УДК 621.327:681.5

О.С. Кравцов[1], А.В. Омельченко[1], А.О. Подорожняк[2], Ю.П. Шамаєв[1]

[1] *Харківський університет Повітряних Сил імені Івана Кожедуба, Харків*
[2] *Національний технічний університет "Харківський політехнічний університет", Харків*

МОДЕЛЬ ПРОЦЕСУ ДИФУЗІЇ ДОМІШОК В АТМОСФЕРІ З УРАХУВАННЯМ ІНВЕРСІЙ ДЛЯ ОЦІНКИ ЯКОСТІ ПОВІТРЯНОГО БАСЕЙНУ

У статті викладені результати проведеного аналізу математичних моделей якості повітряного басейну та наведений опис моделі для точкових джерел забруднень з використанням гаусового рішення для стаціонарного точкового джерела і представлені результати математичного моделювання процесу дифузії домішок в повітряному басейні з урахуванням інверсій. Запропонована модель дозволяє провести оцінку якості повітряного басейну з урахуванням висоти забруднюючих джерел викидів та середньої висоти перемішування повітряних мас в атмосфері, що дозволить використовувати її при екологічному моніторингу генеральних планів міст та схем районних планувань.

Ключові слова: *модель, точкове джерело забруднення, дифузія домішок, оцінка якості, екологічний моніторинг.*

Вступ

При проектуванні генеральних планів міст або схем районних планувань з урахуванням розвитку міст, промисловості, будівництва, комунального господарства, а також забезпечення мінімальної дії на природне довкілля і при визначенні найбільш ефективних засобів відвертання перевищення допустимих концентрацій забруднюючих речовин потрібне моделювання якості повітряного басейну на основі додаткової інформації по інвентаризації викидів. Чисельне моделювання дифузії і розсіювання основних концентрацій речовин забруднень, а також їх взаємозв'язку з джерелами викидів є єдиним практичним методом для отримання подібного роду інформації [1].

По деяких районах України можуть бути вирішені подібні завдання. Деякі території є цікавими зважаючи на наявність великої кількості комунальних та промислових підприємств, електростанцій, металургійних, нафтопереробних заводів, тощо.

Для визначення шляхів реалізації запропонованої концепції оцінки якості повітряного басейну необхідна модель процесу дифузії домішок в атмосфері з урахуванням інверсій для оцінки якості повітряного басейну та провести її дослідження.

Аналіз публікацій. Проведений аналіз літератури показав [2 – 5], що існує багато варіантів моделювання атмосферних забруднень однак вони не розглядають процес забруднення від багатьох точкових джерел забруднення та не враховують трьохвимірний процес дифузії домішок у повітряному басейні. Основним завданням для адекватного моделювання процесу забруднення повітря від багатьох точкових джерел є врахування різної висоти труб забруднювачів та особливостей розсіювання домішок в атмосфері при різних метеоумовах. Таким чином, актуальності набуває питання, пов'язане з розробкою та дослідженням моделі точкових забруднень атмосфери населених пунктів, що враховує інверсії в процесі дифузії забруднюючих домішок в повітряному басейні.

Мета статті. Дана стаття присвячена розробці та дослідженню моделі процесу дифузії домішок в атмосфері з урахуванням інверсій для оцінки якості повітряного басейну.

Основна частина

Основою для інвентаризації джерел викидів є вивчення розподілу різних типів споживання палива. Найбільші промислові споживачі щомісячно представляють дані про споживання. Поступають також дані про щорічне споживання палива й на інші потреби, такі, як опалювання житлових і адміністративних будівель, використання палива невеликими промисловими підприємствами. Основним джерелом інформації для розрахунку викидів від житлових масивів, комунальних і промислових підприємств є дані про розділення населення на групи та видам використовуваного палива (вугілля, тверде, бездимне паливо, нафта) в кожному квадраті (1 км^2) сітки на карті. Наприклад, річні об'єми викиду $S0_2$ для кожного квадрата сітки розраховувалися за допомогою коефіцієнтів, що характеризують споживання палива на одну людину, і коефіцієнтів, що характеризують викиди на одиницю палива [1]:

$$W_c = \sum_{i=1}^{3} 2P_i S_i (1-q_i) N_i \,, \qquad (1)$$

де W_c – річний об'єм викидів SO_2 в квадраті сітки; P_i – річне споживання і- го виду палива; S_i – відносний масовий вміст сірки у і-му виді палива; N_i – кількість людей, що знаходяться в квадраті сітки, які користуються і-м видом палива.

© О.С. Кравцов, А.В. Омельченко, А.О. Подорожняк, Ю.П. Шамаєв,

Розрахунок викидів від комунальних і промислових підприємств виконується на основі інформації про кожне джерело, сітки, що складається з координат квадрата, де він знаходиться, типу джерела, виду використання палива (т. е. опалювання приміщень або промисловий процес), річного його споживання, зміст сірки в паливі та висоти труби. Для кожного джерела розраховується річний об'єм викидів SO_2. Наприклад, для диму

$$W_c = P_r \alpha_p , \qquad (2)$$

де W_c – річний об'єм викидів для цього джерела; p_t – річне споживання палива; α_p – частка палива (по масі), що викидається у вигляді диму, величина α_p залежить від виду палива (вугілля, кокс, продукти перегонки нафти) і від розміру парового котла.

Великі джерела можуть розглядатися як декілька точкових. Висота точки викиду коригується розрахунком ефективної висоти, тобто до висоти труби додається підйом факела за рахунок конвекції. Підйом факела розраховується при нейтральній або нестійкій атмосфері. Розрахунок підйому факела роблять за наступною формулою:

$$\Delta H = 7.4 \alpha_p^{1/3} H^{2/3} U^{-1} , \qquad (3)$$

де ΔH – висота підйому факела; α_p – параметр сили конвекції; H – висота труби; U^{-1} – швидкість вітру.

У тих випадках, коли немає достатньої кількості даних про характер викидів, сила конвекції розраховується на підставі відомостей про споживання палива в цьому районі з урахуванням втрати 15-20% енергії палива з паливними газами [1-2].

Ефективні висоти викидів для кожного типу джерел розраховуються або оцінюються, як для великих промислових джерел. При розрахунку передбачається, що викиди від промислових процесів відбуваються впродовж усього року, а викиди при опалюванні приміщень залежать від температури навколишнього повітря. Найпростішим видом залежності первинних викидів при опалюванні приміщень Wcp від температури будуть:

$$W_{cp}(T) = W_0 \left[a + b\left(T_3 - T\right) \right] \text{ при } T \le T_3 , \qquad (4)$$

$$W_{cp}(T) = W_0 , \qquad (5)$$

де W_{cp} – середній річний об'єм викидів; T_3 – задана температура; T – середня температура навколишнього повітря; a і b – постійні параметри.

Нижче (табл. 1) приведені величини викидів (%) від різних типів стаціонарних джерел забруднень/ Аналіз спостережуваних концентрацій забруднюючих речовин і їх взаємозв'язків з метеорологічними умовами важливий не лише з точки зору оцінки показників забруднення цієї місцевості. Він є цінним, якщо не найістотнішим, попереднім етапом розробки детальних моделей дифузії. Наприклад, виходячи з даних про концентрації, можна оцінити деякі коефіцієнти турбулентності, залежної від конкретної місцевості, які повинні використовуватися в моделях. Крім того, різні характеристики спостережуваних концентрацій, наприклад інтегральні функції повторюваності цих концентрацій (рози забруднення) і залежність концентрацій від напряму, можуть використовуватися при оцінці адекватності моделі.

Таблиця 1

Величини викидів (%)
від різних типів стаціонарних джерел забруднень

	Дим	SO_2
Обігрів жителів	62	1
Обігрів службових приміщень	1	1
Невеликі промислові підприємства	1	2
Середні промислові підприємства	4	7
Нафтопереробний завод і електростанції	32	89

Концентрація забруднюючих речовин приблизно дорівнює деякому середньому значенню, наприклад середньорічному. Повторюваність концентрації диму і $S0_2$ апроксимується нормальним розподілом:

$$f(C) = 1/(C_\sigma \sqrt{2\pi}) \exp\left[-(\ln C - \ln C_q)^2 / (2\sigma^2) \right] \qquad (6)$$

де $f(C)$ – щільність розподілу концентрації C; C_σ – стандартне відхилення від середнього значення C; C_q – середньоарифметична концентрація.

Норми якості навколишнього повітря зазвичай виражається у вигляді величин, усереднених за деякий період (наприклад, за рік) повторюваності можливого перевищення певних більш високих порогових значень. Враховуючи останнє, можна відмітити, що інтегральна функція розподілу має вигляд

$$F(C^*) = \int_{C^*}^{\infty} f(C) dC \qquad (7)$$

Можливості моделей дифузії для передбачення реальних концентрацій в заданій точці і в заданий момент часу досить обмежені, тому за допомогою цих залежностей можна прогнозувати лише середню концентрацію і повторюваність концентрацій по території. Важливим випробуванням моделі (і одночасно основних метеорологічних даних про джерела викидів) є перевірка її здатності відтворювати спостережувані повторюваності концентрацій на різних майданчиках по усій території, Достовірність моделі збільшується, якщо з її допомогою можна відтворити повторюваності концентрацій забрудників при різних характеристиках джерел викидів. Спостережувані концентрації складаються з вкладів забруднюючих речовин, залежних від напряму. Причиною цього є:

1) характеристики турбулентності атмосфери залежать від напряму, часто повітряні потоки східного напряму є стійкішими, ніж потоки західного напряму;

2) ефективні потужності джерел, що лежать об'єкту, що з навітряного боку вивчається, можуть значно змінюватися. Особливо часто це спостеріга-

ється в такій місцевості, де міські території відносно невеликі і потужні джерела знаходяться в межах зони забруднення Іншим способом описи спостережуваного забруднення на території. являються "рози забруднення", які дають також відповідну інформацію для будь-яких балансових розрахунків.

Оперуючи значеннями коефіцієнтів кореляції концентрацій речовин забруднень за добовими спостереженнями для окремих майданчиків і типовими коефіцієнтами кореляції приведених значень концентрацій, спостережуваних на різних майданчиках впродовж якогось періоду часу можна судити достовірно про режим негативного стану території, що вивчається, і визначити поле концентрації речовин забруднень залежно від метеорологічних умов.

Взаємозв'язок між концентраціями речовин забруднень і метеорологічними змінними може бути представлена за допомогою множинного регресійного аналізу у вигляді лінійної функції логарифмів цих змінних, тобто у вигляді рівняння регресії виду:

$$\ln C = a + b \ln C^* + C \ln(T_3 + T_в - T) + d \ln V, \quad (8)$$

де C – концентрація речовин забруднення; T і V – середньодобова температура повітря та поточна швидкість вітру; C* – концентрація в попередній день, включена внаслідок кореляції між двома послідовними серіями даних; T_3 – задана температура.

Рівняння (8) часто розглядається в якості регресійної (статистичною) моделі. Така модель, якщо її постійно модернізувати, може використовуватися в схемах короткострокового прогнозування, наприклад, сильного забруднення. Проте важливо відмітити, що модель працює тільки для тієї конкретної місцевості і для того діапазону залежних і незалежних змінних, для яких і були вичислені коефіцієнти регресії. Рівняння (8) не можна використати для прогнозу негативних ефектів, пов'язаних з інверсією і зі зміною характеристик джерел викидів для будь-якої місцевості.

Методи оцінки якості повітряного довкілля полягають у відшукуванні рішень рівнянь дифузії домішок і розробці способів розрахунку забруднень атмосфери з урахуванням названих вище за чотири природні чинники, а також зростання потужностей промисловості і очікуваних викидів шкідливих речовин. При цьому поширення домішок описується рівнянням дифузії.

Необхідно також враховувати рівняння конвективної дифузії, яке згідно напівемпіричної теорії турбулентності розглядається нелінійним зі змінними коефіцієнтами дифузії по трьох напрямах. Аналітичне рішення його невідомо, тому доводиться робити спрощення нелінійного рівняння дифузії, грунтуючись на аналізі фізики явища і спостереженнях.

Наприклад, при розробці прогнозу забруднення атмосфери міста може бути прийнята гіпотеза про те, що анізотропія коефіцієнта дифузії враховується тільки уздовж напряму пануючого вітру. Процес розглянутий як стаціонарний. Проте не можна виключати і складнішу – другу гіпотезу, суть якої полягає в наступному.

По-перше, слід врахувати, що великі заводи працюють впродовж будь-якої зміни по прямолінійному графіку практично рівномірно, не міняючи режим випуску продукції в часі. Тому витрата домішки, що поступає з труб заводу в атмосферу, можна або усереднити, або прийняти з тим або іншим наближенням не залежним від часу. Тоді похідна $\frac{\partial C}{\partial t}$ в рівнянні конвективної дифузії може бути прирівняна нулю.

По-друге, беруться до уваги тільки найбільш вірогідні значення коефіцієнтів дифузії по трьох координатних осях, які усереднені в статистичному сенсі, використовуючи при цьому метод Монте-Карло.

Для відшукування усереднених коефіцієнтів дифузії проведені незалежні статистичні дослідження. У результаті випробувань (випадкових величин) і зроблених вимірів отриманий ряд можливих значень коефіцієнтів дифузії по трьох координатних осях, визначена верхня межа помилки, що виходить, при заданій надійності і встановлені довірчі інтервали.

Математична модель дифузії домішок в повітряному середовищі після прийняття другої гіпотези буде представлена рівнянням дифузії (9) і трьома інтегральними рівняннями (10), які приведені нижче:

$$V_x \frac{\partial C}{\partial x} + V_y \frac{\partial C}{\partial y} + V_z \frac{\partial C}{\partial z} = D_x \frac{\partial^2 C}{\partial y^2} + D_z \frac{\partial^2 C}{\partial z^2}, \quad (9)$$

де C – концентрація домішок в атмосфері міста; V_x, V_y, V_z - проекції швидкості вітру на вибрані три координатні осі; D_x, D_y, D_z – коефіцієнти дифузії. Вісь x спрямована по горизонталі і уздовж пануючого вітру в цій місцевості, використовуючи розу вітрів; вісь y – по горизонталі і нормально до осі x; вісь z – вертикальна координата [6]. Рішення рівняння дифузії зводиться до рішення таких інтегральних рівнянь :

$$\left.\begin{aligned} &\iint_{S_x}\left[C''(x) - \frac{V_x}{D_x}C'(x) + K_x^2 C(x)\right]dx^2 = 0 \\ &\iint_{S_y}\left[C''(y) - \frac{V_y}{D_y}C'(y) + K_y^2 C(y)\right]dy^2 = 0 \\ &\iint_{S_z}\left[C''(z) - \frac{V_z}{D_z}C'(z) + K_z^2 C(z)\right]dz^2 = 0 \end{aligned}\right\} \quad (10)$$

де K_x^2, K_y^2, K_z^2 – змінні параметри, які визначаються із спостережень в конкретних умовах.

Рішення інтегральних рівнянь (10) відшукуються за допомогою варіаційних методів, зокрема застосовується математично витончений метод Б.Г. Галеркіна [6]. Цей метод отримав дуже широке застосування в різних областях техніки та наукових дослідженнях.

Також опубліковані фундаментальні теоретичні роботи із застосування методу Галеркіна до точних рішень як лінійних, так і нелінійних рівнянь. Наближене рішення, по Галеркіну, відшукується у вигляді системи заздалегідь вибраних функцій, що задовольняють заданим граничним умовам, що є повними у даній області і лінійно незалежними. Рішення знаходиться у вигляді поліномів, що задовольняють вказаним умовам. Складаються умови ортогональності:

$$\int L\left(\bar{C}\right)\phi_K\left(\bar{U}^*\right)dq = 0, \qquad (11)$$

де $L\left(\bar{C}\right)$ – диференційний оператор, що відповідає початковим інтегральним рівнянням із заданими умовами; $\phi_K\left(\bar{U}^*\right)$ – повна система функцій.

Умови ортогональності після обчислення інтегралів, що входять в них, перетворюються на систему алгебри рівнянь відносно невідомих коефіцієнтів. З рівнянь алгебри визначається функція

$$C^* = \sum A_i \phi_K\left(\bar{U}^*\right), \qquad (12)$$

де A_i (i = 1, 2…, n) – коефіцієнти, що отримуються зі вказаних рівнянь.

Моделі з урахуванням інверсій для концентрацій, усереднених за великий період, і проведені порівняння між результатами спостережень і розрахованими по моделі, цілком обнадіюють [1, 2, 4]. Також, для підвищення точності екологічного моніторингу, запропоновану модель процесу дифузії домішок в атмосфері з урахуванням інверсій для оцінки якості повітряного басейну можливо використовувати із застосуванням даних мультиспектральної зйомки [7].

Висновки

В статті проведено аналіз математичних моделей якості повітряного басейну та наведений опис моделі процесу дифузії домішок в атмосфері з урахуванням інверсій для оцінки якості повітряного басейну. Запропонована модель дозволяє провести оцінку якості повітряного басейну з урахуванням висоти забруднюючих джерел викидів та середньої висоти перемішування повітряних мас, що дозволить використовувати її при екологічному моніторингу генеральних планів міст та схем районних планувань.

Напрямками подальшого удосконалення запропонованої моделі для забруднень повітряного басейну є підвищення точності за рахунок використання мультиспектральних даних з систем дистанційного зондування землі.

Список літератури

1. Лаврик В.І. Моделювання і прогнозування стану довкілля [Текст] / В.І. Лаврик. – К.: Академія, 2010. – 400 с.

2. Зеркалов Д.В. Екологічна безпека: управління, моніторинг, контроль [Текст] / Д.В. Зеркалов. – К.: Дакор, Основа, 2007. – 412 с.

3. Тарасова В.В., Метрологія, стандартизація і сертифікація [Текст] / В.В. Тарасова, А.С. Малиновський, М.Ф. Рибак. – К.: ЦНЛ, 2006. – 264 с.

4. Клименко М.О. Метрологія, стандартизація і сертифікація в екології [Текст] / М.О. Клименко, П.М. Скрипчук. – К.: Академія, 2006. – 368 с.

5. Шамаєв Ю.П. Особливості впровадження законодавчо-нормативних документів України та європейського союзу у галузі охорони навколишнього середовища [Текст] / Ю.П. Шамаєв, О.А. Коростельова // Збірник наукових праць Харківського університету Повітряних Сил. – Х.: ХУПС, 2015. – Вип. 1 (42). – С.132 – 135.

6. Флетчер К. Численные методы на основе метода Галеркина: Пер. с англ. [Текст] / К. Флетчер – М.: Мир, 1988. – 352 с.

7. Подорожняк А.О., Метод інтелектуальної обробки мультиспектральних зображень [Текст] / А.О. Подорожняк, О.Д. Лагода, Н.Ю. Любченко // Системи обробки інформації. – Х.: ХУ ПС, 2015. – Вип. 10 (135). – С. 123 – 125.

Надійшла до редколегії 7.10.2015

Рецензент: д-р техн. наук, проф. В.Б. Кононов, Харківський університет Повітряних Сил ім. І. Кожедуба, Харків.

МОДЕЛЬ ПРОЦЕССА ДИФФУЗИИ ПРИМЕСЕЙ В АТМОСФЕРЕ С УЧЕТОМ ИНВЕРСИЙ ДЛЯ ОЦЕНКИ КАЧЕСТВА ВОЗДУШНОГО БАССЕЙНА

А.С. Кравцов, А.В. Омельченко, А.А. Подорожняк, Ю.П. Шамаєв

В статье изложены результаты проведенного анализа математических моделей качества воздушного бассейна и приведено описание модели для точечных источников загрязнений с использованием гауссова решение для стационарного точечного источника и представлены результаты математического моделирования процесса диффузии примесей в воздушном бассейне с учетом инверсий. Предложенная модель позволяет провести оценку качества воздушного бассейна с учетом высоты загрязняющих источников выбросов и средней высоты перемешивания воздушных масс в атмосфере, что позволит использовать ее при экологическом мониторинге генеральных планов городов и схем районного планирования.

Ключевые слова: *модель, точечный источник загрязнения, диффузия примесей, оценка качества, экологический мониторинг.*

MODEL OF DIFFUSION OF IMPURITIES IN THE ATMOSPHERE WITH INVERSIONS TO EVALUATE THE QUALITY OF AIR POOL

O.S. Kravtsov, A.V. Omelchenko, A.O. Podorozhniak, Iu.P. Shamaiev

The article presents the results of the analysis of mathematical models as air quality and description given model for point sources of pollution using Gaussian solutions for stationary point sources and presents the results of mathematical modeling of diffusion impurities in the air basin based inversions. The proposed model allows us to assess the quality of air quality on the basis of height pollutant emission sources and the average height of the mixing of air masses in the atmosphere, allowing its use in the environmental monitoring of master plans of cities and regional planning schemes.

Keywords: *model, point source pollution, diffusion of impurities, quality assessment, environmental monitoring.*