

УДК 504.064.2.001.18

Р.В. СІПАКОВ

ЗАБРУДНЕННЯ АТМОСФЕРИ: СМОГИ ТА ТУМАНИ У ВЕЛИКИХ МІСТАХ УКРАЇНИ

***Анотація.** У статті розглянуті основні чинники забруднення атмосфери великих міст України, проаналізовані основні чинники виникнення смогів на прикладі міста Києва в період січня – лютого 2017 року. Для аналізу забруднення вибіркових точок міста Києва було використано математичну модель поширення твердих та газоподібних забрудників з урахуванням основних факторів впливу на процес розсіювання шкідливих домішок в повітрі: теплоти, турбулентності, хімічної кінетики і т. п. В результаті моделювання було підтверджено той факт, що смог над Києвом та на прилеглих територіях утворився в результаті дії антициклону та забруднення атмосфери шкідливими речовинами, сажею і т. п.*

***Ключові слова:** смог, аерозольно-пиліві токсиканти, аерозольно-газові забруднення, інверсія, циклон, антициклон, модель забруднення атмосфери.*

Вступ

Екологічний стан повітряного середовища у великих містах з інтенсивним автомобільним рухом, а також в околицях підприємств, що викидають в атмосферу безліч токсичних речовин, завжди вимагав особливої уваги. Актуальним завданням щодо забезпечення комфортних умов проживання населення на урбанізованих територіях є прогнозування поширення забруднень в повітряному басейні великого міста та в селітебних зонах.

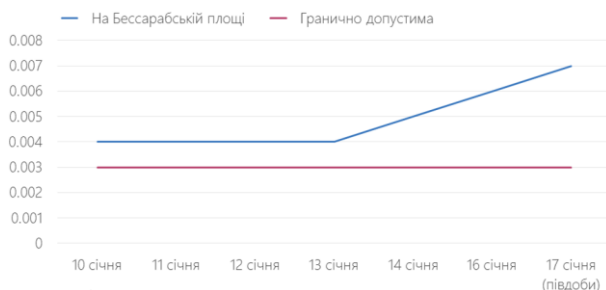
Атмосфера міста характеризується наявністю низки несприятливих факторів, дія яких на організм людини може викликати як порушення функціонального стану його органів та систем, так і розвиток патологічних станів. У структурі забруднень навколишнього середовища на території промислових міст, таких як Київ, Одеса та інші, значний вклад вносять аерозольно-газові токсиканти. Вони здатні довгий час циркулювати в системі «атмосфера – ґрунт – атмосфера», накопичуватись в органах і тканинах живих організмів, потрапляючи через системи дихання та травлення, тим самим збільшується їх токсична дія.

Забруднення повітря міст відбувається в основному в результаті процесів згоряння. Паливо зазвичай складається з вуглеводнів, за винятком в основному екзотичних домішок, таких як викиди ракетної промисловості, де іноді використовуються азот, алюміній і навіть берилій. Спалювання палива спочатку здається нешкідливим, але воно може призвести до утворення низки забруднюючих сполук вуглецю.

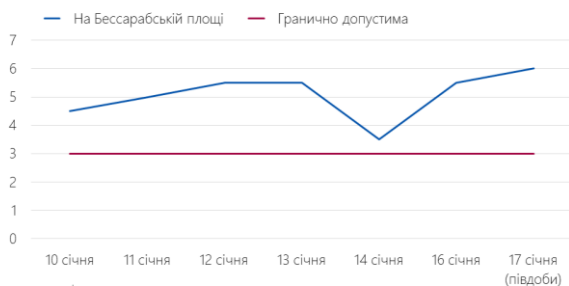
Найбільш несприятливі умови для забруднення атмосфери створюються взимку та навесні. В місті велика кількість джерел аерозольних викидів, в основному, це котельні та теплоелектростанції, які працюють на вугіллі, автотранспорт, тепловози на залізниці та інше. Крім того, при певних умовах (температурний режим, вологість, інтенсивність сонячної радіації і т. п.) аерозолі можуть утворюватись із газової фази окремих токсикантів. Для м. Києва такими є оксид вуглецю (до 25%), діоксин сірки (до 20%), діоксин

азоту (до 10%), фенол (до 3%), сірковуглець (до 3%), формальдегід (до 1%), сірководень (до 1%). За даними Центральної геофізичної лабораторії Українського Гідрометцентру, рівні формальдегіду, вуглекислого газу та азоту в Києві 17 січня 2017 року значно перевищували допустимі концентрації (рис. 1).

Середньодобова концентрація формальдегіду, мг/м³



Середньодобова концентрація оксиду вуглецю, мг/м³



Середньодобова концентрація діоксиду азоту, мг/м³

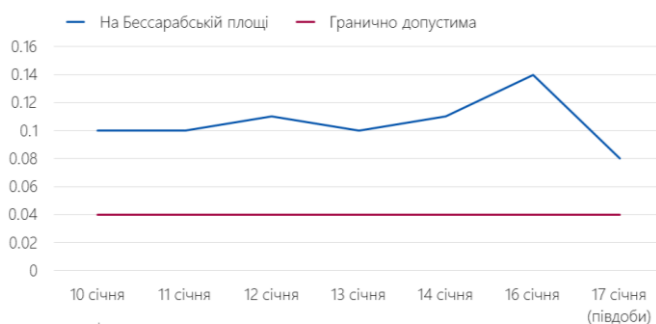


Рис. 1 – Дані Центральної геофізичної лабораторії Українського Гідрометцентру

Метеорологічні умови суттєво впливають на рівень концентрації атмосферних забрудників при незмінній потужності їх викидів. Концентрація в приземному шарі атмосфери залежить від температурної стратифікації атмосфери, швидкості вітру, інтенсивності опадів, атмосферного тиску, вологості повітря. Як правило, періоди зі зниженим рівнем забруднення

атмосфери виникають при циклонному характері погоди. Для них характерна хмарність, значні опади, сильний вітер, відсутність інверсії. Подібні ситуації сприяють швидкому очищенню повітря, інтенсивному розсіюванню домішок.

В залежності від макросиноптичних процесів, що формують погодні умови, спостерігається підвищення концентрації шкідливих домішок в приземному шарі атмосфери на фоні антициклонного характеру погоди, для якого притаманна стійка, одноманітна, переважно ясна погода з приземними інверсіями та слабкими вітрами. При температурній інверсії в шарі повітря, що розміщений безпосередньо над джерелами викидів, збільшення температури відбувається зі збільшенням висоти. Це призводить до того, що переміщення шарів повітря зменшується, тим самим, затримується перенос атмосферних домішок. В результаті аерозольно-газові забруднення зосереджуються біля земної поверхні, їх концентрації різко зростають.

Через інверсії в атмосфері вихлопні гази і промислові викиди не можуть розсіятися, що призводить до утворення смогу, який ми спостерігали в деяких областях України, Білорусії, Польщі в січні – лютому 2017 року.

16–19 січня 2017 року частину України огорнули тумани та смоги через антициклон «Бригітта». Бо саме при антициклоні утворюються оптимальні умови: відсутні фронтальні вітри, різкі зміни температури, спостерігається слабкий вітер або штиль. Як видно на прогностичних картах від 17–18 січня 2017 року (рис. 2), антициклон «Бригітта» накрив практично всю Україну.

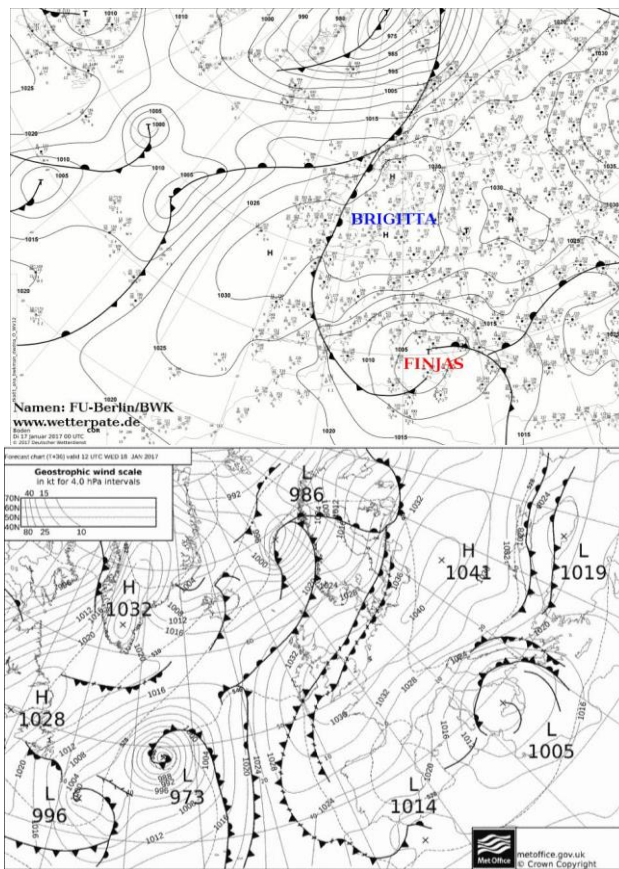


Рис. 2 – Прогностичні карти від 17–18 січня 2017 року. Антициклон «Бригітта»

Через інверсії (явища, коли навколоземні верстви повітря мають температуру значно нижче, ніж верхні шари) утруднена вертикальна циркуляція повітря. Це призводить до того, що вихлопні гази автомобілів і викиди промислових об'єктів накопичуються в навколоземних шарах і не можуть розсіятися.

Виклад основного матеріалу

Найбільш універсальними методами отримання кількісної та якісної картин розподілу забруднень є чисельні. Однак при використанні складних моделей і розрахунків на сітках з великою кількістю осередків число арифметичних операцій зазвичай настільки велике, що з таким навантаженням справляються лише багатопроцесорні обчислювальні системи.

Застосуємо моделі в часткових похідних, що мають високу точність і універсальність та дозволяють отримати як якісні, так і досить точні кількісні результати. Для точного моделювання процесів поширення аерозольно-газових токсикантів в тривимірній області необхідний облік безлічі чинників: молекулярної і турбулентної дифузії, конвекції (в тому числі теплової), слабкої стисливості середовища, хімічної кінетики, складної форми області. Існуючі моделі [2, 7–9] або враховують частину зазначених факторів, або враховують всі, але при цьому відрізняються значною неоднорідністю, що виражається в наявності трьох і більше різних типів рівнянь, до яких застосовуються різні методи інтегрування, що утруднює ефективно розпаралелення.

Розглянемо однорідну модель, що враховує всі вищеперелічені фактори і складається лише з двох підсистем: динамічної і кінетичної (хімічні реакції). Рівняння кожної з підсистем мають єдину форму. У кінетичну підсистему входять традиційні диференціальні рівняння першого порядку. У динамічну підсистему входять рівняння Нав'є – Стокса для трьох компонентів вектора швидкості газу, рівняння поширення тепла, рівняння слабкої стисливості газу, рівняння дифузії (з урахуванням швидкості витання) газоподібних речовин, рівняння для трьох компонентів вектора швидкості пилу, рівняння нерозривності для пилу (рівняння моделі турбулентності Абрамовича – Секундового).

Для пилу враховано силу тяжіння і опору потоку, а також дифузію. Всі динамічні рівняння приведені до вигляду:

$$\frac{\partial G}{\partial t} + \sum_{i=1}^3 v_i \frac{\partial N}{\partial x_i} = \sum_{i=1}^3 \frac{\partial}{\partial x_i} \left((R_G + \alpha_G v_{турб}) \frac{\partial N}{\partial x_i} \right) + K_G,$$

де G – одна із головних змінних моделі, (яка містить: v_i – проекція вектора швидкості на вісь x_i ; P – тиск; T – температура; $v_{турб}$ – турбулентна в'язкість; C_j – концентрація j -ї речовини; v_{pi} – проекція вектора швидкості пилу на вісь x_i ; ρ_p – густина пилу); x_1, x_2, x_3, t – змінні Ейлера; R_G та α_G – коефіцієнти; K_G – функція, вигляд якої залежить від рівняння:

$$K_{v_i} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial P}{\partial x_i} + F_i; \quad i = 1, 2, 3,$$

де $F_1 = 0$, $F_2 = 0$, $F_3 = bg\Delta T$; ρ – густина повітря, b – термічний коефіцієнт розширення повітря, ΔT – «надлишкова» температура, $g = 9,81$ м/с²;

$$K_p = -c^2 \sum_{i=1}^3 \frac{\partial v_i}{\partial x_i}, \quad c^2 = a^2 \rho,$$

де a – швидкість поширення малих збурень;

$$K_T = 0, \quad K_{v_{турб}} = v_{турб} \bar{\sigma} f \left(\frac{v_{турб} \bar{\sigma}}{8v_{мол}} \right) D - \gamma S,$$

$$S = \frac{v_{турб} (v_{мол} + \beta v_{турб})}{L_{min}^2}, \quad D = \sqrt{\sum_{i=1}^3 \sum_{j=1}^3 \frac{\partial v_i}{\partial x_j} \left(\frac{\partial v_i}{\partial x_j} + \frac{\partial v_j}{\partial x_i} \right)},$$

$$f(z) = 0,2 \frac{z^2 + 1,47z + 0,2}{z^2 - 1,47z + 1},$$

де $v_{мол}$ – молекулярна в'язкість; $\gamma = 50,0$; $\beta = 0,06$; L_{min} – найкоротша відстань до стінки;

$$K_{C_j} = \frac{dC_j}{dt}, \quad j = \overline{1, N},$$

де N – кількість речовин в суміші; $\frac{dC_j}{dt}$ – виражає зміну концентрації j -ї речовини в результаті хімічної реакції;

$$K_{\rho_p} = -\rho_p \sum_{i=1}^3 \frac{\partial v_{pi}}{\partial x_i}, \quad K_{v_{pi}} = -g_i + F_{pi}, \quad i = 1, 2, 3, \quad g_1 = 0, \quad g_2 = 0, \quad g_3 = g$$

$$F_{pi} = \frac{3}{8} C_D \frac{\rho}{\rho_{речов} a_p} |v - v_p| (v_j - v_{pi}),$$

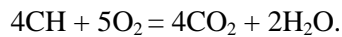
де C_D – коефіцієнт опору при заданих швидкостях потоку та частинок; $\rho_{речов}$ – густина речовини частинки; a_p – радіус частинки. Коефіцієнт опору визначають з наступної формули [5]:

$$C_D = \begin{cases} \frac{24}{Re_p}, \text{ при } Re_p < 0,1 \\ \frac{24}{Re_p} \left(1 + \frac{3}{16} Re_p + \frac{9}{160} Re_p^2 \ln(2 Re_p) \right), \text{ при } 0,1 \leq Re_p < 1, \\ \frac{24}{Re_p} (1 + 0,15 Re_p^{0,678}), \text{ при } 1 \leq Re_p < 900 \\ 0,44, \text{ при } 900 \leq Re_p \end{cases}$$

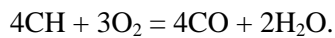
де Re_p – локальне число Рейнольдса для сферичної частинки пилу.

Вибір моделі турбулентності здійснюється за результатами чисельних експериментів з різними моделями (К.Е. Прандтля, Кармана, Ріварда, Абрамовича – Секундового) для завдання при турбулентному змішуванні затопленого плоскогонного закрученого струменя.

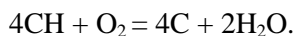
Взимку забруднення повітря міст відбувається в основному в результаті процесів згоряння. Звичайний процес згоряння палива відбувається відповідно до рівняння:



Цей процес є безпечним, оскільки ні CO_2 , ні вода не є токсичними речовинами. Однак, коли в процесі спалювання має місце нестача кисню, що може трапитися всередині двигуна або котла, тоді можуть утворитися токсичні компоненти. Рівняння можна записати у вигляді:



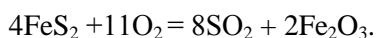
За таких умов утворюється оксид вуглецю (CO), отруйний газ. Якщо кисню ще менше, то можна отримати вуглець (тобто сажу):



При низьких температурах і у випадках відносно невеликої кількості O_2 реакції піролізу, тобто реакції, коли руйнування відбувається в результаті нагрівання, можуть викликати зміни в розташуванні атомів, що призводить до утворення поліциклічних ароматичних вуглеводнів в процесі спалювання. Найбільш сумновідомий – бензопірен – сполука, що викликає рак.

Таким чином, незважаючи на те, що спалювання палива спочатку здається нешкідливим, воно може призвести до утворення ряду забруднюючих сполук вуглецю.

Крім того, забруднення повітря можуть викликати домішки, що входять до складу палива. Найбільш поширеною домішкою у викопному паливі є сірка (S), частково представлена у вигляді мінералу піриту – FeS_2 . В деякому вугіллі може містяться до 6% сірки, яка перетворюється при спалюванні в SO_2 :



У паливі присутні й інші домішки, але сірка завжди вважалася найбільш типовим промисловим забруднювачем повітря. Сажа, CO_2 і SO_2 є первинними забруднювачами. Діоксид сірки добре розчинний і тому може розчинятися в атмосферному повітрі, яке конденсує навколо частинок, наприклад, диму.

Сліди металів – забруднювачів заліза (Fe) або марганцю (Mn) каталізують перехід розчиненого SO_2 в H_2SO_4 . Сірчана кислота має більшу спорідненість до води, тому утворена крапелька цієї кислоти додатково адсорбує воду. Крапельки постійно ростуть, і «туман-вбивця», вологий смог, згущується, досягаючи дуже низьких значень рН.

Перехід від вугілля до вуглеводневого палива зменшить небезпеку забруднення повітря частинками сажі. Однак з'явилися нові види забруднення, як первинного, так і вторинного, що виникають в результаті реакцій первинних забруднювачів з паливом, що не перегоріло, та киснем повітря.

Для рівнянь хімічної кінетики застосовні:

а) метод Гіра для жорсткої підсистеми кінетичних рівнянь;

б) явно-неявна схема Рожкова, що має достатній рівень точності і стійкості при меншій обчислювальній трудомісткості.

За допомогою розглянутої моделі побудуємо модель забруднення перехрестя двох вулиць (вул. Жилинська та Л. Толстого) міста Києва. На нижній межі задані розподіл температури і концентрацій (пилу і первинних забруднювачів): найвищі значення в районі перехрестя, включаючи стоп-лінії, менші – на дорогах поза перехрестям. Для моделювання було використано набір з 21 реакції, характерних для фотохімічного смогу: базові реакції утворення озону і пероксіацетилнітрату; реакції за участю оксидів азоту, формальдегіду та вуглеводнів $\text{C}_n\text{H}_{2n+2}$, які замикають ланцюги циклічних механізмів накопичення озону; інші реакції, в тому числі з утворенням парів азотної кислоти. Під пилом будемо розуміти частинки піску радіусом до 0,5 мкм.

Як бачимо з малюнка 3, в районі перехрестя утворився висхідний потік, обумовлений тепловою конвекцією, з'явилося і кілька зон поворотної течії. У верхній частині утворилася температурна інверсія, що перешкоджає розсіюванню забруднень (рис. 4, температура вказана в градусах Цельсія).

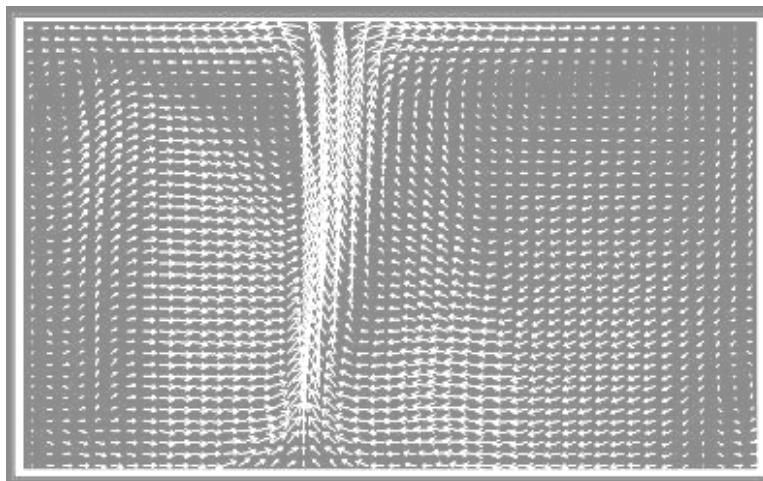


Рис. 3 – Розподіл швидкостей у фронтальному перерізі уздовж однієї з вулиць

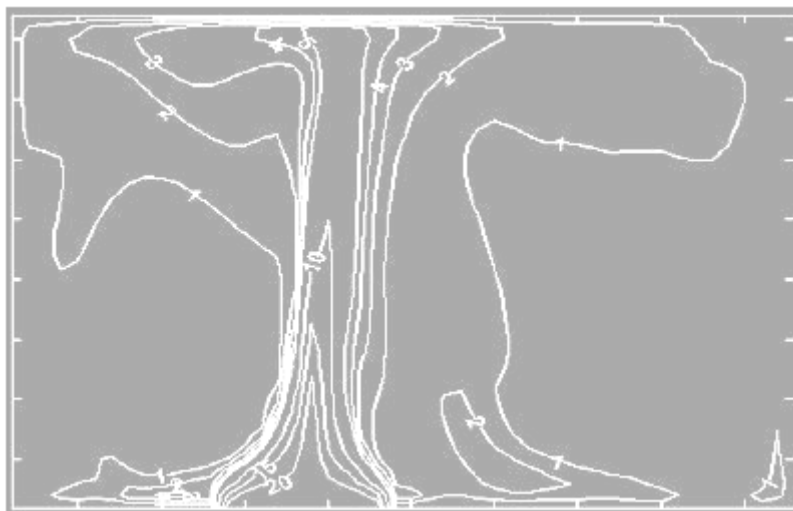


Рис. 4 – Ізолінії надлишкової температури у фронтальному перерізі уздовж однієї з вулиць

Висхідні потоки меншої інтенсивності виникли на дорогах поза перехрестям. У вуличних каньйонах, де транспортний потік малий і виділення тепла відсутнє, в нижній частині утворилися потоки, спрямовані в бік перехрестя. При цьому надходження забруднювачів в такі каньйони здійснюється у верхній частині області.

Найбільш забрудненою ділянкою виявилось перехрестя (найвищі концентрації первинних забруднювачів, рис. 5) і прилегла до нього зона (помірні концентрації первинних і найвищі концентрації вторинних забруднювачів, рис. 6).

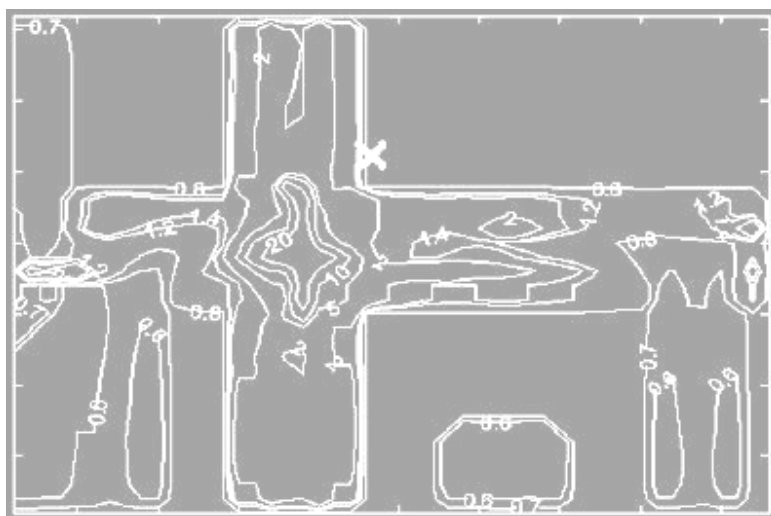


Рис. 5 – Ізолінії концентрацій чадного газу в горизонтальному перетині на рівні станції наземних вимірювань

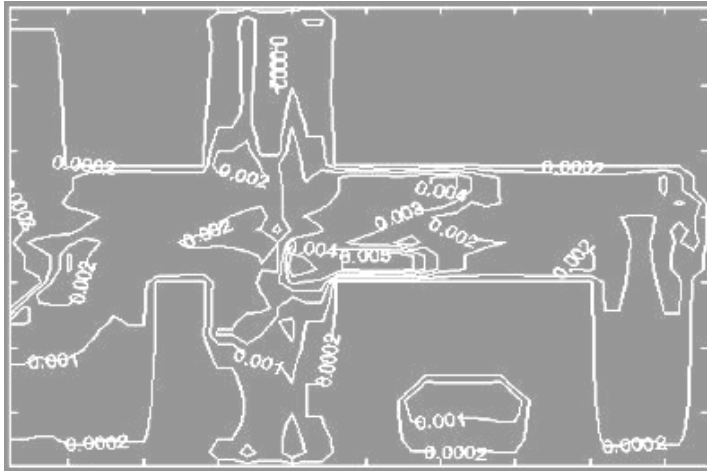


Рис. 6 – Ізолінії концентрацій озону в горизонтальному перетині на рівні станції наземних вимірювань

Також було змодельовано зону забруднення навколо промислової зони ТЕЦ-4 в місті Київ. В основі моделі – поширення діоксиду сірки SO_2 і дрібного пилу, що викидаються з труби підприємства. На верхній межі заданий горизонтальний повітряний потік, спрямований в бік міста, його швидкість вибрана з розрахунку, щоб на висоті випускного отвору труби швидкість вітру становила 2–4 м/с. Область є повністю відкритою. Фактором хімічної кінетики нехтуємо, так як вологість повітря вважається низькою, отже, розвиток вологого смогу неможливий. Значення концентрації діоксиду сірки та щільності пилу на виході труби розраховані приблизно, на підставі річних викидів. Точні дані про параметри частинок пилу також відсутні.

У верхній частині області утворився горизонтальний потік, що відносить викиди на значну відстань (рис. 7). При цьому турбулентна в'язкість у верхній частині має значну величину, а частки пилу взяті малими (радіусом порядку 10^{-4} м), тому сила опору частинок потоку велика і осідання пилового потоку на поверхню фактично не відбулося.

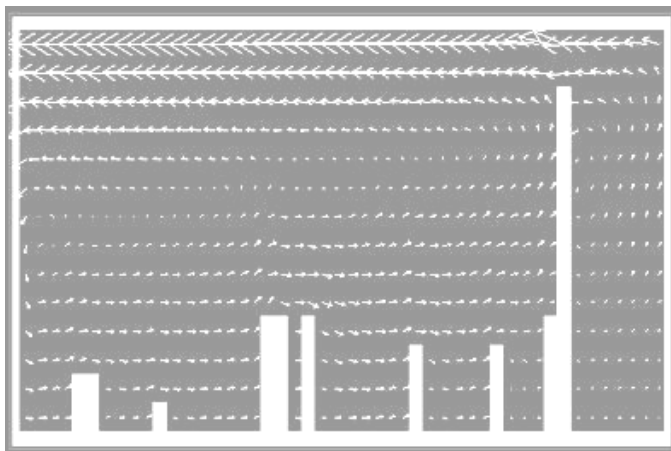


Рис. 7 – Розподіл швидкостей у фронтальному перерізі, що проходить через трубу підприємства

Інша ситуація з діоксидом сірки, де за рахунок дифузії і постійної швидкості осідання забрудненість атмосфери у поверхні вища (рис. 8).

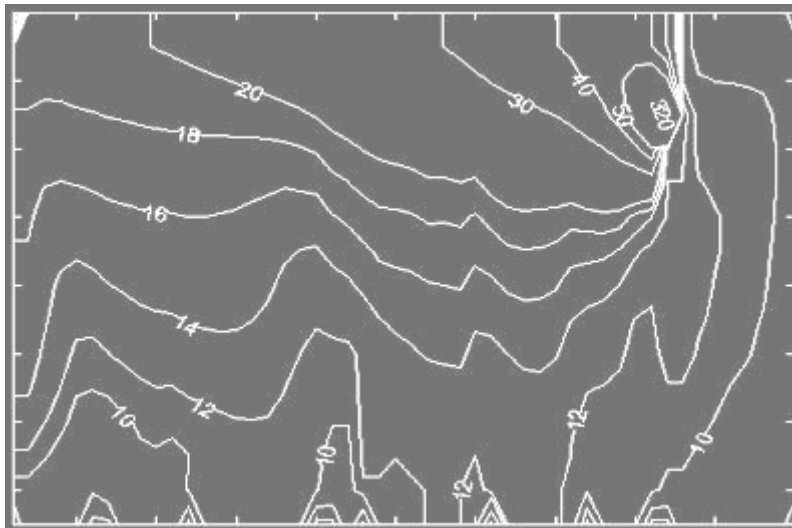


Рис. 8 – Ізольні концентрацій SO₂ у фронтальному перерізі, що проходить через трубу підприємства

Висновки

Таким чином, проведений аналіз показує, що транспорт (основний забруднювач Києва), енергопостачальні підприємства мають значний негативний вплив на компоненти навколишнього середовища і, отже, здоров'я людей. Причому максимальне антропогенне навантаження припадає на повітряний басейн міських територій. Зниження концентрації забруднюючих речовин, що містяться в димових газах, можна досягти на основі реалізації комплексу заходів, в рамках якого поряд з організаційними і технологічними вагоме місце займають спеціальні інженерно-екологічні заходи – пило-газоуловлювання, пило-газоочистка і пило-газорозсіювання.

У результаті антропогенного забруднення атмосфери при певних погодних умовах, наприклад, антициклон «Бригітта», виникає густий жовтуватий туман, що часто спричиняє токсичну дію на живі організми та рослинність.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Пекунов В.В. Параллельное решение задачи численного моделирования распространения загрязнений в воздушном бассейне большого города в окрестности предприятия / Пекунов В.В., Ясинский Ф.Н. // Препринт ИПМ № 36, Москва, 2003 г. – 14 с.
2. Марчук Г.И. Математическое моделирование в проблеме окружающей среды. – М.: Наука, 1982. – 319 с.
3. Турбулентное смешение газовых струй / Абрамович Г.Н., Крашенинников С.Ю., Секундов А.Н., Смирнова И.П. – М.: Наука, 1974.– 272 с.

4. Brief Description of MAQSIP Science. Draft Version 2.1. – MCNC North Carolina Supercomputing Center. – <http://www.emc.mcnc.org/products/maqsip/users/science.html>.
5. Bruse, M. (2002), ENVI-met implementation of the gas/particle dispersion and deposition model PDDM. – <http://www.geographie.ruhr-uni-bochum.de/agklima/envimet/documents/sources.PDF>.
6. Evaluation of MOBILE vehicle emission model. – FHWA-PD-94-38, Federal highway administration environmental analysis division / office of environment and planning, December, 1994. – 204 p.
7. Guideline on Air Quality Models (Revised) and Supplements. – EPA-450/2-78-027R et seq., published as Appendix W to 40 CFR Part 51 (7-1-99 Edition). U. S. Environmental Protection Agency, Research Triangle Park, North Carolina, 1999.
8. Piva, R., Orlandi, P. Numerical Solutions for Atmospheric Boundary Layer Flows over Street Canyons. Proceedings of the Fourth Int. Conference «Numerical Methods in Fluids Dynamics», ed. R. D. Richtmeyer, Springer-Verlag, New York, pp. 319-325 (1975).
9. Transport statistics bulletin: Road traffic statistics: 2000 – Statistics report SB (01) 19. – UK Department for transport, local government and the regions, 2001. – 41 p.
10. User's Guide for CAL3QHC Version 2: A Modeling Methodology for Predicting Pollutant Concentrations Near Roadway Intersections. – EPA-454/R-92-006, U. S. Environmental Protection Agency, Research Triangle Park, North Carolina, 1992.

Стаття надійшла до редакції 08.02.2017