

## ДОСЛІДЖЕННЯ ЕФЕКТУ ТЕПЛООВОГО ОСТРОВА В МІСТІ ХАРКІВ

Роговий А. С.<sup>1</sup>,

<sup>1</sup>Харківський національний автомобільно-дорожній університет

***Анотація.** На основі числового моделювання рівнянь течії повітря, рівнянь теплоперенесення з урахуванням сонячної радіації досліджено прояви ефекту «теплового міського острова» на прикладі ділянки міської забудови м. Харкова. Отримано показники зміни температури повітря в різний час протягом доби.*

***Ключові слова:** тепловий міський острів, теплоперенесення, міська забудова, модель турбулентності, сонячна радіація.*

### Вступ

В останні десятиліття значно зріс інтерес до оптимізації міських умов для комфортного проживання мешканців великих міст. Сприяють цьому дві основних причини: значне зростання кількості мешканців у містах і відповідне зростання потреби в комфортному проживанні. Перша причина приводить до значного збільшення розмірів великих міст. Згідно з даними ООН кількість міських мешканців перевищує число сільських уже починаючи з 2008 р., а до 2030 р. загалом буде більш ніж 5 млрд осіб. Очевидно, що особливості розвитку міст стають усе більш актуальними й залучають усе більшу кількість дослідників. Починаючи з 90-х рр. минулого століття почала формуватися окрема дисципліна, яку називають «Міська (урбаністична) фізика» [1]. До сфери інтересів цієї дисципліни звичайно належать: зміна клімату у великих і малих містах; енергетика й концентрація великих промислових підприємств; забруднення повітря в мегаполісах; безпеку; транспорт; здоров'я людей, що проживають у містах. Усі виділені проблеми, що досліджують в урбаністичній фізиці, є взаємозалежними. Зокрема оптимізація транспорту й маршрутів усередині міста впливає на викиди забруднювальних шкідливих речовин в атмосферу й, відповідно, на здоров'я людей [2–4].

### Мета і постановка завдання

Однією з основних проблем, що привертає увагу дослідників, є зміна в міському мікрокліматі, яку звичайно називають «ефектом міського теплового острова». Цей ефект почали розглядати й фіксувати починаючи з 80-х рр. минулого століття. На сьогоднішній день проведено велику кількість досліджень і цей ефект задокументовано у дуже багатьох містах, наприклад: Токіо (Японія), Сінгапур

(Сінгапур), Пекін (Китай), Куала-Лумпур (Малайзія), Куритиба (Бразилія), Афіни (Греція), Аахен (Німеччина), Рим (Італія), Фінікс (США) і ще в багатьох інших, практично на всій земній кулі [5]. Більшість досліджень проведено в північних широтах між тропічним і арктичним колами. Крім того, можна зауважити про відсутність відомого авторам дослідження для Харкова, що має стандартну архітектуру пострадянських країн. Такі дослідження можуть виявити деякі нові особливості міського теплового острова з урахуванням проектування міст і побудови будівель і споруджень за радянськими вимогами.

За останні двадцять років опубліковано більш ніж 500 статей, присвячених проблемам моделювання клімату міст і розрахунку забруднень. Однією з причин такої пильної уваги до теплового ефекту може бути виявлений Гарсеном [6] зв'язок між температурою в місті й кількістю смертей у ньому. Багато авторів стверджують, що збільшення середньотижневої температури в межах міста збільшує кількість смертей, і це спостерігається практично в усіх містах Європи. Таким чином, поліпшення кліматичних умов у великих урбаністичних центрах є однією з найбільш глобальних проблем людства, вирішення якої приводить до значного зниження прояву ефекту міського теплового острова, що, у свою чергу, поліпшує самопочуття мешканців, а також знижує витрати електроенергії (за рахунок зменшення витрат на кондиціонування повітря).

Метою цієї роботи є виявлення ефекту теплового острова в м. Харкові та його дослідження.

### Аналіз публікацій

Прояв ефекту теплового острова наведено на рис. 1.

Необхідно відзначити, що на рисунку подано, окрім ефекту міського теплового острова, також і ефект міського холодного острова. Йому звичайно приділяють значно менше уваги, але за рахунок його існування поряд із тепловим островом коливання температури повітря в місті значно зменшуються. Крім того, про подібне розташування кривих температур у місті й сільській місцевості свідчать досить багато додаткових досліджень і в містах північних широт [7, 8].

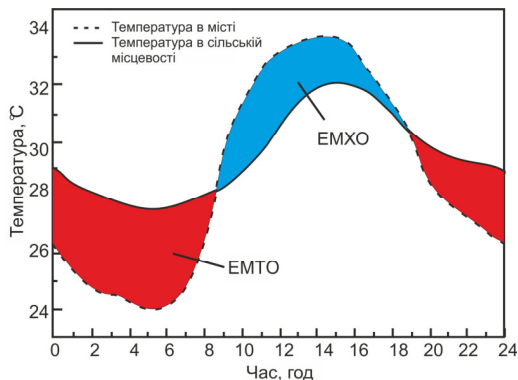


Рис. 1. Ефект міського теплового (ЕМТО) й холодного (ЕМХО) островів

Як видно з графіка, різниця в температурах у міській і сільській області перевищує 2–3 °С.

Основними причинами виникнення теплового острова, згідно з [9], є:

- складна геометрія вулиць за наявності висотних будинків, що не дозволяє сонячному випромінюванню поглинатися елементами будівель, і виникнення складного теплообміну;
- теплові властивості матеріалів поверхні будівель і доріг такі, що збільшують збереження тепла;
- антропогенний фактор, пов'язаний зі спалюванням палива й метаболізмом тварин;
- ефект «теплиці» в місті за рахунок більш забрудненої атмосфери;
- зменшення ефективного альбедо міської системи за рахунок множинного відбиття сонячного випромінювання поверхнями будівель міста;
- зменшення поверхонь випару в місті (водні поверхні, рослини, дерева), що призводить до меншої переробки теплових потоків;
- зменшення турбулентного переносу тепла з вулиць.

Відповідно до [10, 11] основними способами боротьби з проявом теплового міського ефекту є збільшення зелених насаджень

(50 %), використання світлих кольорів для покриття дахів (29 %), використання світлих, «холодних» кольорів для покриття поверхонь доріг (21 %). Природно, що на сьогоднішній день найкращим способом оцінки проектних рішень у галузі мікроклімату міста є попереднє моделювання пропонуваніх змін у структурі насаджень і кольорів покриттів дахів і фасадів. Для того щоб одержати адекватні результати, необхідно у процесі моделювання комбінувати кілька моделей: модель адвекції для обтікання будівель і споруджень міста, модель теплообміну з урахуванням сонячного випромінювання за часом й місцем знаходження Сонця і, відповідно, тіней від будівель. У багатьох випадках моделюють ще й викид шкідливих речовин в атмосферу, що може змінювати тепловий баланс у місті, у зв'язку з виникненням ефекту «теплиці». Ці завдання є досить складними й найчастіше потребують нестационарного розрахунку на сітках із досить великою кількістю елементів, що, у свою чергу, потребує значних ресурсів комп'ютерної техніки.

**Основний матеріал досліджень**

Для оцінки проектних рішень, спрямованих на поліпшення прояву теплового острова в місті, моделювання має містити моделювання руху повітря, теплопередачу й рівняння радіації. Радіаційні теплові потоки, що звичайно розглядають під час моделювання, подано на рис. 2 [12].

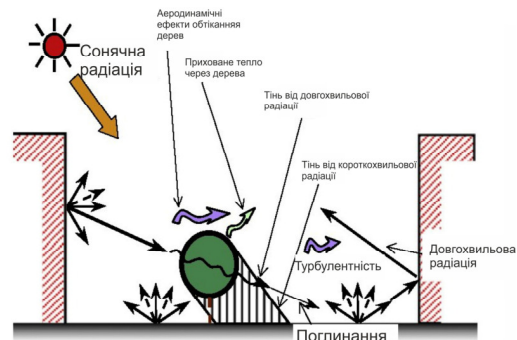


Рис. 2. Теплові потоки в місті

Загальний баланс енергій може бути записаний у такій формі [13]:

$$Q^* + Q_F = Q_H + Q_E + \Delta Q_S + \Delta Q_A + S, \quad (1)$$

де  $Q^*$  – загальний потік радіації всіх хвиль;  $Q_F$  – антропогенний тепловий потік;  $Q_H$  – турбулентний явний тепловий потік;  $Q_E$  –

турбулентний прихований тепловий потік;  $\Delta Q_s$  – накопичений тепловий потік у заданому об'ємі (поглинання й випромінювання зі всіх поверхонь: вода, ґрунт, будівельні матеріали);  $\Delta Q_A$  – адвективний потік тепла;

$S$  – усі інші джерела й поглиначі тепла, наприклад, фотосинтез.

Найчастіше потоками  $\Delta Q_A$  й  $S$  нехтують у силу їх незначущості порівняно з іншими. Антропогенний потік враховується здебільшого в зимовий період, коли загальний сонячний потік має менші значення, ніж улітку.

**Модель руху рідини.** Обтікання будівель і споруджень у межах міста з урахуванням теплопередачі характеризується нестационарністю, енергетичною нерівноважністю, масштабною дифузійною, що обумовлюється наявністю великих когерентних структур. У роботі [14] припущено, що провести адекватний розрахунок на основі стаціонарних рівнянь *RANS* дуже складно, але, з іншого боку, проведення нестационарного розрахунку дозволяє адекватно розрахувати основні характеристики потоку. У такому випадку основні рівняння для стислого середовища в нестационарній постановці у формі Ейнштейна [14]:

$$\begin{aligned} \frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial \rho u_j}{\partial x_j} &= 0; \\ \frac{\partial (\rho u_i)}{\partial t} + \frac{\partial (\rho u_i u_j)}{\partial x_j} &= \\ &= - \left( \frac{\partial p}{\partial x_i} \right) + \frac{\partial}{\partial x_j} (\tau_{ij} - \rho u'_i u'_j) + \rho \beta (T - T_0) g_i \\ \frac{\partial (\rho h)}{\partial t} + \frac{\partial (\rho u_j h)}{\partial x_j} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left( \rho u'_j h' - \frac{\mu}{Pr} \frac{\partial h}{\partial x_j} \right) &= 0, \end{aligned} \quad (2)$$

де  $u, \rho, h, p$  – осереднені швидкість, густина, ентальпія й тиск відповідно;  $\rho u'_i u'_j$  – тензор Рейнольдсових напруг;  $\rho u'_j h'$  – турбулентний тепловий потік моделюється зв'язком з турбулентним числом Прандтля й турбулентною в'язкістю;  $\mu$  – динамічна в'язкість;  $Pr = c_p \mu / s$  – число Прандтля;  $c_p$  – питома теплоємність середовища за умови постійного тиску;  $s$  – коефіцієнт теплопровідності.

Тензор Рейнольдсових напруг і турбулентний тепловий потік повинні моделюватися за спеціальними залежностями. Тензор Рейнольдсових напруг моделюється на основі

*SST* моделі турбулентності [15]. Для моделей такого типу функціональний зв'язок між турбулентною в'язкістю й осередненими характеристиками турбулентності визначається співвідношенням [16, 17]:

$$v_T = \frac{a_1 k}{\max(a_1 \omega, \Omega F_2)}, \quad (3)$$

де  $a_1 = 0,31$  – емпіричний коефіцієнт;  $k$  – кінетична енергія турбулентності;  $\omega$  – частота турбулентних пульсацій;  $\Omega$  – абсолютна величина завихореності;

$$F_2 = \tanh \left[ \left[ \max \left( \frac{2\sqrt{k}}{\beta^* \omega y}, \frac{500v}{y^2 \omega} \right) \right]^2 \right], \quad (4)$$

де  $y$  – відстань від стінки;  $\beta^*$  – константа, рівна 0,075.

У свою чергу кінетична енергія турбулентності дорівнює:

$$k = \frac{1}{2} (u'u' + v'v' + w'w'). \quad (5)$$

Зміна в часі та в просторі кінетичної енергії турбулентності й частоти турбулентних пульсацій описується рівнянням переносу характеристик турбулентності [17, 18]:

$$\begin{cases} \frac{\partial (\rho k)}{\partial t} + \frac{\partial (\rho u_j k)}{\partial x_j} = \\ = \frac{\partial}{\partial x_j} \left( \rho (v + \sigma_{k1} v_T) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right) + P_k - \beta^* \rho k \omega; \\ \frac{\partial (\rho \omega)}{\partial t} + \frac{\partial (\rho u_j \omega)}{\partial x_j} = \\ = \frac{\partial}{\partial x_j} \left( \rho (v + \sigma_{\omega 1} v_T) \frac{\partial \omega}{\partial x_j} \right) - \\ - \rho \beta \omega^2 + CD_\omega + \alpha \frac{\rho}{\mu_T} P_k, \end{cases} \quad (6)$$

де  $P_k = \min \left( \tau_{ij} \frac{\partial V_i}{\partial x_j}, 10\beta^* k \omega \right)$  – генераційний турбулентний член;

$$F_1 = \tanh \left\{ \min \left[ \max \left( \frac{\sqrt{k}}{\beta^* \omega y}, \frac{500v}{y^2 \omega} \right), \frac{4\sigma_{\omega_2} k}{CD_{k\omega} y^2} \right]^4 \right\} -$$

емпірична функція;

$$CD_{k\omega} = \max \left( 2\rho\sigma_{\omega_2} \frac{1}{\omega} \frac{\partial k}{\partial x_j} \frac{\partial \omega}{\partial x_j}, 10^{-10} \right) -$$

позитивна частина перехресних дифузійних членів [20, 21].

Математичне моделювання проводилося за умови таких значень констант моделі:  $\sigma_{k1} = 0,85$ ;  $\sigma_{k2} = 1$ ;  $\sigma_{\omega 1} = 0,5$ ;  $\sigma_{\omega 2} = 0,856$ ;  $\alpha_1 = 5/9$ ;  $\alpha_2 = 0,44$ ;  $\beta_1 = 3/40$ ;  $\beta_2 = 0,0828$ , обумовлених рівнянням  $\phi = \phi_1 F_1 + \phi_2 (1 - F_1)$ .

**Модель сонячного випромінювання.**

У цій роботі використовувалася модель випромінювання за методом Монте-Карло, яка припускає, що поле випромінювання можна розглядати як фотонний газ. Для цього газу середня інтенсивність випромінювання є пропорційною відстані, пройденій фотоном в одиниці об'єму за одиницю часу. У цьому випадку можна одержати інтенсивність на основі підрахунку фотонів у кожному елементі об'єму. Крім того, підраховуючи кількість фотонів, що падають на поверхню, одержують середній радіаційний потік і середній потік, який поглинається.

Мета радіаційного моделювання полягає в тому, щоб вирішити рівняння переносу випромінювання для рівняння енергії та знайти радіаційний тепловий потік на стінках. Рівняння переносу випромінювання можна записати у вигляді:

$$\frac{dI_v(\vec{r}, \vec{s})}{dt} = - (K_{av} + K_{sv}) I_v(\vec{r}, \vec{s}) + K_{av} I_b(v, T) + \frac{K_{sv}}{4\pi} \int dI_v(\vec{r}, \vec{s}') \Phi(\vec{s} \cdot \vec{s}') d\Omega' + S, \quad (7)$$

де  $v$  – частота;  $\vec{r}$  – радіус-вектор;  $\vec{s}$  – вектор напрямку;  $K_{\alpha}$  – коефіцієнт абсорбції;  $K_s$  – коефіцієнт розсіювання;  $I_b$  – інтенсивність випромінювання абсолютно чорного тіла;  $I_v$  – спектральна інтенсивність випромінювання, що залежить від положення й напрямку;  $T$  – локальна абсолютна температура;  $\Omega$  – тілесний кут;  $\Phi$  – фазова функція розсіювання;  $S$  – джерело інтенсивності випромінювання.

Рівняння (7) є рівнянням першого порядку відносно  $I_v$  у напрямку  $s$ . Для розв'язання цього рівняння потрібно задати граничні умови для  $I_v$ :

1) непрозорі дифузно випромінювальні й дифузно відбивальні границі:

$$I_v(\vec{r}_w, \vec{s}) = \epsilon_v(\vec{r}_w) I_b(v, T) + \frac{\rho_w(\vec{r}_w)}{\pi} \int_{n \cdot \vec{s}' < 0} I_v(\vec{r}_w, \vec{s}') |\vec{n} \cdot \vec{s}'| d\Omega'; \quad (8)$$

2) дифузно випромінювальні й дзеркально відбивальні границі:

$$I_v(\vec{r}_w, \vec{s}) = \epsilon_v(\vec{r}_w) I_b(v, T) + \frac{\rho_v^d(\vec{r}_w)}{\pi} \int_{n \cdot \vec{s}' < 0} I_v(\vec{r}_w, \vec{s}') |\vec{n} \cdot \vec{s}'| d\Omega' + \rho_v^s(\vec{r}_w) I_v(\vec{r}_w, \vec{s}_s),$$

де  $\rho_v^d$  – дифузійна відбивна здатність;  $\rho_v^s$  – дзеркальна відбивна здатність;  $\rho_v$  – спектральна відбивна здатність.

**Геометрична модель.** Харків характеризується досить великою кількістю високих будинків, особливо у «спальних» районах міста (30–50 м). Багато будинків у цих районах мають 12 й 16 поверхів. Вуличні дерева наявні в досить великій кількості, однак їх висота рідко перевищує 8–15 м, тобто здебільшого вони є нижчими за будинки. Розглянута ділянка розташована у східному районі міста (рис. 3).

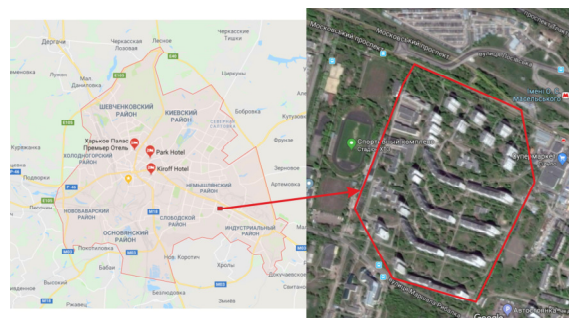


Рис. 3. Місце розташування досліджуваної площі міської забудови

Розглянута ділянка міської забудови має такі координати: 49°57' N й 36°21' E. З огляду на рекомендації з побудови розрахункової галузі створено сіткову модель досліджуваної ділянки. Усі сіткові розбивки склалися з тетрагональних і призматичних елементів. Згущення сіткових елементів виконувалося

поблизу твердих стінок і, насамперед, – поблизу будівель. Основна різниця між сітковими розбивками полягала в розмірі сіткового призматичного елемента поблизу стінки будинку, що в підсумку приводило до зростання числа елементів за умови зменшення розміру.

**Результати моделювання.** На рис. 4 наведені результати розрахунку температури поверхні Землі досліджуваної ділянки о 09.00, 13.00 і о 18.00.

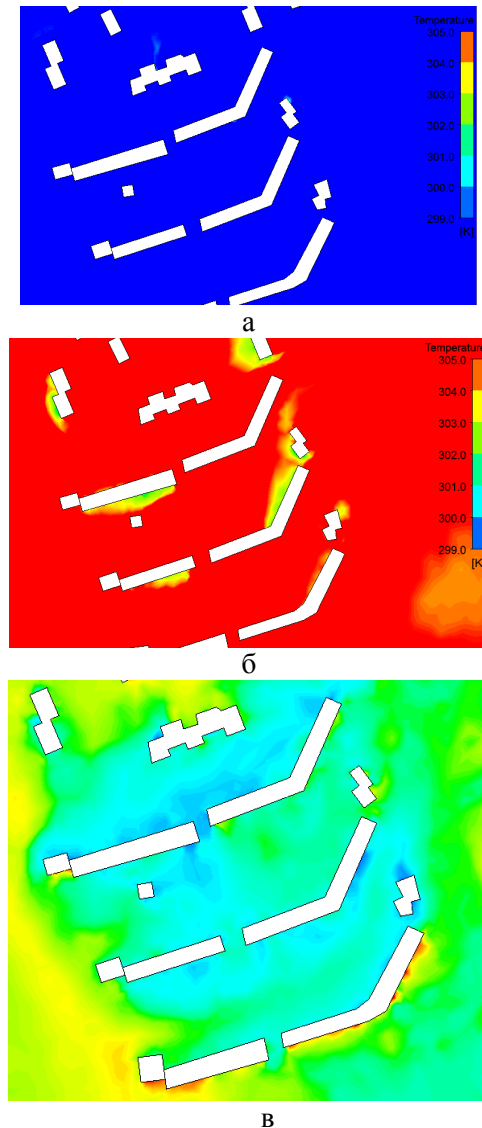


Рис. 4. Розподіл температури за часом: а – о 09.00; б – о 13.00; в – о 18.00

На рис. 4, в можна бачити зменшення температури в ділянці тіні (Сонце на цьому рисунку світить знизу з інтенсивністю  $300 \text{ Вт/м}^2$ ). Усі графіки наведені з однаковим діапазоном зміни температури, що ускладнює видимість температурних ефектів. Тому на рис. 5 наведено поле температур із меншим діапазоном змінення температури.

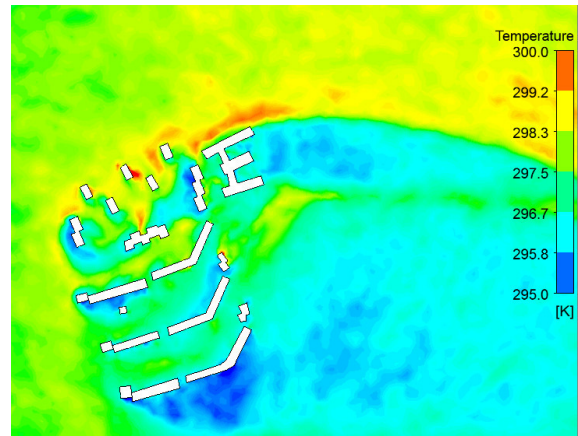


Рис. 5. Розподіл температури в ранковий час

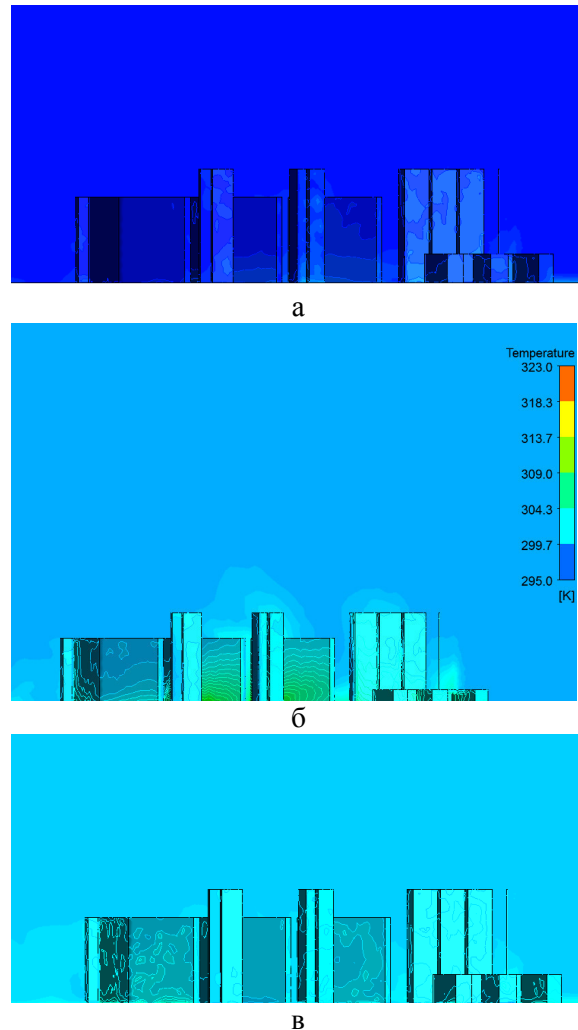


Рис. 6. Нагрівання будівель унаслідок впливу сонячного випромінювання за часом: а – о 09.00; б – о 13.00; в – о 18.00

Наведену вище математичну модель розраховано у програмному комплексі OpenFoam, який надається розробником з вільною ліцензією.

На рис. 6 показано вплив сонячного випромінювання на нагрівання будівель. Усі



графіки наведені з однією шкалою зміни температури.

Точне прогнозування приграничного шару є важливим для одержання адекватних результатів моделювання мікроклімату міста [1]. Для цього необхідно правильно задати шорсткість поверхні Землі. З цією метою профіль вертикальної швидкості задавався за такою формулою:

$$U(z) = U_s \left( \frac{z}{z_s} \right)^\alpha, \quad (9)$$

де  $U_s$  – швидкість поза приграничним шаром на висоті  $z_s = 10$  м;  $\alpha = 0,4$  – емпіричний коефіцієнт, що залежить від поверхні.

У нашому випадку коефіцієнт обрано для міської забудови. Загалом можна використати й інший спосіб задання профілю швидкості у граничній умові входу в тому випадку, якщо моделюється весь приграничний шар міста великої висоти. Докладно це розглядається в [22].

На рис. 7, 8 наведені картини порівняння розрахунків з урахуванням і без урахування шорсткості. Шорсткість було задано величиною  $z_0 = 1$  м, що в перерахуванні на  $k_s = 29,6$  м. Спостерігаються зміни в температурі біля поверхні Землі й будівель, що, схоже, пов'язано зі зменшенням швидкості поблизу поверхонь. Вектори швидкості показані на відстані 0,6 м від поверхні Землі.

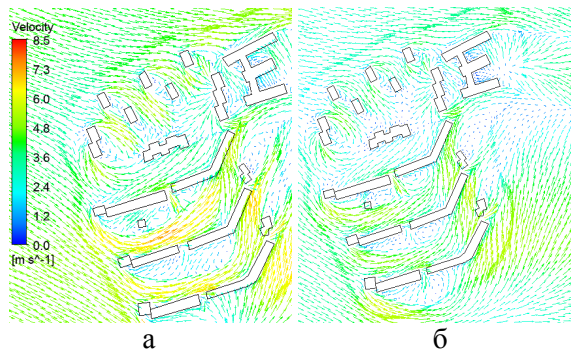


Рис. 7. Порівняння векторів швидкості: а – під час розрахунку без урахування шорсткості; б – з її врахуванням

Необхідно відмітити, що якщо задається профіль приграничного шару, не має сенсу розглядати модель турбулентності SST і достатньо використати «к-е» модель турбулентності, у якій прилеглий шар задається профілем швидкості, як і в нашому випадку.

Використання цієї моделі може значно зменшити час розрахунку.

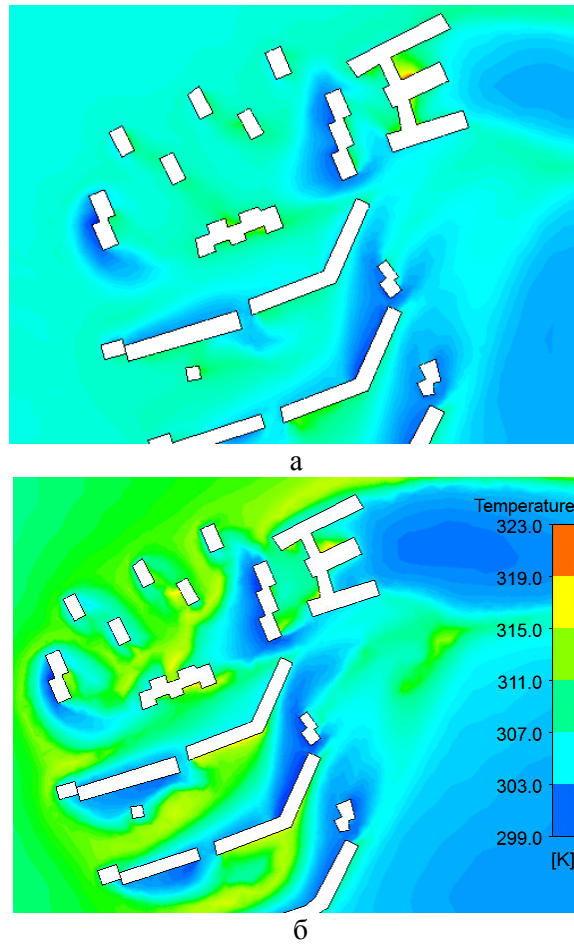


Рис. 8. Порівняння розподілу температури: а – під час розрахунку без урахування шорсткості; б – з її врахуванням

Таким чином, отримано модель, що дозволяє розрахувати розподіли температури повітря в місті та виявити ефект теплового острова біля будівель та доріг у місті. Це допомагає на етапі проектування застосувати та оцінити вплив основних способів боротьби з проявом теплового міського ефекту: збільшення зелених насаджень, використання світлих кольорів для покриття дахів, використання світлих, «холодних» кольорів для покриття поверхонь доріг.

### Висновки

1. У роботі на основі числового моделювання шляхом вирішення URANS-рівнянь, рівнянь теплоперенесення з урахуванням сонячної радіації досліджено прояви ефекту «теплового міського острова» на прикладі ділянки міської забудови м. Харкова. Одержано картини зміни температури повітря в різний час протягом доби. Підтверджено

наявність ефекту «теплого острова» в Харкові зі збільшенням температури на 2...4 °С, порівняно із сільською місцевістю.

2. Проаналізовано вплив шорсткості на картини течії в ділянці міської забудови. Шорсткість було задано величиною  $k_s = 29,6$  м. Спостерігаються зміни в температурі біля поверхні Землі й будинків, що, схоже, пов'язано зі зменшенням швидкості поблизу поверхонь.

### Література

1. Blocken B. Computational Fluid Dynamics for urban physics: Importance, scales, possibilities, limitations and ten tips and tricks towards accurate and reliable simulations / B. Blocken // *Building and Environment*. – 2015. – V. 91. – P. 219–245.
2. Солодов В. Г. Модель переноса атмосферних забруднень в полосе насаджень вздовж автомобільної дороги. / В. Г. Солодов, А. Г. Авершин // *Автомобіль і електроніка. Сучасні технології*. – 2018. – № 13. – С. 98–107.
3. Солодов В. Г. Перенос примеси в приземному шарі автомобільної дороги в умовах бокової вітрової епіюри / В. Г. Солодов, А. Г. Авершин // *Наукові праці Міжнародної науково-практичної конференції «Новітні технології розвитку автомобільного транспорту», 16–19 жовтня 2018 р., м. Харків*. – Х.: ФОРТ, 2018. – С. 325–328.
4. Hedquist B. C. Seasonal variability of temperatures and outdoor human comfort in Phoenix, Arizona, USA / Hedquist B. C., Brazel A. J. // *Building and Environment*. – 2014. – V. 72. – P. 377–388.
5. Toparlar Y. A review on the CFD analysis of urban microclimate / Toparlar, Y., Blocken, B., Maiheu, B., Van Heijst, G. J. F. // *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. – 2017. – V. 80. – P. 1613–1640.
6. Garssen J. The effect of the summer 2003 heat wave on mortality in the Netherlands / Garssen J., Harmsen C., Beer J. // *Eurosurveillance*. – 2005. – V. 10. – № 7–9. – P. 165–167.
7. Yang X. The urban cool island phenomenon in a high-rise high-density city and its mechanisms / Yang, X., Li, Y., Luo, Z., & Chan, P. W. // *International Journal of Climatology*. – 2017. – V. 37. – № 2. – P. 890–904.
8. Arnfield A. J. Two decades of urban climate research: a review of turbulence, exchanges of energy and water, and the urban heat island / Arnfield A. J. // *International journal of climatology*. – 2003. – V. 23. – № 1. – P. 1–26.
9. Oke T. R. Simulation of surface urban heat islands under 'ideal' conditions at night Part 2: Diagnosis of causation / Oke, T. R., Johnson, G. T., Steyn, D. G., & Watson, I. D. // *Boundary-Layer Meteorology*. – 1991. – V. 56. – № 4. – P. 339–358.
10. Georgakis C. Studying the effect of «cool» coatings in street urban canyons and its potential as a heat island mitigation technique / Georgakis C., Zoras S., Santamouris M. // *Sustainable Cities and Society*. – 2014. – V. 13. – P. 20–31.
11. Rosenfeld A. H. Cool communities: strategies for heat island mitigation and smog reduction / Rosenfeld, A. H., Akbari, H., Romm, J. J., & Pomerantz, M. // *Energy and Buildings*. – 1998. – V. 28. – № 1. – P. 51–62.
12. Mochida A. Prediction of wind environment and thermal comfort at pedestrian level in urban area / Mochida A., Lun I. Y. F. // *Journal of wind engineering and industrial aerodynamics*. – 2008. – V. 96. – № 10–11. – P. 1498–1527.
13. Offerle B. Temporal variations in heat fluxes over a central European city centre / Offerle, B., Grimmond, C. S. B., Fortuniak, K., Klysik, K., & Oke, T. // *Theoretical and applied climatology*. – 2006. – V. 84. – № 1–3. – P. 103–115.
14. Mei S. J. Thermal buoyancy driven canyon airflows inside the compact urban blocks saturated with very weak synoptic wind: Plume merging mechanism / Mei, S. J., Hu, J. T., Liu, D., Zhao, F. Y., Li, Y., Wang, H. Q. // *Building and Environment*. – 2018. – V. 131. – P. 32–43.
15. Chernetskaya-Beletskaya N. Study on the coal-water fuel pipeline transportation taking into account the granulometric composition parameters / N. Chernetskaya-Beletskaya, A. Rogovyi, A. Shvornikova, I. Baranov, M. Miroshnikova, N. Bragin // *International Journal of Engineering & Technology*. – № 7 (4.3). – 2018. – P. 240–245.
16. Сємин Д. А. Математическое моделирование рабочих процессов безроторных центробежных насосов / Д. А. Сємин, А. С. Роговой // *Вісник СНУ ім. В. Даля. – Луганськ: Вид-во Східноукр. нац. ун-ту ім. В. Даля*. – № 5 (159). – Ч.1 – 2011. – С. 338–344.
17. Menter F. R. Two-Equation Eddy-Viscosity Turbulence Models for Engineering Applications / F. R. Menter // *AIAA Journal*. – 1994. – V. 32 (8). – P. 1598–1605.
18. Rogovyi A. Energy performances of the vortex chamber supercharger / A. Rogovyi // *Energy*. – № 163. – 2018. – P. 52–60.
19. Menter F. R. Zonal Two Equation k- $\omega$  Turbulence Models for Aerodynamic Flows / F. R. Menter // *AIAA Paper*, – 1993. – P. 2906–2920.
20. Rogovyi A. Use of detached-eddy simulation method (DES) in calculations of the swirled flows in vortex apparatuses / A. Rogovyi // *Teka Komisji Motoryzacji i Energetyki Rolnictwa*. – 2016. – Vol. 16. – № 3. – P. 57–62.
21. Rogovyi A. Application of the similarity theory for vortex chamber superchargers / A. Rogovyi, S. Khovansky // *IOP Conf. Series: Materials*

- Science and Engineering – № 233 (2017). – 2017. – pp. 012011.
22. Tominaga Y. AIJ guidelines for practical applications of CFD to pedestrian wind environment around buildings /Tominaga, Y., Mochida, A., Yoshie, R., Kataoka, H., Nozu, T., Yoshikawa, M., Shirasawa, T. // *Journal of wind engineering and industrial aerodynamics*. – 2008. – V. 96. – № 10–11. – P. 1749–1761.
- ### References
1. Blocken B. (2015) Computational Fluid Dynamics for urban physics: Importance, scales, possibilities, limitations and ten tips and tricks towards accurate and reliable simulations. *Building and Environment*, 91, 219–245.
  2. Solodov V.G., Avershin A.G. (2018) Model' perenosa atmosferykh zagryaznenii v polose nasazhdenii vozle avtomobil'noi dorogi [Model of atmospheric pollution transfer in the belt of plantings near the highway]. *Avtomobil' i elektronika. Sovremennye tekhnologii*, 13, 98–107. <http://veit.khadi.kharkov.ua/article/view/151289/150287> [in Russian].
  3. Solodov V.G., Avershin A.G. (2018) Perenos primesi v prizemnom sloe avtomobil'noi dorogi v usloviyakh bokovoi vetrovoi epyury [The transfer of impurities in the surface layer of the road in the conditions of the lateral wind epyure]. *Naukovi pratsi Mizhnarodnoyi naukovo-praktychnoyi konferentsiyi «Novitni tekhnolohiyi rozvytku avtomobil'noho transportu»*, 16-19 zhovtnya 2018 r., m. Kharkiv. Kharkiv: «FORT», 325–328 [in Russian].
  4. Hedquist B.C., Brazel A.J. (2014) Seasonal variability of temperatures and outdoor human comfort in Phoenix, Arizona, USA. *Building and Environment*, 72, 377–388.
  5. Toparlar, Y., Blocken, B., Maiheu, B., Van Heijst, G. J. F. (2017) A review on the CFD analysis of urban microclimate. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 80, 1613–1640.
  6. Garssen J., Harmsen C., Beer J. (2005) The effect of the summer 2003 heat wave on mortality in the Netherlands. *Eurosurveillance*, 10 (7–9), 165–167.
  7. Yang, X., Li, Y., Luo, Z., & Chan, P. W. (2017) The urban cool island phenomenon in a high-rise high-density city and its mechanisms. *International Journal of Climatology*, 37 (2), 890–904.
  8. Arnfield A. J. (2003) Two decades of urban climate research: a review of turbulence, exchanges of energy and water, and the urban heat island. *International journal of climatology*, 23 (1), 1–26.
  9. Oke, T. R., Johnson, G. T., Steyn, D. G., & Watson, I. D. (1991) Simulation of surface urban heat islands under 'ideal' conditions at night Part 2: Diagnosis of causation. *Boundary-Layer Meteorology*, 56 (4), 339–358.
  10. Georgakis C., Zoras S., Santamouris M. (2014) Studying the effect of «cool» coatings in street urban canyons and its potential as a heat island mitigation technique. *Sustainable Cities and Society*, 13, 20–31.
  11. Rosenfeld, A. H., Akbari, H., Romm, J. J., & Pomerantz, M. (1998) Cool communities: strategies for heat island mitigation and smog reduction. *Energy and Buildings*, 28(1), 51–62.
  12. Mochida A., Lun I. Y. F. (2008) Prediction of wind environment and thermal comfort at pedestrian level in urban area. *Journal of wind engineering and industrial aerodynamics*, 96 (10–11), 1498–1527.
  13. Offerle, B., Grimmond, C. S. B., Fortuniak, K., Kłysik, K., & Oke, T. (2006) Temporal variations in heat fluxes over a central European city centre. *Theoretical and applied climatology*, 84 (1–3), 103–115.
  14. Mei, S. J., Hu, J. T., Liu, D., Zhao, F. Y., Li, Y., Wang, H. Q. (2018) Thermal buoyancy driven canyon airflows inside the compact urban blocks saturated with very weak synoptic wind: Plume merging mechanism. *Building and Environment*, 131, 32–43.
  15. Chernetskaya-Beletskaya N., Rogovyi A., Shvornikova A., Baranov I., Miroshnikova M., Bragin N. (2018) Study on the coal-water fuel pipeline transportation taking into account the granulometric composition parameters. *International Journal of Engineering & Technology*, (4.3), 240–245.
  16. Syomin D.O., Rogovyi A.S. (2011) Matematicheskoe modelirovanie rabochikh protsessov bezrotornykh tsentrobezhnykh nasosov [Mathematical modeling of centrifugal pump without a rotor working process]. *Visnyk SNU im. V.Dalya. Luhans'k*, 5 (159 Ch.1), 338–344 [in Russian].
  17. Menter F.R. (1994) Two-Equation Eddy-Viscosity Turbulence Models for Engineering Applications. *AIAA Journal*, 32(8), 1598–1605.
  18. Rogovyi A. (2018) Energy performances of the vortex chamber supercharger. *Energy*, 163, 52–60.
  19. Menter F.R. (1993) Zonal Two Equation k- $\omega$  Turbulence Models for Aerodynamic Flows. *AIAA Paper*, 2906–2920.
  20. Rogovyi A. (2016) Use of detached-eddy simulation method (DES) in calculations of the swirled flows in vortex apparatuses. *Teka Komisji Motoryzacji i Energetyki Rolnictwa*, 16(3), 57–62.
  21. Rogovyi A., Khovansky S. (2017) Application of the similarity theory for vortex chamber superchargers. *IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering*, 233, 012011.
  22. Tominaga, Y., Mochida, A., Yoshie, R., Kataoka, H., Nozu, T., Yoshikawa, M., Shirasawa, T. (2008) AIJ guidelines for practical applications of CFD to pedestrian wind environment around



buildings. *Journal of wind engineering and industrial aerodynamics*, 96 (10–11), 1749–1761.

**Роговий Андрій Сергійович**<sup>1</sup>, д.т.н., проф. кафедри теоретичної механіки та гідравліки, тел. +38-057-707-37-30, e-mail: [asrogovoy@ukr.net](mailto:asrogovoy@ukr.net).

<sup>1</sup>Харківський національний автомобільно-дорожній університет, 61002, Україна, м. Харків, вул. Ярослава Мудрого, 25.

#### Исследование эффекта теплового острова в городе Харьков

**Аннотация.** На основе численного моделирования уравнений течения воздуха, уравнений теплопереноса с учетом солнечной радиации исследовано проявление эффекта «теплового городского острова» на примере участка городской застройки г. Харькова. Получены картины изменения температуры воздуха в разное время в течение суток.

**Ключевые слова:** тепловой городской остров, теплоперенос, городская застройка, модель турбулентности, солнечная радиация.

**Роговой Андрей Сергеевич**<sup>1</sup>, д.т.н., проф. кафедры теоретической механики и гидравлики, тел. +38-057-707-37-30, e-mail: [asrogovoy@ukr.net](mailto:asrogovoy@ukr.net).

<sup>1</sup>Харьковский национальный автомобильно-дорожный университет, 61002, Украина, г. Харьков, ул. Ярослава Мудрого, 25.

#### Investigation of the effect of a thermal island in Kharkiv

**Abstract. Problem.** One of the main problems that attracts the attention of researchers is a change in the urban microclimate, which is commonly referred to as the «effect of the urban heat island». Such an effect has already been investigated in many cities, but for cities in post-Soviet countries they have not yet been conducted. **Goal.** The goal of this work is to detect the effect of the heat island in Kharkiv and its research. **Methodology.** A mathematical modeling was carried out to evaluate design decisions aimed at

improving the heat island's appearance in the city, including simulation of air flow, heat transfer and radiation equation. The flow of buildings and constructions within the city with allowance for heat transfer is characterized by unsteadiness, energy non-equilibrium, and large-scale diffusion, which is conditioned by the presence of large coherent structures. The calculation is made on the basis of solving the non-stationary Reynolds-averaged Navier–Stokes equations. **Results.** The picture of changes in the temperature of air at different times during the day is obtained. The confirmation of the presence of the effect of the "heat island" in Kharkiv, with a temperature increase of 2–4 °C, in comparison with the rural, has been obtained. The influence of roughness on the patterns of the flow in the field of urban development is analyzed. The roughness was given by the value of  $k_s = 29,6$  m. There are changes in temperature near the surface of the earth and buildings, which apparently is associated with a decrease in velocity near the surfaces. **Originality.** For the first time, calculations were made for Kharkiv, which made it possible to determine the heat island manifestation and to improve the microclimate research. **Practical value.** Mathematical modeling of heat transfer processes taking into account solar radiation allows us to investigate the interrelated problems of urban physics. In particular, the optimization of air temperature in large cities should be based on the results obtained, which will allow to more accurately determine the temperature fields and reduce their impact on human health.

**Key words:** heat urban island, heat transfer, urban development, turbulence model, solar radiation.

**Rogovyi Andrii**<sup>1</sup>, professor, Doct. Of Science, Theoretical Mechanics and Hydraulics Department, tel. +38-057-707-37-30, e-mail: [asrogovoy@ukr.net](mailto:asrogovoy@ukr.net).

<sup>1</sup>Kharkiv National Automobile and Highway University, 25, Yaroslava Mudrogo str., Kharkiv, 61002, Ukraine.