

**МЕТОДОЛОГІЧНІ ПІДХОДИ ЩОДО МОДЕЛЮВАННЯ ЗЕЛЕНИХ
КОНСТРУКЦІЙ БУДІВЕЛЬ**

Київський національний університет будівництва і архітектури

Анотація

Розглянуто та проаналізовано результати досліджень енергоефективності зелених конструкцій різних авторів. Показано великий інтерес до моделювання теплофізичних процесів у зелених конструкціях. Виділені питання, які на сьогодні є дискусійними і вимагають доопрацювання. Серед них дослідження охолоджувального ефекту рослин.

Ключові слова: зелені конструкції, зелені покрівлі, охолоджувальний ефект, енергоефективність

Abstract

Results of researches of energy efficiency of green structures by different authors are considered and analysed. High interest of simulation of thermal physics processes in green structures is shown. Debatable questions that require additional researches are selected. One of them is research of cooling effect of plants.

Keywords: green structures, green roofs, cooling effect, energy efficiency

Серед численних переваг, пов'язаних з впровадженням зелених дахів, є відтворення середовища існування диких птахів, створення в перенаселених міських районах більшого життєвого простору, зменшення міського ефекту теплового острова, економія енергії і ослаблення зливових стоків. Три головні переваги, які були відзначені в ряді досліджень, – це теплові та енергетичні вигоди зелених дахів і збереження ними води [1].

Теплові та енергетичні вигоди зелених покрівель. Дослідження з цих питань можна розділити на дві групи: перша – натурні, практичні дослідження; друга – створення фізичних та математичних моделей. Переважає перший напрямок. Більшість досліджень у цьому напрямку однотипні, незалежно від місця проведення. Зазвичай вони спрямовані на визначення охолоджувального ефекту зеленої покрівлі. При цьому порівнюється температура повітря над поверхнею неозелених покрівель (зазвичай, темного кольору) без рослин і зелених покрівель з рослинним шаром. Температура над неозеленими покрівлями темного кольору значно вища ніж над зеленими. На підставі таких досліджень ґрунтується підхід "міський тепловий острів", а також «ефект кондиціонування». Вважається, що в літній період зелена покрівля працює як пасивний охолоджувач. Ми вважаємо такий підхід до вимірювання охолоджувального ефекту не зовсім правильним, оскільки залежно від виду неозеленого покрівельного покриття, альbedo може бути різним. Отже, ми можемо отримувати різні показники «охолоджувального ефекту». У результаті проведення натурних досліджень ми дійшли висновку, що під терміном «охолоджувальний ефект» слід розуміти різницю температури між рослинним шаром і повітрям над ним. Наведемо результати окремих досліджень. За даними Кембриджського університету, влітку температура відкритої поверхні чорного даху може досягати 80 °С. При цьому температура під зеленим дахом становить лише 27 °С [2]. В основі натурних досліджень енергоефективності зеленої покрівлі лежить рівняння балансу енергії:

$$R_n = LET + H + G_{sfc}, \quad (1)$$

де R_n – чистий потік випромінювання (отриманий з вхідних і вихідних радіаційних потоків), LET – прихований тепловий потік, H – явний тепловий потік, G_{sfc} - тепловий потік ґрунту (фотосинтетичне дихання і зберігання теплоти в рослинному шарі вважаються незначними). Рівняння (1) базується на законі збереження енергії. За основу своїх досліджень це рівняння взяв Гаффіні [3]. У 2005 році ним було припущено, що зелені

дах охолоджуються так само ефективно, як і звичайні білі дахи. Охолодження зелених дахів відбувається прихованою втратою теплоти та поліпшенням відбивної здатності. Співвідношення загальної відбитої енергії до надходження електромагнітного випромінювання визначається як альbedo. Альbedo білих дахів – 0,7...0,85, типових бітумних, смоляних та галькових – 0,1...0,2 [4]. Уон [5] на підставі польових вимірювань прийшов до висновку, що отримані значення альbedo зелених покрівель менші, завдяки меншому акумулювальному ефекту цих покрівель. Удень при сильному потоку сонячній радіації неозелений дах накопичує теплоту, яка потім вночі продовжує віддаватися до будівлі. Зелені дахи накопичують вдень значно менше теплоти, завдяки чому тепловий потік до будівлі вночі значно зменшується. Шляхом вимірювання температури повітря на різній висоті над рослинним шаром, автор прийшов до висновку, що після заходу сонця температура навколишнього повітря на зелених дахах продовжує знижуватися. Через зниження температури навколишнього середовища над зеленими дахами можна знизити міський ефект теплового острова. Дослідження в Канаді (Оттава) також продемонстрували зниження температури на зеленому даху. При температурі навколишнього середовища 35 °С, температура неозеленого даху досягла 70 °С, а на зеленій покрівлі температура залишалася рівною 25 °С [6,7]. Міський тепловий острів – це перегрів міських та приміських районів порівняно з сільською місцевістю. Це відбувається з причин зменшення площі зелених насаджень, збільшення кількості будівель та жорстких штучних поверхонь.

Другий напрям досліджень заснований на розробці моделей. Теплопровідність зеленої покрівлі залежить від складових шарів і товщини мембран конструкції покрівлі [8]. Тому теплова інерція може бути різною. Наприклад, Сантомоуріс [9] досліджував потенціал економії енергії зеленої покрівлі в дитячому садку в Греції. Він створив теплову модель з використанням програми теплового моделювання TRNSYS. Кожен набір експериментальних даних порівнювався з результатами моделі. Отримано коефіцієнт кореляції 0,92 для всього набору даних. Вчений дійшов висновку, що будівля із зеленою покрівлею має більш комфортні внутрішні температурні умови порівняно з неозеленою. Однак, ми вважаємо, що в проведених дослідженнях мало уваги приділяється термічним властивостям покрівельних матеріалів. В Афінах Нячхоу і співавтори [10] визначили, як зелена покрівля може економити енергію в будівлях з різним термічним опором існуючої теплоізоляції. У літній триденний період вони провели експеримент для трьох будівель з однаковою теплоізоляцією. При цьому тільки одна з них мала зелену покрівлю. Автори дійшли висновку, що внутрішня температура перевищила 30 °С в будівлях без зеленої покрівлі протягом 68 % періоду, а з зеленою покрівлею – тільки за 15 % періоду. При тепловому моделюванні в TRNSYS встановлено, що найбільше заощадження енергії на зелених покрівлях припадає на зимовий період, а не на літнє охолодження, як думали раніше, вважаючи, що зелена покрівля розглядається як техніка пасивного охолодження.

Уон і колеги [11] провели дослідження на покрівлях з недостатньою теплоізоляцією в Сингапурі. Для реєстрації температури на різній глибині з різним асортиментом рослин вони використовували програму моделювання DOE-2 для порівняння ефектів теплоізоляції різних видів рослин. Встановлено, що коефіцієнт теплопередачі у неізольованого газону становить 0,51 Вт / (м²·К). Покриття газону зменшувало річне споживання енергії тільки на 0,6 %. У відкритій неізольованій покрівлі з дерном річне заощадження енергії становило 10,5 %. Отже, річна економія енергії зеленим покриттям більша на покрівлях з недостатньою теплоізоляцією. Все це відбувається через зменшення охолодження, а не нагрівання.

Дані висновки підтверджуються дослідженнями Еморфопоуло і Аравантіноса [12]. Вони використовували стаціонарну математичну модель для розрахунку прогнозованої температури нижніх шарів відкритої та зеленої покрівлі з ізоляцією і без. Це дало поверхневу температуру ззовні і всередині конструкції покрівлі. Було виявлено, що відсутність теплоізоляційного шару розширює розбіжність між літньою та зимовою

температурою внутрішньої поверхні, але на зеленій покрівлі ця різниця менша ніж на відкритій. Для зеленої покрівлі з теплоізоляцією і коефіцієнтом теплопередачі $0,4 \text{ Вт} / (\text{м}^2 \cdot \text{К})$ різниця температури між покрівельними шарами не перевищує $2,5 \text{ }^\circ\text{C}$, навіть коли зовнішня температура коливається від мінус 10 до плюс $40 \text{ }^\circ\text{C}$. Учені дійшли висновку, що хоча зелена покрівля може поліпшити тепловий захист будівлі, вона не може замінити шар теплоізоляції. Це важливий момент, який не можна ігнорувати.

Канадські вчені Стевен Петч та Моніка Кун [13] відмічають широкий спектр соціальних, економічних та екологічних переваг від зелених покрівель як на державному, так і на приватному рівнях. Автори відмічають економічну вигоду завдяки енергоефективності зелених покрівель. У теплий період року завдяки евапотранспірації зелені рослини охолоджують покрівлю, а взимку, навпаки, зелена покрівля – додатковий утеплювач, завдяки якому теплота залишається в будівлі. Таким чином, це дозволяє економити кошти на систему кондиціонування повітря та опалення. Тип будівлі є ключовим фактором при визначенні загальної економії витрат. Наприклад, в одно- або двоповерховому комплексах, де зелена покрівля огинає більшу частину будівлі, отримана економія енергії 25 %. Встановлено [14,15], що при зовнішній температурі мінус $20 \text{ }^\circ\text{C}$ температура не знижується нижче $0 \text{ }^\circ\text{C}$ під рослинним шаром завтовшки 200 мм, навіть коли фітоценотичне середовище та ґрунт замерзають. Залежно від кліматичної зони реалізація зеленого даху також може дозволити знизити вимоги до традиційної теплоізоляції. IRC і Canadaresearch працюють над розробкою моделі, яка буде більш точно прогнозувати підвищення енергоефективності різних систем зеленого даху на різних типах будівель.

Алькозар і Басс [16] використовували термічне моделювання (пакет ESP-г: Environmental Systems Performance-research) для моделі багатоповерхового житлового будинку в Мадриді (Іспанія). ESP-г використовує підхід кінцевих елементів до моделювання теплоти, руху повітря, вологи і витрати електроенергії. Теплові характеристики порівнювалися для будівель без зеленої покрівлі, з зеленою покрівлею і з водоутримувальною зеленою покрівлею. На цій висотній будівлі покрівля займає 16 % від загальної площі будівлі. Коефіцієнт теплопередачі був зменшений з $0,59$ до $0,42 \text{ Вт} / (\text{м}^2 \cdot \text{К})$ для зеленої покрівлі і до $0,38 \text{ Вт} / (\text{м}^2 \cdot \text{К})$ для зеленої водоутримувальної покрівлі. Зелена покрівля забезпечувала щорічну економію енергії 1 %: 6 % при охолодженні і 0,5% при нагріванні. Відзначено, що найбільше заощадження енергії спостерігалось в приміщеннях, розташованих безпосередньо під зеленою покрівлею. Цей ефект залишався значущим на три поверхи вниз. Результати зазначених досліджень підтверджують наші дані, отримані в ході експерименту на фізичній моделі з зеленим газоном в аеродинамічній трубі. Отже, на основі цих даних можна внести коригування в проектування зелених покрівель. По-перше, найбільший ефект кондиціонування повітря спостерігається в зонах росту газону. Тому житлові приміщення краще розташовувати безпосередньо під ділянками газону. По-друге, для ефекту кондиціонування повітря при проектуванні зелених покрівель краще не робити технічний поверх.

Таким чином, аналіз літературних джерел свідчить про великий інтерес до моделювання теплофізичних процесів у зелених конструкціях. При цьому багато питань, як наприклад, вивчення охолоджувального ефекту, є дискусійними і вимагають доопрацювання.

Література

1. Castleton H.F. Green roofs; building energy savings and the potential for retrofit / H.F.Castleton, V. Stovin, S.B.M. Beck, J.B. Davison // Energy and Buildings. – 42, 2010. – P. 1582-1591.
2. FiBRE—Findings in Built and Rural Environments, Can Greenery Make Commercial Buildings More Green? Cambridge University, 2007.

3. Gaffin, Energy balance modelling applied to a comparison of white and green roof cooling efficiency, in: Greening Rooftops for Sustainable Communities, Washington, DC, 2005.
4. Washington State University, Energy Efficiency Factsheet - Reflective Roof Coatings, 1993.
5. Wong N.H. et al. Investigation of thermal benefits of rooftop garden in the tropical environment // Building and Environment. - 38 (2) (2003) 261–270.
6. Bass, B. and B. Baskaran. 2003. Evaluating Rooftop and Vertical Gardens as an Adaptation Strategy for Urban Areas. Institute for Research and Construction, Ottawa, Canada: National Research Council.
7. Liu K. and B. Baskaran. 2003. Thermal Performance of Green Roofs Through Field Evaluation. In Proc. Greening Rooftops for Sustainable Communities: Chicago 2003.
8. K. Lui, J. Minor, Performance evaluation of an extensive green roof, in: Greening Rooftops for Sustainable Communities, Washington, DC, 2005.
9. M. Santamouris, et al., Investigating and analysing the energy and environmental performance of an experimental green roof system installed in a nursery school building in Athens, Greece, Energy 32 (2007) 1781–1788.
10. A. Niachou, et al., Analysis of the green roof thermal properties and investigation of its energy performance, Energy and Buildings 33 (7) (2001) 719–729.
11. N.H. Wong, et al., The effects of rooftop garden on energy consumption of a commercial building in Singapore, Energy and Buildings 35 (4) (2003) 353–364.
12. E. Eumorfopoulou, D. Aravantinos, The contribution of a planted roof to the thermal protection of buildings in Greece, Energy and Buildings 27 (1) (1998) 29–36.
13. Peck S. Design guidelines for green roofs / S. Peck, M.Kuhn//Ontario Association of Architects. – Canada. – 22 p.
14. Bass, B., Kuhn, M., Peck S., "Greenbacks from Green Roofs: Forging a New Industry in Canada" (GBGR), CMHC. 1998. - p. 24.
15. Miller C. Vegetative Roof Covers: A New Method for Controlling Urban Runoff in Urbanized Areas. - Villanova University, October 1998.
16. S. Alcazar, B. Bass, Energy performance of green roofs in a multi storey residential building in Madrid, in: Greening Rooftops for Sustainable Communities, Washington, DC, 2005.

Ткаченко Тетяна Миколаївна – к.б.н., доц. кафедри охорони праці і навколишнього середовища, Київський національний університет будівництва і архітектури, Київ, e-mail: tkachenkoknuba@gmail.com

Мілейковський Віктор Олександрович – к.т.н., доц. кафедри теплогазопостачання і вентиляції, Київський національний університет будівництва і архітектури, Київ, e-mail: v_mil@ukr.net

Tkachenko Tetyana O., Ph. D (Biology), Associate Prof., Department of labour protection and environment control, Kyiv National University of Construction and Architecture, Kyiv, e-mail: tkachenkoknuba@gmail.com

Mileikovskiy Viktor O., Ph. D (Eng.), Associate Prof., Department of Heat and Gas Supply and Ventilation, Kyiv National University of Construction and Architecture, Kyiv, e-mail: v_mil@ukr.net