

УДК 502.3:504.5:621.43.068.4

Л.Л. ГУРЕЦЬ, канд. техн. наук, доцент

Сумський державний університет (СумДУ), м. Суми

МОДЕЛЮВАННЯ РОЗСІЮВАННЯ ЗАБРУДНЮЮЧИХ РЕЧОВИН З УРАХУВАННЯМ МІСЬКОЇ ЗАБУДОВИ

Розглянуто питання моделювання розповсюдження забруднюючих речовин в умовах міської забудови. Розв'язання системи диференціальних рівнянь Нав'є-Стокса, нерозривності і молекулярної дифузії для вертикального і горизонтального напрямків переносу забруднюючої речовини з урахуванням щільності забудови дозволило отримати залежність розповсюдження забруднюючих речовин за висотою житлового району від швидкості вітру.

Ключові слова: забруднююча речовина, розсіювання, міська забудова.

Однією з задач, які необхідно розв'язувати при оцінці впливу викидів забруднюючих речовин (ЗР) на навколошнє середовище, є розрахунок їх розсіювання в атмосфері.

На розсіювання ЗР впливають параметри джерела викиду та метеорологічні умови. Параметрами джерела викиду є його висота, об'єм, температура і швидкість та концентрація забруднюючої речовини. У випадку пилового забруднення потрібно також знати розмір частинок пилу. До метеорологічних параметрів, які впливають на розсіювання забруднюючої речовини, відносяться швидкість та напрямок вітру, а також вертикальна температурна стратифікація атмосфери. Інверсія перешкоджає турбулентному перемішуванню повітряних потоків, тому максимальні поверхневі концентрації ЗР спостерігаються при високій стабільноті стратифікації. Навпаки, конвекційні явища підсилюють вертикальне перемішування, і показники концентрацій забруднюючих речовин у приземному шарі в цьому випадку виявляються найбільш низькими.

Розробці математичних моделей розсіювання забруднюючих речовин в атмосфері присвячені роботи таких фахівців, як Берлянд М.Г., Марчук В.Г., Згурівський М.З., Нестеров А.В., Алоян О.Є., Беляєв М.М., Радкевич О.Р. та ін. [1–5].

Для опису процесу розсіювання в сучасній практиці знаходить застосування широкий спектр математичних моделей. Трьохмірне гідродинамічне моделювання здійснюється за допомогою ейлерівських моделей розсіювання. При цьому способі моделювання збільшення або зниження вмісту конкретної забруднюючої речовини потрібно визначати у кожній точці уявної просторової сітки за окремі проміжки часу. Цей метод дуже складний та вимагає тривалих комп'ютерних розрахунків, тому його застосування є проблематичним.

Аналітичне рішення ейлерівських моделей може бути отримане за таких припущень: незмінність умов виділен-

ня забруднюючих речовин у часі; незмінність метеорологічних умов під час перенесення; швидкість вітру менше 1 м/с. У цьому випадку отримують моделі розсіювання Гауса [6], які застосовуються в нормативних методиках US EPA (United States Environmental Protection Agency – Агентство захисту навколошнього середовища США) та МАГАТЕ (Міжнародне агентство з атомної енергії).

Для аналізу випадкових викидів чи окремих випадків рекомендується модель Лагранжа [7], або модель частинок. Її основна ідея полягає в розрахунку траєкторій багатьох частинок, кожна з яких містить фіксовану кількість забруднюючої речовини. Окремі траєкторії частинок формуються під дією переносу при середній швидкості вітру, а також під впливом ймовірнісних порушень траєкторій. Через елемент ймовірності порушення траєкторії описують суміш, яка утворюється внаслідок турбулентності. В принципі, модель Лагранжа здатна описувати комплексні метеорологічні умови.

На цей час в Україні з метою прогнозування процесів розсіювання шкідливих речовин в атмосфері використовується методика ОНД-86. Дана модель реалізує ті ж базові принципи моделювання процесу розсіювання шкідливих речовин в атмосфері, що й гаусівські моделі. Однак її використання створює складності розробки єдиних підходів до цього питання в рамках європейських і світових стандартів. ОНД-86 не дозволяє врахувати цілий ряд специфічних процесів, що виникають при розсіюванні викидів шкідливих речовин в атмосфері, наприклад «задимлення», «виснаження», вологе й сухе осадження, хімічні перетворення речовин в атмосфері. Досить приблизно проводиться також облік регіонально залежних метеорологічних і фізичних характеристик атмосфери.

При розгляді питання розсіювання забруднюючих речовин в умовах міста необхідні знання дифузійного та турбулентного переносу маси та тепла, взаємодії



повітряного потоку з елементами забудови міста. Існуючі моделі розповсюдження забруднення в умовах міста не враховують вплив рельєфу та параметрів забудови на рух повітря поблизу будівель. Їх наводять у вигляді напів-емпіричних залежностей, справедливих лише для конкретного випадку, або у вигляді обробки даних вимірювань. Таким чином, при дослідженні забруднення атмосферного повітря міста замість спрощених методів, які беруть до уваги тільки висоту будівель, слід використовувати модель Лагранжа чи Ейлера, що повніше враховують вплив забудови і дають змогу підвищити точність розрахунків.

Частинки пилу та потік забруднюючої речовини під-хоплюються циркуляцією повітря з підвітряної сторони будівлі. Амплітуда підвітряної циркуляції залежить від габаритів будівлі і швидкості вітру. Важливо також враховувати щільність забудови міста. У щільній міській забудові утворення кільцевих вихрів навколо будинків практично неможливе. Повітряний потік фактично перетикає через дахи будинків, тому при оцінці дії приземних джерел забруднюючих речовин значна увага приділяється коефіцієнту аерації [8]

$$K_A = \frac{P_B - \Delta P}{P_B},$$

де P_B – нормативний швидкісний напір вітру, який визначається за метеоданими, Па;

ΔP – опір забудови з врахуванням рельєфу місцевості, Па.

Міська вулиця являє собою відкритий зверху канал висотою H та довжиною L . Повітря в ньому рухається під дією ініціюючого потоку, який при течії вздовж стін будівель відчуває опір нерівностей їх поверхонь. Приймаємо потік забруднюючої речовини рівномірно розподіленим і враховуємо його як стаціонарне джерело.

Для визначення зміни концентрації ЗР за висотою забудови H розглянемо двовимірну модель, допускаючи, що перенос речовини відбувається за висотою забудови H і довжиною вулиці L . Запишемо систему диференціальних рівнянь Нав'є-Стокса, нерозривності і молекулярної дифузії для вертикального і горизонтального напрямків переносу забруднюючої речовини в межах розрахункової площини $S = H \cdot L$:

$$\begin{cases} p \left(\frac{\partial w_x}{\partial t} + \frac{\partial w_x}{\partial x} w_x + \frac{\partial w_x}{\partial y} w_y \right) = - \frac{\partial p}{\partial x} + \mu \left(\frac{\partial^2 w_x}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 w_x}{\partial y^2} \right) - \sigma_x, \\ p \left(\frac{\partial w_y}{\partial t} + \frac{\partial w_y}{\partial x} w_x + \frac{\partial w_y}{\partial y} w_y \right) = - \frac{\partial p}{\partial y} + \mu \left(\frac{\partial^2 w_y}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 w_y}{\partial y^2} \right) - \sigma_y, \\ \frac{\partial w_x}{\partial x} + \frac{\partial w_y}{\partial y} = 0, \\ \frac{\partial C}{\partial t} + \frac{\partial C}{\partial x} w_x + \frac{\partial C}{\partial y} w_y = D \left(\frac{\partial^2 C}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 C}{\partial y^2} \right), \end{cases} \quad (1)$$

де D – коефіцієнт молекулярної дифузії, m^2/c ;
 C – концентрація забруднюючої речовини, mg/m^3 ;
 w_x, w_y – компоненти вектора швидкості повітряного потоку;
 x, y – координати за довжиною вулиці та висотою забудови відповідно;
 t – час, с;
 p – тиск потоку повітря, Па;
 σ – опір житлового масиву руху повітря, Па;
 ρ – густина повітряного потоку, kg/m^3 ;
 μ – коефіцієнт динамічної в'язкості повітряного потоку, $Pa \cdot s$.

Початкові умови:

$$\begin{aligned} W(0, x, y) &= W_s(x, y), \quad C(0, x, y) = \\ &= C_s(x, y), \quad p(0, x, y) = p_s(x, y). \end{aligned} \quad (2)$$

Границі умови:

$$W(\tau, x, y) = W_{\partial S}(\tau, x, y), \quad C(\tau, x, y) = C_{\partial S}(\tau, x, y). \quad (3)$$

$$\text{При } y = 0, \quad w_x = 0, \quad \frac{\partial C}{\partial y} = 0. \quad (4)$$

$$\text{При } y = H, \quad w_y = 0, \quad \frac{\partial w_x}{\partial y} = 0. \quad (5)$$

При рівномірному розподілі забруднення приймаємо

$$\frac{\partial C}{\partial x} = 0. \quad (6)$$

Опір житлового масиву руху повітря

$$\sigma = -\xi p S W^2, \quad (7)$$

де ξ – коефіцієнт аеродинамічного опору житлового масиву, що залежить від форми будинків і режиму обтікання;
 W – швидкість потоку повітря, m/s .

Розрахункова площа визначається з урахуванням щільності забудови

$$S = S_a(1 - \varepsilon), \quad (8)$$

де S_a – загальна площа забудови, m^2 ;
 ε – щільність забудови, частка.

Розв'язання системи (1) з урахуванням наведених початкових (2) та граничних умов (3)–(6) дозволило отримати залежність розповсюдження ЗР за висотою H від швидкості вітру W (рис. 1).

Як видно з рис. 1, компоненти повітряної суміші з густиною вище $1,2 \text{ kg/m}^3$ до швидкості вітру $4\text{--}5 \text{ m/s}$ знаходяться в приземній зоні висотою $2\text{--}2,5 \text{ m}$. При більших швидкостях значний вплив чинять вихрові потоки, які мають вертикальний зсув, і забруднюючі речовини переносяться в більш високі шари атмосфери.

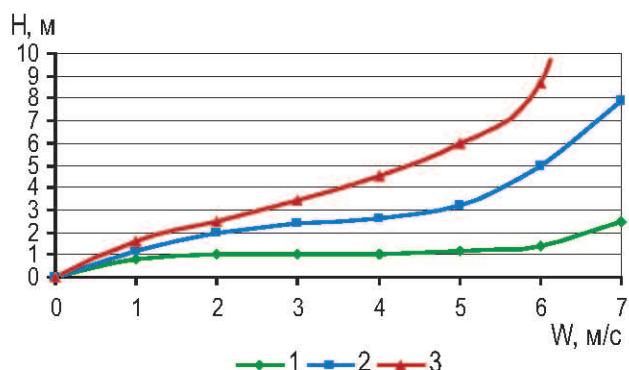


Рисунок 1 – Розповсюдження забруднюючих речовин при різних густинах компонентів: 1 – $\rho = 2 \text{ кг/м}^3$; 2 – $\rho = 1,2 \text{ кг/м}^3$; 3 – $\rho = 0,8 \text{ кг/м}^3$

ВИСНОВКИ

Запропоновано модель, яка надає можливість спрогнозувати забруднення повітря за висотою міської забудови. Результати моделювання показали, що викиди забруднюючих речовин розповсюджуються в просторі переважного проживання людини. Тому для зменшення їх негативної дії на здоров'я населення актуальною є розробка заходів щодо істотного скорочення обсягів шкідливих викидів в урбанізованому середовищі.

Рассмотрены вопросы моделирования распространения загрязняющих веществ в условиях городской застройки. Решение системы уравнений Навье-Стокса, неразрывности и молекулярной диффузии для вертикального и горизонтального направлений переноса загрязняющего вещества с учетом плотности застройки позволило получить зависимость распространения загрязняющих веществ по высоте жилого района от скорости ветра.

БІБЛІОГРАФІЧНИЙ СПИСОК

1. Вараксин А.Ю. Турбулентные течения газа с твердыми частицами / А.Ю. Вараксин. – М. : ФИЗМАТЛИТ, 2003. – 192 с.
2. Rogers C.B. The behavior of small particles in a vertical turbulent boundary layer in air / C.B. Rogers, J.K. Eaton // Int. J. Multiphase Flow. – 1990. – V. 16, № 5. – P. 819–834.
3. Згуровский М.З. Численное моделирование распространения загрязнения в окружающей среде / М.З. Згуровский. – К. : Наук. думка, 1997. – 368 с.
4. Берлянд М.Е. Прогноз и регулирование загрязнения атмосферы / М.Е. Берлянд. – Л. : Гидрометеоиздат, 1985. – 273 с.
5. Беляев Н.Н. Моделирование процесса рассеивания токсичного газа в условиях застройки / Н.Н. Беляев // Вісник Дніпропетровського національного університету залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна. – 2009. – Вип. 29. – С. 83–85.
6. Hanna S. Air Quality Modelling over Short Distances / S. Hanna // College on Atmospheric Boundary Layer and Air Pollution Modelling. – 1994. – № SMR/760-2. – Р. 712–743.
7. Бабков В.С. Анализ математических моделей распространения примесей от точечных источников / В.С. Бабков, Т.Ю. Ткаченко // Наукові праці ДонНТУ. – 2011. – Вип. 13(185). – С. 147–155.
8. Корганбаев Б.Н. Расчет суммарных значений факторов окружающей среды, действующих на организм человека. / Б.Н. Корганбаев // Гидрометеорология и экология. – 2005. – № 4. – С. 178–186.

Поступила в редакцию 07.11.2013

Problems of simulating the spread of pollutants in urban areas are considered. Solution of the Navier-Stokes equations, continuity and molecular diffusion for vertical and horizontal directions of pollutant transfer subject to housing density enables receiving the dependence of pollutants spread along the height of a residential area on the wind speed.