води і її виході з модуля.

Поряд з цим змодельованим великим «зеленим» дахом, з подібними модулями оцінювалися великий «зелено-блакитний» дах, «блакитний» дах без зеленого аспекту, продуктивний інтенсивний «зелений» дах і продуктивний інтенсивний «зелено-блакитний» дах. Утримання зливових вод і евапотранспірація контролювалися шляхом постійного контролю ваги модуля і шляхом вимірювання води, що стікає у водосховища. Після інтенсивних опадів було встановлено, що продуктивний «зелено-блакитний» модуль даху зберіг всю зливову воду, тобто вода не стікала у водосховище вниз, тоді як інші модулі мали різну кількість зливового стоку після події.

Крім того, концепція «зелено-блакитного» даху передбачає й такі біофізичні процеси, як затримання, зберігання, проникнення та біологічне поглинання забруднюючих речовин, що дозволяє управляти не лише кількістю, а й якістю зливових вод [21].

Ще одним сучасним видом модифікації системи «зеленого» даху є розробка та впровадження так званого «фіолетового» даху.

Фундаментальним для розуміння відмінностей між «фіолетовими» дахами та традиційними «зеленими» дахами є розуміння відмінностей між двома поширеними явищами, що стосуються управління зливовими водами.

Утримання – це процес захоплення дощової води, яка відводиться з даху лише через процес евапотранспірації (випаровування).

Зберігання – це процес тимчасового утримання дощової води, яка стікає з даху через деякий час.

Традиційні «зелені» дахи забезпечують лише явище утримання. Концепція «фіолетового» та «зелено-блакитного» даху забезпечують як утримання дощової води, так і зберігання її деякий час в системі.

«Фіолетова» покрівля – це конструкція, яка включає в себе губчастий шар з гідрофільної мінеральної вати, щільний шар поліефірної тканини, і може включати або не включати додатковий стільниковий шар для збільшення обсягу дощової води, яку можна утримувати, зменшуючи тим самим піковий стік до 95 %.

Дослідження, проведене авторами [5] мало на меті оцінити технічну можливість багатшарового даху, а саме «фіолетового» даху, в управлінні міськими зливовими водами.

«Фіолетова» покрівля концептуально і технічно відрізняється від «зеленої» покрівлі тим, що перша включає в себе низькотрансмісивний дренажний шар і зону пустих проміжків між частинками матерії, який може бути спроектований на різній глибині для тимчасового зберігання і повільного відведення води (рис. 4).



Рис. 4. Схема модифікованих «зелених» покрівель з іншими інноваційними системами: «фіолетовий» дах [5]

Fig. 4. Scheme of modified "green" roofs with other innovative systems: "purple" roof [5]

Макропористі шари мінеральної вати та субстрат, які є стандартними матеріалами для «зелених» покрівель, призначені для затримки води, але вони не завжди мають достатню кількість макропор, щоб забезпечити ефективний відвід води під час інтенсивних опадів. У конструкцію «фіолетового» даху додається стільниковий накопичувальний резервуар для затримання води – це шар вертикальних трубок, які на 93% складаються з макропорних порожнеч.

А на відміну від «зелено-блакитного» даху, в структуру «фіолетового» даху додається обмежувальна тканина в основі шару утримування води, що складається з щільно розташованих поліефірних ниток (шар тертя). Додаткове утримування води може бути досягнуто за допомогою ряду вертикально орієнтованих трубок у формі стільника. Ці два компоненти забезпечують стійкість до дренажу по всьому профілю системи, на відміну від «зелено-блакитних» конструкцій даху, які обмежені лише діаметром отвору. Голчаста мінеральна вата в конструкції «фіолетового» даху є прикладом загального варіанту наявності високоабсорбуючого шару між носієм і шаром зберігання для додаткового утримання дощової води (рис. 4).

Три типи дахів, тобто традиційні, «зелені» та «фіолетові», були побудовані в Західному Сідней, Австралія. Ці дахи були досліджені і порівняні з точки зору зменшення пропускну здатності стоку, початкового часу стоку і часу, необхідного для відведення стоку. Дані збиралися за період з квітня 2021 року по травень 2022 року. Всього за цей період було зафіксовано 76 опадів.

В результаті експериментальних досліджень було встановлено, що «фіолетовий» дах працював ефективніше, ніж інші покрівельні системи під час всього періоду опадів. «Фіолетовий» дах затримав початок дощового стоку на 773, 211 і 86 хв для малої, середньої і великої інтенсивності опадів, відповідно, в порівнянні з традиційним дахом, і на 110,59 і 14 хв, відповідно, в порівнянні з «зеленим» дахом.

Під час невеликої інтенсивності опадів «фіолетовий» дах у більшості випадків зберігав 100% води. Для середніх, великих і надзвичайно великих дощових подій середнє скорочення об'єму стоку «фіолетовим» дахом склало 88%, 34% і 7% та 55%, 21% і 10%, ніж у традиційних і «зелених» дахів, відповідно.

Крім зменшення обсягу дощової води, «фіолетовий» дах затратив на 242 і 113 хв більше часу, щоб відвести зливу воду, в порівнянні з традиційною покрівлею під час середніх і великих дощових подій відповідно, і на 226 і 66 хв довше, ніж «зелена» покрівля. У випадку середньої тривалості надзвичайно інтенсивних дощових опадів, «фіолетовий» дах витримав на 503 хвилини більше, ніж традиційний дах, щоб відвести зливу воду, та на 74 хвилини довше, ніж «зелений» дах.

Результати цього дослідження довели технічну можливість технології «фіолетового» даху щодо уповільнення стоку та зменшення обсягу зливної води під час дощових опадів різної інтенсивності.

«Фіолетовий» дах, заснований на концепції «зберігання», концептуально і технічно відрізняється від «зеленого» даху і може ефективно затримати пік дощових опадів, що дозволяє знизити тиск на місцеву систему управління зливовими водами.

Крім того, на відміну від «зелено-блакитного» даху, «фіолетова» покрівля має пасивний характер – вода стікає без будь-яких механічних дренажних точок для випуску води.

Тобто, є дві основні переваги запропонованої системи «фіолетового» даху: зменшення тиску на місцеву систему каналізації під час дощової події, затримуючи генерацію стоку, та мінімізації насичення в результаті повільного вивільнення поглиненої води, що дозволяє підготувати дах до наступної дощової події.

Різні наукові дослідження [1, 3, 5, 12, 14, 19, 21] демонструють, що ступінь утримання дощових вод «зелено-блакитними» та «фіолетовими» дахами, приблизно однакова і є вищою, ніж традиційними та «зеленими»

дахами, що представлено на рис. 5. Це пояснюється тим, що «зелено-блакитні» та «фіо-

летові» дахи мають більш глибокі та водопоглинальні шари, що дозволяє їм затримувати велику кількість води.

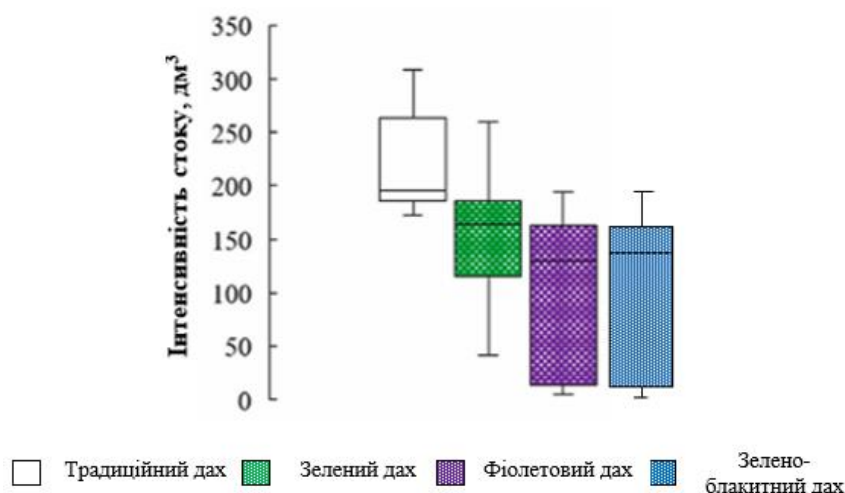


Рис. 5. Ступінь утримання дощового стоку, в залежності від інтенсивності опадів, різними типами покрівель

Fig. 5. The degree of retention of rainwater, depending on the intensity of precipitation, by different types of roofs

Отже, результати досліджень та їх обговорення свідчать про те, що дощову воду можна контролювати на даху різними способами: за допомогою «зелено-блакитного» даху, «зеленого» та «фіолетового» дахів, в

залежності від конфігурації покрівлі, на яку буде встановлено ту чи іншу конструкцію. На рис. 6 запропоновано загальну схему управління дощовими стоками на будівельному об'єкті.

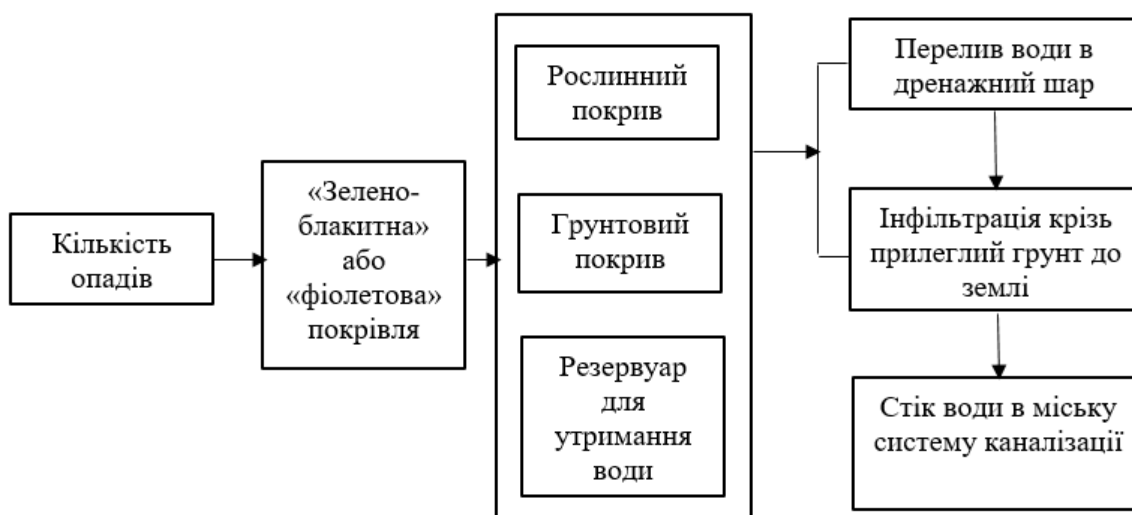


Рис. 6. Схема управління дощовим стоком на об'єкті

Fig. 6. Rainwater management scheme at the facility

Оскільки в різних регіонах існує багато різних типів дахів, то вибір системи даху повинен обиратися згідно певних вимог. Авторами запропоновано порівняльний аналіз управління дощовим стоком за допомогою

традиційних дахів, «зелених» покрівель та модифікованих з іншими системами «зелених» покрівель, як показано в табл. 1.

Табл. 1. Порівняння управління дощовим стоком за допомогою традиційних дахів, «зелених» покрівель та модифікованих з іншими системами «зелених» покрівель
Table 1. Comparison of rainwater management using traditional roofs, green roofs and modified with other green roof systems

| <i>Традиційне управління зливовими водами</i> | <i>Управління зливовими водами з допомогою «зеленого» даху</i> | <i>Управління зливовими водами з допомогою модифікованих систем «зеленого» даху</i> |
|---|---|---|
| Концепція: відсутність можливості збору та утримання дощового стоку на даху | Концепція: можливість часткового збору та відсутність утримання дощового стоку на даху | Концепція: можливість збору і утримання дощового стоку за допомогою спеціальних резервуарів |
| Основний дощовий стік надходить безпосередньо в міську систему каналізації | Частина дощового стоку поглинається рослинністю та субстратом, а частина – надходить в міську систему каналізації | Дощові стоки збираються та утримуються на даху в додаткових резервуарах для утримання дощових стоків |
| З результатів наукових досліджень доведено, що цей підхід не є ефективним для управління дощовими стоками | Аналіз наукових даних доводить, що підхід з використанням систем «зеленого» даху ефективний для управління дощовою водою | Фактичний аналіз наукових даних доводить, що підхід з використанням «зелено-блакитного» та «фіолетового» даху ефективний для управління дощовою водою |
| Вартість будівництва низька, але не має переваг для управління стоком опадів | Вартість будівництва висока, але має багато переваг для управління зливовою водою | Вартість будівництва висока, але має багато переваг для управління зливовою водою |
| Можливість встановлення на будівлях старого покоління | Можливість встановлення на будівлях старого покоління (інтенсивні «зелені» дахи) та будівлях нового покоління (екстенсивні та інтенсивні «зелені» дахи) | Можливість встановлення на будівлях нового покоління |

ВИСНОВКИ

«Зелені» дахи мають велику користь для навколишнього середовища, забезпечуючи екосистемні послуги в багатьох екологічних питаннях, включаючи управління зливовими водами, пом'якшення температури міського теплового острова та ізоляцію будівель, біорізноманіття, естетику, здоров'я та добробут людей. Впроваджуючи «зелений» дах на будівлі, можна перетворити непроникну ділянку даху на ділянку пористого ґрунту, що сприяє збереженню природного навколишнього середовища. Однак, якщо вони реалізуються без уваги до аспектів екологічного дизайну, тоді оптимізація витрат може призвести до екологічно небезпечних

результатів, а не до очікуваних переваг. Крім того, однією з критичних проблем для «зелених» дахів є зниження їх продуктивності при насиченні дощовою водою, тобто зменшення ефективності функціонування після інтенсивних зливових опадів. Для вирішення цієї проблеми може бути реалізована інноваційна технологія, заснована на принципі затримання зливових вод, а саме, впровадження «гібридних зелених» дахів (*Hybrid Green Roofs*), такі як «зелено-блакитні» та «фіолетові» покрівлі, які є ефективними в регулюванні дощових вод.

«Зелено-блакитні» дахи є системами, які комбінують рослинний покрив та шар дренажу, що збирає та затримує дощову воду.

Дослідження показують, що такі дахи можуть затримати до 60-90% дощової води, що дозволяє зменшити ризик повеней та перенавантаження каналізаційних систем.

«Фіолетові» дахи, зі свого боку, збирають дощову воду у спеціальні резервуари, що знаходяться під поверхнею зеленого покриття. Це дозволяє зберегти до 90% дощової води та використовувати її для поливу рослин чи для інших технічних і побутових потреб. Крім того, «фіолетові» дахи можуть фільтрувати дощову воду та зменшувати забруднення навколишнього середовища.

Проте, на підставі вищенаведеного огляду літератури встановлено, що дослідження щодо утримання дощової води «зелено-блакитними» та «фіолетовими» покриттями все ще обмежені і потребують подальших системних вивчень.

Отже, інноваційне поєднання «зеленої» покритті з іншими системами може бути ефективним рішенням для управління дощовими водами в міських умовах. Вибір між ними може залежати від різних факторів, таких як ти та вік будівлі, бюджет, доступність та рівень технічної підтримки. Однак, незалежно від того, який вид даху використовується, важливо враховувати його можливості та обмеження для досягнення максимальної ефективності управління дощовими водами.

ЛІТЕРАТУРА

1. **Muhammad Shafique, Daehee Lee, Reeho Kim.** A Field Study to Evaluate Runoff Quantity from Blue Roof and Green Blue Roof in an Urban Area // *International Journal of Control and Automation*. 2016. Vol. 9. No. 8. P.p. 59 – 68.
2. **Nina V. Dudorova, Boris D. Belan.** The Energy Model of Urban Heat Island // *Atmosphere*. 2022. Vol. 13 (3). 457.
3. **Muhammad Shafique, Reeho Kim, Daehee Lee.** The Potential of Green-Blue Roof to Manage Storm Water in Urban Areas // *Nature Environment and Pollution Technology*. 2016. Vol. 15 No. 2 P. 715-718.
4. **Nguyen C.N., Muttill N., Tariq M.A., Ng A.** Quantifying the Benefits and Ecosystem Services Provided by Green Roofs – A Review // *Water*. 2022. Vol. 14.
5. **Mohammad A. Alim, Sayka Jahan, Ataur Rahman, Mohammad Ataur Rahman, Mark Liebman, Brad Garner, Robert Griffith, Merran Griffith, Zhong Tao.** Experimental investigation of a multilayer detention roof for stormwater management // *Journal of Cleaner Production*. 2023. Volume 395. 136413.
6. **Tkachenko T.M.** Problems of classification and use of "green constructions" in greening of modern cities // *Ecological sciences: scientific and practical journal*. 2018. No. 1(20). T.2. P. 21-24.
7. **Tkachenko T.M.** Problems of classification and use of "green constructions" in greening of modern cities // *III International scientific-practical congress: "Urban environment - XXI century"*. 2019. P. 50-52.
8. **Shafique M., Kim R., Rafiq M.** Green roof benefits, opportunities and challenges – A review // *Renew. Sust. Energ. Rev.* 2018. Vol. 90. P. 757–773.
9. **Cuong Ngoc Nguyen, Nitin Muttill, Muhammad Atiq Ur Rehman Tariq, Anne W. M. Ng.** Quantifying the Benefits and Ecosystem Services Provided by Green Roofs – A Review // *Water*. 2022. Vol. 14(1).
10. **Peng L.L., Jim C.Y.** Green-roof effects on neighborhood microclimate and human thermal sensation // *Energies*. 2013. Vol. 6. P. 598–618.
11. **Scott J., Garner B., Hidalgo D., Daoularis D., Warmerdam O.** Insights into green roof modeling using SWMM LID controls for detention-based designs // *Journal of Water Management Modeling*. 2022. Vol. 30.
12. **Kristiina Valter Mai.** Productive Blue-Green Roofs for Stormwater Management // *Management. Green Energy and Environmental Technology*. 2022. P. 1–12.
13. **De Berardinis P., Bartolomucci C., Capannolo L., De Vita M., Laurini E., Marchionni C.** Instruments for Assessing Historical Built Environments in Emergency Contexts: Non-Destructive Techniques for Sustainable Recovery // *Buildings*. 2018. Vol. 8 (27).
14. **Busker T., Moel H., Haer T., Schmeits M., Bart van den Hurk, Myers K., Dirk Gijbert Cirkel, Aerts J.** Blue-green roofs with forecast-based operation to reduce the impact of weather extremes // *Journal of Environmental Management*. 2022. Volume 301. 113750.
15. **Wright J.** Evapotranspiration rates of representative green roof systems and the implications for green roof policies // *MASc Thesis, Ryerson University*. 2022
16. **Zhang Z., Szota C., Fletcher T. D., Williams N. S., Farrell C.** Green roof storage

capacity can be more important than evapotranspiration for retention performance // *J. Environ. Manage.* 2019. Vol. 232. P. 404–412.

17. **Sang D.** Sustainable building // *Phys. Rev.* 2019. Vol. 2–6.

18. ZinCo Canada Inc. Product Data Sheet: Wicking Mat DV40.

19. **Pelorusso R., Petroselli A., Apollonio C., Grimaldi S.** Blue-green roofs: hydrological evaluation of a case study in Viterbo, Central Italy // *Lecture Notes in Civil Engineering*, Springer, Cham. 2021. P. 3-13.

20. **Dario Pumo, Antonio Francipane, Francesco Alongi, Leonardo, V. Noto.** The potential of multilayer green roofs for stormwater management in urban area under semi-arid Mediterranean climate conditions // *Journal of Environmental Management*. 2023. Volume 326, Part A. 116643.

21. **Kuei-Hsien Liao, Shinuo Deng, Puay Yok Tan.** Blue-Green Infrastructure: New Frontier for Sustainable Urban Stormwater Management // *Greening Cities*. 2017. P. 203–226.

REFERENCES

1. **Shafique, M., Lee, D., & Kim, R. (2016).** A Field Study to Evaluate Runoff Quantity from Blue Roof and Green Blue Roof in an Urban Area. *International Journal of Control and Automation*, 9(8). 59–68. <https://doi.org/10.14257/ijca.2016.9.8.07>
2. **Dudorova, N. V., & Belan, B. D. (2022).** The Energy Model of Urban Heat Island. *Atmosphere*, 13(3). 457. <https://doi.org/10.3390/atmos13030457>
3. **Shafique, M., Kim, R., & Lee, D. (2016).** The Potential of Green-Blue Roof to Manage Storm Water in Urban Areas. *Nature Environment and Pollution Technology*, 15(2). 715-718. [http://www.neptjournal.com/upload-images/NL-56-55-\(55\)D-512.pdf](http://www.neptjournal.com/upload-images/NL-56-55-(55)D-512.pdf)
4. **Nguyen, C.N., Muttill, N., Tariq, M.A., & Ng, A. (2022).** Quantifying the Benefits and Ecosystem Services Provided by Green Roofs – A Review. *Water*. 14. <https://doi.org/10.3390/w14010068>
5. **Alim, M. A., Jahan, S., Rahman, A., Rahman, M. A., Liebman, M., Garner, B., Griffith, R., Griffith, M., & Tao, Z. (2023).** Experimental investigation of a multilayer detention roof for stormwater management. *Journal of Cleaner Production*, 395, 136413. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2023.136413>
6. **Tkachenko, T. M. (2018).** Problems of classification and use of "green constructions" in greening of modern cities. *Ecological sciences: scientific and practical journal*, 1(20/2). 21-24. [in Ukrainian]
7. **Tkachenko, T. M. (2019).** Problems of classification and use of "green constructions" in greening of modern cities. *III International scientific-practical congress: "Urban environment - XXI century"*. 50-52. [in Ukrainian]
8. **Shafique, M., Kim, R., & Rafiq, M. (2018).** Green roof benefits, opportunities and challenges – A review. *Renew. Sust. Energ. Rev.*, 90. 757–773. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2018.04.006>
9. **Nguyen, C. N., Muttill, N., Tariq, M. A. U. R., & Ng, A. W. M. (2022).** Quantifying the Benefits and Ecosystem Services Provided by Green Roofs – A Review. *Water*, 14(1). 68 <https://doi.org/10.3390/w14010068>
10. **Peng, L. L., & Jim, C. Y. (2013).** Green-roof effects on neighborhood microclimate and human thermal sensation. *Energies*, 6. 598–618. <https://doi.org/10.3390/en6020598>
11. **Scott, J., Garner, B., Hidalgo, D., Daoularis, D., & Warmerdam, O. (2022).** Insights into green roof modeling using SWMM LID controls for detention-based designs. *Journal of Water Management Modeling*. <https://doi.org/10.14796/jwmm.c484>
12. **Mai, K. V. (2022).** Productive Blue-Green Roofs for Stormwater Management. *Management. Green Energy and Environmental Technology*. 1–12. <https://doi.org/10.5772/geet.04>
13. **De Berardinis, P., Bartolomucci, C., Capannolo, L., De Vita, M., Laurini, E., & Marchionni, C. (2018).** Instruments for Assessing Historical Built Environments in Emergency Contexts: Non-Destructive Techniques for Sustainable Recovery. *Buildings*, 8(2). 27. <https://doi.org/10.3390/buildings8020027>
14. **Busker, T., Moel, H., Haer, T., Schmeits, M., van den Hurk, B., Myers, K., Cirkel, D. G., & Aerts, J. (2022).** Blue-green roofs with forecast-based operation to reduce the impact of weather extremes. *Journal of Environmental Management*, 301. 113750. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2021.113750>
15. **Wright, J. (2022).** Evapotranspiration rates of representative green roof systems and the implications for green roof policies. MASC Thesis, Ryerson University.
16. **Zhangó Z., Szotaó C., Fletcheró T. D., Williamsó N. S., & Farrell, C. (2019).** Green roof storage capacity can be more important than evapotranspiration for retention performance. *J. Environ. Manage.*, 232. 404–412. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2018.11.070>

17. Sang, D. (2019). Sustainable building. *Phys. Rev.* 2–6. Retrieved from <https://www.iop.org/sites/default/files/2019-11/physics-review-article-november-2019.PDF>
18. ZinCo Canada Inc. Product Data Sheet: Wicking Mat DV40. Retrieved from: https://www.zinco.ca/assets/pdf/ZinCo_PDB_Wicking_Mat_DV40_engl.pdf
19. Pelorosso, R., Petroselli, A., Apollonio, C., & Grimaldi, S. (2021). Blue-green roofs: hydrological evaluation of a case study in Viterbo, Central Italy. *Lecture Notes in Civil Engineering, Springer, Cham.* 3-13. [10.1007/978-3-030-68824-0_1](https://doi.org/10.1007/978-3-030-68824-0_1)
20. Pumo, D., Francipane, A., Alongi F., & Noto, L. V. (2023). The potential of multilayer green roofs for stormwater management in urban area under semi-arid Mediterranean climate conditions. *Journal of Environmental Management*, 326. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2022.116643>
21. Liao, K.-H., Deng, S., & Tan, P. Y. (2017). Blue-Green Infrastructure: New Frontier for Sustainable Urban Stormwater Management. *Greening Cities*, 203–226. https://doi.org/10.1007/978-981-10-4113-6_10

Modification of the "green" roof using technical solutions to reduce the negative impact of stormwater in urban conditions

Maryna Kravchenko, Tetiana Tkachenko, Viktor Mileikovskiy

Abstract. The effectiveness and shortcomings of the "green" roof in the management of rainwater in the urban environment are analyzed. The scheme of the construction of a typical "green" roof and its classification in terms of types are shown. The proposal to increase the efficiency of stormwater management with the help of "green" roofs, through their integration with other systems, that is, the creation and implementation of "hybrid green roofs" (Hybrid Green Roofs), is substantiated. The possibility of a "blue" roof as a rainwater management technology without vegetation, which allows for effective retention of rainwater, is analyzed. The design scheme and principle of operation of the "green-blue" roof are given, and a comparative analysis of its effectiveness in stormwater management with traditional and "green" roofs is made. The results of research are presented, which showed that the measured runoff of rainwater from a "blue" roof is about 0.45 dm³/s compared to a regular roof with a runoff volume of 1.55 dm³/s. On the other hand, the runoff from the "green-blue" roof is about 0.1 dm³/s, compared to the control roof (0.3 dm³/s). It is substantiated that a "green-blue" roof is more effective in retaining rain runoff during long-term precipitation than a "blue" roof. However, both options can be applied to urban buildings as effective methods of managing stormwater runoff in urban areas. The scheme of construction and the principle of operation of the "purple" roof is given - as a type of roof that includes a spongy layer of hydrophilic mineral wool, a dense layer of polyester fabric, and can include an additional cellular layer to increase the amount of rainwater that can be retained, thereby reducing peak flow up to 95%. The results of the study are presented, which confirm the technical feasibility of the "purple" roof technology in terms of slowing down the flow and reducing the volume of storm water during rainfall of various intensities. A "Purple" roof, based on the concept of "storage", is conceptually and technically different from a "green" roof and can effectively delay peak rainfall, thereby reducing the pressure on the local stormwater management system. Unlike a "green-blue" roof, a "purple" roof is passive in nature - water flows off without any mechanical drainage points to divert the water. A diagram characterizing the degree of retention of rainwater, depending on the intensity of precipitation, by different types of roofs is presented. The authors proposed a comparative analysis of rainwater runoff management using traditional roofs, "green" roofs, and roofs modified with other "green" roof systems.

Keywords: "green" roof, "green-blue" roof, "purple" roof, "blue" roof, rainwater, stormwater, maintenance, storage, management

Стаття надійшла до редакції 03.04.2023