

ІННОВАЦІЙНІ РІШЕННЯ ФУНКЦІОНАЛЬНИХ ПЛОСКИХ ПОКРІВЕЛЬ: ЗЕЛЕНІ, БЛАКИТНО-ЗЕЛЕНІ ТА БІОСОНЯЧНІ СИСТЕМИ**Кур'ян В. В.,**PhD з архітектури, ст.викладач,
4rchitect.urbanplanner@gmail.com, ORCID: 0000-0002-5943-7085**Кушнір О. П.,**магістр,
kushnir.stud9@gmail.com*Одеська державна академія будівництва та архітектури*

Анотація. Будівельний сектор у XXI столітті зазнає суттєвого переосмислення під впливом екологічних викликів, що підсилює актуальність концепції сталого розвитку та зеленого будівництва. Одним із важливих напрямів є впровадження зеленої архітектури, зокрема функціональних плоских покрівель, які еволюціонували від традиційних зелених дахів до інноваційних блакитних, блакитно-зелених та біосонячних систем. Метою статті є дослідження конструктивних та функціональних особливостей цих типів покрівель і визначення їхнього потенціалу для підвищення енергоефективності та екологічності міського середовища, а також можливостей інтеграції у повоєнну відбудову України. Методологія ґрунтується на порівняльному аналізі наукових джерел, дослідницьких робіт та світового практичного досвіду щодо експлуатації зазначених систем. Результати дослідження демонструють, що зелені, блакитні та блакитно-зелені покрівлі забезпечують ефективне управління зливовими водами, покращення мікроклімату та підвищення енергоефективності будівель, тоді як біосонячні покрівлі додатково сприяють розвитку міського біорізноманіття та збільшенню продуктивності сонячних панелей. У висновках підкреслено, що впровадження цих інноваційних покрівельних рішень є перспективним напрямом розвитку зеленого будівництва в Україні, однак потребує оновлення нормативної бази та підтримки з боку держави й професійної спільноти.

Ключові слова: сталий розвиток, зелене будівництво, інноваційні рішення, енергоефективність, екологічність, зелені покрівлі, блакитні покрівлі, біосонячні покрівлі, агровольтаїка,

Вступ. Будівельний сектор традиційно вважається одним із найважливіших рушіїв економічного зростання будь-якої країни. Він тісно пов'язаний з іншими галузями, такими як промисловість, транспорт, інфраструктура тощо. Втім, у XXI столітті окремі його аспекти зазнали серйозного переосмислення. Сучасний етап розвитку людства характеризується стрімкими змінами в усіх сферах життя і діяльності людини. Ці процеси взаємопов'язані, взаємопідсилюють один одного, а їхні наслідки часто є непередбачуваними. Зростання чисельності населення планети сприяє активнішому залученню природних ресурсів у сферу життєдіяльності людства та збільшенню обсягів усіх видів відходів. Водночас глобальні зміни клімату, що продиктовані серйозними ризиками, свідчать про значне виснаження ресурсів. Нераціональне ресурсовикористання пояснюється неекономічним їх витрачанням і відчутне через навантаження на світову екосистему [1]. Загострення соціально-економічних і політичних питань, поряд з критичною екологічною ситуацією в світі, вимагають зміни вектора розвитку сучасного суспільства. Вирішенням цього завдання є перехід до концепції, що забезпечує збалансований розвиток економічного, екологічного та соціального компонентів.

У цьому контексті надзвичайної актуальності набуває концепція «sustainable development» (в перекладі з англ. «сталий розвиток»), що охоплює всі сфери життєдіяльності людини, включно з архітектурою та будівництвом. Поширення концептуальних досліджень стосовно питань концепції сталого розвитку відбулося в результаті Конференції ООН з навколишнього середовища і розвитку (Ріо-де-Жанейро, 1992 рік) та Всесвітнього саміту зі збалансованого розвитку (Йоганнесбург, 2002 рік). Одне з найбільш уживаних трактувань поняття запропоноване у 1987 році Міжнародною комісією з охорони навколишнього середовища та розвитку. Згідно із ним «sustainable development» є економічним та соціальним розвитком, який здатний задовольнити потреби сучасного покоління без обмеження можливостей майбутніх поколінь стосовно використання широкого спектру ресурсів [2].

Сучасні інноваційні технології у сфері архітектури та будівництва відкривають можливість практичної реалізації принципів сталого розвитку. Одним із ключових напрямів цього процесу є поняття «green building» (в перекладі з англ. «зелене будівництво»). Концепція зеленого будівництва апелює такими поняттями, як: заощадження ресурсів та засобів; комфорт проживання; корисність характеристик об'єктів; довговічність експлуатації будівель, теорія та практика будівництва навколишнього природного середовища, та постійно доповнюється [1].

Одним з прикладів впровадження зеленої архітектури є розробка газонів на дахах, також відомих як «green roofs» (в перекладі з англ. «зелені покрівлі»). Вони повертають флору в житлові зони, покращують стан атмосфери вулиць від пилу, який є небезпечним для здоров'я, і сприяють затриманню дощової води, що насичує ґрунт. Зокрема, трав'яний покрив на дахах будинків – чудовий утеплювач, що упереджує тепловтрати. А у спекотний літній період шар газонної трави на дахах ідеально утримує прохолоду і перешкоджає нестачі вологи в повітрі приміщень будівель. Наприклад, у США площа висотних екосистем, які були зведені лише у 2014 році дорівнюють майже 500 тис. м² [1]. З моменту реалізації концепції зелених дахів відбулося суттєве розширення їхніх можливостей: з'явилася низка інноваційних типів функціональних плоских покрівель, зокрема «blue roofs» та «blue-green roofs» (в перекладі з англ. «блакитні покрівлі» та «блакитно-зелені покрівлі»), що дозволяють акумулювати дощову воду під субстратом, а також комбіновані системи «biosolar roofs» (в перекладі з англ. «біосонячні покрівлі»), орієнтовані на вироблення відновлюваної енергії, які поєднують властивості різних типів покриттів. Такі рішення перетворили покрівлю з пасивного елемента будівлі на активну складову її екологічної та енергетичної системи, що стало важливим кроком у розвитку сучасної архітектури сталого спрямування.

В умовах повоєнного відновлення України зелене будівництво стало не просто модним трендом, а одним з найважливіших індикаторів розвитку будівельної галузі. Воно відображає прагнення країни до сталого розвитку, енергоефективності та збереження довкілля [3]. Дослідження інноваційних рішень у проєктуванні функціональних плоских покрівель дозволить впровадити набуті знання у практиці повоєнної відбудови з урахуванням світових принципів концепції сталого розвитку.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. В контексті даної статті було проаналізовано останні матеріали з питань концепції сталого розвитку, зеленого будівництва та проєктування функціональних плоских покрівель серед зарубіжних та українських авторів.

У зарубіжній практиці було виокремлено наукові статті, роботи та публікації, що розкривають питання визначення (World Green Infrastructure Network [4]), складу (E. Oberndorfer, J. T. Lundholm, B. Bass, R. Coffman [5]) та наводять ілюстрації складу зелених покрівель (University of Chicago Library [6]). Окремі дослідження присвячені визначенню та компонентному складу покрівель типу blue roof та blue-green roof (K. Valter Mai [7]), досвіду впровадження останнього (M. Shafique, R. Kim, D. Lee [8]), а також сучасним системам контролю стоку (Green Roof Technology [9]). Крім того, розглянуто спеціалізоване джерело,

присвячене історії розвитку, науковим дослідженням, складу та конструктивним схемам покрівель типу biosolar roof (Pritchard & Pritchard [10]).

Серед вітчизняних авторів проаналізовано актуальні публікації, присвячені складовим концепції сталого розвитку (Зайцева Л.О. [1]), зеленому будівництву як складовій концепції сталого розвитку (Богінська Л.О. [2]) та інновації відновлення будівельної галузі в Україні (Андрусів У.Я., Мажак Ю.М. [3]). У своїй роботі Богінська Л.О. також посилається на таких українських науковців, які досліджували еколого-економічні аспекти функціонування галузі, як: Мащенко С.О., Вовк М.С., Алієв Р.А., Орловська Ю.В., Вовк М.С., Чала В.С., Білик О.А., Бондар О.І., Тарасенко Д.Л. та інші. Водночас авторка наголошує, що на сьогодні досі актуальним залишається питання щодо проблем раціонального природокористування у будівництві [1].

Постановка завдання. Метою даної статті є дослідження сучасних інноваційних рішень у проєктуванні функціональних плоских покрівель типів green, blue-green та biosolar, а також визначення перспектив їх інтеграції у практику повоєнної відбудови України з урахуванням світових принципів концепції сталого розвитку.

Предметом дослідження виступають системи функціональних плоских покрівель green, blue-green та biosolar roofs як складові зеленого будівництва в контексті концепції сталого розвитку, а також світові приклади їхнього впровадження і можливості інтеграції в контексті післявоєнної реконструкції України.

Методологія дослідження базується на порівняльному аналізі наукових статей, дослідницьких робіт, публікацій і матеріалів професійних платформ, що висвітлюють питання проєктування та експлуатації зазначених покрівельних систем, а також на огляді зарубіжного досвіду їх практичного впровадження.

Результати проведеного дослідження покликані сформувати узагальнене уявлення про принципи функціонування даних систем, продемонструвати приклади їх реалізації у світовій будівельній галузі, та оцінити перспективи розвитку досліджуваних функціональних покрівель в умовах післявоєнного відновлення України.

Основний матеріал і результати. Дах, також відомий як «п'ятий фасад», є важливою частиною захисної зовнішньої частини будівлі. Водночас покрівлі становлять значний просторовий потенціал, особливо в умовах густої міської забудови, де вільні території для озеленення або розміщення технічного обладнання обмежені. Ці значною мірою невикористані та переважно горизонтальні поверхні можна використовувати для багатьох корисних цілей, таких як виробництво енергії за допомогою сонячних панелей, управління зливовими водами та вирощування рослин [5].

У контексті впровадження сучасних інноваційних покрівельних рішень плоскі дахи мають низку переваг у порівнянні з традиційними скатними. Вони забезпечують можливість раціонального використання простору, зручність розміщення інженерних систем та створення додаткових функціональних площ. Саме такі покрівлі стають основою для реалізації сучасних систем green, blue-green та biosolar roofs, які трансформують дах із пасивного елемента в активну частину екологічної та енергетичної системи будівлі, а також можуть виконувати рекреаційну функцію.

Історія зелених покрівель, відомих також як «сади на дахах», сягає Х століття до нашої ери й бере свій початок у Персії. Найдавнішими задокументованими «садами на дахах» були висячі сади Семіраміди, розташовані на території сучасної Сирії (тодішньої Персії), які належать до семи чудес Стародавнього світу [5]. Відомо, що з 1000 року нашої ери у Скандинавії активно проєктувалися житлові будинки з дерновими дахами, що забезпечували теплоізоляцію житлових приміщень впродовж всього року [4].

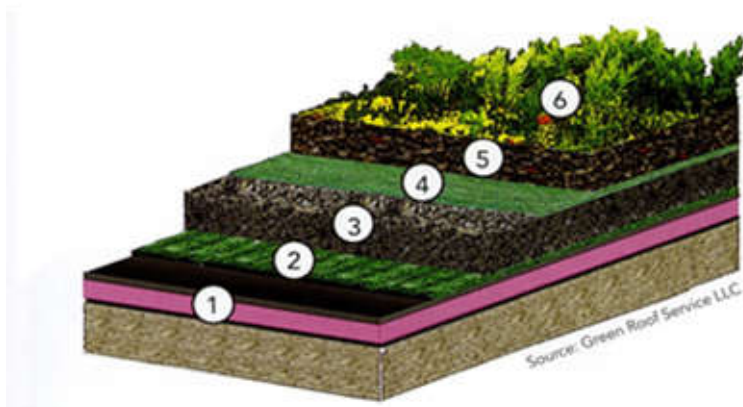
Сьогодні ж, за мотивами стародавніх «садів на дахах» та скандинавських дахів з «зеленим утеплювачем», у відомих міжнародних готелях, бізнес-центрах та приватних будинках реалізуються багатофункціональні покрівельні системи, що охоплюють естетичну, соціальну, економічну, екологічну та енергоефективну функції будівельного сектору.

Становлення сучасної системи green roof розпочалось у Німеччині на початку ХХ століття, де рослинність на дахах оригінально встановлювалася для пом'якшення шкідливого фізичного впливу сонячної радіації на конструкцію даху. Ранні зелені покрівлі також виконували вогнезахисну функцію. У 1970-х роках, на тлі зростання екологічної свідомості суспільства й стурбованості проблемою нераціонального використання ресурсів, зокрема в урбанізованих регіонах, виникли передумови для інституціалізації екологічної архітектури в межах державної політики та наукових досліджень. Саме в цей період технології зелених дахів набули широкого поширення завдяки їхнім численним екологічним перевагам.

У 1982 році Німецьке товариство ландшафтних досліджень, розвитку та будівництва опублікувало перші технічні рекомендації щодо проєктування та експлуатації зелених покрівель. Відтоді багато німецьких міст з того часу запровадили програми стимулювання для популяризації цієї технології та підвищення екологічних стандартів. Будівельне законодавство Німеччини нині передбачає обов'язкове впровадження зелених покрівель у багатьох міських центрах. Актуальні наукові джерела свідчать, що площа покриття зеленими покрівлями лише в Німеччині щороку збільшується приблизно на 13,5 мільйона квадратних метрів на рік [5].

Зелені дахи можуть виглядати як доглянуті газони або природні рослинні угруповання, і залежно від товщини субстрату та прийнятих інженерних рішень діляться на екстенсивні та інтенсивні. Екстенсивні зелені дахи, які використовують тонкий шар рослинного середовища для підтримки ґрунтопокривних рослин з коротким корінням, зазвичай проєктуються з урахуванням експлуатаційних характеристик будівлі, а не естетичних міркувань. Похилі та вигнуті екстенсивні зелені дахи можна побачити з рівня землі. Інтенсивні ж дахи можуть підтримувати досить значну, добре помітну рослинність, що каскадом спадає з боків будівлі, або як чагарники та дерева, що піднімаються над дахом. З них останні зазвичай називають «садами на дахах» [4]. У порівнянні, інтенсивні зелені покрівлі зазвичай вимагають значних інвестицій у догляд за рослинами. Крім того, вони підкреслюють активне використання простору та мають вищі естетичні очікування, ніж екстенсивні зелені покрівлі, які зазвичай мають менший ґрунт та низькорослий ґрунтовий покрив.

Зелені дахи будуються з деякими спільними компонентами. Їх часто називають «перевернутими дахами», оскільки ізоляція та гідроізоляція розміщуються не зверху покрівельного матеріалу, а знизу. Ці компоненти складають функціональні шари як інтенсивних, так і екстенсивних зелених дахів. Спільні компоненти включають настил, гідроізоляцію, ізоляцію, фільтраційний шар та дренаж, субстрат та рослинний покрив [6]. (Рис. 1)



- 6 - рослинний покрив.
- 5 - розширене (екстенсивне) середовище для вирощування;
- 4 - фільтраційний шар, проникний для коренів;
- 3 - дренажний шар;
- 2 - захисний та водоакумуючий шар;
- 1 - покрівельна основа, теплоізоляція, гідроізоляція;

Рис. 1. Схема будови зеленої покрівлі, виконана Йоргом Бройнінгом [6]

Зі щорічним зростанням населення світу міські території продовжують розширюватися як за площею, так і за щільністю забудови. Під впливом урбанізаційних процесів збільшується площа водонепроникних поверхонь. У контексті управління зливовими водами

це призводить до зменшення інфільтрації та зростання обсягів поверхневого стоку, що, у свою чергу, підвищує навантаження на наявну інфраструктуру водовідведення. Як наслідок, ризики локальних підтоплень та аварійних скидів із каналізаційних систем у містах суттєво зростають. Останні дослідження вказують, що глобальне потепління може спричинити збільшення частоти екстремальних опадів у низці регіонів світу, що додатково призведе до збільшення кількості повеней у міських районах [8]. У зв'язку з цим, проблема ефективного контролю та затримання дощових вод набула особливої актуальності. Відомо, що акумулювання води може бути забезпечено як природними середовищами, зокрема ґрунтом, так і спеціально розробленими резервуарами для її тимчасового утримання [7]. Подальший розвиток технологій зелених покрівель сприяв появі нових типів функціональних покрівельних систем, таких як blue roofs — дахів із функцією акумулювання дощових вод, та blue-green roofs, що поєднують властивості зелених і водоаккумулюючих систем.

Blue roofs, також відомі як «блакитні покрівлі», призначені для управління зливовими водами. Їхня конструкція та специфіка впровадження, подібно до зелених покрівель, вимагають особливої уваги до гідроізоляції та розрахунку несучої здатності будівлі для витримування додаткового навантаження води. Зростаючий науковий інтерес викликає перспектива максимізації потенціалу блакитних покрівель не лише для утримання та/або затримки води, але й для її продуктивного використання для росту і живлення рослин. Водночас рослини пропонують можливість поглинати та утримувати певну кількість вологи всередині своєї структури, а також виводити частину води в атмосферу шляхом випаровування. Поєднуючи функціональні покрівельні системи blue roofs із green roofs, потенціал управління зливовими водами підвищується. Випаровування створює охолоджувальний ефект на будівлю, що є ще однією екологічною перевагою, характерною як для блакитних, так і для зелених покрівель [7].

Blue-green roofs, або блакитно-зелені покрівлі, також відомі як елементи концепції «міста-губки», є комбінованою системою, що поєднує принципи blue roofs та green roofs. Даний тип покрівель дозволяє впроваджувати один з найефективніших способів управління об'ємом зливових вод у ХХІ столітті, оскільки поєднує тимчасове утримання води, регулювання стоку та використання вологи для живлення рослинного шару.

В контексті статті було розглянуто досвід локального впровадження системи blue-green roofs у середній школі Чунгвун, м. Сеул [8]. У дослідженні, проведеному М. Shafique, R. Kim, D. Lee, проаналізовано характеристики опадів з метою оцінки зменшення обсягів поверхневого стоку та затримки пікового стоку, яких можна досягти завдяки блакитно-зеленим покрівельним системам.

На покрівлі школи було встановлено експериментальні секції розміром $0,5 \times 0,5 \times 0,2$ метри, що конструктивно відповідають принципам повномасштабної системи blue-green roof. Переливні стоки із модулів збиралися через дренажні труби, а загальна площа водозбору становила 285 квадратних метрів. Конструктивна схема blue-green roofs працює подібно до зелених покрівель, і включає додатковий водоаккумулюючий шар знизу, що дозволяє утримувати більший об'єм зливових вод і таким чином знижувати ризики локальних повеней. Для системи було використано місцевий садовий субстрат, а під час вибору рослин враховували їхню стійкість до низького вмісту поживних речовин та здатність витримувати екстремальні температурні умови. Після посадки рослинність продовжувала рости природним шляхом без використання добрив та штучного поливу.

Для порівняльної оцінки ефективності системи було організовано контрольну секцію покрівлі, що не містила шару субстрату й рослинності. На обох поверхнях було встановлено датчики вологості, рівня води та витрати стоку, що дозволило точно фіксувати роботу покрівельних систем. Для аналізу роботи систем було розглянуто шторм із середньою інтенсивністю опадів 90 мм/год, який спостерігався в м. Сеул з 22 липня 2014 року по 28 липня 2014 року [8]. (Рис. 2)

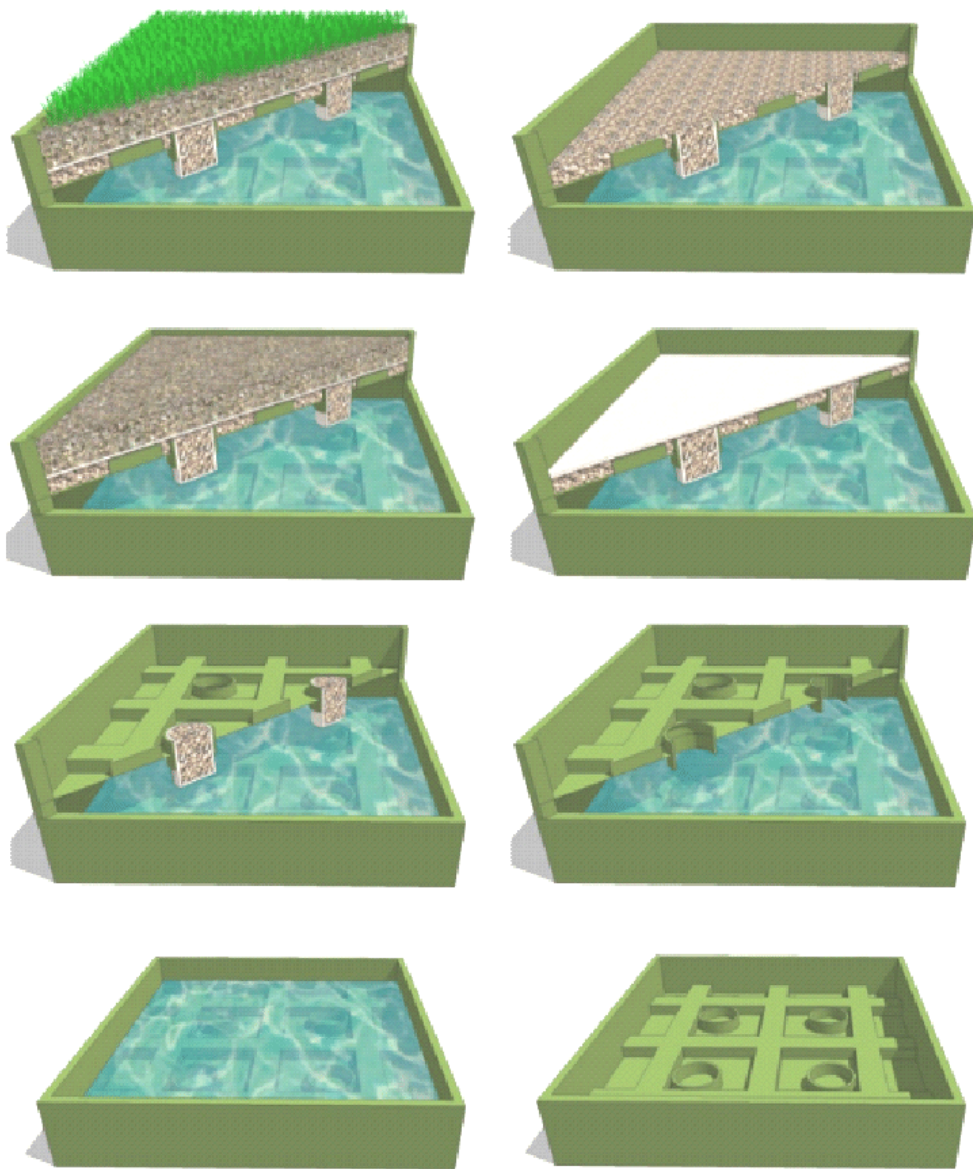


Рис. 2. Схема будови експериментальної секції за принципами блакитно-зеленої покрівлі для дослідження у середній школі Чунгвун, м. Сеул, проведеному Muhammad Shafique, Ree-Ho Kim та D. Lee [8] (2014 р.)

Результати дослідження свідчать, що стік дощової води з блакитно-зеленої покрівлі був значно меншим порівняно з контрольним дахом, а піковий стік мав суттєво нижчу інтенсивність. Блакитно-зелена покрівля ефективно зменшувала обсяг поверхневого стоку, утримувала частину дощової води та збільшувала час концентрації. Характерною особливістю стало те, що стік з системи продовжував формуватися навіть після завершення опадів, тоді як контрольна поверхня майже одразу припиняла утворювати стік. Це пояснюється необхідністю проходження води через субстрат, дренажний шар і фільтраційну мембрану перед її відведенням. Крім того, блакитно-зелена покрівля утримувала достатні об'єми води під час інтенсивних опадів, що демонструє її високий потенціал у запобіганні раптовим міським повеням. Проведене дослідження підтверджує, що системи blue-green roofs є однією з найбільш ефективних практик «low impact development» (LID) (в перекладі з англ. «розвиток з низьким рівнем впливу») для управління зливовими водами у високорозвинених урбанізованих районах [8].

У світовій практиці управління зливовими водами на покрівлях дедалі ширше застосовуються автоматизовані системи контролю стоку, зокрема технології типу «smart flow

control» (SFC) (в перекладі з англ. «інтелектуальне керування стоком»). Такі системи передбачають встановлення автономних «розумних» клапанів, здатних регулювати швидкість відведення дощової води на основі даних про рівень опадів, прогноз погоди та поточний стан покрівлі. Завдяки безперервній взаємодії з системами моніторингу вологості та протікань ці пристрої забезпечують високий рівень надійності, швидку окупність та мінімальні витрати на обслуговування [9].

Гнучкість технології SFC дає змогу застосовувати її як у межах blue roofs, так і в blue-green roofs. Водночас інтеграція цих систем із зеленими покрівлями сприяє підвищенню ефективності випаровування та транспірації, що створює додатковий охолоджувальний ефект. Останній, у свою чергу, позитивно впливає на продуктивність фотоелектричних модулів, що відкриває перспективи для формування biosolar roofs та інших комбінованих покрівельних систем.

Перші концептуальні передумови для формування систем biosolar roofs сягають 1981 року і пов'язані з дослідженням А. Goetzberger та А. Zastrow, присвяченим можливості спільного використання земельних ділянок для виробництва енергії та вирощування рослин. У своїй роботі автори запропонували розміщувати фотоелектричні панелі над сільськогосподарськими культурами, тим самим усуваючи конкуренцію між енергогенерацією та агровиробництвом за територію. Вони розрахували, що встановлення сонячних панелей на висоті близько 2 метрів над поверхнею ґрунту забезпечує рослинам рівномірне надходження сонячної радіації протягом дня — на рівні приблизно двох третин від інсоляції на відкритому полі. Запропонована модель спільного використання землі для виробництва енергії та вирощування рослин отримала назву «agrivoltaics» (в перекладі з англ. «agriculture» - «сільське господарство» та «photovoltaics» - «фотовольтаїка»; концепція спільного використання однієї земельної ділянки для вирощування рослин та виробництва сонячної енергії) і стала підґрунтям для подальших розробок у сфері інтеграції рослинності та фотоелектричних систем. На основі цих ідей згодом сформувалася сучасна концепція biosolar roofs, яка переносить принципи агровольтаїки на покрівельні конструкції, поєднуючи озеленення дахів та водоакамуючу функцію із сонячною генерацією [10].

Першим в світі прикладом інтеграції сонячних панелей із зеленою покрівлею вважається експериментальний проєкт культурного центру UfaFabrik у Берліні в 1998-1999 роках, в рамках якого було встановлено дві «photovoltaic» (PV) (в перекладі з англ. «фотовольтаїчний», тобто пов'язаний із перетворенням сонячної енергії на електричну) електростанції. Метою дослідження було порівняти ефективність роботи сонячних панелей на покрівлі з екстенсивним озелененням та на традиційній бітумній покрівлі. У межах експерименту варіювалися типи PV-елементів, особливості інверторів та температурні умови експлуатації, зокрема вплив охолодження, яке забезпечує рослинний шар зеленого даху. Результати продемонстрували, що зелені покрівлі та сонячні панелі не конкурують за простір, а тільки взаємно підсилюють ефективність одна одної. Рослинний шар покрівлі сприяв зниженню робочої температури фотоелектричних модулів, що підвищило їхню загальну продуктивність. У свою чергу, PV-панелі створювали часткове затінення рослинності, зменшуючи випаровування та посушливий стрес на екстенсивних дахах.

У подальших дослідженнях ефективності комбінованих покрівельних систем розглядався вплив блакитно-зеленої покрівлі типу blue-green roofs на продуктивність фотоелектричних панелей. В результаті тривалих експериментів було визначено, що комбінована система blue-green solar roof, також відома як biosolar roof, забезпечує на 4,4% більший вихід електроенергії порівняно з традиційною бітумною покрівлею за аналогічних умов освітленості. Дослідження підтвердили, що сонячні панелі можуть успішно поєднуватися з високо біорізноманітною рослинністю. Додатковим важливим аспектом, що визначає переваги biosolar roof, є їх позитивний вплив на розвиток міського біорізноманіття. [10]. (Рис. 3).

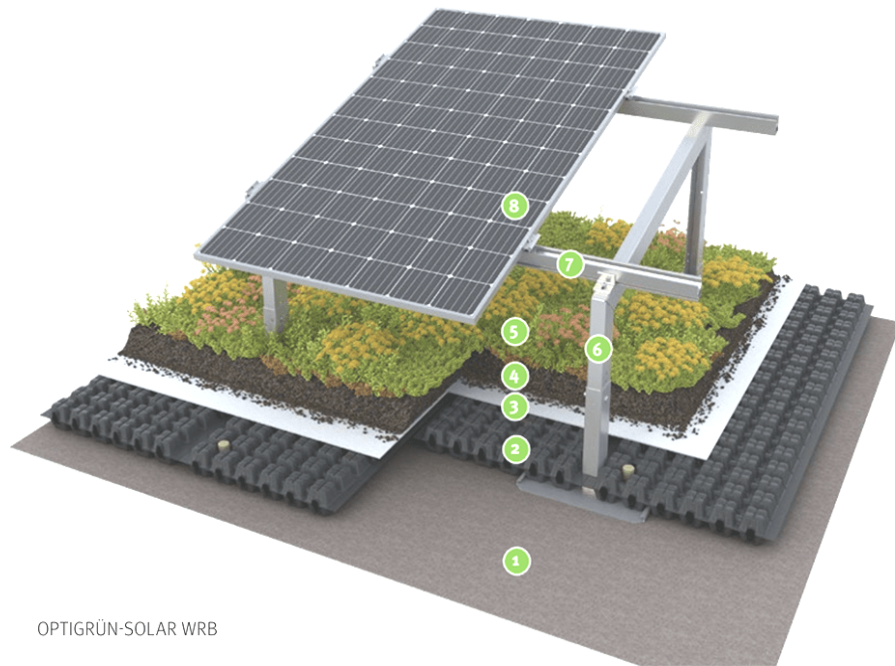


Рис. 3. Схема будови біосонячної покрівлі [10], де: 1 - роздільний, захисний та водоакумулюючий фліс; 2 - водоутримуючий модуль; 3 - капілярно-всмоктуючий фліс; 4 - субстрат (грунтовий шар); 5 - рослинний шар; 6 - основа для сонячних панелей; 7 - монтажні рейки для сонячних панелей; 8 - сонячна панель.

Дослідження біосонячної покрівлі, встановленої у Queen Elizabeth Olympic Park в Лондоні, підтвердило, що фотоелектричні панелі не лише не перешкоджають формуванню стійких екосистем, а й можуть сприяти збільшенню видового різноманіття. Моніторинг засвідчив наявність 92 видів рослин та близько 50 видів безхребетних, майже половина з яких має природоохоронну цінність [10]. Затінення, яке створюють PV-панелі, формує різноманітні мікробіоти, сприяючи появі різних екологічних ніш і зміні видового складу рослинності: під панелями переважали низькорослі види, тоді як у відкритих ділянках активно розвивалися вищі трав'янисті рослини. Отримані результати демонструють, що biosolar roofs додатково можуть функціонувати як повноцінні напівприродні біоти, підтримуючи екологічну стійкість та збагачуючи міське середовище.

Висновки. Проведений аналіз історичного розвитку, конструктивних особливостей, функціональних можливостей та сучасних інноваційних рішень у сфері функціональних покрівельних систем типів green, blue, blue-green та biosolar демонструє, що такі покрівельні системи є важливим інструментом формування екологічно стійкої й енергоефективної міської інфраструктури.

Зелені покрівлі, що еволюціонували від висячих садів Семіраміди та традиційних скандинавських дернових дахів до високотехнологічних мультифункціональних систем, забезпечують комплекс екологічних, естетичних та енергетичних переваг, серед яких — зниження теплового навантаження, поліпшення мікроклімату, затримання зливових вод і створення додаткових рекреаційних просторів. Розвиток технологій управління зливовими водами зумовив появу blue roofs та blue-green roofs. Розглянуте експериментальне дослідження, проведене в м. Сеул, підтверджує спроможність таких систем значно зменшувати інтенсивність поверхневого стоку та збільшувати час концентрації дощових вод, що робить їх однією з найдієвіших практик «low impact development» (LID).

Інтеграція blue-green roofs з фотоелектричними технологіями стала основою для формування концепції biosolar roofs, яка поєднує принципи агровольтаїки з функціональністю озелених покрівель. Згадані польові випробування показали, що такі

покрівлі підвищують енергоефективність сонячних панелей завдяки охолоджувальному ефекту рослинності. Водночас biosolar roofs сприяють розвитку міського біорізноманіття, створюючи різноманітні мікробіотопи та забезпечуючи середовище існування для широкого спектра рослин і безхребетних видів.

Застосування досліджених зелених конструкцій – перспективний напрямок зеленого будівництва, що має високий потенціал і буде актуальним при відновленні України після активних військових дій. Але для впровадження даних типів зелених конструкцій необхідна відповідна нормативна база. Для успішного розвитку зеленого будівництва в Україні необхідно активізувати зусилля держави, бізнесу та громадськості. Основними напрямками розвитку зеленого будівництва в Україні є: розробка та впровадження нових будівельних норм і стандартів, що відповідають принципам зеленого будівництва; розширення державних програм фінансування зелених проєктів, надання податкових пільг та інших стимулів; розвиток ринку екологічно чистих будівельних матеріалів; навчання фахівців у галузі зеленого будівництва; популяризація зеленого будівництва (проведення інформаційних кампаній та заходів для підвищення обізнаності населення про переваги зеленого будівництва).

Література

- [1] Богінська Л.О. «Зелене будівництво як складова сталого розвитку будівельного комплексу». Вчені записки Таврійського національного університету ім. В. І. Вернадського, серія «Технічні науки», 2023. [Електронний ресурс]. Доступно: https://tech.vernadskyjournals.in.ua/journals/2023/2_2023/part_2/40.pdf Дата звернення: Листопад 11, 2025.
- [2] Зайцева Л.О. «Складові концепції сталого розвитку». «Ефективна економіка», 2019. [Електронний ресурс]. Доступно: http://www.economy.nayka.com.ua/pdf/11_2019/57.pdf Дата звернення: Листопад 11, 2025.
- [3] Андрусів У.Я., Мажак Ю.М. «Зелене будівництво як інновація відновлення будівельної галузі в Україні». № 6(6) (2024): «Успіхи і досягнення у науці», серія «Управління та адміністрування», 2024. [Електронний ресурс]. Доступно: [https://doi.org/10.52058/3041-1254-2024-6\(6\)-246-255](https://doi.org/10.52058/3041-1254-2024-6(6)-246-255) Дата звернення: Листопад 11, 2025.
- [4] World Green Infrastructure Network. “Key Definition: Green Roof”. 2021. [Електронний ресурс]. Доступно: <https://worldgreeninfrastructurenetwork.org/key-definition-green-roof/> Дата звернення: Листопад 11, 2025.
- [5] E. Oberndorfer, J. T. Lundholm, B. Bass, R. Coffman. “Green Roofs As Urban Ecosystems: Ecological Structures, Functions And Services”. American Institute of Biological Sciences, 2007. [Електронний ресурс]. Доступно: https://www.researchgate.net/publication/232694304_Green_Roofs_As_Urban_Ecosystems_Ecological_Structures_Functions_And_Services Дата звернення: Листопад 12, 2025.
- [6] University of Chicago Library. “Construction Components of Green Roofs”. 2010. [Електронний ресурс]. Доступно: <https://www.lib.uchicago.edu/collex/exhibits/science-sustainability/green-roofs/construction-components-green-roofs/> Дата звернення: Листопад 11, 2025.
- [7] K. Valter Mai. “Productive Blue-Green Roofs for Stormwater Management”. “Green Energy and Environmental Technology”, 2022. [Електронний ресурс]. Доступно: https://www.researchgate.net/publication/359858425_Productive_Blue-Green_Roofs_for_Stormwater_Management Дата звернення: Листопад 12, 2025.
- [8] M. Shafique, R. Kim, D. Lee. “The potential of green-blue roof to manage storm water in urban areas”. “Nature Environment and Pollution Technology”, 2016. [Електронний ресурс]. Доступно: https://www.researchgate.net/publication/304952812_The_potential_of_green-blue_roof_to_manage_storm_water_in_urban_areas Дата звернення: Листопад 12, 2025.

[9] Green Roof Technology. "Blue Green Roofs Sponge Cities". [Електронний ресурс]. Доступно: https://greenrooftechology.com/green-roof-finder/blue_green-roofs/ Дата звернення: Листопад 12, 2025.

[10] Pritchard & Pritchard. "Repository of biosolar research". [Електронний ресурс]. Доступно: <https://biosolar-roofs.com/research-and-technology/biosolar-research/> Дата звернення: Листопад 11, 2025.

References

[1] L. Boghinsjka. "Green building as a component of the sustainable development of the building complex". Scientific notes of the V. I. Vernadsky Tavrichesky National University, series "Technical Sciences", 2023. [Online]. Available: https://tech.vernadskyjournals.in.ua/journals/2023/2_2023/part_2/40.pdf Accessed on: November 11, 2025.

[2] L. Zaitseva. "Constituents of sustainable development". "Efektyvna ekonomika", 2019. [Online]. Available: http://www.economy.nayka.com.ua/pdf/11_2019/57.pdf Accessed on: November 11, 2025.

[3] U. Andrusiv, Y. Mazhak. "Green building as an innovation for the renewal of the construction industry in Ukraine". № 6(6) (2024): "Uspikhy i dosiahnennia u nautsi", series "Upravlinnia ta administruvannia", 2024. [Online]. Available: [https://doi.org/10.52058/3041-1254-2024-6\(6\)-246-255](https://doi.org/10.52058/3041-1254-2024-6(6)-246-255) Accessed on: November 11, 2025.

[4] World Green Infrastructure Network. "Key Definition: Green Roof". 2021. [Online]. Available: <https://worldgreeninfrastructurenetwork.org/key-definition-green-roof/> Accessed on: November 11, 2025.

[5] E. Oberndorfer, J. T. Lundholm, B. Bass, R. Coffman. "Green Roofs As Urban Ecosystems: Ecological Structures, Functions And Services". American Institute of Biological Sciences, 2007. [Online]. Available: https://www.researchgate.net/publication/232694304_Green_Roofs_As_Urban_Ecosystems_Ecological_Structures_Functions_And_Services Accessed on: November 12, 2025.

[6] University of Chicago Library. "Construction Components of Green Roofs". 2010. [Електронний ресурс]. Доступно: <https://www.lib.uchicago.edu/collex/exhibits/science-sustainability/green-roofs/construction-components-green-roofs/> Accessed on: November 11, 2025.

[7] K. Valter Mai. "Productive Blue-Green Roofs for Stormwater Management". "Green Energy and Environmental Technology", 2022. [Online]. Available: https://www.researchgate.net/publication/359858425_Productive_Blue-Green_Roofs_for_Stormwater_Management Accessed on: November 12, 2025.

[8] M. Shafique, R. Kim, D. Lee. "The potential of green-blue roof to manage storm water in urban areas". "Nature Environment and Pollution Technology", 2016. [Online]. Available: https://www.researchgate.net/publication/304952812_The_potential_of_green-blue_roof_to_manage_storm_water_in_urban_areas Accessed on: November 12, 2025.

[9] Green Roof Technology. "Blue Green Roofs Sponge Cities". [Online]. Available: https://greenrooftechology.com/green-roof-finder/blue_green-roofs/ Accessed on: November 12, 2025.

[10] Pritchard & Pritchard. "Repository of biosolar research". [Online]. Available: <https://biosolar-roofs.com/research-and-technology/biosolar-research/> Accessed on: November 11, 2025.

INNOVATIVE SOLUTIONS FOR FUNCTIONAL FLAT ROOFS: GREEN, BLUE-GREEN, AND BIOSOLAR SYSTEMS

Kurian V.,

PhD in Architecture, Senior Lecturer,

4rchitect.urbanplanner@gmail.com, ORCID: 0000-0002-5943-7085

Kushnir O.,

Master,

kushnir.stud9@gmail.com

Odesa State Academy of Civil Engineering and Architecture

Abstract. The construction sector has traditionally been regarded as one of the key drivers of economic development; however, in the 21st century its priorities have undergone significant re-evaluation under the influence of global socio-economic, political, and environmental challenges. In this context, the concept of sustainable development becomes particularly relevant, shaping new approaches to the formation of the built environment and directly influencing the architecture of buildings and structures. One of the central directions of sustainable development is green building, which is based on the principles of environmentally oriented architecture focused on ecological performance, energy efficiency, and the rational use of resources. One of the most prominent examples of innovation in this field is the development of roof greening systems, commonly known as roof gardens or green roofs, which have gradually evolved into complex multifunctional structures. Further technological advancement has led to the emergence of blue roofs designed for stormwater retention and controlled runoff, as well as blue-green roofs that integrate the functions of vegetated and water-accumulating systems and correspond to the principles of low impact development. A new stage is represented by biosolar roofs, which combine vegetation, stormwater management and photovoltaic energy generation, and are conceptually linked to agrivoltaics. These systems additionally contribute to enhancing urban biodiversity by creating stable micro-ecosystems on rooftop surfaces. The aim of the article is to explore innovative solutions in the design and operation of functional flat roofs, green, blue-green, and biosolar, and to determine their potential for integration into the post-war reconstruction of Ukraine. The methodology is based on a comparative analysis of scientific literature, contemporary research, and professional publications that reflect international experience in implementing these roof systems. The conducted review demonstrates that such innovative roofing technologies constitute an essential component in forming environmentally resilient and energy-efficient urban environments. Their application represents a promising direction for the development of green building in Ukraine; however, effective implementation requires an updated regulatory framework and systemic support from the state and the professional community.

Keywords: sustainable development, green building, green architecture, architecture of buildings and structures, innovative solutions, energy efficiency, environmental sustainability, rooftop gardens, green roofs, blue roofs, blue-green roofs, low impact development, solar roofs, biosolar roofs, agrivoltaics, biodiversity.

Стаття надійшла до редакції 14.11.2025[This work](#) © 2025 by [Kurian V., Kushnir O.](#) is licensed under [CC BY 4.0](#)