

УДК 004.65+519.6

**А.В. ЯРЕМИЧ, С.Д. ІСАЄВ**

## **CFD МОДЕЛЮВАННЯ ПОШИРЕННЯ ЗАБРУДНЮЮЧИХ РЕЧОВИН АТМОСФЕРНОГО ПОВІТРЯ В СЕРЕДОВИЩІ МІСЬКОЇ ЗАБУДОВИ**

***Анотація.** Використовуючи методи CFD моделювання, польових досліджень та ГІС-аналізу, досліджені та верифіковані шляхи поширення ЗР в умовах міської забудови для 8 основних напрямків поширення повітряних мас на основі побудованої тривимірної моделі об'єкта дослідження, а також детерміновані основні особливості архітектурних форм та міського планування, які сприяють поширенню забруднюючих речовин атмосферного повітря в середовищі міської забудови.*

***Ключові слова:** CFD, моделювання поширення забруднень, урбоєкологія, вплив архітектури.*

### **Перелік скорочень та термінів**

**ЗР** – забруднюючі речовини;

**ТЗЗР** – турбулентне засмоктування забруднюючих речовин;

**КПЗР** – канал перенесення забруднюючих речовин;

**ДВЗ** – двигун внутрішнього згоряння;

**ГІС** – геоінформаційна система;

**CFD** – (Computational Fluid Dynamics) – підрозділ методів прикладної математики для розрахунку динаміки потокових процесів;

**CAD** – (Computer-aided manufacturing) – система автоматизованого проектування;

**Домен** – тривимірна розрахункова модель середовища, що вміщує в собі об'єкт дослідження та є чітко обмеженою в просторі.

### **Вступ**

Значний вплив на поширення забруднення атмосферного повітря в міському середовищі має особливість розташування та геометрія архітектурних форм. Ці фактори можуть значною мірою змінювати природний, метеорологічно передбачений напрям вітру, а отже, і змінювати прогнозовані шляхи поширення забруднюючих речовин. Існуючі в Україні методики розрахунку шляхів поширення забруднюючих речовин враховують лише напрямок вітру, а отже, не можуть давати достовірні результати в середовищі міської забудови.

Метою роботи є перевірка можливості застосування сучасного методу CFD моделювання для оцінки впливу напрямку вітру на якість повітря в прибудинкових територіях міської забудови. Таке моделювання може використовуватися, зокрема, під час планування архітектури та розташування споруд, а також для аналізу існуючих масивів міської забудови з метою розрахунку шляхів перерозподілу забруднюючих речовин.

У роботі пропонується конфігурація домену дослідження, яка дозволяє зручно проводити симуляцію дисперсії ЗР крізь об'єкт дослідження для 8 напрямків вітру, а також пропонується метод верифікації отриманих даних.

## Вхідні дані

Із заходу на схід протяжність об'єкта дослідження складає 1332 м, а з півночі на південь – 1318 м. Площа об'єкта дослідження складає 1.03 км<sup>2</sup>.

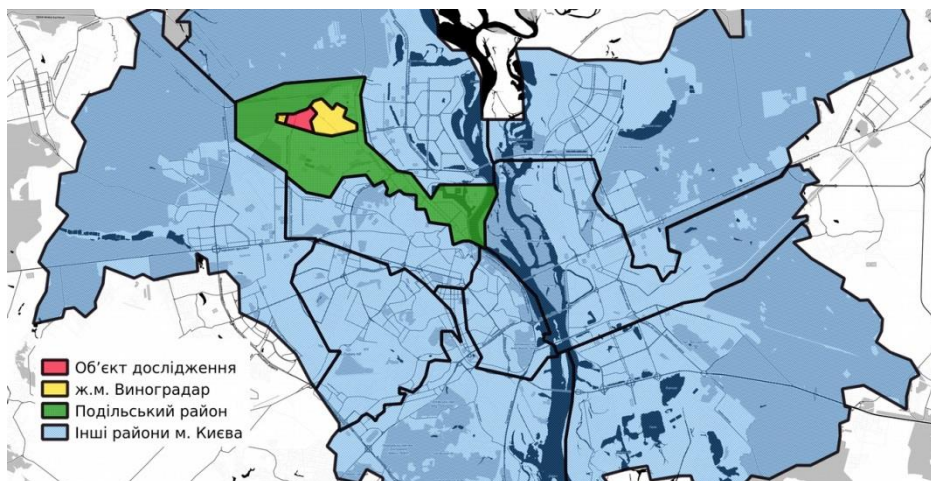


Рис. 1 – Географічне розташування об'єкта дослідження на адміністративній мапі м. Києва

**Забудова та джерела викидів.** Об'єкт дослідження налічує 143 архітектурні форми, з яких:

- вищих за 16 поверхів – 9;
- 16-поверхових – 17;
- 12-поверхових – 28;
- 9-поверхових – 13;
- забудова до 4 поверхів – 76.

До об'єкта дослідження прилягають 5 автошляхів, які є головними лінійними джерелами викидів ДВЗ:

- проспект Правди;
- проспект Георгія Гонгадзе;
- проспект Свободи;
- проспект Василя Порика;
- вулиця Маршала Гречка.

Сумарна довжина джерел лінійного викиду рівняється 6608 метрів.

Розраховано, що сумарна потужність джерел викиду становить 6,637 кг/с станом на час пік.

## CFD моделювання поширення ЗР в повітрі

CFD моделювання перерозподілу ЗР вимагає в якості робочого простору тривимірну модель об'єму, в якому знаходиться об'єкт дослідження і де відбувається симуляція перенесення мас ЗР та перерозподілу швидкості і тиску потоку [1]. Така тривимірна модель простору навколо об'єкта дослідження називається доменом дослідження. Форма домену обрана, виходячи з фактичних вимог до моделювання.

У публікації описаний процес моделювання для 8 напрямків вітру, а саме: північного, південного, західного, східного, північно-західного, північно-східного, південно-західного, південно-східного.

В якості оптимальної фігури для домену моделі обрана правильна восьмикутна призма (рис. 2), кожна грань котрої відповідає джерелу вітра окремого напрямку.

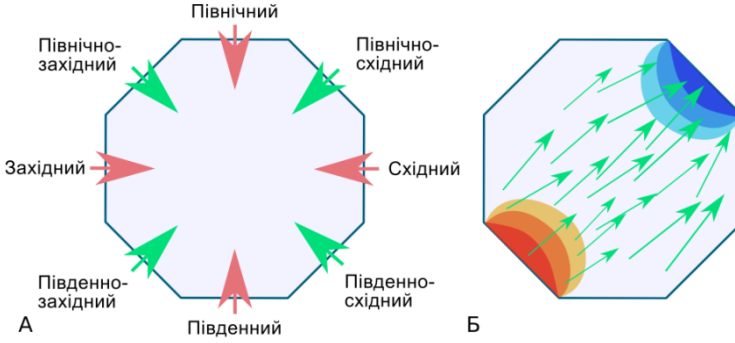


Рис. 2 – Схема восьмикутного домену моделі: А – схема напрямків вітру; Б – схема симуляції потоку повітря в домені (червоним – грань-джерело потоку повітря, вектори – потік повітря в домені, синім – область низького тиску, в яку спрямований потік повітря)

Для кожного напрямку вітру обрані 2 паралельні бічні грані восьмикутної призми (рис. 2:Б). Одна грань в такому разі в домені відповідає джерелу надлишкового тиску із заданою швидкістю повітря, а протилежна грань відповідає області від'ємного тиску, що спрямовує симульований потік повітря від однієї грані до іншої, взаємодіючи з іншими об'єктами на своєму шляху, як з перешкодами.

Для створення моделі перешкод були обрані картографічні дані об'єкта дослідження з відкритою ліцензією з ресурсу OpenStreetMaps, прив'язані до системи координат WSG-84N36 в середовищі QGIS (рис. 3) та вивантажені в CAD середовище для створення тривимірної моделі. Висоти забудови визначалися на основі інструментів Google Earth Pro [2].



Рис. 3 – Карта-схема завантажених ГІС-даних для подальшої обробки

Характеристики створеного домену:

- відстань між бічними гранями: 1316 м;
- висота: 400 м.

Після створення тривимірної моделі вона була конвертована в тривимірну триангуляційну сітку за допомогою програмного алгоритму “NETGEN 1D-2D-3D” [3] в середовищі Salome Platform (рис. 4).

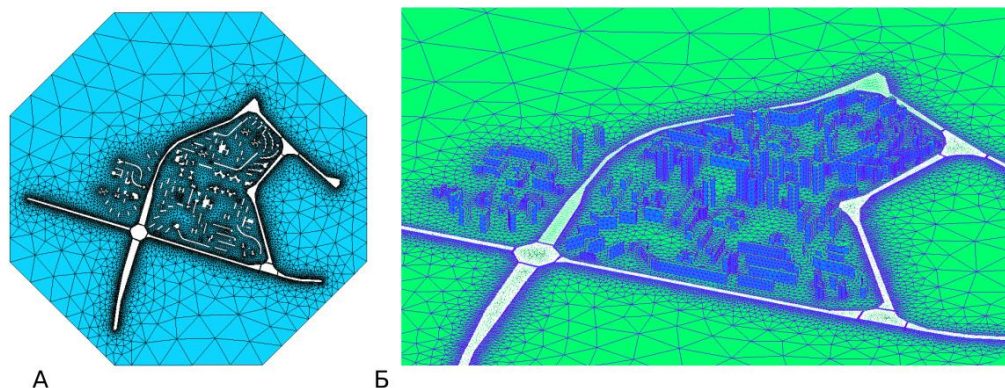


Рис. 4 – Триангульована внутрішня поверхня домену: А – вид внутрішньої поверхні зверху; Б – вид внутрішньої поверхні в перспективі

CFD моделювання поширення ЗР крізь створену модель здійснювалося в середовищі Code\_Saturne. Кожна грань являє собою обмежуючу поверхню, за якою симуляція не відбувається. Для кожного сегмента лінійного джерела забруднення були задані скалярні показники потужності викидів згідно з проведеними розрахунками на основі даних спостереження та підрахунку кількості та інтенсивності автотранспорту для кожної ділянки. Для усіх внутрішніх граней тривимірного домену, окрім граней сторін, верхньої грані, та граней доріг, був заданий коефіцієнт нерівності значенням 1 м. Цей параметр потенційно дозволяє врахувати різноманіття рельєфу, яке формується об'єктами благоустрою, зеленими насадженнями та фасадами забудови. Для моделювання була задана середня для місцевості швидкість вітру 4 м/с.

Моделювання здійснювалося в 35 кроків, еквівалентних 300 секундам поширення ЗР.

Результатом моделювання поширення ЗР стали 8 окремих наборів просторової інформації, візуалізовані у вигляді растрових зображень, які після обробки були завантажені до ГІС та прив'язані до системи координат. Кожне растрове зображення репрезентує шляхи поширення ЗР крізь забудову дослідної ділянки для кожного з 8 окремих напрямків вітру (рис. 5: А – Ж), а також містить дані про ймовірний градієнт концентрацій ЗР.



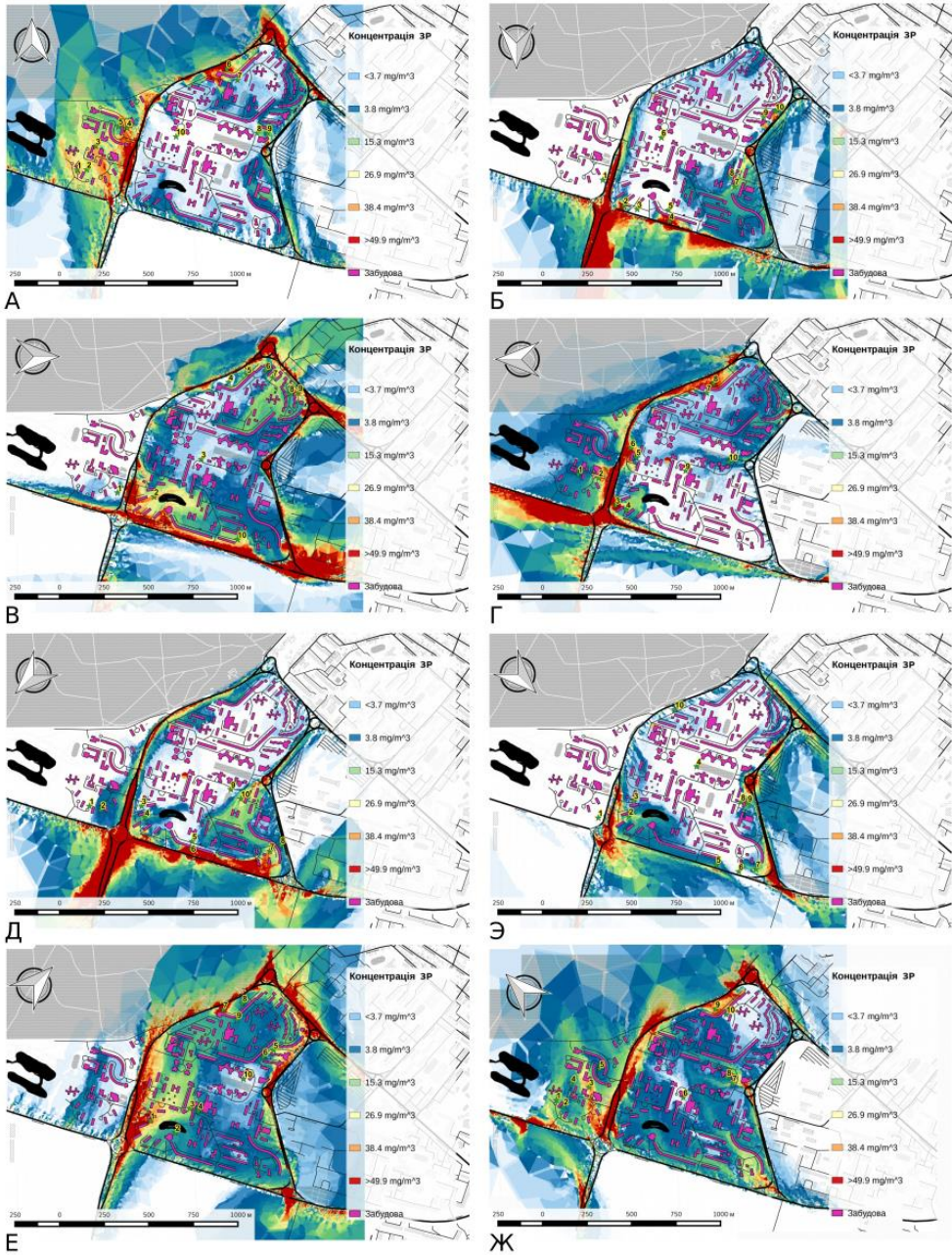


Рис. 5 – Результати CFD моделювання поширення ЗР через модель дослідної території: А – південний напрямок вітру; Б – північний напрямок вітру; В – східний напрямок вітру; Г – західний напрямок вітру; Д – південно-західний напрямок вітру; Е – південно-східний напрямок вітру; Є – північно-західний напрямок вітру; Ж – північно-східний напрямок вітру; нумеральні позначки – пункти контрольних замірів

### Верифікація результатів моделювання

Верифікація результатів дослідження здійснювалася шляхом польових досліджень.

Для даних моделювання для кожного напрямку вітру були визначені контрольні пункти замірів, по 10 для напрямку, які включали локації з максимальними та мінімальними розрахунковими концентраціями ЗР – точки контрасту. Для отримання відомостей про фактичний рівень ЗР в повітрі використовувався експериментальний моніторинговий прилад, чутливий до компонентів викидів бензинових та дизельних ДВЗ та супутніх сполук. Для замірів обиралися дні без опадів та зі швидкістю вітру близькою до 4 м/с.

Таблиця 1 – Матриця коефіцієнтів кореляційного аналізу результатів замірів з результатами моделювання

Напрямок вітру	Північний	Північно-західний	Західний	Південно-західний	Південний	Південно-східний	Східний	Північно-східний	$\Sigma$ <i>cor</i>
Органічні сполуки	0.140	0.275	0.666	0.630	0.568	0.338	0.838	0.686	4.141
Озон	0.101	-0.200	0.742	0.682	0.631	0.725	0.569	0.793	4.043
Викиди диз. ДВЗ	0.228	0.703	0.807	0.481	0.842	0.695	0.776	1.000	5.531
Викиди бенз. ДВЗ	0.564	0.357	0.409	0.717	0.806	0.770	0.770	0.689	5.083
<b><math>\Sigma</math> напрямки вітру</b>	1.033	1.136	2.624	2.510	2.847	2.528	2.952	3.168	-

Кореляційний аналіз свідчить, що найкращий збіг спостерігався за північно-східного напрямку вітру та для компонентів викидів дизельних ДВЗ.

### Вплив геометрії та схеми розташування забудови на депонування та перерозподіл ЗР

Операція над результатами моделювання здійснювалася в геоінформаційній системі QGIS за допомогою методу растрової калькуляції, який дозволяє здійснювати математичні операції за заданою формулою над растровими зображеннями як над матрицями значень. Кожна точка растру в процесі обчислень взаємодіє з точкою іншого растру, у якої ті ж самі координати, що й у точки першого растру. Результат візуалізується у вигляді растрового зображення, що зібране із сукупності обрахованих значень.

Для виявлення критичних зон забруднення, в яких викиди ДВЗ прогнозовано депонуються за будь-яких напрямків вітру, доцільно розраховувати середнє геометричне значення рівнів ЗР для усіх 8 змодельованих напрямків вітру.

Середні геометричні значення дають можливість виявити, на які ділянки території забруднення потрапляє за усіх напрямків вітру.

Растрова калькуляція середнього геометричного проведена в середовищі QGIS за формулою:

$$R_{\text{геом}} = \sqrt[8]{N * W * E * S * NW * NE * SW * SE}$$

де:  $R_{\text{геом}}$  – результатне растрове зображення;

N – растр результатів моделювання для північного напрямку вітру;

W – растр результатів моделювання для західного напрямку вітру;

E – растр результатів моделювання для східного напрямку вітру;

S – растр результатів моделювання для південного напрямку вітру;

NW – растр результатів моделювання для північно-західного напрямку вітру;

NE – растр результатів моделювання для північно-східного напрямку вітру;

SW – растр результатів моделювання для південно-західного напрямку вітру;

SE – растр результатів моделювання для південно-східного напрямку вітру.

Результати візуалізовані в зручній для сприйняття палітрі та надані на рис. 6.

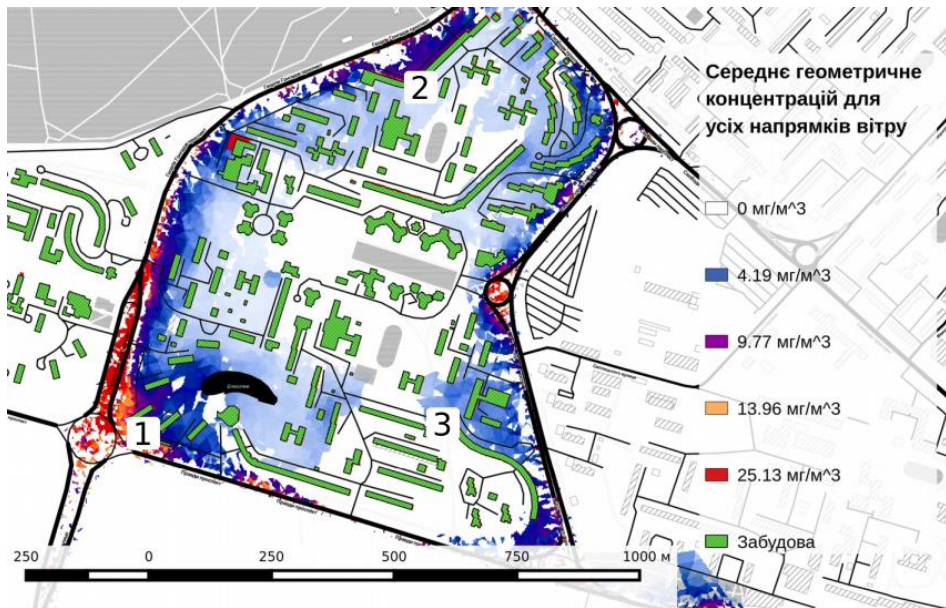


Рис. 6 – Середні геометричні значення поширення забруднення:

- 1 – сукупність будинків на розі пр. Правди та пр. Гонгадзе; 2 – комплекс будинків за адресою пр. Гонгадзе 28, 30, 32А; 3 – комплекс пунктів продажу за адресою пр. Порика 13, 13А, 13Б, 13В

Результати розрахунків вказують на наявність зон, забруднення яких відбувається за будь-яких напрямків вітру. Найбільший інтерес являє сукупність житлової забудови на розі пр. Правди та пр. Гонгадзе (рис. 6:1). Через особливості планування території спостерігається явище засмоктування забруднення в середину мікрорайону за рахунок утворення в його центрі зони пониженого тиску, яка створюється внаслідок дії аеродинамічних законів, що описуються рівняннями Нав'є – Стокса.

Це пояснюється тим, що швидкість вітру на околицях мікрорайону є вищою, ніж в його середині, за умови, що будинки на околиці перпендикулярні до напрямку вітру. Це створює ефект засмоктування повітряних мас з центру району до його периферії зі сторін бічного обтікання. У свою чергу повітряні маси разом з ЗР з підвітряного від району боку засмоктуються в середину району, заміщаючи собою повітряні маси, що перемістилися до зовнішніх меж району, які обтікаються вітром.



Також характерним є комплекс з лінійно розташованих будинків за адресою пр. Гонгадзе 28, 30, 32А (рис. 6). Через особливість форми даний комплекс за більшості напрямків вітру або ініціює засмокування забруднень у турбулентний вихор з підвітряного боку комплексу, або ж депонує ЗР внаслідок прямого їх перенесення до фронтальної частини комплексу.

Результати аналізу свідчать, що мешканці житлових комплексів в зонах 1 та 2 перебувають під перманентним впливом ЗР ДВЗ.

Окрім зон житлової забудови, які перебувають під перманентним впливом ЗР, також присутні зони, недосяжні для забруднення за будь-яких напрямків вітру.

В якості рівняння для обчислення використана формула середніх арифметичних растрових значень ЗР для усіх напрямків вітру.

Формула середнього арифметичного растрової калькуляції:

$$R_{\text{арифм}} = \frac{(N + W + E + S + NW + NE + SW + SE)}{8}$$

де:  $R_{\text{арифм}}$  – результатне растрове зображення;

N – растр результатів моделювання для північного напрямку вітру;

W – растр результатів моделювання для західного напрямку вітру;

E – растр результатів моделювання для східного напрямку вітру;

S – растр результатів моделювання для південного напрямку вітру;

NW – растр результатів моделювання для північно-західного напрямку вітру;

NE – растр результатів моделювання для північно-східного напрямку вітру;

SW – растр результатів моделювання для південно-західного напрямку вітру;

SE – растр результатів моделювання для південно-східного напрямку вітру.

Результати візуалізовані в зручній для сприйняття палітрі та надані на рис. 7.

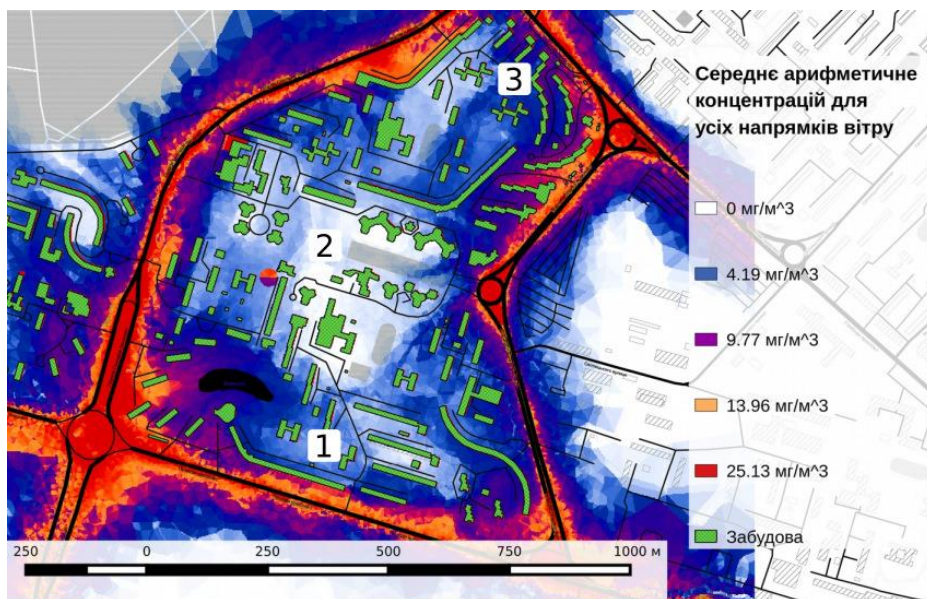


Рис. 7 – Середні арифметичні значення поширення забруднення: 1 – сукупність будинків за адресою пр. Гонгадзе 7 та 9; 2 – центр мікрорайону, простір за житловим комплексом за адресою пр. Гонгадзе 28, 30, 32А; 3 – простір між будинками за адресою пр. Правди 80А та 80Б



У результаті розрахунків виявилось, що найбільш захищеним від впливу забруднень за всіх напрямків вітру є центр мікрорайону, де знаходиться середня школа № 3, а також внутрішнє подвір'я сукупності житлових будинків за адресами пр. Гонгадзе 7 та 9. Разом з тим пункти 3 та 4 також показують прогнозовано невисокий рівень забруднення.

В описаних випадках прогнозується явище майже повної ізолюваності. Також яскраво виражений ефект ізолюваності від ЗР відзначається для сторін будинків, позиційованих до центру мікрорайону.

### Обговорення результатів

Внаслідок обробки та ПС-аналізу результатів моделювання виявлені певні особливості, що сприяють депонуванню та перерозподілу ЗР в середовищі міської забудови.

Змодельовано, що ефект ТЗЗР [4][5] найчастіше проявлявся для витягнутих 9-поверхових архітектурних форм, паралельних джерелу забруднення.

Вертикальний переріз результатів моделювання та схематичне зображення турбулентного вихору, що є причиною ТЗЗР, проілюстровані на рис. 7.

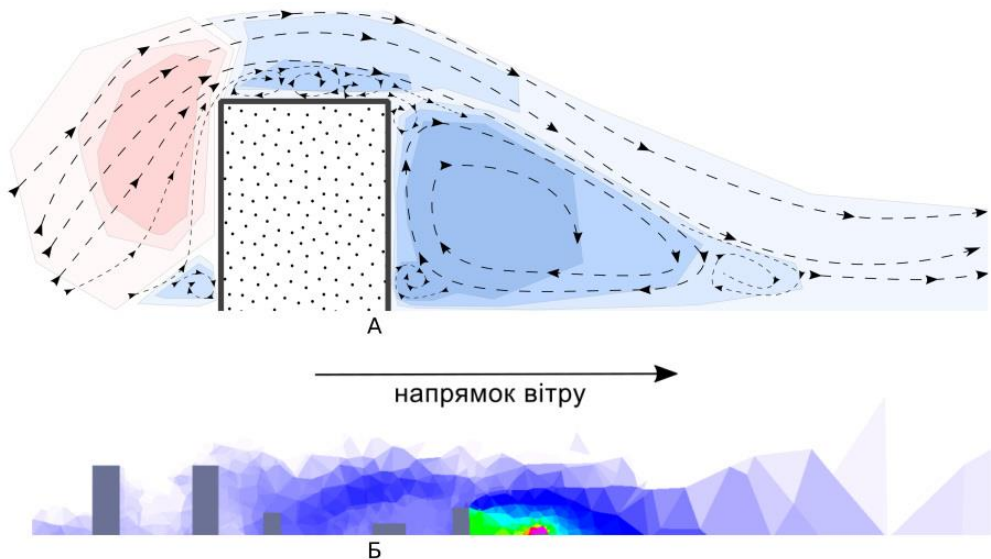


Рис. 7 – Депонування ЗР з підвітряного боку архітектурних форм: А – ефект виникнення турбулентного вихра з підвітряного боку архітектурної форми (стрілками вказаний напрям руху потоків повітря; червоним кольором зображена зона високого тиску; синім – зона низького тиску); Б – вертикальний переріз результатів моделювання для ефекту ТЗЗР біля будинків за адресою пр. Гонгадзе 28, 30, 23 для південного напрямку вітру (червоним кольором зображені к-ції вищі від  $50 \text{ мг/м}^3$ , білим – к-ції нижчі від  $3.9 \text{ мг/м}^3$ )

Пришвиджені потоки повітря утворюються згідно з Каньйонним ефектом [4][5] вздовж довгих прямих вулиць, оточених забудовою. За умов виникнення в середині масиву забудови області низького тиску створюються передумови, за яких повітряні маси з підвітряного боку від масиву

засмоктуються всередину через утворений будинками портал, компенсуючи область низького тиску всередині.

Слід зазначити, що таке розташування архітектурних форм також ініціює поширення ЗР і за фронтального напрямку вітру, адже не створює перешкод і створює шлюз, через який ЗР з джерела забруднення безпосередньо переносяться вглиб житлового масиву. Особливо інтенсивне пряме перенесення спостерігається у випадках, коли торці будинків знаходяться біля пожвавленого перехрестя. За таких умов, якщо напрям руху вітру співпадає з напрямком лінійного джерела забруднення, то через шлюз з будинків відбувається інтенсивне перенесення ЗР, що збираються повздовжніми потоками повітря з автошляхів.

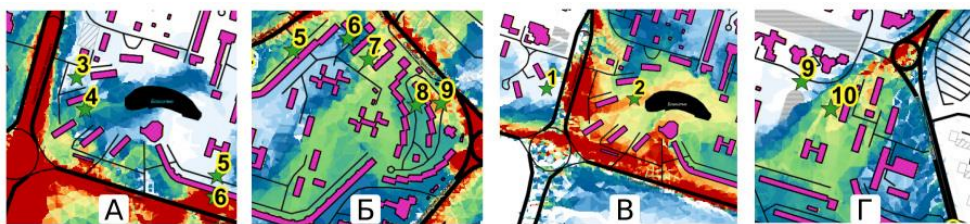


Рис. 8 – Вплив плану розташування будинків на перерозподіл ЗР: А – південно-західне засмоктання ЗР за північно-східного вітру; Б – північно-східне засмоктання ЗР за західного напрямку вітру; В – пряме західне перенесення ЗР; пряме північно-східне перенесення ЗР; (нумеральні позначки – пункти контрольних замірів)

Явища депонування забруднення в прибудинковій зоні найбільше помітні для видовжених будинків, що знаходяться паралельно джерелу забруднення (рис. 8.А, 8.Б). За таких випадків ЗР депонується через явище ТЗЗР за умови, що лінійне джерело забруднення знаходиться з підвітряного від будівлі боку. Проте найбільшому депонуванню за будь-яких напрямків вітру сприяє вигнута форма будівлі, чому свідчить результат середнього геометричного від усіх результатів моделювання (рис. 6).

## Висновки

1. Доведено, що результати CFD моделювання поширення ЗР корелюють з результатами замірів, а отже, метод моделювання є дієвим.
2. Виявлено, що найбільше ЗР депонується в повітрі вздовж видовжених 9-поверхових комплексів забудови, що мають вигин кінцями в бік джерела ЗР.
3. Встановлено, що поширенню ЗР в середовищі міської забудови сприяють комплекси паралельно розташованої забудови, що позиційовані до автошляхів бічними фасадами.

## СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Yucong MIAO. Simulating Urban Flow and Dispersion in Beijing by Coupling a CFD Model with the WRF Model [Електронний ресурс] / MIAO Yucong, LIU Shuhua, CHEN Bicheng [and other] // *Advances in Atmospheric Sciences*. – 27.01.2013. – № 30. – С. 1663–1678. – режим доступу: <http://www.iapjournals.ac.cn/aas/article/2013/0256-1530-30-1663.html>. – дата звернення: 03.03.2015.

2. Ghaffarian Salar. Automatic building detection based on supervised classification using high resolution google earth images [Електронний ресурс] / Salar Ghaffarian, Saman Ghaffarian // The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences. – 7.09.2014. – № 3.– С. 101–106.– режим доступу: <http://goo.gl/ztnCBD>.– дата звернення: 20.04.2015.
3. Schoberl Joachim. NETGEN An advancing front 2D/3D-mesh generator based on abstract rules [Електронний ресурс] / Joachim Schoberl // Computing and Visualization in Scienc. – 21.01.1997. – № 1. – С. 41–52. – режим доступу: [http://www.asc.tuwien.ac.at/~schoeberl/wiki/publications/netgen\\_org.pdf](http://www.asc.tuwien.ac.at/~schoeberl/wiki/publications/netgen_org.pdf). – дата звернення: 20.04.2015.
4. Shishegar Nastaran. Street Design and Urban Microclimate: Analyzing the Effects of Street Geometry and Orientation on Airflow and Solar Access in Urban Canyons [Електронний ресурс] / Nastaran Shishegar // Journal of Clean Energy Technologies. – 01.02.2014. – № 1. – С. 52–55. – режим доступу: <http://www.jocet.org/papers/013-J10008.pdf>. – дата звернення: 18.04.2015.
5. Т. R. Оке. Street Design and Urban Canopy Layer Climate [Електронний ресурс] / Оке Т.Р. // Energy and Buildings. – 22.03.1988. – № 11. – С. 103–113. – режим доступу: <http://goo.gl/5IymC1>. – дата звернення: 23.03.2015.

*Стаття надійшла до редакції 02.12.2016*