УДК 504.054:621.43:004.9

МЕТОДИКА ОЦІНЮВАННЯ ЛОКАЛЬНОГО ТЕПЛОВОГО ВПЛИВУ ТРАНСПОРТНИХ ЕНЕРГЕТИЧНИХ УСТАНОВОК У ЩІЛЬНІЙ ЗАБУДОВІ

Романов Борис Миколайович, аспірант,
Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут»,
e-mail: borys.romanov.sci@gmail.com, ORCID ID: 0009-0000-9895-3018

На сучасному етапі розвитку урбаністики проблема «міського теплового острова» (Urban Heat Island – UHI) вимагає переходу від загального моніторингу до детального аналізу мікроклімату окремих локацій. Традиційні методики оцінювання термічного стану міст, що базуються на даних метеостанцій, мають низьку просторову роздільну здатність і не дозволяють об'єктивно оцінити навантаження у «вуличних каньйонах» – зонах щільної забудови, де антропогенні теплові викиди акумулюються найбільш інтенсивно.

Центральним антропогенним чинником локального нагріву в межах вулично-дорожньої мережі є транспортні енергетичні установки (ТЕУ). Аналіз існуючих досліджень показує, що двигуни внутрішнього згоряння (ДВЗ) генерують значний потік відчутного тепла (sensible heat flux), який є первинним фактором термічного забруднення приземного шару повітря [1]. Ситуація посилюється в умовах заторів, де низька швидкість руху та перехідні режими роботи ТЕУ призводять до нелінійного зростання температури навколишнього середовища [2]. Крім того, ефективність розсіювання цієї енергії критично залежить від морфології забудови (комплексної просторової структури та фізичної форми міських об'єктів), яка в умовах щільних міських блоків створює умови для утримання тепла [3].

Для подолання обмежень статичних методів оцінювання в останні роки все частіше пропонується залучення концепції «цифрових двійників» (Digital Twins). Це дозволяє перейти від епізодичних замірів до створення динамічних моделей, що інтегрують дані про трафік, геометрію середовища та метеорологічні параметри в єдину систему моніторингу [4].

Метою даної роботи є аналіз та систематизація існуючих методик оцінювання теплового впливу ТЕУ, а також визначення перспективних напрямків використання сучасних інструментів цифрового моделювання для побудови високоточних моделей локального теплового забруднення у щільній забудові.

Аналіз параметрів та значень теплового впливу транспортного потоку

Для об'єктивного оцінювання теплового стану міського середовища необхідно насамперед проаналізувати структуру та фізичні параметри теплової енергії, що генерується транспортними засобами. Аналіз методичних підходів,

викладених у роботі Li C. et al. [1], дозволяє класифікувати тепловий викид ТЕУ як потік відчутного тепла (Q_f).

Автори базують свої розрахунки на енергетичному балансі, де загальна енергія палива розподіляється на корисну механічну роботу (25–35%) та теплові втрати. Останні включають теплоту відпрацьованих газів (30–35%), а також енергію, що відводиться через систему охолодження та конвекцію від корпусу двигуна (30–35%). Таким чином, сумарна частка теплових викидів у приземний шар повітря становить 60–75%, що є базовим параметром для сучасних моделей антропогенного навантаження.

Особливого значення в останніх дослідженнях набуває чинник динаміки трафіку. Як зазначають Lee J. та Berkelhammer M. [2], інтенсивність теплового впливу має нелінійну залежність від швидкості потоку. Їхній аналіз доводить, що в режимах заторів («stop-and-go») локальне теплове навантаження зростає найбільш критично. Зокрема, встановлено кореляцію, згідно з якою зниження середньої швидкості потоку на кожні 16 км/год (10 миль/год) призводить до збільшення інтенсивності теплового аномального впливу на 0,36°C.

Ці дані свідчать про те, що сучасна методика оцінювання повинна враховувати не лише сумарну кількість спаленого палива, а й питомий час перебування транспортних одиниць на конкретній ділянці вулиці, що дозволяє точніше розрахувати локальну акумуляцію тепла.

Аналіз морфології забудови як чинника акумуляції тепла

Ефективність розсіювання теплових викидів ТЕУ безпосередньо залежить від просторової структури міського середовища. Аналіз досліджень Shareef S. та Altan H. [3] вказує на те, що конфігурація міських блоків та параметри «вуличних каньйонів» є визначальними у формуванні локальних температурних аномалій. Ключовим показником у сучасних методиках оцінювання виступає співвідношення висоти будівель до ширини вулиці (H/W), яке безпосередньо корелює зі здатністю середовища до самоохолодження. При високих значеннях H/W, що є типовим для зон щільної багатоповерхової забудови, виникає ефект термічної пастки, де тепло, що виділяється двигунами, утримується між фасадами будівель через обмежену природну конвекцію.

Додатковим критичним параметром, що використовується в новітніх методах аналізу, є коефіцієнт відкритості неба (Sky View Factor, SVF). Як зазначають Lachapelle J. A. et al. [5], впровадження мікромасштабних 3D-моделей, зокрема моделі TUF-Pedestrian (Temperature of Urban Facets – Pedestrian), дозволяє детально розрахувати вплив затінення та багаторазового відбиття теплового випромінювання. Ця модель базується на тривимірному моделюванні енергетичного балансу поверхонь (facets), що дає змогу враховувати не лише пряме нагрівання повітря від ТЕУ, а й вторинне теплове випромінювання від нагрітих штучних поверхонь (асфальту, стін), що акумулюють енергію в умовах обмеженої аерації.

Аналіз перспективних ІТ-інструментів для реалізації методики оцінювання

Для практичної реалізації сучасних методик оцінювання критичне значення має перехід від статичних розрахункових моделей до динамічних систем на базі концепції «цифрових двійників» (Digital Twins). Як зазначають Agüera-Pérez A. et al. [4], використання відкритих ІТ-платформ дозволяє інтегрувати різнорідні потоки даних – від інтенсивності трафіку до метеорологічних параметрів – у єдине обчислювальне середовище. Це забезпечує можливість оцінювання теплового стану в масштабі реального часу, що є необхідним для оперативного управління міською інфраструктурою.

Аналіз новітніх підходів у сфері машинного навчання [6] та обробки геопросторових даних [7] показує зміну парадигми: від суто фізичного моделювання до методів, що базуються на даних (data-driven models). Використання інтелектуальних алгоритмів (наприклад, регресійних моделей на базі ансамблів дерев) дозволяє будувати високоточні теплові карти, базуючись на великих масивах інформації про інтенсивність руху та структуру викидів ТЕУ без необхідності встановлення надмірної кількості фізичних сенсорів [6]. При цьому методики збору даних, описані в роботі Yan X. et al. [7], дозволяють використовувати API геопросторових сервісів для отримання похвилинної динаміки транспортних потоків, що значно підвищує роздільну здатність оцінювання.

Важливим елементом сучасних систем стає впровадження «пояснюваного штучного інтелекту» (Explainable AI, XAI). Згідно з дослідженнями Xu F. et al. [8], методи XAI дозволяють не лише прогнозувати значення температури, а й інтерпретувати внесок кожного окремого чинника – наприклад, вагу щільності забудови порівняно з інтенсивністю заторів – у формування конкретної теплової аномалії.

Це забезпечує прозорість методики оцінювання та дозволяє верифікувати отримані результати з точки зору фізики процесів.

Висновки

Проведений аналіз дозволяє стверджувати, що локальне теплове забруднення у «вуличних каньйонах» є результатом складної динамічної взаємодії множини факторів. Опрацьовані результати досліджень [1, 2, 3, 5] підтверджують, що теплові викиди ТЕУ, параметри швидкісного режиму та морфологія забудови діють не ізольовано, а як складна термічна система.

Теоретичне узагальнення свідчить, що впровадження новітніх технологій ІТ, зокрема концепції цифрових двійників [4] та інтелектуального аналізу геопросторових даних [7], сприяє якісно новому рівню аналізу цієї системи. Головною перевагою такого підходу є можливість не лише прогнозувати загальну температуру, а й виконувати кількісну оцінку внеску кожного окремого чинника – від інтенсивності теплового потоку двигунів до ступеня впливу затінення будівель. Використання методів пояснюваного штучного інтелекту

(XAI) [8] дозволяє декомпозувати загальну картину нагріву, виділяючи частку антропогенного тепла ТЕУ як один із ключових параметрів.

Результати аналізу окреслюють перспективні напрями розвитку методологій оцінювання міського мікроклімату, що базуються на інтеграції інтелектуальних систем аналізу даних. Такий підхід створює наукове підґрунтя для пошуку обґрунтованих способів мінімізації теплового навантаження та покращення екологічного стану територій із щільною забудовою.

Література

1. **Li C. et al.** Do Electric Vehicles Mitigate Urban Heat? The Case of a Tropical City. *Frontiers in Environmental Science*. 2022. Vol. 10. 810342. DOI: https://doi.org/10.3389/fenvs.2022.810342.

2. **Lee J., Berkelhammer M.** Evaluating the Influence of Traffic Congestion on Surface Urban Heat Island Intensity. *Geophysical Research Letters*. 2025. URL: https://jangholee.com/files/2025_LeeBerkelhammer_GRL.pdf (дата звернення: 04.03.2026).

3. **Shareef S., Altan H.** Urban Block Configuration and Microclimate: A Review of Design Strategies. *Buildings*. 2024. Vol. 14 (8). 2367. DOI: https://doi.org/10.3390/buildings14082367.

4. **Agüera-Pérez A. et al.** An Open-Source Urban Digital Twin for Enhancing Outdoor Thermal Comfort in the City of Huelva (Spain). *Smart Cities*. 2023. Vol. 6 (5). P. 2533–2555. DOI: https://doi.org/10.3390/smartcities6050113.

5. **Lachapelle J. A. et al.** A microscale three-dimensional model of urban outdoor thermal exposure (TUF-Pedestrian). *International Journal of Biometeorology*. 2023. Vol. 67. 105315. DOI: https://doi.org/10.1007/s00484-022-02241-1.

6. Machine Learning in Modeling Urban Heat Islands: A Data-Driven Approach for Kuala Lumpur. *ResearchGate Preprints*. 2025. URL: https://www.researchgate.net/publication/388815276 (дата звернення: 04.03.2026).

7. **Yan X. et al.** High-Resolution Traffic Flow Prediction and Vehicle Emission Inventory Estimation for Chinese Cities Using Geo-Spatial Data of Jinan City, China. *Atmosphere*. 2025. Vol. 16 (10). 1213. DOI: https://doi.org/10.3390/atmos16101213.

8. **Xu F. et al.** Characterizing the Thermal Effects of Urban Morphology Through Unsupervised Clustering and Explainable AI. *Remote Sensing*. 2025. Vol. 17 (18). 3211. DOI: https://doi.org/10.3390/rs17183211.