

УДК 536.2:620.9:502

Дослідження теплопередачі в енергоефективних зелених покрівлях

Т. М. Ткаченко¹, В. О. Мілейковський²

¹к.б.н., доц., докторант кафедри охорони праці і навколишнього середовища Київського національного університету будівництва і архітектури, м. Київ, Україна, tkachenkoknuba@gmail.com

²к.т.н., доц. кафедри теплогазопостачання і вентиляції Київського національного університету будівництва і архітектури, м. Київ, Україна, mileikovskiy@gmail.com

Анотація. Одним із актуальних напрямів зеленого будівництва є створення зелених покрівель. Вони мають ряд переваг, основними з яких є: зменшення навантаження на зливові міські стоки, економія питної води, додаткове утеплення, випарне охолодження за рахунок транспірації (випаровування вологи), звукоізоляція, пом'якшення ефекту «теплових островів», збереження флори і фауни. В Україні з причини енергетичної кризи особливо актуальним є вивчення теплопередачі в зеленій покрівлі. Вперше вивчено вплив швидкості вітру на теплові процеси рослинного шару зеленої покрівлі. Вперше проведено дослідження теплопередачі в рослинному шарі екстенсивної зеленої покрівлі при різній швидкості вітру в аеродинамічній трубі. Встановлено нерівномірний розподіл теплового потоку залежно від ряду випадкових факторів. «Охолоджувальний ефект» зеленої покрівлі посилюється при збільшенні швидкості вітру, оскільки інтенсифікується транспірація.

Ключові слова: енергоефективні зелені покрівлі, рослинний шар, тепловий потік, коефіцієнт теплопередачі, аеродинамічна труба.

Вступ. Сьогодні в усьому світі спостерігається зростання інтересу до зеленого будівництва. Це обумовлено, з одного боку, енергетичною кризою, а з іншого – екологічними й соціальними проблемами. Одним з актуальних напрямів зеленого будівництва є створення зелених покрівель. Останні мають ряд переваг, основними з яких є: зменшення навантаження на зливові міські стоки, економія питної води, додаткове утеплення, випарне охолодження за рахунок транспірації (випаровування вологи рослинами), звукоізоляція, пом'якшення ефекту «теплових островів», збереження флори й фауни.

Актуальність дослідження. В Україні у зв'язку з енергетичною кризою особливо цікавим і актуальним є вивчення теплопередачі в зеленій покрівлі. Існують численні зарубіжні дослідження з даного питання. Деякі з них засновані на створенні фізичних моделей. Однак в зарубіжних дослідженнях існує неясність в методологічному підході. Тому актуальними є дослідження теплопередачі окремо в живому рослинному шарі зеленої покрівлі.

Останні дослідження та публікації. Ефективне охолодження зелених покрівель відображено в публікаціях С. Гаффіна [1], Н. Вонга [2], К. Луї та Дж. Мінора [3]. Останні автори проводили дослідження озелених і звичайних покрівель в Торонто. Датчики теплового потоку розміщувалися нижче зеленої

покрівельної мембрани. Встановлено, що коефіцієнт теплопередачі крізь зелену покрівлю менше на 70-90 % у теплий період року (період охолодження), а втрати теплоти в холодний період року (опалювальний сезон) скоротилися на 10-30 %. Грецькі вчені [4] також вивчали теплообмін на зелених покрівлях за допомогою термопар. Встановлено, що зелена покрівля не тільки покращує ізоляційні властивості будівлі, скорочуючи річне споживання енергії, а й стабілізує температуру внутрішнього повітря протягом року. Виходячи зі сказаного, вважалося, що зелені покрівлі більш ефективні для пасивного охолодження в теплий період (в період охолодження), а не як ізолятор в холодний (опалювальний сезон). Однак економія теплоти в холодний період також була досліджена групою грецьких вчених [5], які створили теплову модель, використовуючи програму моделювання TRNSYS. Порівнюючи будівлі із зеленою покрівлею з будівлями зі звичайною, був зроблений висновок, що навантаження на охолодження будівлі зменшується від 6 до 49 %. Інша група грецьких дослідників у 2001 році прийшла до аналогічного висновку. У Сінгапурі Н. Вонгом та ін. [6] була створена теплова модель зелених покрівель з різними рослинами в програмі моделювання DOE-2 для порівняння ізоляційних ефектів різних видів рослин. Встановлено, що найбільш ефективним виявився дерен. При цьому на покрівлях з гарною ізоляцією річне споживання було значно вище (10,5 %), ніж на зелених покрівлях без ізоляції (тільки на 0,6 %). С. Алказар і Б. Бесс [7] прийшли до висновку, що сонячне випромінювання, транспірація й фізіологічні процеси рослин впливають на продуктивність покрівлі більше, ніж збільшення опору теплопередачі.

Цікаві і суперечливі дослідження отримані при вивченні товщини й вологості ґрунту зеленої покрівлі. К. Луї і Дж. Мінор [3] виміряли різницю теплопередачі зеленої покрівлі з товщиною ґрунту 100 мм і 75 мм. Учені прийшли до висновку, що більш низький коефіцієнт теплопередачі у покрівель з товщиною ґрунту 100 мм. Е. Дель Барріо [8] у своїх дослідженнях зазначив, що вологий ґрунт кращий ізолятор порівняно з сухим. Такому висновку суперечать дослідження Р. Лаззаріна та ін. [9], які вважають, що повітря – кращий ізолятор, ніж вода, а отже, більш вологий ґрунт є поганим ізолятором порівняно з сухим.

Ч. Фен та ін. [10] використовували математичну модель зеленої покрівлі для типового літа в Китаї. Вчені вважають, що в усіх існуючих теплових моделях зелених покрівель не враховується випарне охолодження та ефект від фотосинтезу. При цьому стверджується, що 58 % теплоти від зеленої покрівлі втрачається при транспірації, 30,9 % – у результаті довгохвильового радіаційного обміну, і лише 1,2 % теплоти зберігається і передається до приміщення нижче. Модель показує, що 9,5 % теплоти видаляється чистим ефектом фотосинтезу. Заслужовують на увагу дослідження зелених покрівель для підвищення ефективності систем охолодження і вентиляції [11]. Кондиціонери охолоджують внутрішній простір, виділяючи теплоту назовні. Таким чином, цей процес підвищує температуру навколишнього середовища, а витрати на кондиціювання повітря в сусідніх приміщеннях залежать від температури припливного повітря.

Охолодження асиміляцією теплонадлишків вентиляційним повітрям без холодильної машини особливо ефективно у Великобританії, де температура навколишнього середовища нижча за 15 °С. Наприклад, зелена покрівля може

сприяти охолодженню приміщень в офісних будівлях у весняно-осінній період, коли температура зовнішнього повітря низька, а внутрішня – некомфортно висока через тепловіддачу від людей і обладнання.

Для визначення чисельної оцінки переваги зеленої покрівлі Міністерством енергетики США розробляється спеціальна програма моделювання. Модель враховує радіаційний теплообмін, конвективний теплообмін, теплопровідність, кількість і вологість ґрунту. Модель успішно затверджена у Флориді [12].

Проведений аналіз літератури показує наявність різних моделей зелених покрівель, що передбачають урахування різних параметрів. Однак, прямого врахування вітрового потоку (що має місце на зелених покрівлях, особливо багатоповерхових будівель), знайдено не було. В Україні відсутні дослідження та моделювання теплових процесів у зелених покрівлях. Тому нами вперше вивчено вплив швидкості вітру на теплопередачу рослинного шару.

Дослідження зазвичай проводяться на комплексі «ґрунт-трав'яний покрив» без поділу шарів. Однак, згідно з [13] приведений опір теплопередачі конструкції визначається як сума опору теплопередачі шарів. Такий підхід дозволяє визначити внесок кожного шару окремо в приведений опір теплопередачі конструкції.

Формулювання цілей статті. Метою дослідження є визначення коефіцієнта теплопередачі живого рослинного шару (трав'яний газон) при більш низькій температурі повітря, ніж температура ґрунту, а також оцінка охолоджувального ефекту трави від транспірації.

Основна частина. Спочатку перевірена значимість опору теплопередачі рослинного шару [14]. Чисельно змодельована рослинна поверхня зеленої покрівлі та встановлено, що коефіцієнт теплопередачі при відстані між травинками 3 мм становить 0,53 Вт/(м² К), а при 6 мм зменшується до 0,4 Вт/(м² К), оскільки зменшується кількість травинок, які є «містками холоду». Однак, у даних дослідженнях не було враховано ряд важливих факторів: вітер, транспірація тощо. Для виявлення «охолоджувального ефекту» трави, який виникає при транспірації, проведено натурні дослідження, в ході яких показано, що «охолоджувальний ефект» трави знаходиться в межах похибки термометра, тобто в даних дослідженнях не був виявлений. Слід зазначити, що найчастіше «охолоджувальний ефект» трави розуміється як різниця температури між темною поверхнею без рослин і поверхнею з травою. Найчастіше виміри робляться в сонячну погоду. Таке розуміння не обґрунтовано, тому що містить у собі значну кількість різних за природою фізичних факторів: поглинання й відбиття сонячної радіації, теплоаккумуляційний ефект, розсіювання конвективної теплоти, розсіювання радіаційної теплоти, а також часткове перетворення поглиненої сонячної енергії в енергію хімічних зв'язків (фотосинтез), а не в теплову, тощо. Якщо порівнювати траву з новою блискучою оцинкованою поверхнею, то невідомо, буде отримано «охолоджувальний ефект» або «нагрівальний ефект». Якщо порівняти траву з оцинкованою поверхнею, що зазнала впливу часу, то вийде більше поглинання світла поверхнею без рослин. Таким чином, у традиційному розумінні «охолоджувальний ефект» залежить не стільки від трав'яного покриву, скільки від типу поверхні покрівлі без озеленення. Тому пропонуємо конкретизувати термін «охолоджу-

вальний ефект» як зниження температури завдяки випарному охолодженню внаслідок транспірації.

Наступним етапом досліджень було експериментальне визначення коефіцієнта теплопередачі живого рослинного шару (у даній роботі трав'яний газон), а також оцінка охолоджувального ефекту цього шару від транспірації [15]. Моделювався осінньо-зимово-весняний період, коли температура зовнішнього повітря нижча температури в приміщенні.

Поверхня зеленої покрівлі є складною через трав'яний покрив, тому пряме вимірювання теплового потоку виконати важко. У даній роботі використовується непряме вимірювання шляхом вимірювання тепловіддачі нагрівача та температурного поля на двох поверхнях ґрунту.

Створена фізична модель трав'яного шару зеленої покрівлі (рис. 1-3). Корпус моделі 1 виготовлений з фанери завтовшки 10 мм. Довжина моделі – 720 мм, ширина – 580 мм, висота – 100 мм. Дно та стінки моделі теплоізовані пінопластом 2 завтовшки 50 мм. На поверхню теплоізоляційного шару 2 покладена нагрівальна плівка 3 «Heat Plus» (HP-APN-410-400).



Рис. 1. Фізична модель екстенсивного зеленої покрівлі (за незначної швидкості повітря)

Це захищена плівка третього покоління семишарової структури з поліефірним нетканим полотном, що збільшує міцність. Кінці мідних струмопровідних шин 4 по кутах плівки ретельно ізовані за допомогою бутилової стрічки «Heat Plus» (ширина смуг 350 мм). Поверх бутилової стрічки та вздовж ліній різки наклеєна ізоляційна стрічка «Heat Plus», щоб уникнути враження електричним струмом та витоків струму. Поверх плівки 3 рівномірно розміщені п'ятнадцять термісторів 5 типу 640-47K, що перетворюють на електричний опір температуру нижнього шару ґрунту газону 6, укладеного поверх нагрівальної плівки 3 і термісторів 5. Від кожного термістора виведені два ізовані проводи перерізом 0,08 мм² з роз'ємами для з'єднання з вимірювальним приладом 7 (мультиметром Актаком АВМ-4307). Додатковий термістор 8 з проводом є вільним з метою перетворення температури повітря та температури верхнього шару.

Місця припайки проводів та виводи кожного термістора 5 і 8 ретельно захищені, щоб уникнути похибки від витоків тестового струму через ґрунт 6.



Рис.2. Фізична модель екстенсивного зеленої покрівлі (аеродинамічна труба)

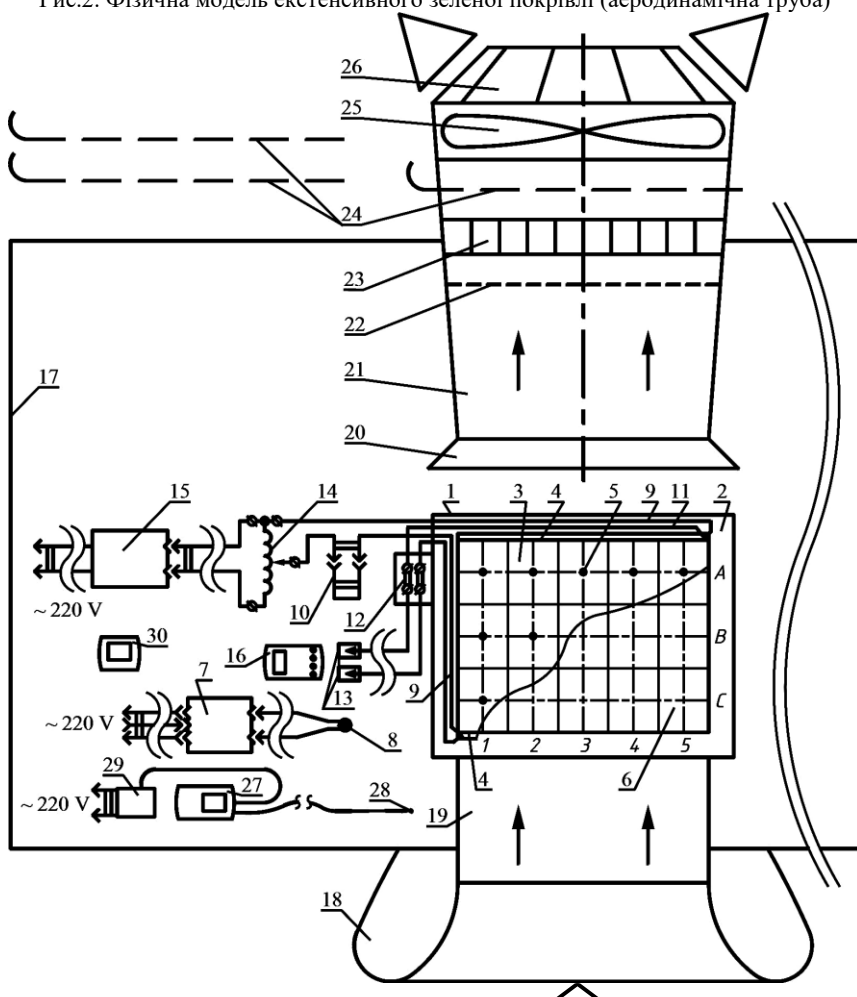


Рис.3. Схема моделі екстенсивної зеленої покрівлі

Вимірювання потужності нагрівальної плівки виконується шляхом вимірювання діючих (середньоквадратичних) напруги на нагрівачі і струму крізь нагрівач за чотирипровідною схемою. Силові дроти 9 перерізом 1 мм^2 припаяні до шин нагрівальної плівки 4 в протилежних кутках. Попутний рух струму забезпечує максимальну рівномірність розподілу струму плівкою. У розрив одного з силових проводів 9 приєднується або мультиметр 7 у режимі вимірювання струму, або короткозамкнена розетка 10. Від місць пайки до шин нагрівальної плівки 4 виведені два вимірювальних дроти 11 перетином $0,08 \text{ мм}^2$ (для мінімізації тепловтрат крізь них). Поза теплозахисної оболонки моделі до них за допомогою контактної колодки 12 приєднаний комплект вимірювальних щупів 13 високого класу захисту від дотику. Вони приєднуються до мультиметру 7 у режимі вимірювання напруги. Таким чином, падіння напруги в силових проводах 9 поза теплозахисної оболонки повністю вилучається з результатів вимірювань. Тепловіддача нагрівальної плівки 3 регулюється ЛАТРОм 14, який приєднаний до електричної мережі з використанням стабілізатора 15 напруги СН-315 «Україна-2» для уникнення похибки вимірювань через перепади напруги в мережі. Для контролю стабільності напруги до вимірювальних щупів 13 приєднаний мультиметр 16 типу DT9205A (результати вимірювання не використовуються в розрахунках) протягом усього часу проведення експерименту за винятком вимірювання напруги мультиметром 7. Модель може розміщуватися в закритому приміщенні для досліджень при відсутності руху повітря (рис. 1). Для випробувань при різній швидкості руху повітря модель встановлювалася в аеродинамічну трубу. У даній роботі застосована аеродинамічна труба відкритого типу – камера Ейфеля. На вході до герметичної камери 17 встановлений прямокутний колектор 18 з прямокутним стабілізаційним патрубком 19. Це дозволяє сформувати практично рівномірний потік повітря. Модель розміщується таким чином, щоб верхній рівень ґрунту 6 збігався з нижнім рівнем патрубка 19, для уникнення додаткових відривних течій. Витяжний агрегат складається з входного конфузора 20 (для зменшення впливу відривних течій) і дифузornoї частини 21, обладнаної за ходом повітря сіткою 22 для руйнування вихорів, спрямовальним апаратом 23 типу «хонейкомб» для переривання закрутки потоку, регулювальними змінними пластинами 24 з різною рівномірною перфорацією, осьовим високообертним вентилятором 25 і захисною сіткою 26.

Швидкість руху повітря визначається за допомогою термоелектроанемометра: обчислювач 27 – реєстратор даних Testo 445; датчик 28 – гаряча куля $\varnothing 3 \text{ мм}$ Testo 0635 1049; живлення реєстратора даних 27 від мережі 220 В за допомогою блока живлення 29. Контроль відносної вологості повітря здійснюється термогігрометром Testo 608 H1.

У першій серії досліджень середня висота трави становила 40,4 мм при середній товщині травинки 87 мкм (вимірювалася мікрометром ЛІЗ з ціною поділки 2 мкм).

Випробування проведені в практично нерухомому повітрі (відносна вологість повітря 45,1 %, температура повітря 14,5 °C); в аеродинамічній трубі при різній швидкості вітру: 6,02 м/с (відносна вологість повітря 44 %, температура

повітря 15,9...16 °C) і 9,76 м/с (відносна вологість повітря 43,4 %, температура повітря 14,9 °C).

Для визначення коефіцієнта теплопередачі трав'яного шару необхідно виміряти температуру над ґрунтом і під ґрунтом у різних точках та визначити тепловий потік. Процес теплопередачі складний через значну нерівномірність розподілу коефіцієнта тепловіддачі до повітря по поверхні. Рівномірний тепловий потік від нагрівальної плівки перерозподіляється в товщі ґрунту. Визначивши розподіл температури в нижньому (прилеглому до плівки) і верхньому шарах ґрунту, а також за відомим тепловим потоком від нагрівальної плівки, можливо визначити перерозподіл теплового потоку всередині ґрунту і розподіл теплового потоку від верхньої поверхні ґрунту до трав'яного шару. Для цього використовуємо рівняння Фур'є-Кірхгофа

$$(\partial\theta/\partial t) - a\nabla^2\theta = \Phi(r, t), \text{ К/с}, \quad (1)$$

де θ – температура, К; t – час, с; a – коефіцієнт температуропровідності, м²/с; ∇^2 – лапласіан; Φ – функція теплових джерел, К/с, r – вектор точки, м.

Для стаціонарного процесу, який досягається, якщо починати вимірювання тільки після стабілізації показань приладів, перший «нестационарний» член рівняння (1) дорівнює нулю. Оскільки внутрішні теплові джерела відсутні, права частина рівняння (1) теж дорівнює нулю. Тоді рівняння (1) набуває вигляду рівняння Лапласа:

$$\nabla^2\theta = 0. \quad (2)$$

За рівнянням (2) розраховується розподіл теплового потоку, що залишає ґрунт. Проведені дослідження без потоку повітря показали нерівномірний розподіл теплового потоку (рис. 4), що пояснюється різною висотою трави і нерівномірністю її зростання (густоти). Проведені дослідження «охолоджувального ефекту» в лабораторних умовах без швидкості вітру і підігріву показали, що різниця температури верхнього шару ґрунту і навколишнього повітря знаходиться в межах 0,5...1 °C.

В аеродинамічній трубі при швидкості вітру 6,02 м/с (рис. 5), також спостерігається нерівномірний розподіл теплового потоку зі збільшенням охолоджувального ефекту. Зі збільшенням швидкості вітру до 9,76 м/с збільшується «охолоджувальний ефект» трави. Інакше кажучи, при збільшенні швидкості вітру збільшується транспірація і зростає коефіцієнт теплопередачі (рис. 6).

У деяких точках на межах моделі відбувається інтенсивне тепловзімання сильним вітровим потоком і значення коефіцієнта теплопередачі збільшується (так звані «крайові ефекти»).

Для істотного випарного охолодження в теплий період року необхідна дія вітру. Рекомендується максимально продувати покрівлі (встановлювати перфоровані парапети). У холодний період року для зменшення транспірації і коефіцієнта теплопередачі навпаки, рекомендується установка глухого парапету.

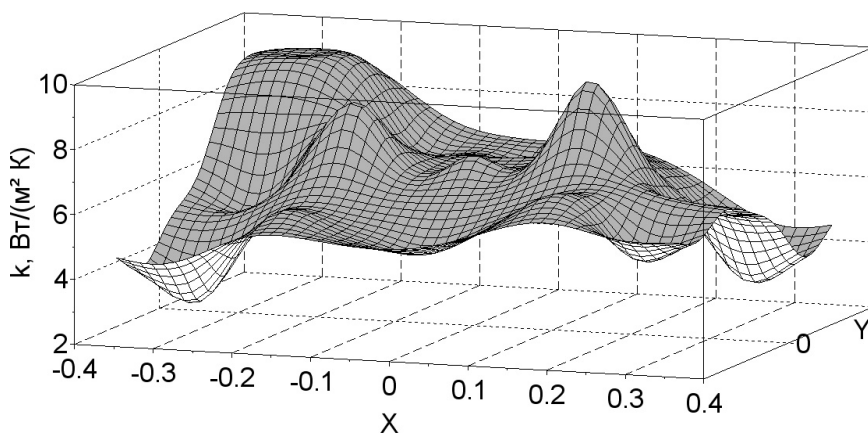


Рис.4. Коефіцієнт теплопередачі екстенсивної зеленої покрівлі при незначній швидкості навколишнього повітря

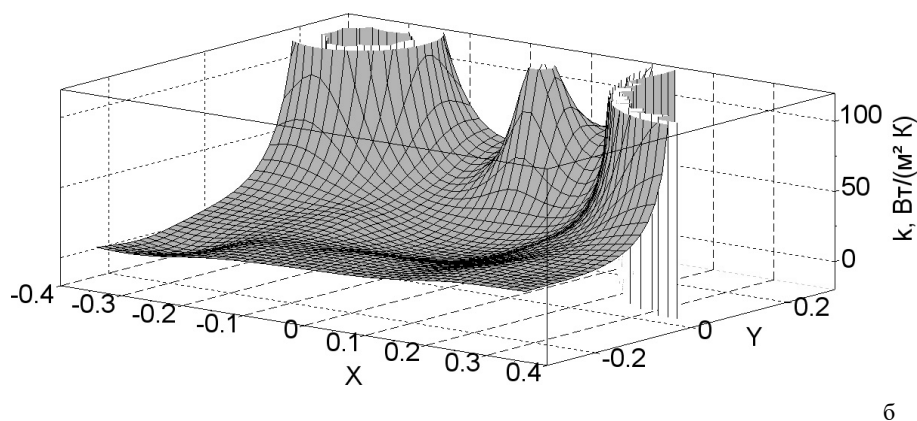
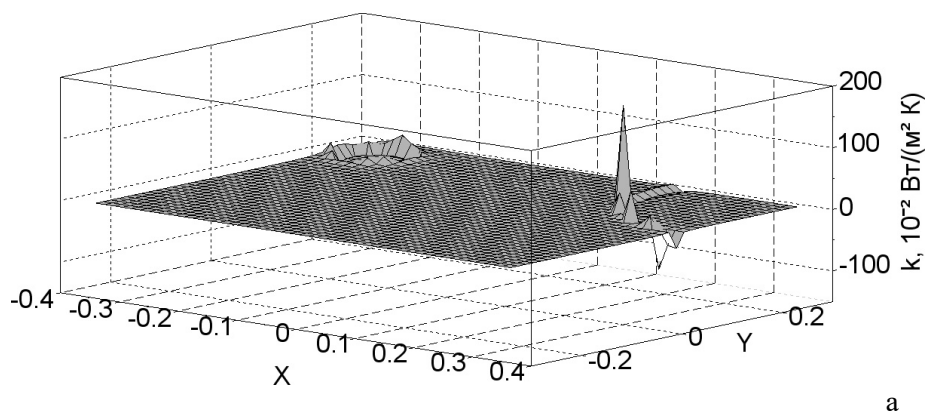


Рис.5. Коефіцієнт теплопередачі екстенсивної зеленої покрівлі при швидкості вітру 6,02 м / с:
а - повний масштаб; б - в діапазоні від 0 до 120 Вт / (м² · К)

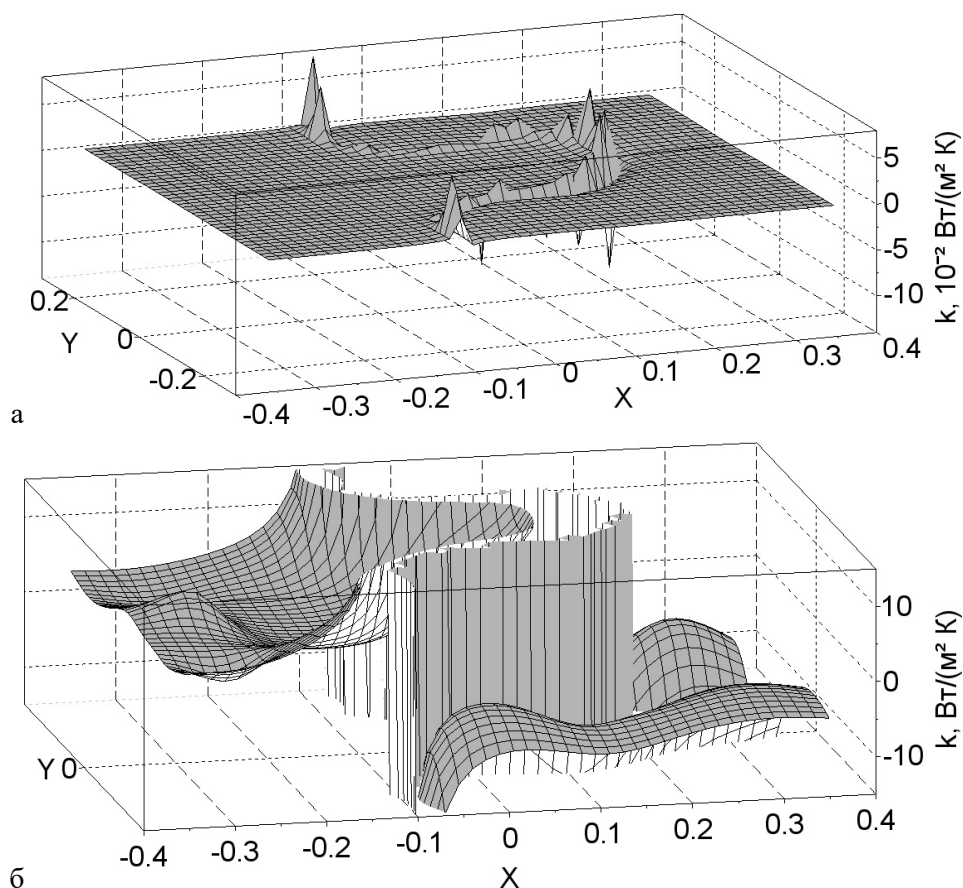


Рис.6. Коефіцієнт теплопередачі екстенсивної зеленої покрівлі при швидкості вітру 9,76 м/с: а - повний масштаб; б - в діапазоні від мінус 15 до 15 Вт / (м² · К)

Висновки. Встановлено нерівномірний розподіл теплового потоку в живому рослинному шарі зеленої покрівлі. При цьому «охолоджувальний ефект» зеленої покрівлі і коефіцієнт теплопередачі зростає при збільшенні швидкості вітру, оскільки при цьому збільшується транспірація та інтенсифікується тепловіддача до повітря.

Перспективи подальших досліджень. Планується завершення серії експериментів з різною висотою трави та проведення досліджень при охолодженні ґрунту.

Література

1. Gaffin S. Energy balance modelling applied to a comparison of white and green roof cooling efficiency / S. Gaffin, C. Rosenzweig, L. Parshall, D. Beattie, R. Berghage, D. Braman // Greening Rooftops for Sustainable Communities, Washington, DC, 2005

2. Wong N. H. Investigation of thermal benefits of rooftop garden in the tropical environment / N. H. Wong, Yu. Chena, C. L. Ong, A. Sia // *Building and Environment*. - 38 (2) 2003. - 261–270.
3. Lui K. Performance evaluation of an extensive green roof / K. Lui, J. Minor // *Greening Rooftops for Sustainable Communities*, Washington, DC, 2005.
4. Niachou A. Analysis of the green roof thermal properties and investigation of its energy performance / A. Niachou, K. Papakonstantinou, M. Santamouris, A. Tsangrassoulis, G. Mihalakakou // *Energy and Buildings*. - 33 (7), 2001. - 719–729.
5. Santamouris M. Investigating and analysing the energy and environmental performance of an experimental green roof system installed in a nursery school building in Athens / M. Santamouris et al. // *Greece, Energy*. - 32, 2007. - 1781–1788.
6. Wong N. H. The effects of rooftop garden on energy consumption of a commercial building in Singapore / N. H. Wong, D. K. W. Cheong, H. Yan, A. Sia. // *Energy and Buildings*. - 35 (4), 2003. - 353–364.
7. Alcazar S. Energy performance of green roofs in a multi storey residential building in Madrid / S. Alcazar, B. Bass // *Greening Rooftops for Sustainable Communities*, Washington, DC, 2005.
8. Del Barrio E. P. Analysis of the green roofs cooling potential in buildings / E. P. Del Barrio // *Energy and Buildings*. - 27, 1998. - 179–193.
9. Lazzarin R. M. Experimental measurements and numerical modelling of a green roof / R. M. Lazzarin, F. Castellotti, F. Busato // *Energy and Buildings*. - 37 (12), 2005. - 1260–1267.
10. Feng C. Theoretical and experimental analysis of the energy balance of extensive green roofs / C. Feng, Q. Meng, Y. Zhang // *Energy and Buildings*. - 42 (6), 2010. - 959–965.
11. Mankiewicz P. Integrating stormwater and greywater treatment for thermal regulation and the enhancement of biological diversity: using mass balance of water as a design criteria / Mankiewicz P., Simon D.B. // *Greening Rooftops for Sustainable Communities*, Minneapolis, 2007.
12. Sailor D. J. A green roof model for building energy simulation programs / D. J. Sailor // *Energy and Buildings*. - 40 (8), 2008. - 1466–1478.
13. Тепло́ва ізоля́ція будіве́ль: ДБН В.2.6 – 31:2016. – [Чинний від 08-07-2016 № 220]. – Київ: Міністерство регіонального розвитку, будівництва та житлово-комунального господарства України, 2017. – 31 с.
14. Плоский В. О. Моделирование термического опору трав'яного шару зеленої покрівлі / В. О. Плоский, Т. М. Ткаченко, В. О. Мілейковський, В. Г. Дзюбенко // Вісник Національного університету «Львівська політехніка». Збірник наукових праць. Серія: «Теорія і практика будівництва» - № 844. – Львів: «Львівська політехніка», 2016. – С. 158-163.
15. Ткаченко Т.Н. Методика создания физической модели экстенсивной зеленой кровли / Т.Н. Ткаченко, В.А. Милейковский // Сборник научных трудов института водного хозяйства им. Ц. Е. Мирцхулава Грузинского технического университета. - №71. – Тбилиси: Институт водного хозяйства им. Ц. Е. Мирцхулава Грузинского технического университета, 2016. – С.117-122.

References

1. Gaffin S., Rosenzweig C., Parshall L. *Energy balance modelling applied to a comparison of white and green roof cooling efficiency*. Greening Rooftops for Sustainable Communities, Washington, DC, 2005.
2. Wong N. H., Yu. Chena, Ong C. L., Sia A. *Investigation of thermal benefits of rooftop garden in the tropical environment*. Building and Environment. - 38 (2) 2003. - 261–270.

3. Lui K., Minor J. *Performance evaluation of an extensive green roof*. Greening Rooftops for Sustainable Communities, Washington, DC, 2005.
4. Niachou A., Papakonstantinou K., Santamouris M., Tsangrassoulis A., Mihalakakou G. "Analysis of the green roof thermal properties and investigation of its energy performance." *Energy and Buildings*, no. 33 (7), 2001.
5. Santamouris M. 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*, no. 32, 2007.
6. Wong N. H., Cheong D. K. W., Yan H., Sia A. "The effects of rooftop garden on energy consumption of a commercial building in Singapore." *Energy and Buildings*, no. 35 (4), 2003.
7. Alcazar S., Bass B. *Energy performance of green roofs in a multi storey residential building in Madrid*. Greening Rooftops for Sustainable Communities, Washington, DC, 2005.
8. Del Barrio E. P. "Analysis of the green roofs cooling potential in buildings." *Energy and Buildings*, no. 27, 1998.
9. Lazzarin R. M., Castellotti F., Busato F. "Experimental measurements and numerical modelling of a green roof." *Energy and Buildings*, no. 37 (12), 2005.
10. Feng C., Meng Q., Zhang Y. "Theoretical and experimental analysis of the energy balance of extensive green roofs." *Energy and Buildings*, no. 42 (6), 2010.
11. Mankiewicz P., Simon D.B. *Integrating stormwater and greywater treatment for thermal regulation and the enhancement of biological diversity: using mass balance of water as a design criteria*. Greening Rooftops for Sustainable Communities, Minneapolis, 2007.
12. Sailor D. J. "A green roof model for building energy simulation programs." *Energy and Buildings*, no.40 (8), 2008.
13. *Teplova izolacij budivel*: DBN B.2.6 – 31:2016, 08-07-2016 № 220, Kijv, Ministerstvo regionalnogo rozvitku, budivniztva ta jitlovo-komunalnogo gospodarstva, 2017.
14. Ploskij V.O., Tkachenko T.M., Mileikovskiy V.O., Dziubenko V. G. "Modeluvanj termichnogo oporu travjanogo sharu zelenoj pokrivli." *Visnik Natsionalnogo universitetu "Lvivska politehnika"*, Iss. 844, Lviv, , 2016, pp. 158-163.
15. Tkachenko T.M., Mileikovskiy V.O. "Metodika sozdanij fizicheskoy modeli ekstensivnoj zelenoj krovli." *Sbornik nauchnich trudov instituta vodnogo chozajstva Gruzinskogo technicheskogo universiteta*, Iss. 71, Tbilisi, 2016, pp. 117-122.

УДК 536.2:620.9:502

Исследование теплопередачи в энергоэффективных зелёных кровлях

Т. Н. Ткаченко¹, В. А. Милейковский²

¹к.б.н., доц., докторант кафедры охраны труда и окружающей среды Киевского национального университета строительства и архитектуры, г. Киев, Украина, tkachenkoknuba@gmail.com

²к.т.н., доц. кафедры теплогазоснабжения и вентиляции киевского национального университета строительства и архитектуры, г. Киев, Украина, mileikovskiy@gmail.com

Аннотация. Одним из актуальных направлений зелёного строительства является создание зелёных кровель. Последние имеют ряд преимуществ, основными из которых являются: уменьшение нагрузки на ливневые городские стоки, экономия питьевой воды, дополнитель-

ное утепление, испарительное охлаждение за счёт транспирации (испарения влаги), звуко-изоляция, смягчение эффекта «тепловых островов», сохранение флоры и фауны. В Украине в связи с энергетическим кризисом особенно актуальным является изучение теплопередачи в зелёной кровле. Впервые изучено влияние скорости ветра на тепловые процессы растительного слоя зелёной кровли. Впервые проведено исследование теплопередачи в растительном слое зелёной кровли при различной скорости ветра в аэродинамической трубе. Установлено неравномерное распределение теплового потока, зависящее от ряда случайных факторов. «Охлаждающий эффект» зелёной кровли усиливается при увеличении скорости ветра, так как увеличивается транспирация.

Ключевые слова: зелёные кровли; растительный слой; тепловой поток; коэффициент теплопередачи; аэродинамическая труба

UDC 536.2:620.9:502

Study of Heat Transfer in Energy Efficient Green Roofing

T. Tkachenko¹, V. Mileyskiy²

¹ Ph. D. (Biology), associate professor, department of labour protection and environment control, Kiev National University of Construction and Architecture, Kiev, Ukraine, tkachenkoknuba@gmail.com, ORCID: 0000-0003-2105-5951

²PhD, (Civil engineer), associate professor, department of heat and gas supply and ventilation, Kiev National University of Construction and Architecture, Kiev, Ukraine, mileyskiy@gmail.com, ORCID: 0000-0001-8543-1800

Abstract. One of the actual directions of green construction is green roof building. They have many advantages, the most important are: decrease of storm drain load, saving of drinking water, additional heat insulation, cooling effect by plants transpiration, sound insulation, moderating of «urban heat islands», saving of flora and fauna. In Ukraine, because of fuel and energy crisis, the researches of heat transfer in the green roofs are actual. For the first time, the influence of wind speed on thermal processes of a plant layer of the green roof is studied. First, the researches of heat transfer in the plant layer of the green roof at different wind speed in a wind tunnel are performed. The non-uniformed distribution of the heat transfer dependent on random factors is shown. The wind speed gains the «cooling effect» of the green roof because of the transpiration intensification.

Keywords: Energy-efficient green roofs; vegetative layer; heat flow; heat transfer coefficient; aerodynamic tube.

Надійшла до редакції 16 травня 2017