

В. О. Плоский*, Т. М.Ткаченко**, В. О. Мілейковський***, В. Г. Дзюбенко**

Київський національний університет будівництва і архітектури,
кафедра архітектурних конструкцій,

**кафедра охорони праці і навколишнього середовища,

***кафедра теплогазопостачання і вентиляції

МОДЕЛЮВАННЯ ТЕРМІЧНОГО ОПОРУ ТРАВ'ЯНОГО ШАРУ ЗЕЛЕНОЇ ПОКРІВЛІ

© Плоский В. О., Ткаченко Т. М., Мілейковський В. О., Дзюбенко В. Г., 2016

Сьогодні енергоефективності покрівлі досягають не лише застосуванням будівельних і оздоблювальних матеріалів, але і за допомогою озеленення. Основними проблемами сучасних урбоценозів є брак зелених зон і неможливість їх створення через ущільнення забудови; сильне зменшення біорізноманіття аж до повної втрати окремих видів рослин і тварин, що веде до екологічного дисбалансу. Виходом із ситуації є застосування альтернативних форм озеленення, які не потребують значного простору, але при цьому виконують необхідні санітарно-гігієнічні та еколого-біологічні функції. Одним з таких видів є дахове озеленення. У більшості досліджень енергоефективності зелених покрівель розглядають лише їхні будівельні складові. Однак, якщо провідні фірми-проектувальники зелених покрівель (наприклад, ZinCo) досліджують теплоізоляційні властивості огорожувальних конструкцій зелених покрівель, то дослідження переважно мають комерційний характер, спрямований на рекламу і збільшення попиту на послуги і матеріали конкретної фірми і виробника. Метою роботи є вивчення теплопередачі рослинного шару зеленої покрівлі без урахування випаровування. Встановлено, що при відстані між травинками 3 мм коефіцієнт теплопередавання становить 0,53–0,54 Вт/(м²·К) при відстані 6 мм – 0,4 Вт/(м²·К) – 0,26 Вт/(м²·К). Його можна знайти теоретично, якщо враховувати лише теплопровідність трави і знехтувати теплопередаванням через повітря між травинками. Це свідчить про несуттєвий вплив конвекції між травинками.

Ключові слова: зелений дах, травинка, теплопередавання, конвективний обмін

Today the energy efficiency of roofs is achieved not only by the use of building materials, but also by planting. The main problems of modern urbocenoses is the lack of green areas and the inability to create them because of consolidation of area; strong decrease of biodiversity until the complete loss of certain plants and animal species, leading to ecological imbalances. The solution of this problem is to use alternative forms of landscaping that do not require large amounts of space, but at the same time fulfill the necessary sanitary and ecological and biological functions. One of the methods is the roof planting. Most of the researches of green roofs energy efficiency consider only their building components. However, if the leading manufacturers of green roofs (eg, ZinCo) conducting research insulating properties of green roofs protective structures, they usually are commercial in nature, focused on advertising and increasing demand for services and materials of specific company and producer. The aim is to study heat properties of green roof excluding evaporation. Found that when the distance between the blades 3 mm the heat transfer coefficient is 0.53 - 0.54 W/(m²·K), at a distance of 6 mm – 0.4 W/(m²·K) is 0.26 W/(m²·K). It can be found theoretically, considering only the thermal conductivity of grass and neglect heat transfer through the air among the grass-blades. This indicates that there is immaterial impact of convection among the grass-blades.

Key words: green roof, grass-blades, heat transfer, convective exchange.

Постановка проблеми. Інтерес до альтернативних джерел енергії та енергоефективних технологій виник в Європі та Америці у 70-ті роки, коли країни-експортери нафти ввели ембарго на

її постачання. З того часу енергоефективні технології розвиваються й удосконалюються. Одним з перспективних напрямків енергоефективності є дахове озеленення. Енергоефективні технології в будівництві мають комплексний характер і передбачають утеплення стін, енергоефективну покрівлю, фарби, склопакети, енергоощадні системи обігріву та охолодження приміщень [1].

Сьогодні енергоефективності покрівлі досягають не лише із застосуванням будівельних і оздоблювальних матеріалів, але і за допомогою озеленення. Основними проблемами сучасних урбоценозів є брак зелених зон і неможливість їх створення через ущільнення забудови; сильне зменшення біорізноманіття аж до повної втрати окремих видів рослин і тварин, що веде до екологічного дисбалансу. Виходом із ситуації є застосування альтернативних форм озеленення, які не потребують значного простору, але при цьому виконують необхідні санітарно-гігієнічні та еколого-біологічні функції. Такими видами озеленення є: дахове, вертикальне, мобільне, екопарковки, зелені схили.

Аналіз досліджень проблеми. Перші спогади про зелені дахи з'явилися понад 1000 років тому в Скандинавії та Ісландії. Саме ці країни вважають батьківщиною екотехнологій. У давнину там були поширені житла із засипаними землею дахами. На них виростала трава, яка слугувала додатковою ізоляцією і давала змогу зберігати тепло. У південних країнах Європи, навпаки, - озеленення дахів використовувалися для захисту від сонця. Особливо придатна була ця технологія для складів і сховищ сільськогосподарської продукції, винних льохів. Подібні будівлі будували зокрема у сільській місцевості Австрії ще в кінці XIX – початку XX століття. Відомо, що римляни використовували для розміщення рослин та квіткових горщиків тераси. Пізніше ті, хто жив у вікторіанську епоху, влаштовували на дахах оранжереї. Найбільш відомий історичний приклад садів на даху – Вісячі сади Вавилону. Знамениті “Сади Семіраміди”, які вважали сьомим чудом світу. Побудовані близько 600 р. до н. е., вони були “зеленими” покрівлями вавилонських палаців. У Європі відомі з давніх давен сади на дахах протягом середніх століть були забуті. Друге народження ця незвичайна покрівля отримали у XIX ст., коли на всесвітній виставці в Парижі німецький архітектор Карл Рабітц здивував публіку, представивши будинок із зеленими насадженнями замість традиційної покрівлі. З того часу в архітектурі з'явилися поняття “живий дах”, “експлуатована покрівля” – галявини або навіть сади для відпочинку просто на даху будівлі. Карл Рабітц сформулював ідею озеленення дахів як найважливішого засобу покращення міського середовища. Він спорудив на даху свого будинку справжній сад, в якому росли дерева і кущі. З того часу покрівельне озеленення вже давно успішно використовують у Європі, Канаді, США, Китаї. У Європі та Америці озелененню покрівель приділяють величезного значення, вважаючи цей напрям найактуальнішим. У Німеччині на 12 % дахів – сади. У цій країні одна з обов'язкових умов при проектуванні нових будівель – озеленення покрівлі. У швейцарських містах до 25 % плоских дахів займають газони. У Японії діє припис розбивати сади на всіх плоских дахах, площа яких перевищує 100 м². Перейнявши ідеєю комплексного озеленення дахів, які могли б зберігати енергію, австралійські архітектори створили проект серії будинків з озеленими терасованими покрівлями. Такі будинки здатні регулювати тепловіддачу: взимку – підігрівати, а влітку – не допускати перегріву. Тільки в Нью-Йорку налічується понад 8000 зелених покрівель. А влада Чикаго виділяє фінансову допомогу тим, хто розмістить у себе на даху газон або розіб'є невеликий сквер.

Озеленення дахів вважають пріоритетним через низку екологічних та економічних переваг.

Екологічні переваги:

1. Зменшення кількості стічних вод (зелені покрівлі залежно від типу затримують від 50 % до 90 % вологи від опадів);
2. Поліпшення мікроклімату приміщень (ефект кондиціонування);
3. Очищення повітря, поглинання пилу і шкідливих речовин, виділення фітонцидів;
4. Звукоізоляція (завдяки рослинному покриттю зелених покрівель рівень шуму зменшується на 8 дБ);
5. Збереження флори і фауни (є альтернативою природних ландшафтів для життя комах, птахів та інших мешканців антропогенних зон);

б. Використання перероблених матеріалів (для виробництва дренажної системи широко застосовуються отримані шляхом утилізації відходів гума, поліетилен і пінополістирол).

Економічні переваги:

1. Скорочення витрат на реконструкцію покрівель (рослинний шар ефективно захищає покрівлю від ультрафіолетових променів, граду і перепаду температур, озеленення покрівлі значно збільшує термін служби покрівельної гідроізоляції (до 40 років));

2. Збільшення теплоізоляції (озеленення покрівлі покращує її теплозахисні властивості, що дозволяє власникові такої покрівлі скоротити витрати енергії на обігрівання та охолодження приміщення; завдяки випаровуванню вологи знижується температура – ефект випарного охолодження в теплий період року);

3. Ефект вологозатримання (дозволяє скоротити кошти, які витрачаються на зливе водовідведення);

4. Перспективи використання вільного простору (нові можливості використання поверхні покрівлі від галявини і саду до кафе, ігрових та спортивних майданчиків, що компенсує ділянки землі, зайняті під забудову) [2, 3].

Є два види зелених дахів: інтенсивні, які займають 5 % світового ринку, і екстенсивні – відповідно, 95 % світового ринку.

До інтенсивних відносять дахи з активною вегетацією рослин, кущів, дерев. При виборі асортименту деревних і чагарникових рослин для інтенсивного стаціонарного дахового озеленення слід керуватися їх морозостійкістю, особливістю розвитку кореневої системи дерев і чагарників (не повинна бути яскраво виражена стрижнева коренева система, як наприклад, у груші, дуба), жаростійкістю (здатність протистояти посухи або швидко відновлювати декоративність після в'янення при спекотній погоді), вітростійкістю (дерева і чагарники повинні володіти якрністю, для протистояння вітровим навантаженням), стійкістю крони до формувального обрізання. В системах для інтенсивного використання асортимент рослин різноманітніший – це декоративноквітучі багаторічники, злаки і пряні трави, чагарники і дерева заввишки не більше 10 м. На таких дахах також можливі майданчики для відпочинку людей або виїзду автомобілів. Висота вегетаційного покриву в цьому випадку досягає 300–1000 мм, маса – 500 кг / м². Вони потребують постійного догляду й додаткового поливу. Облаштування таких зелених дахів призводить до додаткових навантажень на конструкцію будівлі, що необхідно враховувати на початкових етапах будівництва або реконструкції будівлі.

Екстенсивні зелені дахи – дахи з малою вегетацією таких рослин, як трава, мох, квіти. Екстенсивні варіанти передбачають посадку тільки низькорослих і ґрунтопокривних багаторічних рослин з компактною і поверхневою кореневою системою, стійких до посухи, вітру і сонячного випромінювання. Таким видам зазвичай буває достатньо дощової вологи, тому додатковий полив не потрібен. Ці варіанти застосовують на покрівлях з кутом нахилу до 45°, округлених, на дахах-терасах. Асортимент рослин, як правило, складають невибагливі види: очитки, ломикамені, молодило, манжетки, гвоздики, газонні трави та ін. Рослини висаджують у спеціально підготовлений субстрат. Їхній вегетаційний покрив має товщину 60–100 мм і масу до 100 кг / м². Доступ людей на такий дах не обов'язковий. Ходити можна тільки по спеціальних проходах-доріжках. Особливого догляду таке озеленення не вимагає. Рослини використовують ґрунтопокривні, причому ті, які добре витримують різницю температури та нестачу вологи, не потребують додаткового догляду і не вимагають додаткового поливу. Таке озеленення можливе на дахах з невеликим ухилом.

Підвищення теплозахисту та додатковий ефект випарного охолодження зумовлюють енергоефективність зелених покрівель. Аналіз літературних джерел з цієї проблеми показав, що численні дослідження в цій галузі сходяться в одному: зелений дах допомагає ефективно згладжувати стрибки температури [4]. Найбільшого теплозахисту досягають влітку завдяки охолодженню верхніх поверхів будівлі. Професор Гернот Мінке вважає, що озеленення покрівель порівняно зі звичайним покрівельним покриттям має численні переваги [5]. Наприклад, температура покрівельної конструкції під системою зеленого даху при температурі навколишнього

середовища 30 °С становила 17,5 °С. При цьому товщина субстрату була лише 160 мм. У січні при мінус 14 °С температура під рослинним шаром становила 0 °С [6]. На цьому ефекті оснований теплозахист озимих культур, нор тварин тощо, що використовувалося у природі задовго до появи людини. Крім того, додаткову енергоефективність дає комбінування технологій зеленої покрівлі та сонячної енергосистеми. Температура модулів на зелених покрівлях завдяки вологості, яку виділяють рослини, знижується до плюс 27 °С, завдяки чому геліосистеми не перегріваються. Для порівняння: на бітумних покрівлях температура модулів зростає до плюс 40 °С [7].

Ефективність застосування й експлуатаційні характеристики зелених покрівель залежать від технологій виготовлення їхніх компонентів. Серед провідних компаній з виробництва матеріалів для зелених покрівель є: Bauder GmbH & Co, ZinCo, Hydrotech, Euroroof, Техноніколь. Більшість досліджень енергоефективності зелених покрівель розглядає лише їхні будівельні складові. Однак, якщо провідні фірми-проектувальники зелених покрівель (наприклад, ZinCo) проводять дослідження теплоізоляційних властивостей огорожувальних конструкцій зелених покрівель, то вони, як правило, мають комерційний характер, спрямовані на рекламу і збільшення попиту на послуги і матеріали конкретної фірми і виробника. При розрахунку теплозахисних властивостей зелених покрівель відомі лише коефіцієнти теплопровідності матеріалів конструкцій [8]. Немає достатньо обґрунтованих даних для визначення теплозахисних властивостей рослинного шару зеленої покрівлі.

Мета роботи: вивчення теплопередачі рослинного шару зеленої покрівлі без урахування випаровування.

Виклад основного матеріалу. Досліджено масив травинок (рис. 1, 2) заввишки 50 мм (оптимальна висота покосу газону), завтовшки 0,2 мм окремої травинки, відстань між осями травинок 8 мм, відстань між травинками 3 мм. У зв'язку з тим, що рослинний організм на 80 % складається з води, показники теплопровідності, теплоємності та густини травинки прийнято за довідковими даними для води [9]. Задано такі значення температури в моделі: навколишнього повітря – плюс 30 °С або 303,15 К; поверхні під рослинним матеріалом – плюс 20 °С або 293,15 К. Отже, перепад температури становить 10 К.

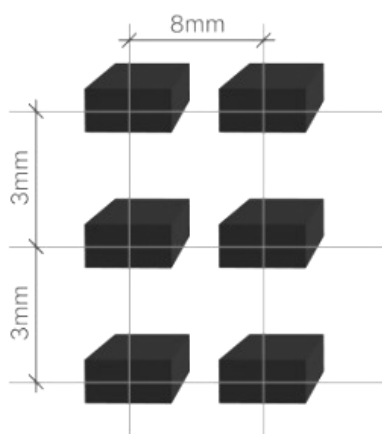


Рис. 1. Схема розташування комірки

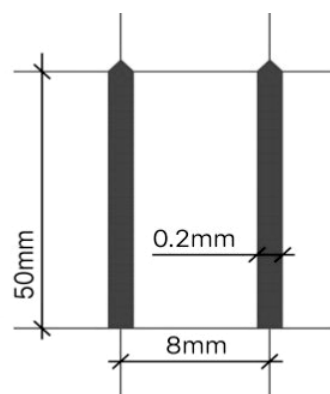


Рис. 2. Вигляд окремої травинки

Для моделювання конвективного теплообміну між травинками використовували рівняння нерозривності, Нав'є–Стокса з урахуванням ламінарного режиму руху та рівняння енергії відповідно [10].

$$\frac{1}{\rho} \cdot \frac{D_p}{dt} + \frac{dw_x}{dx} + \frac{dw_y}{dy} + \frac{dw_z}{dz} = 0; \quad (1)$$

$$\frac{\partial p}{\partial \tau} + \frac{\partial T}{\partial x} \cdot w_x + \frac{\partial T}{\partial y} \cdot w_y + \frac{\partial T}{\partial z} \cdot w_z = a \cdot \nabla^2 T \quad (2)$$

$$\frac{Dw}{d\tau} = g \cdot \beta \cdot (T - T_p) - \frac{1}{\rho} \cdot \nabla \rho + \nu \cdot \nabla^2 w, \quad (3)$$

де W_x ; W_y ; W_z ; – проєкції швидкості відповідно на вісь x , y , z ; ρ – густина, $кг/м^3$;
 $\frac{1}{\rho} \cdot \frac{D\rho}{d\tau} + \frac{dw_x}{dx} + \frac{dw_y}{dy} + \frac{dw_z}{dz}$ – субстанційна похідна густини; p – тиск, τ – час, T – температура;
 w – швидкість, $\nabla^2 = \nabla \cdot \nabla = \frac{\partial}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial y} + \frac{\partial}{\partial z}$ – оператор Лапласа; $(T - T_p)$ – різниця температури між поточною точкою та навколишнім середовищем; τ – час; ν – прискорення вільного падіння;
 ∇ – оператор Гамільтона або градієнт; β – температурний коефіцієнт об'ємного розширення;
 ν – коефіцієнт кінематичної в'язкості.

У результаті проведених розрахунків встановлено, що коефіцієнт теплопередачі трави становить $0,53 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$. Коефіцієнт теплопровідності повітря на порядок менший за коефіцієнт теплопровідності травинки. Тому в першому наближенні коефіцієнт теплопередачі трави можливо оцінити шляхом нехтування теплопровідністю повітря, а саме:

$$k = \frac{\lambda_{\text{ТРАВИНКИ}}}{\delta_{\text{ТРАВИНКИ}}} \cdot \frac{A_{\text{ТРАВИНКИ}}}{A_{\text{КОМІРКИ}}}, \quad (4)$$

де $\lambda_{\text{ТРАВИНКИ}}$ – коефіцієнт теплопровідності травинки при середній температурі 25° ($\lambda_{\text{ТРАВИНКИ}} = \lambda_{\text{ВОДИ}} = 0,6 \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2 \cdot \text{К}}$); $\delta_{\text{ТРАВИНКИ}}$ – середня висота травинки, $A_{\text{ТРАВИНКИ}}$ – площа перерізу травинки, $A_{\text{КОМІРКИ}}$ – площа комірки, яка є періодом структури трав'яного покрову

$$A_{\text{ТРАВИНКИ}} = 0,2 \cdot 5 = 1 \text{ мм}^2$$

$$A_{\text{КОМІРКИ}} = 3 \cdot 8 = 24 \text{ мм}^2$$

Тоді, за формулою (4)

$$k = \frac{0,6}{0,046} \cdot \frac{1}{24} = 0,54 \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2 \cdot \text{К}}$$

Відхилення становить :

$$\frac{0,54 - 0,53}{0,53} \cdot 100\% = 1,89\%$$

Тобто в межах теоретичних та експериментальних даних.

Нами було зроблено спробу збільшити відстань між травинками в горизонтальних рядах (відстань між травинками становить 6 мм). У результаті моделювання коефіцієнт теплопередачі становить $0,4 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$.

Виконуємо наближені розрахунки для цього випадку.

Площа комірки

$$A_{\text{КОМІРКИ}} = 6 \cdot 8 = 48 \text{ мм}^2$$

Тоді за формулою (4) :

$$k = \frac{0,6}{0,046} \cdot \frac{1}{48} = 0,26 \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2 \cdot \text{К}}$$

Відхилення становить :

$$\frac{0,4 - 0,26}{0,4} \cdot 100\% = 35\%$$

Отже, із збільшенням відстанням до 6 мм відсутня можливість нехтувати тепломасообмінними процесами у повітрі між травинками, вплив яких на теплообмін перевищує 30% .

Перспектива подальших досліджень. Надалі необхідно провести серію числових експериментів, варіюючи відстань між травинками і висотою травинок для отримання розрахункових

залежностей без урахування випаровування та впливу вітру. Після цього планується виконання фізичних експериментів для отримання рівнянь теплопередачі в умовах штилю та за різної швидкості вітру. Фізичні експерименти планується провести з використанням аеродинамічної труби, яку встановлено в лабораторії вентиляції на кафедрі теплогазопостачання і вентиляції. Аеродинамічна труба створює швидкість потоку повітря до 22 м/с, що відповідає вітровому режиму більшої частини території України. Такі експерименти будуть найбільш наближені до реальних умов і дозволять врахувати ефект випарного охолодження з урахуванням усіх фізіологічних процесів у живому організмі рослин.

Проведені дослідження дозволяють виробити практичні рекомендації щодо висадки ґрунтопокривних рослин на інтенсивних і екстенсивних покривлях. Для зменшення впливу конвективного теплообміну відстань між рослинами має бути до 6–10 мм.

Висновки. Встановлено, що коефіцієнт теплопередачі для масиву травинки заввишки 50 мм, завтовшки 0,2 мм окремої травинки, відстані між травинками 3 мм; навколишнього повітря – плюс 30 °С або 303,15 К; поверхні під рослинним матеріалом – плюс 20 °С або 293,15 К при моделюванні становить 0,53 Вт/(м²•К). Його можна визначити теоретично (становить 0,54 Вт/(м²•К), якщо враховувати лише теплопровідність трави і знехтувати теплопередачу через повітря між травинками. Це свідчить про несуттєвий вплив конвективного теплообміну між травинками. При відстані 6 мм коефіцієнт стає меншим (при моделюванні 0,4 Вт/(м²•К), при розрахунках -0,26 Вт/(м²•К), але при цьому неможливо знехтувати коефіцієнтом теплопередачі, відхилення становить понад 30 %.

1. Карп И. Н. Энергосбережение в Украине: проблемы и пути решения // Энерготехнологии и ресурсосбережение. – 2004. – № 4. – С. 3–13. 2. Люсев В. К. Пособие по озеленению и благоустройству эксплуатируемых крыш жилых и общественных зданий, подземных и полуподземных гаражей, объектов гражданской обороны и других сооружений. – М.: Стройиздат, 2008. – 110 с. 3. Ткаченко Т. Н. Возможность создания энергоэффективных экологически чистых зеленых технологий в условиях Украины // Строительство, материаловедение, машиностроение: сб. научн. трудов. / “Приднепр. гос. академия стр-ва и архитектуры”. – Днепропетровск, 2015. – Вып. 81. – С. 256–260. 4. Green Roofs – Bringing Nature Back to Town. [Electronic resource] / Zugriff auf die Veröffentlichung: http://www.igra-world.com/green_roof_literature/index.php 5. 13 Fragen an Professor Gernot Minke // Dach+Grün. –2014. - № 3. – S. 6–10. 6. Dämmung durch Dachbegrünungen // Dach+Grün. –2014. – № 4. – S. 6–12. 7. Сонячна енергія та зелені покрівлі. Керівництво з планування. ТОВ “ЗінКО Україна. – 7 с. 8. ДБН В.2.6-31:2006 Державні будівельні норми України “Теплова ізоляція будівель”. 9. Внутренние санитарно-технические устройства. В 3 ч. ч.1. Отопление / В. Н. Богословский, Б. А. Крупное, А. Н. Сканава и др.; Под ред. И. Г. Староверова и Ю. И. Шиллера. – 4-е изд., перераб. и доп. – М.: Стройиздат, 1990.-344 с: ил. – (Справочник проектировщика). 10. Лабай В.Й. Тепломасообмін: підручник для ВНЗ. – Львів.: Тріада Плюс, 2004. – 260 с.