ISSN 2224-087X. Електроніка та інформаційні технології. 2024. Випуск 27. С. 118–131
Electronics and information technologies. 2024. Issue 27. P. 118–131

УДК 004.89 DOI: https://doi.org/10.30970/eli.27.9

РОЗРОБКА МОДЕЛІ ВИМІРЮВАННЯ ЯКОСТІ ПОВІТРЯ

Л. Монастирський, В. Гура, О. Островська

Львівський національний університет імені Івана Франка,
вул. Драгоманова, 50, 79005 Львів, Україна
volodymyr.gura@lnu.edu.ua

У зв'язку зі зростанням проблематики екологічного стану атмосфери, особливе значення набуває оцінка та моніторинг якості повітря. Робота описує процес розробки математичної моделі, яка призначена для вимірювання та аналізу рівнів забруднення повітря, ґрунтуючись на даних з датчиків забруднення та метеорологічних вимірювань.

Робота розпочинається з уведення читача у сучасний стан проблеми забруднення повітря та необхідність використання науково-обґрунтованих методів для його оцінки. Далі представлено різноманіття існуючих методів вимірювання різних забруднювачів, серед яких оксиди азоту, озон, вуглекислий газ, пил та інші, та описано, як ці дані можуть бути зібрані та систематизовані для подальшого аналізу.

Основну частину дослідження приділено розробці математичної моделі, в якій використовуються диференціальні рівняння для опису процесів розповсюдження забруднювачів у атмосфері, статистичні методи для оцінки взаємозв'язків і числові методи для оптимізації моделі. Також розглядаються підходи для інтеграції великої кількості даних з різних джерел у єдину математичну модель.

Подальше увагу зосереджено на процедурах валідації та калібрування моделі, які критично важливі для забезпечення точності прогнозів моделі. Представлено методологію тестування моделі за допомогою реальних даних, що стосуються якості повітря, та описано процеси налаштувань параметрів моделі для забезпечення максимальної точності результатів.

У заключній частині підкреслюється значущість розвитку математичних моделей для покращення систем екологічного моніторингу. Наголошується, що розроблена модель може послужити важливим інструментом для ухвалення рішень у сфері охорони повітря та розробки ефективних заходів протидії негативному впливу забруднення на довкілля та здоров'я населення. Також розглядаються аспекти подальшого удосконалення та оновлення моделі у світлі нових наукових даних та змін у екологічному законодавстві.

Ключові слова: математичне моделювання, вимірювання якості повітря, PM2.5, AQI, статистичний аналіз, числові методи, моніторинг забруднення, атмосферні процеси, датчики забруднення.

1.Вступ

Промисловий розвиток та інтенсифікація людської діяльності привели до значного зростання екологічних проблем, зокрема до погіршення якості атмосферного повітря, яке виходить за межі безпечних рівнів у багатьох регіонах світу. Забруднення повітря не лише становить пряму загрозу здоров'ю людей, але й негативно впливає на біорізноманіття, змінює кліматичні умови та спричинює зниження продуктивності сільського господарства. Сучасні методи оцінки та вимірювання параметрів якості повітря відіграють критично важливу роль у боротьбі з цією глобальною проблемою.

© Монастирський Л., Гура В.,Островська О. 2024

Передусім, точність та надійність вимірювальних систем потребують підкріплення ефективними математичними моделями, які би дозволили не лише вимірювати, але й прогнозувати рівні забруднювачів, аналізувати складні процеси, що відбуваються в атмосфері, і визначати наслідки цих процесів для екосистем і здоров'я людини.

Основною метою даної роботи є розробка математичної моделі, яка забезпечує комплексний підхід до вимірювання якості повітря, включаючи визначення концентрацій широкого спектру забруднюючих речовин, таких як вуглекислий газ, азотні та сірчані оксиди, озон, леткі органічні сполуки та підвісні тверді частинки PM2.5 та PM10. Математична модель повинна враховувати взаємодію між цими речовинами, вплив метеорологічних умов та географічних характеристик території на процеси розсіювання забруднювачів у повітрі.

Для розробки такої моделі використовуються різні математичні методи, включаючи диференціальні рівняння, статистичний аналіз, чисельні методи, а також методи обробки великих даних. У цій роботі ми розглянемо докладніше кожен з цих елементів, а також процеси валідації і калібрування моделі, які забезпечують достовірність та актуальність її висновків. Кінцева ціль даного дослідження – не лише наукове розуміння процесів в атмосфері, але й розробка інструментарію для ефективного застосування на практиці, що в кінцевому рахунку повинно сприяти поліпшенню якості повітря та життя на планеті.

2. Методи та засоби реалізації

Проблема забруднення атмосферного повітря є одним із найактуальніших глобальних екологічних викликів сьогодення. Високий рівень забруднюючих речовин, що включають вуглекислий газ CO2, азотні оксиди NOx, сірчані оксиди SOx, озон O3, летючі органічні сполуки VOCs, пил PM2.5 та PM10 та інші сполуки, впливає не тільки на здоров'я людини, але й на стан навколишнього середовища. Здоров’я людини та забруднення повітря мають прямий і взаємопов'язаний вплив. Статистичні дані вказують на підвищення ризику респіраторних та серцево-судинних захворювань, а також передчасної смертності, пов'язаної з поганою якістю повітря. Вплив на екосистеми також є значним: рослини, тварини та цілі екосистеми страждають від високих рівнів забруднення, що призводить до потерпання біорізноманіття та зміни природних циклів. Крім того, зміни клімату, зумовлені зростанням концентрацій парникових газів, безпосередньо впливають на якість повітря. Приміром, підвищення температури може збільшувати утворення приземного озону, в той час як зміна схем опадів впливає на змивання забруднювачів з атмосфери [1,2,3].

Стандарти якості повітря, впроваджені різними міжнародними та національними організаціями, встановлюють допустимі рівні забруднювачів, орієнтуючись на захист здоров’я населення та навколишнього середовища. Вдосконалення систем моніторингу та оцінки якості повітря вимагає розширення розуміння процесів дисперсії та трансформації забруднюючих речовин у атмосфері, а також нарощування технологічних і аналітичних можливостей. Оцінка джерел забруднення, їхніх викидів, механізмів хімічних перетворень і впливу на здоров’я людей та екологічні системи є ключовими елементами, які мають бути враховані при розробці ефективних стратегій управління якість повітря. Це включає збір даних про викиди, вимірювання концентрацій забруднювачів, моделювання їхнього поширення у повітрі та оцінку впливу цих забруднювачів на різні системи.

Таким чином, можна підсумувати, що якість повітря є складною екологічною проблемою, що залежить від чинників, як-от промисловість, транспорт та зміни клімату. Забезпечення адекватного реагування на цю проблему необхідне для збереження здоров'я людей та стабільності екосистем, що вимагає інтегрованих підходів до моніторингу, аналізу та управління якістю атмосферного повітря на місцевому та глобальному рівнях.

Для вимірювання забруднювачів повітря розроблено цілий ряд технік та методологій, які здатні визначати концентрації різних забруднювачів з необхідною точністю й надійністю:

- Стандартні моніторингові станції: Найбільш традиційний метод вимірювання забруднювачів полягає у використанні стаціонарних станцій, які постійно збирають дані про концентрацію забруднювачів. Ці станції є добре обладнаними, надійними і можуть забезпечувати точні вимірювання протягом тривалого часу.
- Переносні та персональні сенсори: Такі пристрої дозволяють проводити вимірювання в тих місцях, де стаціонарна моніторингова інфраструктура відсутня або може бути використана для досліджень індивідуального впливу забруднення на людину.
- Спектроскопічні методи: Як-то спектрофотометрія, дозволяють вимірювати концентрації забруднювачів за характерними спектрами поглинання, розсіяння або емісії.
- Хроматографічні методи: Газова хроматографія (ГХ) та рідинна хроматографія високої продуктивності (РХВП) широко застосовуються для виявлення та кількісного визначення органічних забруднювачів у повітрі, таких як леткі органічні з'єднання VOCs.
- Мас-спектрометрія: Цей метод дозволяє не тільки визначити концентрацію забруднювачів, але й встановити їх хімічну структуру за масою іонів, створених з молекул.
- Біомоніторинг: Використання рослин або інших біологічних організмів, які реагують на присутність певних забруднюючих речовин, може надати важливу інформацію про якість атмосферного повітря.
- Фізичні методи вимірювання: включають в себе застосування різноманітних датчиків, які можуть реєструвати рівні пилу, частинок сажі або інших забруднювачів за допомогою лазерів або фотоелектричних сенсорів.
- Математичне моделювання: Комп'ютерні моделі дозволяють прогнозувати рівні забруднення на основі існуючих даних про викиди та метеорологічні умови. Ці методи допомагають заповнити прогалини в емпіричних даних та краще зрозуміти динаміку забруднення.

Для створення точної математичної моделі, здатної ефективно вимірювати та прогнозувати рівні забруднення повітря, потрібен набір вихідних даних. Вихідні дані можна розділити на кілька основних категорій:

- Дані про викиди забруднювачів: Це кількісні оцінки обсягу забруднювачів, які потрапляють у повітря з різних джерел, наприклад, з промислових підприємств, транспортних засобів, сільськогосподарської діяльності тощо. Ці дані включають типи забруднювачів, інтенсивність та часовий розклад викидів.

- Метеорологічні дані: Такі як температура повітря, вологість, швидкість та напрямок вітру, і атмосферний тиск. Метеорологічні умови мають великий вплив на поширення і розсіювання забруднюючих речовин у повітрі.
- Топографічні дані: Інформація про особливості ландшафту, включаючи висоту над рівнем моря, наявність рослинності, водойм, забудову та інші географічні характеристики, що можуть впливати на вітрові умови та розподіл забруднювачів.
- Хімічний склад атмосфери: Концентрації різних газів та частинок в атмосфері, які можуть взаємодіяти з первинними забруднювачами, утворюючи вторинні забруднювачі.
- Дані вимірювань: Реальні дані про концентрації забруднювачів в атмосфері, отримані з моніторингових станцій, переносних моніторів, супутникових спостережень або за допомогою інших методів збору даних.

Комбінування цих даних у моделі дозволяє створювати просторово-часові проекції, які відображають розподіл забруднюючих речовин та динаміку змін у якості повітря. Це забезпечує не тільки здатність до поточного моніторингу стану атмосфери, але й створює передумови для розробки прогностичних сценаріїв і превентивних заходів з управління якістю повітря [4,5].

Для моделювання рівнів забруднення повітря використовуються дані, які збирають з різних джерел, щоб забезпечити точність і комплексність інформації. Вихідні дані для моделі будуть зібрані з власних внутрішніх ресурсів, зокрема з DataLake, де зберігається інформація, що була накопичена протягом часу. DataLake є інструментом, що дозволяє зберігати велике різноманіття даних у первісному вигляді, які можуть використовуватися для подальших аналізів та моделювання. Крім того, модель буде включати дані із зовнішнього сервісу SaveEcobot, який є ресурсом, що збирає екологічну інформацію з різноманітних точок моніторингу навколишнього середовища. Відомості, отримані із SaveEcobot [8,9], допомагають наповнювати базу даних актуальними даними про концентрації різних екологічних показників, включаючи дані про якість повітря (див. рис. 1).

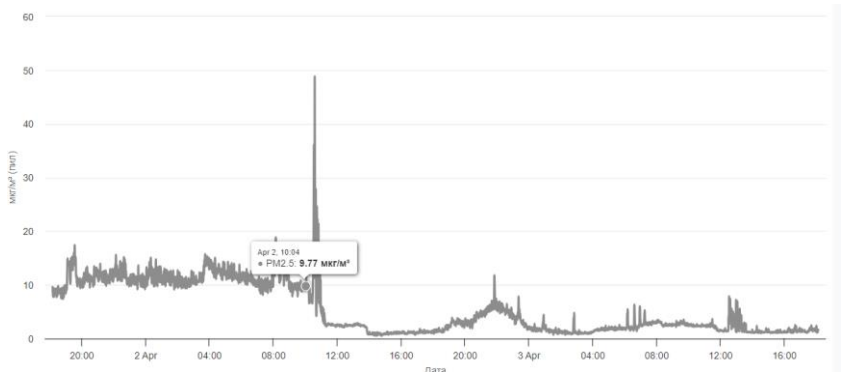

Рис. 1. Графік залежності Pm2.5(μg/m³) від часу
Fig. 1. Graph of Pm2.5 (μg/m³) versus time

Важливу роль у визначенні якості повітря відіграють емпіричні дані із сенсорів, які безперервно здійснюють вимірювання в реальному часі, зокрема, вмісту частинок PM2.5 у повітрі. Ці реальні виміри забезпечують живлення моделі найсвіжішою інформацією про поточний стан забруднення, що дозволяє швидко реагувати на будь-які зміни в рівнях забруднюючих речовин і адаптувати модель для точнішого прогнозування (див. рисунок 2).

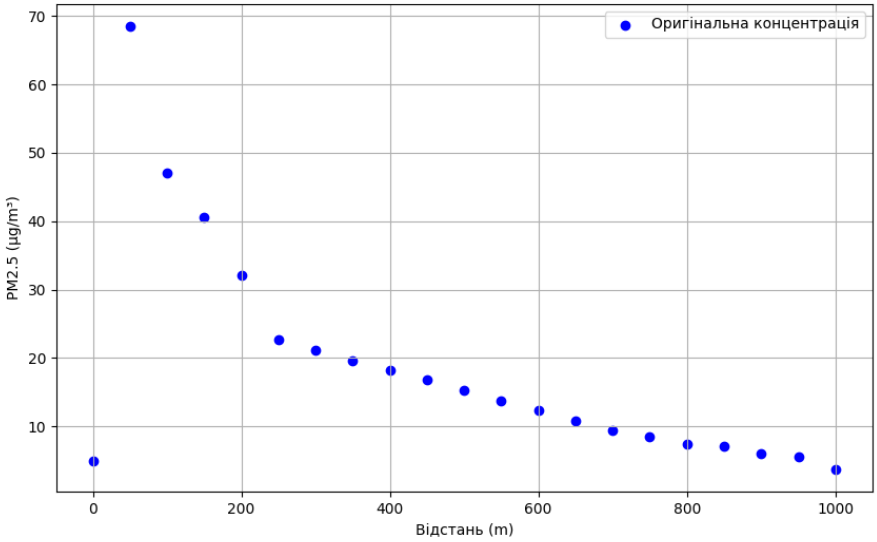

Рис. 2. Графік залежності Pm2.5(µg/m³) від відстані
Fig. 2. Graph of Pm2.5 (µg/m³) versus distance

Узагальнюючи, модель буде побудована на комбінованій базі даних, яка містить інформацію зібрану із внутрішніх ресурсів, конкретно DataLake, засоби спостереження SaveEcobot, а також з реальних даних по PM2.5, що дозволить забезпечити релевантність і точність у прогнозуванні якості повітря.

Після збору всі необхідні вихідні дані для моделювання, які включають внутрішню інформацію з DataLake, дані з сайту Saveecobot і реальні виміри забруднюючих речовин як PM2.5, наступним кроком є процес моделювання якості повітря. Щоб перейти від збору даних до аналізу та передбачення, знадобиться розглянути побудову математичної моделі, яка стане основою для системи вимірювань і прогнозувань.

Математична модель вимірювання якості повітря — це інструмент, який дозволяє нам не просто оцінювати поточний стан атмосфери, але й прогнозувати його зміни під впливом різноманітних факторів. Розробка такої моделі вимагає глибокого розуміння фізико-хімічних процесів, що відбуваються в атмосфері, та вміння точно класифікувати вплив кожної змінної.

Математичне моделювання якості повітря - це процес створення комп'ютерних моделей, котрі імітують поширення та трансформацію забруднювачів у атмосфері. Мета моделювання полягає в оцінці рівнів забруднення, прогнозуванні його змін та аналізу ефективності ініційованих управлінських заходів. Для цього використовуються різні

типи математичних моделей, кожна з яких фокусується на певних аспектах процесів у атмосфері. Приклади ключових компонентів, які включають математичні моделі:

- Розподіл джерел викидів: Описує географічне розміщення та обсяг джерел викидів забруднювачів, включаючи індивідуальні викиди від заводів, автомобілів, побутових та інших джерел.
- Метеорологічні моделі: Враховують вплив вітру, температури, сонячного випромінювання, вологості й інших погодних умов на розсіювання та осідання забруднювачів.
- Хімічні моделі реакцій: Імітують процеси хімічного перетворення забруднювачів у атмосфері, що включає реакції фотолізу, окислення та інші шляхи утворення вторинних повітряних забруднювачів, як-от озону та дрібнодисперсних часток.
- Моделі транспортування та дифузії: Спрямовані на прогнозування шляхів руху забруднювачів у атмосферному просторі, враховуючи турбулентність, адвекцію (транспортування повітряних мас) та дифузійні процеси.
- Моделі осадження: Експлікують механізми, через які забруднювачі видаляються з атмосфери, включаючи власне осадження під дією гравітації, а також змивання дощем.

Якісь моделі можуть включати також параметри, що описують взаємодію забрудненого повітря з різними видами забудови і приземною рослинністю, які можуть істотно впливати на розподіл і концентрацію забруднювачів. Розробка математичних моделей, як правило, здійснюється ітераційно – з поступовим додаванням даних та уточненням моделі за результатами вимірювань якості повітря. Це дозволяє підвищити точність прогнозів моделі перед її використанням для прийняття рішень у сфері охорони довкілля і оцінки ефекту впливу різних політичних і технологічних ініціатив на стан атмосферного повітря.

У моделюванні якості повітря, після вибудовування загальної математичної моделі, яка враховує розподіл джерел викидів, метеорологічні фактори, хімічні реакції і транспортування забруднювачів, наступним етапом є детальніший аналіз та моделювання окремих компонентів цього складного процесу.

Одним із таких компонентів, який має суттєве значення для поширення забруднювачів у середовищі, є турбулентна дифузія. Турбулентність - це випадкові, неправильні коливання швидкості газу чи рідини у просторовому і часовому вимірах, які відбуваються на різних шкалах і виникають через коливання динамічних процесів у атмосфері.

Модель турбулентної дифузії фокусується на описі того, як забруднювачі перемішуються і розсіюються в атмосфері під впливом цих турбулентних рухів. Ця модель використовує диференціальні рівняння для розподілу забруднювачів в просторі і часі, виходячи з параметрів викидів, оточення і метеорологічних умов. Залежно від масштабу і цілей моделювання, можуть бути застосовані різні підходи до турбулентної дифузії, включаючи прості параметричні моделі, які використовують узагальнені коефіцієнти турбулентної дифузії, і більш складні моделі, що розраховують просторову змінність турбулентності на основі фізичних законів механіки рідин та газів.

3. Результати та їх аналіз

На даних, отриманих від існуючих сенсорів, можна розробляти алгоритми машинного навчання для передбачення майбутніх змін в рівнях забруднюючих речовин, а також для швидкого виявлення незвичних відхилень. Ці відхилення можуть вказувати на екологічні інциденти, промислові проблеми з викидами або інші серйозні порушення якості повітря. Для створення ефективної моделі необхідно мати наступні дані:

- вимірювання рівнів токсичних речовин у повітрі;
- екстерні метеорологічні дані, такі як температура повітря, вологість, вітрові умови;
- інформація про антропогенні джерела викидів, включно з транспортом і промисловими об'єктами.

Алгоритм машинного навчання для прогнозування якості повітря можна зобразити як функцію, де вхідними параметрами є час, поточні погодні умови та історія спостережень, а результатом є прогнозовані рівні забруднень. Для опису цього використовують рівняння у формі:

$$\frac{dC(t)}{dt} = f(C(t), t, \theta) + \epsilon h(t, \theta)$$

де $C(t)$ - стан системи у вигляді якості повітря, t - час, θ - параметри системи, що відносяться до джерел викидів та метеорологічним факторам, а ϵ - член, який враховує помилки або випадкові коливання даних. Розв'язання цих рівнянь може служити основою для прогнозів типових рівнів забруднень або для виявлення аномалій. Особливо результати можуть змінюватися в залежності від змін у кордонних умовах, які залежать від зовнішніх чинників, таких як погода. Такі моделі потребують точних визначень параметрів θ. Ці параметри та взаємодії можна визначити за допомогою оптимізації і керованого навчання. Застосування до часових рядів та аналізу даних може дозволити розрахунок змін у рівнях забруднювачів в повітрі для послідовних інтервалів часу, що сприяє передбаченню якості повітря на різні періоди. Такий підхід може також надати цінну інформацію для визначення придатності довкілля до життя та підтримки здоров'я громадськості і довкілля.

Турбулентна дифузія - процес розповсюдження речовин у рідині чи газі за умови нерівномірних і хаотичних рухів потоку, що змінюються в часі. Рівняння, яке описує цей процес з загальної точки зору, запишемось як:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho u) = -\nabla \cdot J + S$$

де ρ позначає щільність, u - швидкість потоку, J - потік через дифузію, а S - джерело (чи поглинання). Потік дифузії може бути представлений як:

$$J = -\rho D \nabla c - \rho u' c'$$

де D означає молекулярну дифузивність, C - концентрацію речовини, а $u'c'$ відіграє роль коефіцієнта турбулентної дифузії, який враховує вплив коливань швидкості і концентрації внаслідок турбулентності. Цей турбулентний член можна моделювати через поняття турбулентної дифузивності:

$$u'c' = -K\nabla c$$

де K відображає інтенсивність перемішування речовин у турбулентних потоках. Оцінка турбулентної дифузивності може базуватися на емпіричних або теоретичних моделях, які залежать від умов і характеристик потоку. Одна з відомих моделей – це теорія змішувальної довжини:

$$K = l^2 \left| \frac{\partial u}{\partial y} \right|$$

де l виступає як довжина мішання, що залежить від відстані до твердої поверхні, і $(\frac{\partial u}{\partial y})$ означає градієнт швидкості в потоці. Ця модель застосовна для турбулентних потоків у межах твердих меж.

Таким чином, виконавши підстановку потоку J у рівняння переносу та поділу його, отримуємо рівняння:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho u) = \nabla \cdot (\rho D \nabla c + \rho K \nabla c) + S$$

Це рівняння ілюструє, як варіюється концентрація домішки в потоці, внаслідок впливу молекулярної та турбулентної дифузії, адвекції та джерел або стоків.

Для інтеграції цієї теорії турбулентної дифузії з індексом якості повітря (AQI), потрібно спочатку встановити зв'язок AQI з концентрацією конкретного забруднюючого речовини. Агентство охорони навколишнього середовища США (EPA) використовує наступну формулу для обчислення AQI на основі PM2.5, що представляє собою мікроскопічні тверді частки:

$$AQI = \frac{(I_{\text{вище}} - I_{\text{нижче}})}{(C_{\text{вище}} - C_{\text{нижче}})}(C - C_{\text{нижче}}) + I_{\text{нижче}}$$

де C - це середня концентрація PM2.5 протягом 24-годинного періоду в μg/m³, $C_{\text{нижче}}$ і $C_{\text{вище}}$ - це межі концентрацій, що віднесені до класифікації AQI, а $I_{\text{нижче}}$ та $I_{\text{вище}}$ - це значення AQI для нижніх та верхніх меж. Межі концентрацій та значення AQI наведені в наступній таблиці 1.

Для кожного забруднювача існують встановлені таблиці [6,7], що містять інтервали концентрацій, які відповідають певним діапазонам AQI. Після того як розраховується індекс для кожного з основних забруднювачів, загальний AQI визначається як найвище з цих значень:

$$\text{AQI} = \max(\text{AQI}_{SO2}, \text{AQI}_{NOx}, \text{AQI}_{O3}, \text{AQI}_{CO}, \text{AQI}_{PM2.5}, \text{AQI}_{PM10})$$

Таблиця. 1. Точки зон для AQI
Table. 1. Zone points for AQI

Озон (O3) 8 год. (ppm)	**Озон (O3) 1 год. (ppm)**	**Тверді частинки PM2.5 24 год. (µg/m³)**	**Тверді частинки PM10 24 год. (µg/m³)**	**Вуглекислий газ (CO) 8 год. (ppm)**	**Сірководень (SO2) 1 год. (ppb)**	**Діоксид азоту (NO2) 1 год. (ppb)**	**AQI**	**Категорія**
0,000 - 0,054	-	0,0 - 12,0	0 - 54	0,0 - 4,4	0 - 35	0 - 53	0 - 50	Добре
0,055 - 0,070	-	12,1 - 35,4	55 - 154	4,5 - 9,4	36 - 75	54 - 100	51 - 100	Помірно
0,071 - 0,085	0,125 - 0,164	35,5 - 55,4	155 - 254	9,5 - 12,4	76 - 185	101 - 360	101 - 150	Нездорове для чутливих груп
0,086 - 0,105	0,165 - 0,204	55,5 - 150,4	255 - 354	12,5 - 15,4	186 - 304	361 - 649	151 - 200	Нездорове
0,106 - 0,200	0,205 - 0,404	150,5 - 250,4	355 - 424	15,5 - 30,4	305 - 604	650 - 1249	201 - 300	Дуже нездорове
-	(2) 0,405 - 0,504	250,5 - 350,4	425 - 504	30,5 - 40,4	605 - 804	1250 - 1649	301 - 400	Небезпечно
-	(2) 0,505 - 0,604	350,5 - 500,4	505 - 604	40,5 - 50,4	805 - 1004[4]	1650 - 2049	401 - 500	Небезпечно

Щоб зв'язати концентрацію PM2.5 з рівнянням турбулентної дифузії та результатами AQI, ми можемо спробувати встановити зв'язок між вихідними параметрами дифузійної моделі та вхідними параметрами формули AQI. Рівняння турбулентної дифузії для PM2.5 можна записати як:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho u) = \nabla \cdot (\rho D \nabla c + \rho K \nabla c) + S$$

де ρ - його щільність, u - швидкість струму, D - молекулярна дифузивність, C - концентрація, K - турбулентна дифузивність та S репрезентує джерело. За припущенням

стаціонарних умов, відсутність адвекції та сталості щільності та дифузивності, можемо скоротити рівняння до:

$$\nabla^2 c = -\frac{S}{\rho(D+K)}$$

Припустимо, ми маємо одномірний профіль з постійним джерелом та концентрацією, що дорівнює нулю на кордонах домену, наше рішення виглядатиме як:

$$c(x) = \frac{S}{2\rho(D+K)} x(L-x)$$

де L - це довжина домену. Включаючи цей вираз в формулу для AQI, отримуємо:

$$AQI = \frac{(I_{\text{вище}} - I_{\text{нижче}})}{(C_{\text{вище}} - C_{\text{нижче}})}\left(\frac{S}{2\rho(D+K)} x(L-x) - C_{\text{нижче}}\right) + I_{\text{нижче}}$$

Ця формула дозволяє розрахувати *AQI* як функцію від положення *x* в домені, враховуючи впливи від джерела *S*, щільності ρ, молекулярної дифузії *D*, турбулентної дифузії *K*, довжини домену *L*, а також верхніх та нижніх меж і пов'язаних з ними значень *AQI* для PM2.5.

На рис. 3 показані результати такого аналізу, де різні комбінації параметрів *S, D, K, L* призводять до відмінностей у передбачуваних рівнях забруднення повітря.

В моделі розсіювання, базованій на рівнянні турбулентної дифузії, основна увага спрямовується на визначення концентрації одиничного забруднювача в атмосфері. Даний підхід застосовує принципи турбулентної дифузії для відтворення розподілу забруднювачів, які викидаються з точкового джерела, з урахуванням таких факторів, як висота викиду джерела та швидкість вітру. Коли мова йде про одне джерело забруднення, концентрація визначається як функція віддалі від джерела викидів, а також по відношенню до висоти, уздовж напряму вітру (вісь x) та перпендикулярно до нього (вісь y). Модель передбачає рівномірний розподіл концентрації забруднювачів за допомогою кривої, яка збільшується із зростанням відстані від джерела викиду, імітуючи ефекти розповсюдження і розведення в атмосфері.

Щодо ситуації з декількома джерелами забруднення, процес визначення загальної концентрації стає більш складним. У цьому випадку необхідно брати до уваги внесок кожного окремого джерела у загальну концентрацію у кожній точці, яка представляє інтерес. Такий комплексний підхід передбачає застосування принципу суперпозиції, який полягає у сумуванні концентрацій, створених кожним джерелом незалежно, якби інші джерела не мали впливу.

Математично, при наявності декількох джерел забруднення, позиціонованих у різних місцях *(X_i, Y_i)* модель адаптується для розрахунку внеску кожного джерела у концентрацію забруднювачів у повітрі. Таким чином, загальна концентрація в певній точці *(X, Y)* є сумою від всіх джерел:

$$C_{\text{total}}(X,Y) = \sum_i C_i(X - X_i, Y - Y_i)$$

Цей вираз показує, що значення від різних джерел є незалежними і не інтегруються між собою, що може бути наближенням, але дозволяє провести оцінку впливу декількох

джерел на забруднення повітря в цілому. Звичайно, у реальній атмосфері умови можуть бути значно складнішими, із можливістю нелінійних взаємодій між забруднюючими речовинами. Однак, дана модель виступає як інструмент для оцінки загальної ситуації на етапі рівномірного розподілу вздовж однієї лінії (рис. 4).

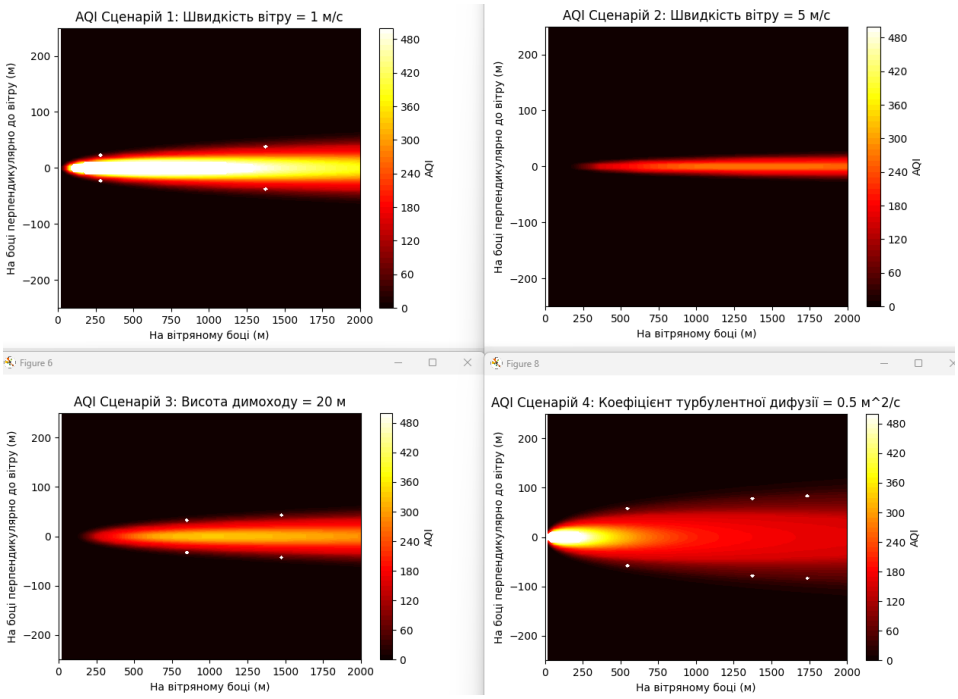

Рис. 3. Вплив турбулентної дифузії на AQI
Fig. 3. Turbulent diffusion effect on AQI

Рис. 4. Розподіл PM2.5 від кількох джерел забруднення
Fig. 4. Distribution of PM2.5 from several pollution sources

Вивчаючи модель розсіювання забруднювачів у атмосфері, що базується на раніше вказаних принципах, ми можемо визначити концентрацію забруднювача на різних відстанях від його джерела. Ця концентрація є ключовим параметром, який безпосередньо впливає на якість повітря і, відповідно, на здоров'я населення. При розгляді декількох джерел забруднення, наряду з загальною концентрацією що формується через суперпозицію внесків від кожного джерела, потрібно також конвертувати ці концентрації у еквівалентні значення AQI. Для цього існують спеціально розроблені таблиці конвертації, що ґрунтуються на федеральних чи місцевих нормативах якості повітря.

Процедура розрахунку AQI з урахуванням декількох джерел забруднення може бути зведена до низки етапів:

1. Вираховуємо концентрації кожного концентрату окремо для кожного джерела з використанням моделі дисперсії.
2. Сумуємо концентрації з усіх джерел, щоб отримати сукупну концентрацію кожного забруднювача в окремих точках.
3. За допомогою таблиць перетворення трансформуємо виміряні концентрації в відповідні індекси AQI.
4. Визначаємо остаточний AQI як найвищий з розрахованих індексів для всіх забруднюючих речовин, оскільки AQI виступає в ролі "найгіршого" індикатора серед включених забруднюючих (рис. 5).

Такий підхід забезпечує можливість інтегрального оцінювання розподілу забруднень від декількох джерел і практичного його застосування для моніторингу рівня якості повітря

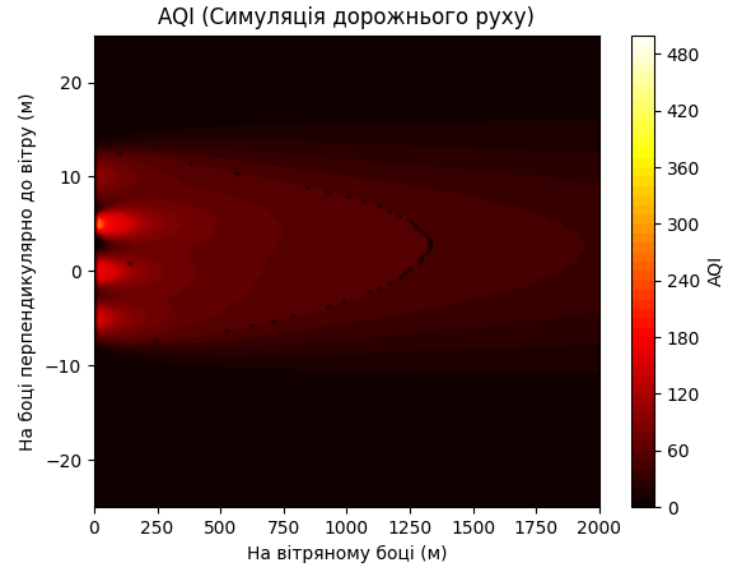

Рис. 5. Приклад розподілу AQI від декількох джерел забруднення
Fig. 5. Example of AQI distribution from several pollution sources

4. Висновки

Моделювання розсіювання атмосферних забруднювачів з використанням рівнянь турбулентної дифузії представляє собою могутній інструмент для дослідження та управління якістю повітря. Розглянута модель особливо корисна у визначенні зонального розподілу концентрацій забруднюючих речовин, що викидаються як одиничними, так і множинними джерелами. Результати, що їх надає модель, мають прямий вплив на розуміння забруднення атмосфери і на здійснення контролю за якістю повітря.

Для окремого джерела забруднення модель підкреслює застосування дифузії у тривимірному просторі, що дає змогу відобразити реальну поведінку забруднюючих речовин, які рухаються в атмосфері. Важливість цього не можна недооцінювати, оскільки вона забезпечує точне прогнозування розподілу концентрацій, від яких залежить вплив на здоров'я та довкілля.

При розгляді множинних джерел забруднення, стає очевидним, що процес визначення загальної концентрації є складнішим і потребує інтеграції внесків від усіх джерел. Метод суперпозиції є ефективним припущенням, яке дозволяє врахувати ці внески, незважаючи на потенційні виклики в урахуванні нелінійних взаємодій.

Відображення концентрацій забруднювачів через індекс AQI надає зрозумілий і широко прийнятий механізм для звітування стану якості повітря до громадськості та владних органів. Так, інформація про AQI стає життєво важливою для проведення інформованих рішень і розробки стратегій зниження рівня забруднення повітря і покращення якості повітря для населення.

Загалом, розглянута модель розсіювання забруднювачів служить як фундамент для розробки і реалізації превентивних заходів щодо захисту навколишнього середовища та підтримання громадського здоров'я. Однак слід мати на увазі, що ця модель є лише інструментом серед багатьох, і для повного розуміння загального впливу забруднювачів на якість повітря необхідні постійне оновлення даних, підтримка моніторингу та гнучкість політичних стратегій у реагуванні на змінні атмосферні умови.

Аналітична система візуалізації даних є рішенням для організацій та людей, що прагнуть отримати оптимальні результати на основі вчасного й ефективного доступу до актуальної, точної і змістовної інформації, дня контролю за підприємствами та якісним рівням повітря.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

[1] Ventusky - Weather Forecast Maps. *Ventusky - Wind, Rain and Temperature Maps*. URL: https://www.ventusky.com .

[2] Data Lake Storage for Big Data Analytics | Microsoft Azure. *Cloud Computing Services | Microsoft Azure*. URL: https://azure.microsoft.com/en-us/services/storage/data-lake-storage .

[3] Azure Synapse Analytics | Microsoft Azure. *Cloud Computing Services | Microsoft Azure*. URL: https://azure.microsoft.com/en-us/services/synapse-analytics .

[4] AirFresh - пристрій моніторингу якості повітря на вулиці з термокомпенсацією. *BeeGreen*. URL: https://beegreen.com.ua/airfresh-pristryy-monitoringu-jakosti-povitrja-vulici-16519 .

[5] *Ночвай В.* Використання ГІС у задачах управління якістю повітря / В. Ночвай, Р. Криваковська, О. Іщук // Електроніка та інформаційні технології. - 2012. - Вип. 2. - С. 154-163. - Режим доступу: http://nbuv.gov.ua/UJRN/Telt_2012_2_21.

[6] DSpace Repository :: Electronic Kyiv-Mohyla Academy Institutional Repository. URL: https://ekmair.ukma.edu.ua/bitstream/123456789/1568/1/Posudin_Monitorynh%20dovkillia_book_2012.pdf .

[7] *Turpin B.* A review of: “Air Quality Control Handbook” E. Roberts Alley & Associates McGraw-Hill, 1998, ISBN 0-07-001411-6. *IIE Transactions*. 1999. Vol. 31, no. 12. P. 1191. URL: https://doi.org/10.1080/07408179908969919 .

[8] *Запорожець А. О.* Analysis of means for monitoring air pollution in the environment. *Science-based technologies*. 2017. Vol. 35, no. 3. URL: https://doi.org/10.18372/2310-5461.35.11844 .

[9] Єдина в Україні екологічна система - SaveEcoBot. *Єдина в Україні екологічна система - SaveEcoBot*. URL: https://www.saveecobot.com/ .

DEVELOPMENT OF AN AIR QUALITY MEASUREMENT MODEL

L. Monastyrskyi , V. Hura, O. Ostrovska

Ivan Franko National University of Lviv,
50 Drahomanov St., UA–79005 Lviv, Ukraine
volodymyr.gura@lnu.edu.ua

Due to the growing problem of the ecological state of the atmosphere, the assessment and monitoring of air quality is of particular importance. This paper describes the process of developing a mathematical model designed to measure and analyse air pollution levels based on data from pollution sensors and meteorological measurements.

The paper begins by introducing the reader to the current state of the air pollution problem and the need for scientifically sound methods for its assessment. It goes on to present the variety of existing methods for measuring various pollutants, including nitrogen oxides, ozone, carbon dioxide, dust and others, and describes how these data can be collected and systematised for further analysis.

The main part of the study is devoted to the development of a mathematical model that uses differential equations to describe the processes of pollutant propagation in the atmosphere, statistical methods to estimate the relationships, and numerical methods to optimise the model. Approaches for integrating a large amount of data from different sources into a single mathematical model are also discussed.

Further attention is focused on model validation and calibration procedures, which are critical to ensuring the accuracy of model predictions. The methodology for testing the model using real air quality data is presented, and the processes for adjusting model parameters to ensure maximum accuracy of the results are described.

The final section emphasises the importance of developing mathematical models for improving environmental monitoring systems. It is emphasised that the developed model can serve as an important tool for decision-making in the field of air protection and development of effective measures to counteract the negative impact of pollution on the environment and public health. The article also discusses aspects of further improvement and updating of the model in the light of new scientific data and changes in environmental legislation.

Keywords: mathematical modelling, air quality measurement, PM2.5, AQI, statistical analysis, numerical methods, model validation, pollution monitoring, atmospheric processes

Стаття надійшла до редакції 12.06.2024
Прийнята до друку 24.06.2024