

3. Yun Zhong, Sakil Mahmud, Zijun He, Yang Yang, Zhe Zhang, Fei Guo, Zhihong Chen, Zhu Xiong, Yubao Zhao (2020). Graphene oxide modified membrane for highly efficient wastewater treatment by dynamic combination of nanofiltration and catalysis. *Journal of Hazardous Materials*, 397, 122774.

4. Zhihui Li, Shuhang Zhang, Guina Zhu, Jie Xing (2024). Use of graphene oxide for the removal of norfloxacin and ceftriaxone antibiotics from aqueous solution: process optimization using response surface approach. *Frontiers in Environmental Science*, 12, 1436848.

УДК 629.735

Угриновський Іван, аспірант кафедри
технології захисту навколишнього середовища та безпеки праці

Коцюбинський Андрій, к.фіз-мат.н. доцент кафедри
технології захисту навколишнього середовища та безпеки праці

Курилюк Марія, студентка кафедри
технології захисту навколишнього середовища та безпеки праці

ВИКОРИСТАННЯ ДРОНІВ З ТЕПЛОВІЗІЙНИМИ КАМЕРАМИ ДЛЯ 3D-ТЕРМОГРАФІЧНОГО АНАЛІЗУ БУДІВЕЛЬ

Будівельний сектор споживає близько 76% електроенергії та 40% первинної енергії з відповідними викидами парникових газів у розвинених країнах. Втрати тепла через огорожувальні конструкції будівель (стіни – 35%, дахи – 25%, підлоги – 15%, протяги – 15%, вікна – 10%) значно впливають на енергоефективність будівель. Традиційні методи термографічного обстеження обмежені доступністю, ризиками безпеки та ефективністю. Безпілотні літальні апарати (БПЛА) з тепловізорами забезпечують інноваційне рішення цих проблем.

У дослідженні використовувався дрон типу мультиротор з тепловізійною камерою роздільною здатністю 388рх, що працює в спектрі 7,5-13 мкм. Для оптимального збору даних впроваджено висхідний мульти-круговий шлях польоту навколо будівлі, який забезпечує перекриття зображень >90% для створення якісних 3D-моделей.

Обробка даних виконувалась із використанням відкритого програмного забезпечення WebODM (Web OpenDrone Map), що дозволяє генерувати 3D-термографічні моделі на основі методів фотограмметрії structure-from-motion (SfM). Зібрані теплові зображення калібрувались для забезпечення однорідного температурного діапазону з максимальним контрастом для точної ідентифікації теплових аномалій.

Дослідження проводилось у зимовий період при зовнішній температурі близько -8°C для забезпечення максимального температурного контрасту між внутрішнім і зовнішнім середовищем (рекомендована різниця $\geq 10^{\circ}\text{C}$).

Аналіз термографічних моделей, створених у WebODM, виявив наступні типи теплових аномалій:

- Теплові мости на з'єднаннях балконних плит з конструкцією будівлі, що призводять до значних втрат тепла
- Недостатня теплоізоляція навколо мансардних вікон
- Протікання повітря через недостатньо герметизовані з'єднання конструкцій

Алгоритм комп'ютерного зору, інтегрований у WebODM, автоматично сегментував теплові аномалії з точністю 76% і показником повноти виявлення 74%, що підтверджує ефективність методу для масштабних обстежень.

3D-термографічні моделі дозволили кількісно оцінити втрати радіаційного тепла та визначити пріоритетні заходи з термомодернізації. Перевагами методу є швидкість збору даних, безпека проведення робіт та можливість обстеження важкодоступних елементів будівлі. Використання БПЛА з тепловізійними камерами у поєднанні з WebODM надає ефективний інструмент для діагностики енергоефективності будівельних конструкцій. Метод забезпечує комплексний аналіз теплових втрат, недоступний при традиційних обстеженнях. Результати дослідження демонструють перспективність використання даної технології для масштабного енергоаудиту міських територій та окремих будівель, що сприятиме впровадженню енергоефективних заходів та скороченню споживання енергії в будівельному секторі.

Перелік використаних джерел

1. Rakha, T., Liberty, A., Gorodetsky, A., Kakillioglu, B., & Velipasalar, S. (2018). Heat mapping drones: an autonomous computer-vision-based procedure for building envelope inspection using unmanned aerial systems (UAS). *Technology| Architecture+ Design*, 2(1), 30-44.
2. Leggiero, M., Andrew, B., Elliott, R., Indergaard, J., Sharma, J. B., & Vogel, T. (2021). Radiative heat loss estimation of building envelopes based on 3D thermographic models utilizing small unmanned aerial systems (sUAS). *Energy and Buildings*, 244, 110957.