

РИБАК ОКСАНА

Державний університет «Житомирська політехніка»

<https://orcid.org/0000-0002-6475-4587>e-mail: ke_ros@ztu.edu.ua

ПАЦЕВА ІРИНА

Державний університет «Житомирська політехніка»

<https://orcid.org/0000-0002-6572-681X>e-mail: rig@ztu.edu.ua

ЕКОЛОГІЧНІ ОСНОВИ АНАЛІЗУ ВПЛИВУ «ЗЕЛЕНИХ» ДАХІВ НА МІСЬКИЙ КЛІМАТ В УРБОЦЕНОЗАХ

У майбутньому очікується посилення впливу зміни клімату в містах. Порівняно з навколишньою територією, більш високі температури є особливо важливими як вплинуть на міський клімат. Крім того, посилення поверхневої герметизації збільшує наслідки сильних дощів. Використання зелених дахів обговорюється як захід адаптації, який може позитивно вирішити обидві проблеми. З теоретичної точки зору переваги очевидні, оскільки можна очікувати покращення мікроклімату та якості повітря, зменшення піків стоку під час дощів та збільшення біорізноманіття, а також покращення ізоляції будівель.

У багатьох густонаселених районах брак місця та конфлікту щодо землекористування обмежують можливість створення великих зелених зон і парків, які сприяють покращенню міського клімату та якості життя мешканців. Доступні території потрібні для згущення міст, щоб створити життєвий простір, запаси чи інфраструктуру. Такі зміни можна розглядати як позитивні з точки зору захисту клімату, але розглядаються як критичні з точки зору адаптації до наслідків зміни клімату. Холодне повітря та достатня вентиляція особливо важливі у зв'язку з міською температурою. Важливо зберегти існуючі холодні дихальні шляхи вільними від нової забудови та створити нові холодні дихальні шляхи за допомогою заходів із реконструкції міст. На цьому тлі зелені дахи є особливо важливими, оскільки вони займають мало або зовсім не займають місця на рівні вулиць і так густонаселених міських районах. Таким чином, будівництво зелених насаджень доповнює інші форми міської зелені, такі як парки та зелені зони.

У цій статті підсумовується поточний стан знань про використання зелених дахів, як заходів адаптації до клімату в помірних кліматичних зонах і розглядаються поточні потреби досліджень. Це, наприклад, кількісна оцінка мікрокліматичного ефекту на рівні міста та вплив зміни клімату на озеленення самих будівель. У статті обговорюється ефективність заходів як щодо до сьогоденного клімату та у зв'язку з кліматом майбутнього – зокрема, стосовно теплового стресу в містах.

Ключові слова: зелений дах, міський клімат, міський тепловий острів, урбоценоз, охолодження

RYBAK OKSANA S., PATSEVA IRINA G.,
Zhytomyr Polytechnic State University

ECOLOGICAL BASICS OF ANALYSIS OF THE INFLUENCE OF "GREEN" ROOFS ON URBAN CLIMATE IN URBOCENOSES

The impact of climate change in cities is expected to increase in the future. Compared to the surrounding area, higher temperatures are particularly important as they affect the urban climate. In addition, increased surface sealing increases the effects of heavy rains. The use of green roofs is discussed as an adaptation measure that can positively address both issues. From a theoretical point of view, the benefits are clear, as one can expect to improve the microclimate and air quality, reduce runoff peaks during rains and increase biodiversity, as well as improve the insulation of buildings.

In many densely populated areas, lack of space and conflicts over land use limit the possibility of creating large green areas and parks that contribute to the improvement of the urban climate and the quality of life of residents. Available areas are needed to densify cities to create livable space, supplies, or infrastructure. Such changes can be seen as positive from the point of view of climate protection, but are seen as critical from the point of view of adapting to the effects of climate change. Cool air and adequate ventilation are especially important due to urban temperatures. It is important to keep existing cold airways free of new development and to create new cold airways through urban renewal activities. Against this background, green roofs are particularly important because they take up little or no space at street level in such densely populated urban areas. Thus, the construction of green spaces complements other forms of urban green such as parks and green areas. This article summarizes the current state of knowledge on the use of green roofs as climate adaptation measures in temperate climate zones and addresses current research needs. This is, for example, a quantitative assessment of the microclimatic effect at the city level and the impact of climate change on the greening of the buildings themselves. The article discusses the effectiveness of measures both in relation to today's climate and in connection with the climate of the future - in particular, in relation to heat stress in cities.

Key words: green roof, urban climate, urban heat island, urbocenosis, cooling

«Зелені» дахи можуть запропонувати різноманітні переваги як безпосередньо на рівні будівлі, так і рівні району та міста, відповідно при значному охопленні території. «Зелені» дахи мають потенціал до зменшення перегріву міста – ефекту міського теплового «острова». Знижені температури доквілля сприяють покращенню теплових характеристик у літню спеку, комфортне перебування на дворі, зниження стресу для здоров'я від спеки та покращення нічних умов для спокійного сну [1].

Використано порівняльний аналіз, систематизацію результатів наукових досліджень, виявлення основних умов та видів влаштування озеленення в житлових спорудах, систематизацію результатів наукових досліджень

Затіняючий ефект рослинності запобігає нагріванню основного будівельного матеріалу даху. Порівняно з темними бітумними дахами зелені дахи також досягають збільшення відбитої частки сонячного випромінювання завдяки їх більш високому альбедо (приблизно 0,7 - 0,85), що також зменшує нагрівання поверхні [2].

Дослідження, проведені Хейсінгером та Вебером (2015) у Брауншвейгу, показали, що середня температура поверхні на зеленому даху в літній день була нижчою на 11 °C порівняно зі звичайним дахом [3]. Максимальне вимірне зниження становило 17,4°C. У різних дослідженнях зниження температури поверхні на 1,9–8,3°C [4], 12–20°C [5], 1,2–5°C [6] або до 15,5°C [7]. Різні прояви ефектів зумовлені різними кліматичними умовами та використаними зеленими насадженнями. Основний ефект поверхневого охолодження зумовлений насамперед затінням і, меншою мірою, транспірацією [7]. Крім того, ізоляційний ефект рослинності зменшує нічне охолодження, що означає, що зелені дахи часто мають вищу мінімальну температуру поверхні і, отже, меншу амплітуду температури [3]. Це призводить до зниження термічного навантаження на покривельну мембрану та, як наслідок, довшого терміну служби матеріалу.

На додаток до затіння, температуру навколишнього середовища зеленого даху можна знизити за рахунок випаровуваного охолодження рослинності та субстрату [8]. Хейсінгер та Вебер стверджують, що температура повітря на 0,27 °C нижча протягом дня на висоті 0,5 м над зеленим дахом (Брауншвейг, період вимірювань серпень-грудень). Максимальне вимірне похолодання становило 0,7 °C (серпень, 15:00) [3].

Теплові потоки, задіяні на зелених дахах показані на рис.1. Порівняно з неозеленими дахами та фасадами, зелені варіанти мають вищий прихований тепловий потік і менший відчутний тепловий потік [9]. У той час як на звичайних дахах 95% вхідного випромінювання перетворюється на тепло, на екстенсивно озелених дахах це лише 42%. Однак решта 58% припадає на охолодження через випаровування [10]. Залежно від місця розташування, типу зелених насаджень і наявності води прихований тепловий потік зелених дахів становить від 100 до 600 Вт/м².

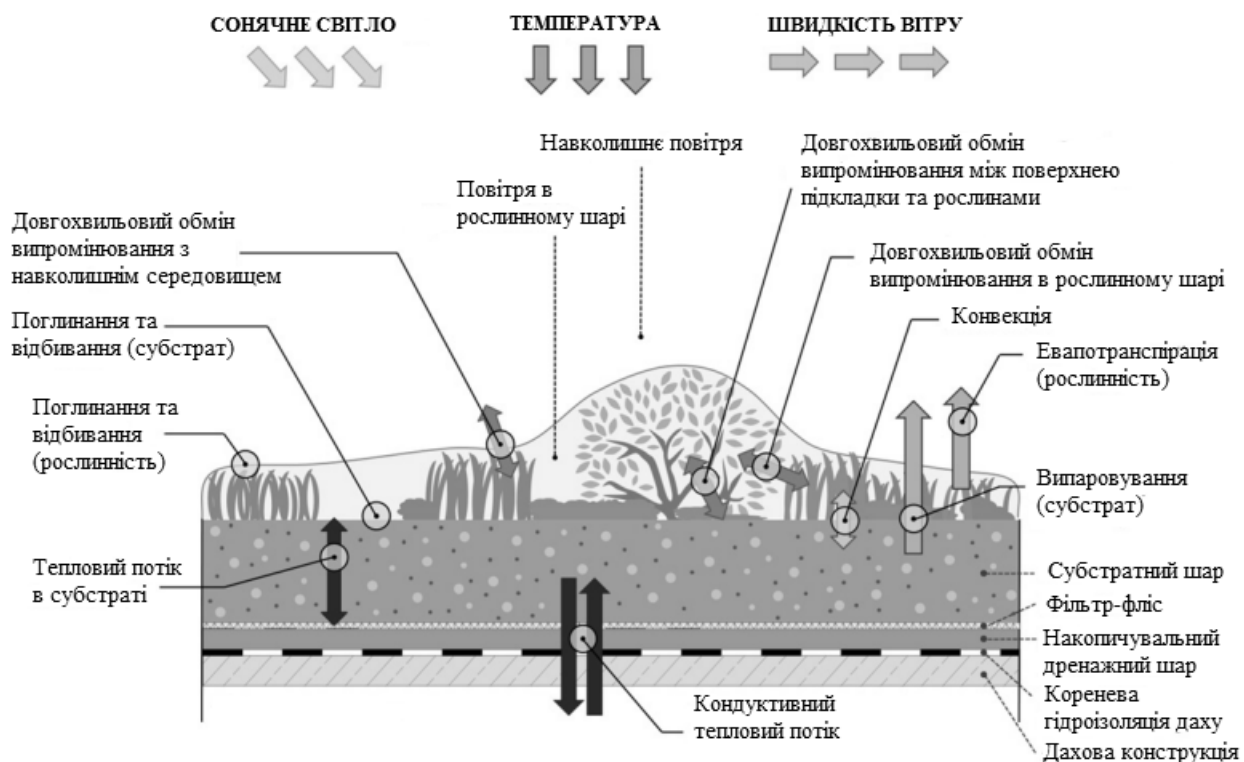


Рис.1 Теплопередача на зелених дахах (ілюстрація на основі Берарді та ін.) [2].

Температура даху, а також її вплив на температуру навколишнього середовища сильно залежить від наступних факторів [1]:

- **Озеленення:** інтенсивне або екстенсивне, структура рослинності, ступінь покриття (індекс листової поверхні– ІЛП) товщина рослинного шару, властивості використаних видів рослин (наприклад, опір продихів, сонячне відбиття та поглинання, теплопровідність, морфологія, швидкість транспірації).
- **Субстрат:** глибина основи, текстура, зернистість, щільність, водоутримуюча здатність, вологість, теплоємність, теплопровідність.
- **Наявність води:** постачання за рахунок опадів та/або зрошення, ємність шару зберігання.
- **Клімат і погода:** кліматична зона (температура навколишнього середовища, вологість тощо), сонячна радіація (задана радіація, ступінь затіння, кут нахилу та орієнтація), швидкість вітру, тривалість, інтенсивність і часова послідовність вологих і сухих періодів.

Крім того, навколишнє середовище має незначний вплив на досягнутий ефект: той самий захід з озеленення може мати більший ефект у щільно забудованому внутрішньому районі міста, ніж у житлових районах на околицях [11]. Безліч факторів впливу показує, що загальне твердження про масштаб очікуваного ефекту є складним, оскільки він залежить від місця розташування. Порівняння досліджень ускладнюється ще й тим фактом, що не існує стандартизованої методології для реєстрації мікрокліматичних ефектів (різна довжина та час серій вимірювань, кліматичні та погодні відмінності тощо). Однак загалом дослідження показують, що чим сухіший і тепліший клімат у регіоні, тим більший ефект охолодження на навколишнє середовище. Однак мікрокліматичні ефекти також можна продемонструвати в умовах вологого клімату [12].

Охолодження, досягнуте через випаровування, корелює з наявною вологістю, тому в посушливий час можна очікувати значно зниженого ефекту охолодження через випаровування. З іншого боку, якщо необхідно, зрошення може позитивно вплинути на ефект охолодження – навіть без посухового стресу, який перевищує мінімальні потреби рослин [13]. Дослідження Бевілаква та інших показують більше зниження температури після випадання опадів і, як наслідок, короткочасне покращення доступності води. У його дослідженні, вищий ступінь покриття при незмінно низькому рівні вологи в підкладці призводив лише до незначного охолоджуючого ефекту. Лише за наявності більшої води та пов'язаного з цим більшого випаровування можна спостерігати більший ефект охолодження. Однак зрошення екстенсивних зелених дахів часто суперечить іншим способам використання води, особливо в посушливих районах з дефіцитними запасами води в літні посушливі періоди.

Інші дослідження також показують, що рівень покриття також є важливим фактором, оскільки відкритий субстрат може призвести до підвищення температури поверхні та навколишнього повітря, коли рослинний покрив неповний. Причиною цього є прискорене висихання субстрату та менша теплоємність порівняно з густою рослинністю [14]. Тому слід уникати неправильної посадки та прогалів у насадженні, ретельно висаджуючи та доглядаючи за зеленими насадженнями.

Використані види та видовий склад також впливають на ефект охолодження. Досягнутий ефект залежить від властивостей рослини, таких як швидкість транспірації, розмір листя та альbedo [15]. Специфічна для рослинності сезонна мінливість також демонструє відмінності в річному циклі [13]. При виборі відповідних рослин необхідно розрізняти здатність покращувати мікроклімат і стійкість до екстремальних погодних умов. Наприклад, багато видів седумів можуть виживати довше, ніж трави або трав'янисті рослини, у суворих умовах на даху [16]. Дослідження Блануса [17] наприклад, посадка чистоцю забезпечує кращу ефективність охолодження, ніж більш стійкий до посухи седум. У цьому сенсі, залежно від місцевої ситуації, необхідно знайти компроміс між максимізацією мікроклімату ефект і максимально можливу посухостійкість. Однак було також показано, що суміш видів, яка є максимально різноманітною, може забезпечити більш ефективні переваги, ніж монокультура [16].

Загалом, поки що в літературі на міському рівні є мало кількісних даних про те, який ефект охолодження можна очікувати за відповідного покриття площі будівель або скільки дахів у місті потрібно озеленити, щоб досягти певного температурного ефекту. З одного боку, це не вдається через відсутність відповідних заходів моніторингу та той факт, що досі не впроваджено жодного загальноміського озеленення, яке було б придатним для прямих вимірювань. Для того, щоб оцінити потенціал зменшення, на даний момент було проведено мегамасштабне моделювання та оцінено чутливі та приховані теплові потоки на існуючих зелених дахах. При розрахунку потенційно можливих температурних впливів на рівні міста слід зазначити, що Таблиця 1 містить огляд деяких симуляцій, проведених на рівні міста. Однак слід зазначити, що враховуються також результати з інших кліматичних зон, які можна лише частково перенести на Україну.

Таблиця 1

Потенціал зниження температури зелених дахів на рівні міста

Посилання	Місто	Методика дослідження	Вид зеленого даху	Результати
[18]	Чикаго, США	Моделювання (дослідження погоди та модель прогнозу)	Екстенсивний	Міська температура між 18:00 і 23:00 була на 2-3 К нижчою порівняно з імітаційними температурами без використання зелених дахів
[19]	Нью-Йорк, США	Симуляція (MM5)	Екстенсивний	Пікові температури на висоті 2 м знижуються на 0,37-0,76 К; зниження температури в середньому на 0,1-0,8 К Близько до землі з озелененням 50% дахів у Нью-Йорку
[20]	Токіо, Японія	Моделювання (модель CSCRC)	Екстенсивний	Майже незначний вплив на рівень вулиці через велику висоту зелених багатоповерхівок
[21]	Гонконг, Китай	Моделювання (ENVI-met)	Екстенсивний	

На додаток до згаданих вище впливів, фактичний температурний ефект на рівні міста також сильно залежить від відсотка зелених дахів, співвідношення площі даху до іншої (особливо закритої) території та структури міста (висота та геометрія будівлі, щільність забудови) [22]. Позитивний ефект на рівні вулиці зменшується, особливо зі збільшенням висоти будівлі різко зменшується і є лише незначним або відсутнім у висотних будинках [20]. Особливо при значному озелененні похилих або скатних дахів з більшим кутом нахилу орієнтація будівлі стає більш впливовою через різний рівень радіації протягом дня [22].

Результати досліджень Александрі та Джонса [22] показують, що поєднання зелених дахів і фасадів забезпечує найбільший ефект охолодження в усіх кліматичних зонах. Щоб досягти цього ефекту на рівні вулиць і у великих містах, поєднання різних заходів з озеленення (озеленення дахів, озеленення фасадів, парків, зелених зон).

Розглядаючи теплове самопочуття, у біометричній теорії людини різні фактори, такі як відносна вологість, швидкість вітру та сонячна радіація, беруться до уваги на додаток до температури повітря та узагальнюються в різних оціночних індексах. Приклади включають фізіологічний еквівалент температури і універсальний термокліматичний індекс [22]. З цієї причини, щоб оцінити переваги заходів з озеленення, крім чистого повітря та/або температури поверхні, слід також досліджувати відчутний тепловий комфорт, оскільки це має велике значення для добробуту та здоров'я мешканців міста.

Наукові дослідження [23] служать допоміжним матеріалом щодо питань зелених дахів та пропонують аргументацію щодо обов'язкових процедур планування землекористування та отримання дозволів на будівництво.

Однак, запровадження "зелених дахів" в Україні стримується відсутністю наукових досліджень і впровадженнь, нормативно-правової бази, відсутністю концепцій щодо ролі "зелених дахів" у сталому розвитку міст, недостатньою державною підтримкою, а також складними економічними та політичними умовами і менталітетом населення.

На разі науково-технічні розробки зелених дахів використовуються для підвищення енергоефективності будівель, зменшення зливових стоків за рахунок поглинання води зеленими покрівлями, покращення стану довкілля, покращення екологічної ситуації, поліпшення естетичних властивостей будівель та психоемоційного стану людей.

References

1. Akbari, H., Cartalis, C., Kolokotsa, D., Muscio, A., Pisello, A.L., Rossi, F., Santamouris, M., Synnefa, A., Wong, N.H., Zinzi, M. (2016): Local climate change and urban heat island mitigation techniques – the state of the art. *Journal of Civil Engineering and Management* 22, 1–16. doi:10.3846/13923730.2015.1111934.
2. Berardi, U., GhaffarianHoseini, A., GhaffarianHoseini, A. (2014): State-of-the-art analysis of the environmental benefits of green roofs. *Applied Energy* 115, 411–428. doi:10.1016/j.apenergy.2013.10.047.
3. Heusinger, J., Weber, S. (2015): Comparative microclimate and dewfall measurements at an urban green roof versus bitumen roof. *Building and Environment* 92, 713–723. doi:10.1016/j.buildenv.2015.06.002.
4. Eumorfopoulou, E.A., Kontoleon, K.J. (2009): Experimental approach to the contribution of plant-covered walls to the thermal behaviour of building envelopes. *Building and Environment* 44, 1024–1038. doi:10.1016/j.buildenv.2008.07.004.
5. Mazzali, U., Peron, F., Romagnoni, P., Pulselli, R.M., Bastianoni, S. (2013): Experimental investigation on the energy performance of Living Walls in a temperate climate. *Building and Environment* 64, 57–66. doi:10.1016/j.buildenv.2013.03.005.
6. Perini, K., Ottel , M., Fraaij, a. L. a, Haas, E.M., Raiteri, R. (2011): Vertical greening systems and the effect on air flow and temperature on the building envelope. *Building and Environment* 46, 2287–2294. doi:10.1016/j.buildenv.2011.05.009.
7. Hoelscher, M.T., Nehls, T., J nicke, B., Wessolek, G. (2016): Quantifying cooling effects of facade greening: Shading, transpiration and insulation. *Energy and Buildings* 114, 283–290. doi:10.1016/j.enbuild.2015.06.047.
8. Coutts, A.M., Daly, E., Beringer, J., Tapper, N.J. (2013): Assessing practical measures to reduce urban heat: Green and cool roofs. *Building and Environment* 70, 266–276. doi:10.1016/j.buildenv.2013.08.021.
9. Kolokotsa, D., Santamouris, M., Zerefos, S.C. (2013): Green and cool roofs' urban heat island mitigation potential in European climates for office buildings under free floating conditions. *Solar Energy* 95, 118–130. doi:10.1016/j.solener.2013.06.001.
10. Pfoser, N., Jenner, N., Henrich, J., Heusinger, J., Weber, S. (2013): *Geb ude Begr nung Energie: Potentiale und Wechselwirkungen*. Darmstadt.
11.  zuela-Aloise, M., Koch, R., Buchholz, S., Fr h, B. (2016): Modelling the potential of green and blue infrastructure to reduce urban heat load in the city of Vienna. *Climatic Change* 425–438. doi:10.1007/s10584-016-1596-2.
12. Alexandri, E., Jones, P. (2008): Temperature decreases in an urban canyon due to green walls and green roofs in diverse climates. *Building and Environment* 43, 480–493. doi:10.1016/j.buildenv.2006.10.055.
13. Bevilacqua, P., Coma, J., P rez, G., Chocarro, C., Ju rez, A., Sol , C., De Simone, M., Cabeza, L.F. (2015): Plant cover and floristic composition effect on thermal behaviour of extensive green roofs. *Building and Environment* 92, 1024–1038. doi:10.1016/j.buildenv.2015.06.002.

Environment 92, 305–316.

14. Speak, A.F., Rothwell, J.J., Lindley, S.J., Smith, C.L. (2013): Reduction of the urban cooling effects of an intensive green roof due to vegetation damage. *Urban Climate* 3, 40–55.

15. Blanusa, T., Vaz Monteiro, M.M., Fantozzi, F., Vysini, E., Li, Y., Cameron, R.W.F. (2013): Alternatives to Sedum on green roofs: Can broad leaf perennial plants offer better „cooling service“? *Building and Environment* 59, 99–106.

16. Cook-Patton, S.C., Bauerle, T.L. (2012): Potential benefits of plant diversity on vegetated roofs: A literature review. *Journal of Environmental Management* 106, 85–92.

17. Blanusa, T., Vaz Monteiro, M.M., Fantozzi, F., Vysini, E., Li, Y., Cameron, R.W.F. (2013): Alternatives to Sedum on green roofs: Can broad leaf perennial plants offer better „cooling service“? *Building and Environment* 59, 99–106.

18. Smith, K.R., Roebber, P.J. (2011): Green roof mitigation potential for a proxy future climate scenario in Chicago, Illinois. *Journal of Applied Meteorology and Climatology* 50, 507–522.

19. Rosenzweig, C., Solecki, W.D., Slosberg, R.B. (2006): Mitigating New York City’s Heat Island With Urban Forestry, Living Roofs, and Light Surfaces, New York City Regional Heat Island Initiative. Final Report.

20. Chen, H., Ooka, R., Huang, H., Tsuchiya, T. (2009): Study on mitigation measures for outdoor thermal environment on present urban blocks in Tokyo using coupled simulation. *Building and Environment* 44, 2290–2299.

21. Ng, E., Chen, L., Wang, Y., Yuan, C. (2012): A study on the cooling effects of greening in a high-density city: An experience from Hong Kong. *Building and Environment* 47, 256–271.

22. Alexandri, E., Jones, P. (2008): Temperature decreases in an urban canyon due to green walls and green roofs in diverse climates. *Building and Environment* 43, 480–493.

23. Ірина Пацева; Оксана Алпатова; Оксана Рибак; Ілля Циганенко-Дзюбенко; Олександр Медвідь (2022) Озеленення даху як захід по адаптації зміни клімату на прикладі м. Житомир . Журнал «Проблеми хімії та сталого розвитку», Вип. 3, 67-74. doi: 10.32782/pcsd-2022-3-9