

УДК 622.457:519.6

© М.М. Біляєв, Т.І. Русакова

КОМП'ЮТЕРНА ОЦІНКА РІВНЯ ЗАБРУДНЕННЯ АТМОСФЕРНОГО ПОВІТРЯ ПІД ДІЄЮ ТЕХНОГЕННИХ ДЖЕРЕЛ

© М. Biliaiev, T. Rusakova

COMPUTER ASSESSMENT OF THE LEVEL OF POLLUTION OF ATMOSPHERIC AIR UNDER ACTION OF TECHNOGENIC SOURCES

Мета дослідження – створення комп'ютерної системи для оцінки рівня забруднення атмосферного повітря під дією організованих і неорганізованих техногенних джерел.

Методика. Метод чисельного розрахунку концентрації домішки в атмосферному повітрі ґрунтується на вирішенні двовимірних та тривимірних рівнянь переносу домішки, яка безпосередньо надходить від організованих або неорганізованих джерел забруднення. Методика враховує процес хімічного перетворення домішки в атмосфері. Чисельна модель ґрунтується на розщепленні модельних рівнянь і їх вирішенні за допомогою неявних різницевих схем щодо двовимірної та тривимірної постановки.

Результати. Створено комп'ютерну систему оцінки рівня забруднення атмосферного повітря, яка включає в себе два блоки прогнозу рівня забруднення атмосферного повітря на базі 2D і 3D моделей рівняння масопереносу, ряд модулів, які враховують процеси хімічного перетворення викидів, вимивання домішки опадами, циклічну дію джерел забруднення, викиди від автотранспорту, що можуть одночасно взаємодіяти з викидами промислових підприємств. Блок «Air-2» дозволяє проводити експрес-прогноз за відсутності надійних вхідних даних, які використовуються в блоці «Air-3». Комп'ютерна система включає модулі графічної обробки результатів прогнозування, дозволяючи отримувати зони забруднення атмосферного повітря різними видами домішок.

Наукова новизна. Встановлено закономірності забруднення атмосферного повітря викидами організованих і неорганізованих техногенних джерел, виконано оцінку зон та рівня забруднення територій прилеглих до джерела викиду.

Практична значимість. Розроблені прогнозні моделі і блоки комп'ютерної системи дозволяють оперативно визначати концентрації забруднюючих речовин в атмосфері, зони сприятливі для проживання населення і несприятливі, оцінювати рівень екологічної безпеки при функціонуванні великих промислових об'єктів або автомобільних магістралей і своєчасно вживати заходи з охорони повітряного середовища.

Ключові слова: промислове підприємство, автотранспорт, джерело забруднення, розсіювання, хімічна взаємодія, чисельна модель

Вступ. Питання екології часто стають основними у багатонаселених містах і промислових центрах, де є високий рівень техногенного навантаження, висока концентрація виробничих потужностей. Згідно екологічного паспорту м. Дніпро, представленого Департаментом транспорту та охорони навколишнього середовища Дніпропетровської міської ради у 2017 р., екологічний стан атмосферного повітря в місті залишається небезпечним. Аналізуючи повторюваність напрямів вітру та штилів (рис. 1) видно, що за рік переважає північно-

західний напрямок вітру, штильові погодні умови складають 17 % та при наявності промислових виробництв I-III класу шкідливості створюють високий потенціал забруднення міського середовища, а тумани і слабка аерація перешкоджають його самоочищенню.

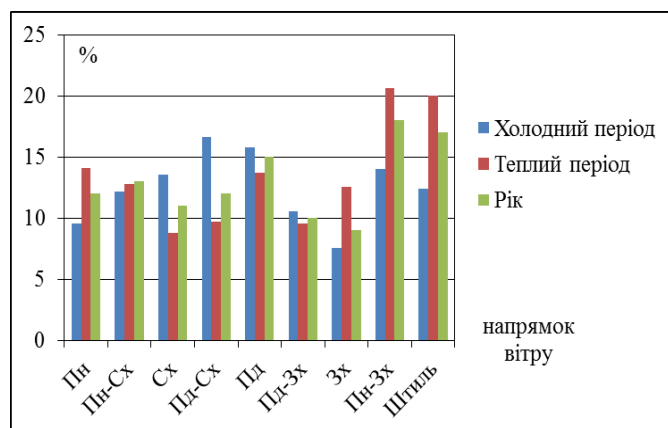


Рис. 1. Повторюваність швидкості вітру в 2016 році

Загальний обсяг викидів в атмосферне повітря міста здійснюється понад 7000 стаціонарними джерелами забруднення, з яких 6 200 (89 %) – організовані. До найбільш екологічно небезпечних об’єктів міста віднесено 11 підприємств металургійної промисловості, енергетики та інших галузей промисловості (табл. 1). Дніпропетровський регіональний центр з гідрометеорології постійно здійснює контроль за станом атмосферного повітря у місті на 6 стаціонарних постах спостереження.

Таблиця 1

Перелік найбільш екологічно небезпечних об’єктів м. Дніпро

№ з/п	Назва екологічно небезпечного об’єкту	Вид економічної діяльності
1	ПАТ «Євраз-ДМЗ ім. Петровського»	Виробництво чавуну, сталі, прокату, товарів народного споживання, коксу і побічних продуктів
2	ПАТ «ІНТЕРПАЙП НТЗ»	Виробництво труб та товарів широкого вжитку
3	ДТЕК Придніпровська ТЕС	Виробництво електричної енергії
4	КП «Дніпроводоканал»	Водопостачання та водовідведення, очищення стічних вод на очисних спорудах
5	ПрАТ «ІнтерМікро Дельта, Інк»	Виробництво шин та гумовотехнічних виробів
6	ДП ВО «Південний машинобудівний завод»	Виробництво ракетно-космічної продукції, тракторів, тролейбусів, трамваїв та спеціального устаткування
7	ПрАТ «Іста-Центр»	Багатосерійне виробництво стартерних акумуляторних батарей
8	ПАТ «Дніпрометиз»	Виробництво товарів народного споживання
9	ПАТ «Дніпровський машинобудівний завод»	Випуск товарів народного споживання та електронних автоматичних телефонних станцій
10	ПАТ «Дніпрофарм»	Випуск лікарських препаратів

Дніпропетровський регіональний центр з гідрометеорології постійно здійснює контроль за станом атмосферного повітря у місті на 6 стаціонарних постах спостереження. Середні концентрації деяких забруднюючих речовин перевищують, як максимально разові, так і середньо добові ГДК, наприклад: пил – $2,67 \text{ мг/м}^3$, м.р. – $0,5 \text{ мг/м}^3$, с.д. – $0,15 \text{ мг/м}^3$; двоокис азоту – $2,25 \text{ мг/м}^3$, м.р. – $0,09 \text{ мг/м}^3$, с.д. – $0,04 \text{ мг/м}^3$; формальдегід – $3,67 \text{ мг/м}^3$, м.р. – $0,035 \text{ мг/м}^3$, с.д. – $0,003 \text{ мг/м}^3$. На рис. 2 представлено, як приклад, розподіл викидів оксиду вуглецю в атмосферне повітря стаціонарними джерелами забруднення по районах міста.

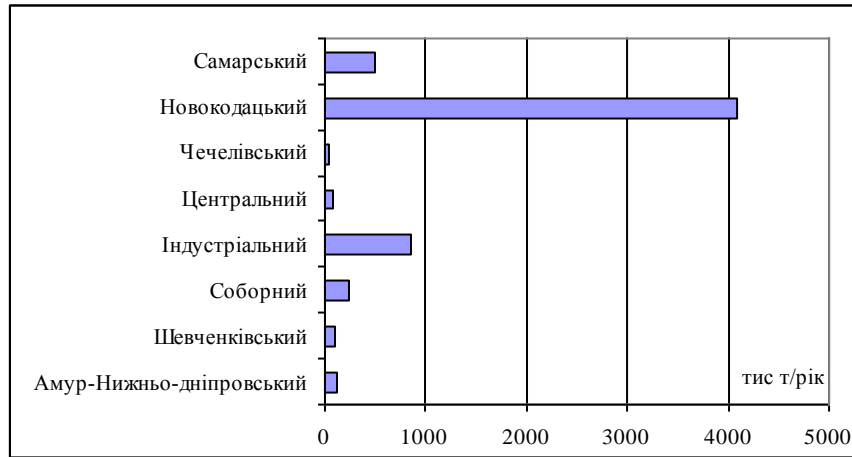


Рис. 2. Обсяги викидів оксиду вуглецю в районах міста Дніпро

Значний внесок у забруднення повітряного басейну міста також вносить автотранспорт. На автомобільний транспорт приходить близько 40 % від сумарного обсягу викидів токсичних речовин в атмосферу по місту.

Дніпровська область відноситься до регіону техногенно навантаженого різними видами підприємств, що представляють собою джерела забруднення атмосферного повітря. Пропонуються європейські підходи до вирішення проблем забруднення і забезпечення якості атмосферного повітря [1]. Для оцінки техногенного впливу цих підприємств необхідні ефективні математичні моделі для розрахунку концентрації домішок. Як правило застосовуються емпіричні моделі (ОНД 86), які не враховують процес атмосферної дифузії та різновидності моделі Гауса [2], які не враховують нерівномірність поля швидкості. Сучасні вимоги до якості прогнозу інформації вимагають створення нових числових CFD моделей [3, 4], які є багато параметричними в оцінці рівня забруднення атмосферного повітря.

Метою даної роботи є розробка комп'ютерної системи прогнозу якості атмосферного повітря під дією техногенних джерел.

Викладання основного матеріалу. Розглядається комп'ютерна система прогнозу якості атмосферного повітря при організованих та неорганізованих техногенних викидах. Комп'ютерна система складається із двох блоків.

Перший блок «Air-3» – представляє собою прогноз рівня забруднення атмосферного повітря на базі 3D моделі рівняння масопереносу (1).

$$\begin{aligned} \frac{\partial C}{\partial t} + \frac{\partial uC}{\partial x} + \frac{\partial vC}{\partial y} + \frac{\partial wC}{\partial z} = \frac{\partial}{\partial x}(\mu_x \frac{\partial C}{\partial x}) + \frac{\partial}{\partial y}(\mu_y \frac{\partial C}{\partial y}) + \\ + \frac{\partial}{\partial z}(\mu_z \frac{\partial C}{\partial z}) + Q\delta(x-x_0)\delta(y-y_0)\delta(z-z_0), \end{aligned} \quad (1)$$

де Q – інтенсивність викиду домішки; u, v, w – компоненти вектору швидкості вітру; $\mu = (\mu_x, \mu_y, \mu_z)$ – коефіцієнт турбулентної дифузії; x_0, y_0, z_0 – координати джерела викиду забруднюючої домішки; $\delta(x-x_0)\delta(y-y_0)\delta(z-z_0)$ – дельта-функція Дірака, за допомогою якої моделюється викид домішки. Значення коефіцієнтів дифузії розраховуються за формулами: $\mu_x = (0,1 \div 1) \cdot U$, $\mu_y = (0,1 \div 1) \cdot U$,

де U – швидкість вітру, $\mu_z = k \left(\frac{z}{z_1} \right)^m$, де z – висота над рівнем Землі, z_1 – висота,

де задана швидкість вітру U , $m \approx 1$, $k = 0,2$ [5].

Особливістю даного блоку є те, що він враховує при прогнозі профіль швидкості вітру, стан атмосфери. Джерелами викиду є промислові труби, відвали.

Другий блок «Air-2» – виконує прогноз на базі 2D моделі рівняння масо переносу (2).

$$\begin{aligned} \frac{\partial C}{\partial t} + \frac{\partial uC}{\partial x} + \frac{\partial (v-w_s)C}{\partial y} = \frac{\partial}{\partial x}(\mu_x \frac{\partial C}{\partial x}) + \frac{\partial}{\partial y}(\mu_y \frac{\partial C}{\partial y}) + \\ + \sum Q_i \delta(x-x_i)(y-y_i), \end{aligned} \quad (2)$$

де C – концентрація забруднюючої речовини; u, v – компоненти вектора швидкості повітряного потоку; w_s – швидкість гравітаційного осідання забруднюючої речовини, $\mu = (\mu_x, \mu_y)$ – коефіцієнти турбулентної дифузії; (x_i, y_i) – координати джерела викиду забруднюючої речовини; Q_i – інтенсивність емісії забруднювача в точці; $\delta(x-x_i)(y-y_i)$ – дельта-функція Дірака, за допомогою якої моделюється надходження забруднювача. Профіль швидкості вітру на

вході в розрахункову область $u = u_1 \left(\frac{Y}{Y_1} \right)^n$, где $u_1 = 4,5$ м/с – значення швидкості вітру на висоті $Y_1 = 10$ м, $n = 0,15$; стан атмосфери (інверсія, конвекція), тобто значення вертикального коефіцієнта дифузії $\mu_y = k \left(\frac{Y}{Y_1} \right)^m$,

$k = 0,2$, $m \approx 1$ [5].

Для побудови числової моделі застосовується неявна попеременно-трикутна різницева схема, що апроксимує моделюючі рівняння (1) або (2),

згідно крайових умов [6]. Вона будується на прямокутній різницевій сітці. Концентрація C визначається в центрі різницевого комірка, компоненти вектору швидкості повітряного середовища задаються на межах різницевого комірка [3].

Цей блок дозволяє виконувати експрес-прогноз при відсутності надійних вхідних даних, які використовуються у першому блоці.

Розроблена комп'ютерна система включає ряд модулів, що дозволяють виконувати прогноз рівня забруднення атмосферного повітря з урахуванням хімічної трансформації викидів, вимивання домішки опадами, циклічної дії джерел забруднення. Особливістю комп'ютерної системи є можливість моделювання забруднення атмосферного повітря викидами від автотранспорту та її застосування при розробці транспортної стратегії міста: побудові нових доріг та розв'язок, модернізації вже існуючих автомобільних мереж.

Комп'ютерна система включає модулі графічної обробки результатів прогнозування. На рис. 3 представлена зона забруднення атмосферного повітря у випадку викидів на промисловому об'єкті ПрАТ «ІнтерМікро Дельта, Інк». Завод спеціалізується на виготовленні гумовотехнічних виробів і ремонті шин.

Стан та перспективи розвитку технологій переробки шин та їх вплив на довкілля [7] показує, що шинна промисловість забруднює атмосферне повітря викидами таких речовин: α – метилстирол, аліфатичні насичені вуглеводні, бензол, бутадієн, гексан, дибутилфталат, дивініл, етилбензол, етилен, ізобутилен, ізопрен, ксилол, манган та його сполуки, насичені вуглеводні, нітрил акрилової кислоти, нітроген (IV) оксид, оксид карбону (II), оксиди етилену, оксиди феруму, пентан, пропілен, стирол, сульфур (IV) оксид, толуол, хлороводень, хлоропрен, циклогексан, циклопентан.

Згідно даних екологічного паспорту міста відносно викидів в атмосферу великих підприємств, інтенсивність викиду вуглеводнів складає 0,006 г/с, сульфур (IV) оксиду – 0,002 г/с, аміносполук – 0,007 мкг/с. Розрахунок виконувався при наступних параметрах: розміри розрахункової області 2 км на 1,5 км, швидкість вітру складала $U=7$ м/с при північно-східному напрямку (рис. 1), $C_{\max}=1,481$ мг/м³, $t=48$ хв. Значення концентрації представлено у відсотках від максимальної її величини на даний момент часу.

Розрахунки показують, що максимальне значення концентрації $C_{\max}=1,481$ мг/м³ може перевищувати максимально одноразову концентрацію вуглеводнів, що складає $ГДК_{\text{мр}}=1$ мг/м³, але її розподіл повільно зменшується, починаючи від центру джерела викиду (заводу) до периферії. Відсотковий розподіл концентрації вуглеводнів показано на рис. 1, в зону забруднення потрапляють: завод та його територія – до 74 %; вул. Бориса Кротова та вул. Краснопольська – 65-70 %; Чечеловський район – 40-50 %; вул. Гладкова, вул. Інженерна, вул. Автостроєва, вул. 152 дивізії – 22-30 %; вул. Івана Франка, вул. Ангарська, вул. Архітектурна – 10-15 %; вул. Шинна – 6-8 %.

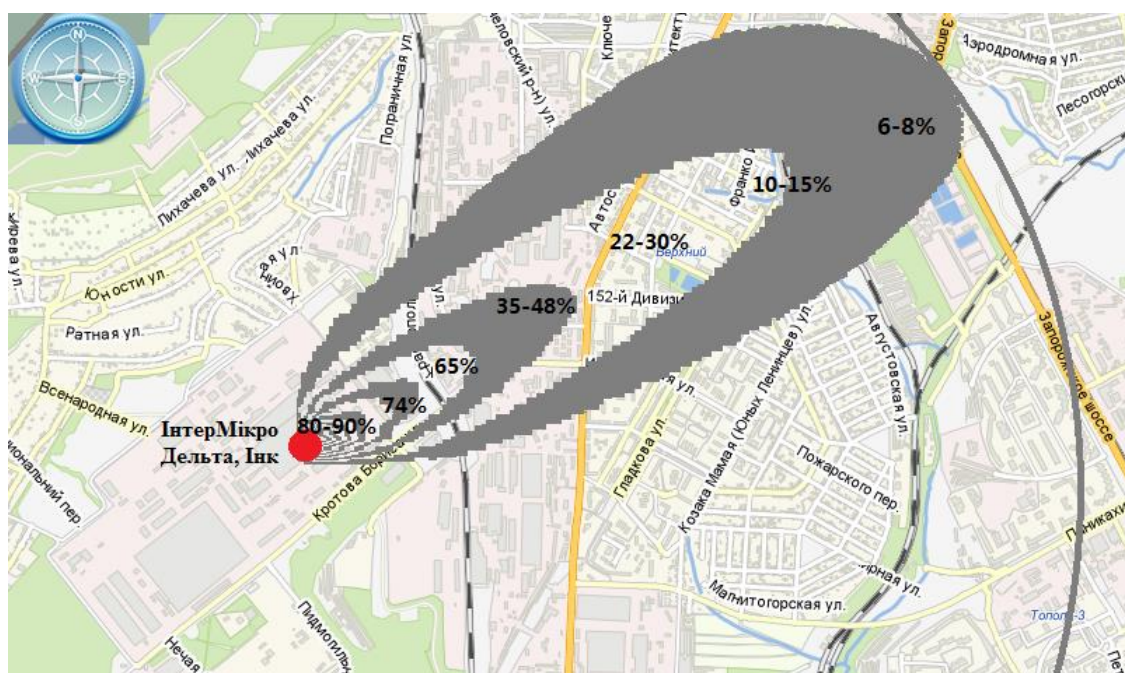


Рис. 3. Відсотковий розподіл концентрації вуглеводнів в зоні забруднення

На рис. 1 колом окреслено загальну зону забруднення, яка виникає при зміні метеорологічних умов, а саме напрямку вітру.

Графічне представлення результатів моделювання дає можливість швидко визначати межі зон техногенного забруднення і їх зміну при різних метеорологічних умовах, різній інтенсивності забруднювача.

Висновки. Представлена комп'ютерна система прогнозу рівня забруднення атмосферного повітря під дією техногенних джерел забруднення, яка дозволяє проводити процес моделювання в 2D і 3D наближенні. Час розрахунку складає від 10 с до 50 с, що важливо при проведенні великої кількості розрахунків на практиці. Комп'ютерна система може бути використана в комплексі організаційних заходів направлених на реалізацію сучасної політики в сфері контролю за забрудненням атмосферного повітря в місті, для вдосконалення автоматизованої системи екологічного моніторингу м. Дніпро, що є особливо важливим для промислового центру, оскільки саме викиди підприємств викликають екологічно небезпечну ситуацію в місті. Подальший розвиток даної системи необхідно проводити в напрямку розробки блоків, що дозволяють виконувати розрахунки з урахуванням рельєфу місцевості.

Перечень ссылок

1. Войтенко, А.В., Голик, Ю. С. (2010). Европейский подход к решению проблем загрязнения и обеспечения качества атмосферного воздуха. *Екологічна безпека*, 2, 23-24.
2. Jaćimovski, S., Miladinović, S., Radovanović, R., Pijazi V. (2017). Use of gaussian mathematical model in the distribution of sulphur dioxide into the atmosphere from point source. *Tehnički vjesnik*, 24(1), 157–162.

3. Biliaiev, M.M., Rusakova, T.I., Kolesnik, V.Ye., Pavlichenko, A.V. (2017). Determination of areas of atmospheric air pollution by sulfur oxide emissions from mining and metallurgical and energy generating enterprises. *Науковий вісник Національного гірничого університету*, 3, 100–106.
4. Qu, Y, Millez, M., Musson-Genon, L. (2010). Development of building resolving atmospheric CFD code taking into account atmospheric radiation in complex geometric. *Air Pollution Modeling and it's Application, NATO SPS Series C: Environmental Security*, 1–5.
5. Марчук, Г.И. (1982). *Математическое моделирование в проблеме окружающей среды*. Москва: Наука.
6. Згуровский, М.З., Скопецкий, В.В., Хрущ, В.К., Беляев, Н.Н. (1997). *Численное моделирование распространения загрязнения в окружающей среде*. Київ: Наукова думка.
7. Клімішина, М.Т. (2016). Стан та перспективи розвитку технологій переробки шин та їх вплив на довкілля. *Технологический аудит и резервы производства*, 6/2(32), 57-63.

АНОТАЦІЯ

Цель. Создание компьютерной системы для оценки уровня загрязнения атмосферного воздуха под действием организованных и неорганизованных техногенных источников.

Методика. Метод численного расчета концентрации примеси в атмосферном воздухе основывается на решении двумерных и трехмерных уравнений переноса примеси, которая непосредственно поступает от организованных или неорганизованных источников загрязнения. Методика учитывает процесс химической трансформации примеси в атмосфере. Численная модель основывается на расщеплении модельных уравнений и их решении с помощью неявных разностных схем относительно двумерной и трехмерной постановки.

Результаты. Создана компьютерная система оценки уровня загрязнения атмосферного воздуха, которая включает в себя два блока прогноза уровня загрязнения атмосферного воздуха на базе 2D и 3D моделей уравнения массопереноса, ряд модулей, которые учитывают процессы химической трансформации выбросов, вымывание примеси осадками, циклическое действие источников загрязнения, выбросы от автотранспорта, которые могут взаимодействовать с выбросами промышленных предприятий. Блок «Air-2» позволяет проводить экспресс-прогноз при отсутствии надежных входных данных, которые используются в блоке «Air-3». Компьютерная система включает модули графической обработки результатов прогнозирования, позволяя получать зоны загрязнения атмосферного воздуха различными видами примесей.

Научная новизна. Установлены закономерности загрязнения атмосферного воздуха выбросами организованных и неорганизованных техногенных источников, сделано оценку зон и уровня загрязнения прилегающих территорий к источнику загрязнения.

Практическая значимость. Разработанные прогнозные модели и блоки компьютерной системы позволяют оперативно определять концентрации загрязняющих веществ в атмосфере, зоны благоприятные для проживания населения и неблагоприятные, оценивать уровень экологической безопасности при функционировании крупных промышленных объектов или автомобильных магистралей и своевременно принимать меры по охране воздушной среды.

Ключевые слова: промышленное предприятие, автотранспорт, источник загрязнения, рассеивание, химическое взаимодействие, численная модель

ABSTRACT

Purpose. Creation of a computer system for assessing the level of atmospheric air pollution under the influence of organized and unorganized technogenic sources.

The methodology. The method of numerical calculation of the impurity concentration in atmospheric air is based on the solution of two-dimensional or three-dimensional impurity transport equations, which directly comes from organized or unorganized pollution sources. The technique takes into account the process of chemical impurity transformation. The numerical model is based on the splitting of model equations and their solution using implicit difference schemes.

Findings. A computer system for estimating the level of atmospheric air pollution has been developed. It includes two units for forecasting the level of atmospheric air pollution based on 2D and 3D models of the mass transfer equation, a number of modules that take into account the processes of chemical transformation of emissions, the washing out of impurities by precipitation, the cyclic action of pollution sources, motor vehicles that can interact with emissions from industrial enterprises. The "Air-2" block allows carrying out express forecast in the absence of reliable input data, which are used in the "Air-3" block. The computer system includes modules for graphical processing of results forecasting, allowing to obtain zones of air pollution with various types of impurities.

The originality. The regularities of atmospheric air pollution by the emissions of organized and unorganized technogenic sources are established, and the assessment of the zones and the level of contamination on the adjacent territories to the source of pollution is carried out.

Practical implication. The developed forecast models and blocks of the computer system allow us to determine quickly the concentrations of pollutants in the atmosphere, favorable and unfavorable areas for living, assess the level of environmental safety in the time of large industrial facilities or highways operation and take timely measures to protect the air environment.

Keywords: *industrial enterprise, motor transport, pollution source, dispersion, chemical interaction, numerical model*