

**ОХОРОНА НАВКОЛИШНЬОГО СЕРЕДОВИЩА**

УДК 504.054(45)

**О.І. Запорожець, д.т.н., проф.  
К.В. Синило, асист.****ПОРІВНЯННЯ ВИМІРЯНИХ І РОЗРАХОВАНИХ КОНЦЕНТРАЦІЙ  
ЗАБРУДНЕННЯ ПОВІТРЯ ВИКИДАМИ ВІД ДВИГУНІВ В АЕРОПОРТУ**

*Надано опис проведених експериментальних досліджень концентрацій забруднення повітря викидами від двигунів повітряних кораблів в аеропорту і їх порівняння з розрахованими значеннями за моделями програмного комплексу PolEmiCa.*

*Experimental measuring of air pollution in airport, produced by aircraft emission, is described and compared with calculated values due to modeling software PolEmiCa.*

**Вступ**

Вплив повітряного транспорту на атмосферу – об'єкт численних досліджень, але лише в деяких з них розглядається забруднення атмосферного повітря в районі аеропорту. В аеропортах вимірюють концентрації основних забруднюючих речовин (ЗР) – діоксиду вуглецю, оксидів азоту, діоксидів сірки, вуглеводнів і зважених частинок, а також використовують розрахункові моделі (EDMS, LASPORT і ALAQS) для побудови полів концентрацій ЗР у районі аеропорту.

Інвентаризація джерел викидів не завжди достовірна, оскільки на території аеропорту експлуатується велика кількість різних емісійних джерел.

Для вдосконалення процедур інвентаризації і оцінки джерел забруднення повітря в Міжнародному аеропорту «Афіни» (МАО) були виконані вимірювання в межах міжнародного проекту «ECATS» 13–25 вересня 2007 р. за допомогою устаткування, наданого організаціями-учасниками:

– Інститутом метеорології і кліматології, Гарміш – Партенкірхен, Німеччина (DOAS, FTIR системи вимірювань), IFU;

– Національним університетом, Афіни, Греція (устаткування на станціях моніторингу в районі МАО), NKUA;

– Вюпертальським державним університетом (DOAS, устаткування для вимірювання CO, CO<sub>2</sub>), BUW.

Результати експерименту були використані для перевірки достовірності комплексної розрахункової моделі НАУ, покладеної в основу програми PolEmiCa [1].

**Опис експерименту  
в Міжнародному аеропорту «Афіни»**

У районі МАО були визначені такі задачі експериментальних досліджень:

– оцінка емісійних характеристик джерел забруднення повітря в зоні аеропорту для моделювання якості атмосферного повітря;

– визначення репрезентативності точок (станцій) моніторингу з метою оцінки якості повітря в районі аеропорту та довколишніх районах, а також перевірки результатів моделювання;

– створення метеорологічної бази даних з метою оцінки і прогнозу рівнів забруднення повітря в районі аеропорту і введення достовірних початкових даних для систем моделювання.

Організація вимірювань у МАО включає такі компоненти:

– одна пересувна станція, яка забезпечувала моніторинг якості атмосферного повітря на території аеропорту (NO<sub>2</sub>, NO<sub>x</sub>, NO, SO<sub>2</sub>, CO, O<sub>3</sub>, PM10 і вуглеводні);

– п'ять стаціонарних станцій МАО, що виконували моніторинг рівнів забруднення атмосферного повітря навколо аеропорту (NO<sub>2</sub>, NO<sub>x</sub>, NO, SO<sub>2</sub>, CO, O<sub>3</sub>, PM10 і вуглеводні) з урахуванням переважаючого напрямку і швидкості вітру та вимірювали концентрації бензолу, толуолу і ксилену;

– метеорологічна станція на території аеропорту, яка забезпечувала безперервні вимірювання швидкості і напрямку вітру, атмосферного тиску, температури, відносної вологості, кількості опадів і сонячної радіації;

– система SODAR/RASS, яка забезпечувала безперервні вимірювання профілів температури, швидкості вітру і характеристик турбулентності атмосфери;

– система вимірювань DOAS, яка виконувала не тільки постійний моніторинг якості атмосферного повітря ( $\text{NO}$ ,  $\text{NO}_x$  і  $\text{O}_3$ ) в зоні аеропорту, але і дозволила оцінити внесок емісій авіаційних двигунів (АД).

Оксиди азоту  $\text{NO}_x$  є об'єктом ретельного дослідження, оскільки вони істотно впливають на рівень вмісту озону як у верхньому, так і в нижньому шарах атмосфери. Для виявлення й оцінки концентрації  $\text{NO}_x$  в МАА використовували систему вимірювання DOAS.

Система вимірювання DOAS складається з джерела радіації – ксенонової лампи – і спектрометра – «одержувача», розташованого на певній відстані від джерела, що визначає шлях абсорбції.

Період вимірювання становив 3 хв.

Схему розташування устаткування DOAS на території МАА показано на рис. 1. Вона ґрунтується на фізичному ефекті абсорбції газами радіації в ультрафіолетовому і видимому спектрі (200–400 нм). Цей діапазон відповідає межі виявлення  $\text{NO}_x$ ,  $\text{O}_3$  і ароматичних вуглеводнів. DOAS – найчутливіший метод для виявлення  $\text{NO}$  і  $\text{NO}_2$ . Зокрема, межа виявлення  $\text{NO}$  становить 7 ppbv.

З метою оцінки емісій АД і подальшого їх порівняння з результатами моделювання розглянемо детально експеримент, виконаний системою вимірювання DOAS (рис. 1, ділянка А). Експлуатаційні операції за період злітно-посадкового циклу (ЗПЦ) руху повітряного корабля (ПК) призводять до викиду низки ЗР, у т. ч.  $\text{NO}_x$ .

Оскільки істотні концентрації  $\text{NO}_x$  утворюються за максимального режиму роботи двигунів ПК, що відповідає режиму розбігу ПК по злітно-посадковій смузі (ЗПС), система DOAS була встановлена поблизу торця ЗПС 03L з урахуванням переважаючого північно-східному напрямку вітру і магнітного курсу зльоту (21 R).

Спектрометр DOAS було розташовано на відстані 210 м від торця ЗПС 03L.

Таким чином, DOAS сканує струмінь газів від АД, що відпрацювали, у момент проходження між ксеноновою лампою і спектрометром. Зафіксована спектрометром DOAS концентрація  $\text{NO}_x$  відповідає піку гаусового закону розподілу концентрації, який найчастіше використовують в моделях забруднення атмосферного повітря.

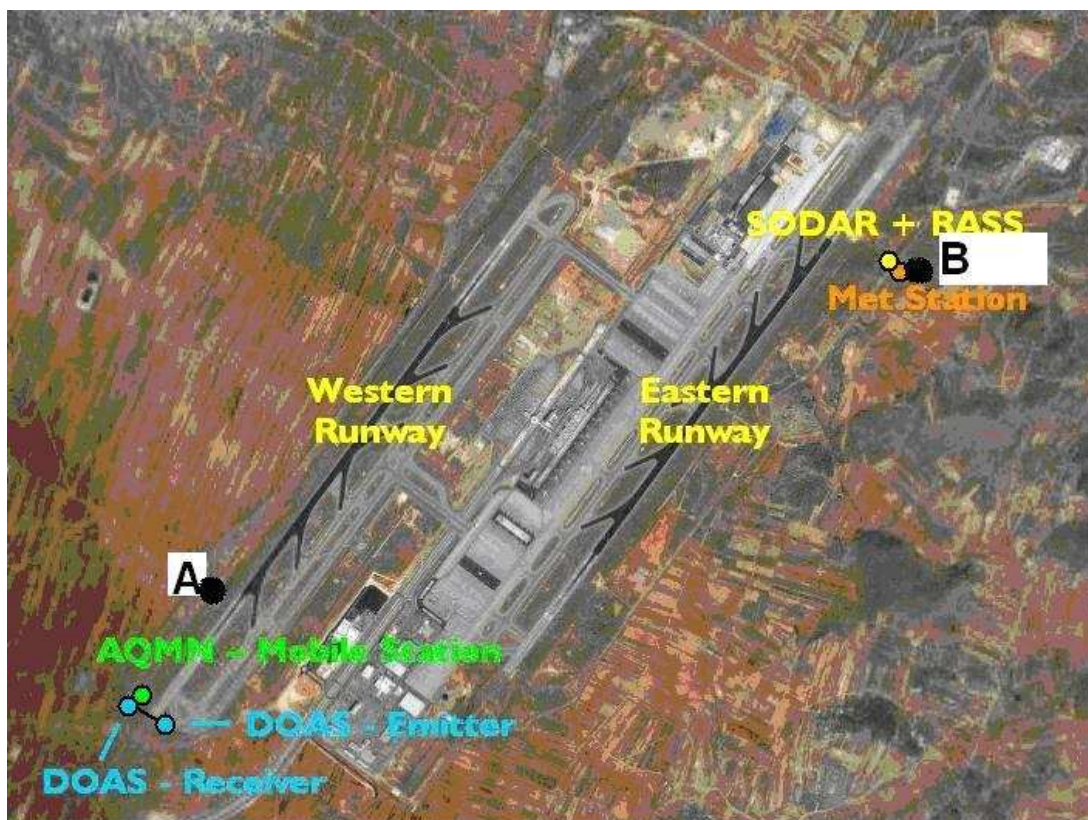


Рис. 1. Схеми розташування устаткування в районі МАА для спостереження за концентраціями забруднення атмосферного повітря і метеорологічними умовами

У цьому дослідженні система DOAS вимірює концентрацію  $\text{NO}_x$  на суттєвій відстані від АД, значення якого істотно залежить від напрямку вітру, а саме від кута між віссю ЗПС ( $36^\circ$ ) і напрямом вітру. Виміряне значення концентрації  $\text{NO}_x$  зазвичай невелике, оскільки домішка розбавляється струменем відпрацьованих газів і подальшою атмосферною дифузією.

Система DOAS виконує моніторинг не тільки емісій АД, але й інших джерел забруднення. Проте, аналізуючи безперервні вимірювання  $\text{NO}_x$  і зіставляючи їх з графіком руху ПК, можна спостерігати чітку кореляцію. А саме, час розгону ПК відповідає яскраво вираженому піку концентрації  $\text{NO}_x$  у ряді безперервних спостережень DOAS. Так, за період виконаних експериментальних досліджень на території МАА було вибрано один день – 20 вересня, протягом якого було відзначено 20 піків  $\text{NO}_x$ , що відповідає експлуатації 20 ПК (рис. 2) за період часу 14.00–16.00.

Згідно з діаграмами (рис. 2), піки концентрації  $\text{NO}_2$  відповідають різкому зниженню концентрації  $\text{O}_3$ , що вказує на хімічні процеси взаємодії  $\text{NO}_2$  і  $\text{O}_3$  в струмені відпрацьованих газів і достовірність спостережень системи DOAS.

Окрім метеорологічної станції аеропорту, на ділянці В (рис.1) було встановлено устаткування SODAR, LIDAR і USA (ультразвуковий анемометр) для визначення вертикальних профілів швидкості вітру, температури і турбулентності атмосфери.

Ультразвуковий анемометр фіксує значення швидкості і напрям вітру кожні 30 с. На підставі даних спостереження можна визначити в межах 1–5 км висоту змішування, стратифікацію атмосфери і характеристики атмосферної дифузії.

Таким чином, перелічені метеорологічні дані дозволяють оцінити розсіювання домішок як в горизонтальному, так і у вертикальному напрямках з урахуванням турбулентної дифузії в межах шару змішування.

Саме вимірювання оксидів азоту методом DOAS 20 вересня 2007 р. були використані для оцінки результатів моделювання з використанням комплексної моделі НАУ.

Метеорологічна база забезпечила початкові дані (швидкість і напрям вітру, вертикальний профіль температури) для моделювання згідно з періодом експлуатації ПК.

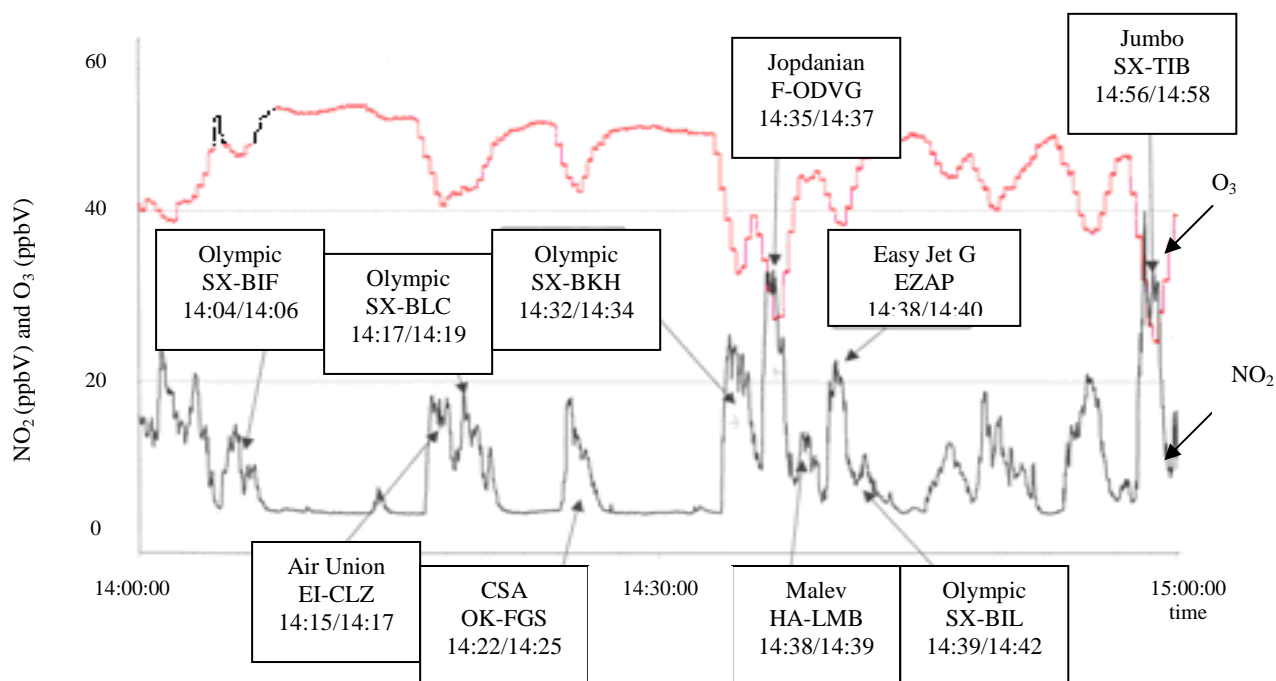


Рис. 2. Концентрація  $\text{NO}_2$  і  $\text{O}_3$  за 20.09.2007 згідно з безперервним вимірюванням DOAS

### Комплексна модель розсіювання НАУ

Атмосферне повітря під час експлуатації літаків цивільної авіації забруднюється викидами АД шкідливих ЗР протягом злітно-посадкового циклу (ЗПЦ). Важливою особливістю цього джерела забруднення є наявність струменя відпрацьованих газів, які можуть переноситися на достатньо великі відстані. Значення відстані перенесення домішки ЗР струменем визначаються режимом роботи АД, режимом руху літака, значеннями метеорологічних параметрів.

Вимірювання параметрів емісії АД ще не відображає характеру впливу авіації на атмосферне повітря. Чинники, які впливають на різницю між рівнями емісії АД і вимірними значеннями концентрацій ЗР в атмосферному повітрі, такі:

- тип АД у силовій установці ПК;
- компонування силової установки в конструкції ПК;
- параметри відпрацьованих газів АД, передусім температура і швидкість струменя на зрізі сопла двигуна;
- етап руху ПК (стоянка, рулювання, розгін по ЗПС з утворенням вихрової пелени);
- метеорологічні параметри (швидкість і напрям вітру, атмосферна стійкість тощо).

Таким чином, розробка моделі оцінки забруднення атмосферного повітря в районі аеропорту, яка враховує вплив експлуатаційних чинників ПК і метеорологічних умов на характер розсіювання викидів ЗР, є актуальною задачею.

У Національному авіаційному університеті (НАУ) розроблено комплексну модель оцінки забруднення, яка складається з таких основних складових:

- 1) моделі емісії ЗР АД, що враховує вплив експлуатаційних чинників;
- 2) моделі перенесення домішки ЗР струменями відпрацьованих газів АД;
- 3) моделі розсіювання домішки ЗР в атмосферному повітрі в результаті перенесення вітром і дії атмосферної турбулентності.

Модельне рівняння перенесення домішок в атмосфері з постійними коефіцієнтами атмосферної турбулентної дифузії має вигляд

$$\frac{dc}{dt} + u_b \frac{dc}{dx} = k_x \frac{d^2c}{dx^2} + k_y \frac{d^2c}{dy^2} + k_z \frac{d^2c}{dz^2}, \quad (1)$$

де

$c$  – концентрація домішки;

$u_b$  – швидкість вітру;

$k_x, k_y, k_z$  – коефіцієнти турбулентної дифузії.

Домішки вважаються хімічно неактивними. Вісь абсцис прямокутної системи координат збігається з напрямом вітру, вісь аплікату спрямовано вгору перпендикулярно поверхні землі, вісь ординат доповнює репер до правої трійки векторів. Точне розв'язання модельного рівняння (1) має такий вигляд:

$$c(x, y, z, t) = \frac{M}{8(\pi t)^{3/2} \sqrt{k_x k_y k_z}} \exp \times \left( -\frac{(x - x_0 - u_b t)^2}{4k_x t} - \frac{(y - y_0)^2}{4k_y t} \right) \times \left[ \exp\left(-\frac{(z - z_0 - H)^2}{4k_z t}\right) + \exp\left(-\frac{(z + z_0 + H)^2}{4k_z t}\right) \right], \quad (2)$$

де

$M$  – залповий викид маси ЗР (домішки) від АД за одиницю часу, г/с;

$x_0, y_0, z_0$  – поточні координати джерела викиду відносно введеної системи відліку;

$H$  – висота спливання хмари ЗР від одного залпу, м.

Координати рухомого джерела викиду ПК ( $x_0, y_0, z_0$ ) є змінними, тому при інтегруванні рівняння (2) протягом періоду усереднення концентрації (для максимально-разових гранично-допустимих концентрацій період інтеграції  $T = 1800$  с, для середньодобової концентрації відповідно  $T = 43200$  с) координати джерела викиду необхідно визначати залежно від швидкості і прискорення руху ПК у кожний момент часу  $t$ . У такому разі оцінка миттєвого і усередненого значень концентрації домішки ЗР в атмосферному повітрі отримала назву моделі точкового пересувного джерела на підставі рішення нестационарного рівняння турбулентної дифузії (1).

Поле концентрації ЗР для будь-якої точки досліджуваної ділянки в будь-який момент часу для залпового джерела визначають за формулою (2). На окремих етапах ЗПЦ методика дозволяє розраховувати концентрації ЗР від нерухомих точкових, лінійних і площадкових миттєвих джерел. Наприклад, модель нерухомого (стаціонарного) точкового джерела використовують для оцінювання поля забруднення атмосферного повітря в результаті викиду ЗР під час випробування двигунів, на місці стоянки ПК під час запуску і прогрівання двигунів:

$$c_{\text{м.м.точ}} = \frac{M \exp \left[ -\frac{(y - y_0)^2}{2\sigma_{y0}^2 + 4k_y t_{\text{max}}} - \frac{H^2}{2\sigma_{z0}^2 + 4k_z t_{\text{max}}} \right]}{u_b [\sigma_{y0}^2 + 2k_y t_{\text{max}}][\sigma_{z0}^2 + 2k_z t_{\text{max}}]^{1/2}}, \quad (3)$$

де

$\sigma_{x0}, \sigma_{y0}, \sigma_{z0}$  – дисперсії меж струменя відпрацьованих газів двигунів ПК.

Максимальне миттєве значення концентрації  $c_{m,m}$  в досліджуваній точці утворюється у момент часу  $t_{max}$ :

$$t_{max} = \Delta x / u_B + [\Delta x k_x / u_B]^{1/2}, \quad (4)$$

де

$\Delta x$  – відстань між досліджуваною точкою і точкою початку процесу атмосферної дифузії і перенесення домішки ЗР вітром.

Модель лінійного миттєвого джерела можна використовувати для ділянок руління ПК у районі аеродрому, якщо напрям вітру не збігається і не є протилежним напрямку руху ПК:

$$c_{m,m \text{ ліній}} = \frac{\text{Mexp} \left[ -\frac{(z - z_0)^2}{2\sigma_{z0}^2 + 4k_z t_{max}} \right]}{u_{ліній} [\sigma_{x0}^2 + 2k_x t_{max}] [\sigma_{z0}^2 + 2k_z t_{max}]^{1/2}}, \quad (5)$$

$$u_{ліній} = u_{ПК} \cos \psi,$$

де

$u_{ПК}$  – швидкість руху ПК;

$\psi$  – кут між напрямками вітру і руху ПК.

Для визначення сумарної концентрації ЗР від одного ПК підсумовуються відповідні середні концентрації від усіх залпів. Ці ж концентрації дають повне уявлення про поле концентрацій на цій території [2]. Аналогічно концентрації підсумовуються за наявності двох і більше ПК шляхом складання відповідних компонентів забруднення. Точність результатів розрахунку концентрації ЗР в атмосферному повітрі викидами від двигунів ПС визначають декількома чинниками: точністю оцінки залпового викиду маси ЗР, швидкості вітру і коефіцієнтів турбулентної дифузії, дисперсії меж струменя відпрацьованих газів двигунів ПК, а також за відповідністю умов забруднення повітря виду використаної моделі за формулами (2), (3) або (5).

Похибка оцінки залпового викиду маси ЗР для двигунів ПК становить до 35% [3]. Сьогодні оцінки ґрунтуються на результатах сертифікаційних випробувань АД [4; 5]. У цій роботі оцінка адекватності моделей і взагалі використання ейлерового підходу до оцінки забруднення атмосферного повітря викидами від двигунів ПК виконана шляхом порівняння з результатами вимірювання концентрацій ЗР, виконаних в аеропорту, в точці контролю, розміщеній біля ЗПС. Більшість вимірюваних концентрацій визначається умовами розгону літака по ЗПС, коли він знаходиться на віддалі 1000–1300 м від точки контролю концентрації, за середнього значення відстані 1210 м. Для цієї відстані отримано розрахункові значення концентрацій з використанням моделей (2), (3) або (5). За даними табл. 1 можна бачити вплив швидкості вітру та струменя відпрацьованих газів АД.

В умовах розвинутої і помірної турбулентності атмосфери можливо, що за швидкостей вітру 4–8 м/с коефіцієнти атмосферної турбулентності зберігатимуть постійні значення. У даних умовах  $k_x = 2,2$ ,  $k_y = 2,0$ ,  $k_z = 3,0$  м<sup>2</sup>/с. Діапазон зміни швидкостей вітру спостерігався при вимірюваннях концентрацій. В табл. 1 результати отримано зі збереженням значень коефіцієнтів турбулентної дифузії постійними. Дисперсії  $\sigma_x$  і  $\sigma_z$  визначаються в цьому випадку часом установлення в точці контролю максимального значення миттєвої концентрації (4).

Струмień відпрацьованих газів двигунів ПК зумовлює перенесення домішки ЗР на відстань  $S_a$  і висоту  $\Delta h_a$  спливання нагрітого струменя над висотою установки двигунів. Параметри струменя розраховано за алгоритмами програми PolEmiCa [1] і наведено в табл. 1. Як видно з табл. 1, вилучення з обліку струменя відпрацьованих газів двигунів ПК, які оцінюються дисперсіями меж  $\sigma_{x0}$ ,  $\sigma_{y0}$ ,  $\sigma_{z0}$ , обумовлює перевищення розрахункових значень концентрації в 2–5 разів. Розрахунок виконано для умов нерухомого ПК. Час інтегрування рівняння (2) визначено за умови встановлення в точці контролю стаціонарного значення концентрації. Для спостережуваних метеорологічних умов модель стаціонарного джерела (3) дає значення концентрацій в 2–3 рази менші порівняно з результатами за більш загальною нестаціонарною моделлю (2).

### Порівняння з результатами вимірювань концентрацій в аеропорту

Дані експерименту в МАА були використані для порівняння з результатами розрахунку за комплексною моделлю НАУ [1]. З використанням наведеної моделі виконано розрахунок концентрації оксидів азоту  $NO_x$  з урахуванням розбавлення викиду  $NO_x$  струменем відпрацьованих газів під час розбігу ПК по ЗПС і розсіювання  $NO_x$  метеорологічними чинниками (швидкістю і напрямом вітру, атмосферною дифузиею). Такі обчислення для 10 літаків, які експлуатувалися на території МАА 20.09.2007, наведено в табл. 2.

### Висновки

Результати моделювання не достатньо добре корелюють з результатами вимірювань. Наведена різниця обумовлена існуючою невизначеністю періода вимірювань, метеорологічних параметрів і даних емісії ЗР. Для розрахунку використовували дані сертифікації двигунів, а не реальні дані, які у принципі не є наявними.



Таблиця 1

**Концентрації оксидів азоту, розраховані за моделлю точкового стаціонарного  $q_{NOpoint}$  і точкового пересувного джерела  $q_{NOmoving}$ , мг/м<sup>3</sup>**

Вплив струменя	$u_b, \text{м/с}$	3,9	4,9	5,9	6,9	7,9
Без урахування струменя	$\frac{\sigma_x}{\sigma_z}, \text{м}$	$\frac{1365,1}{1861,5}$	$\frac{1086,5}{1481,6}$	$\frac{902,4}{1230,5}$	$\frac{771,6}{1052,2}$	$\frac{673,9}{919,0}$
	$q_{NOpoint}$	0,002	0,002	0,002	0,002	0,002
	$q_{NOmoving}$	0,0043	0,006	0,0079	0,01	0,012
З урахуванням струменя	$\frac{S_a}{\Delta h_a}, \text{м}$	$\frac{444}{60,1}$	$\frac{354}{31,5}$	$\frac{294,4}{18,4}$	$\frac{251}{1374,0}$	$\frac{220}{7,7}$
	$\frac{\sigma_x}{\sigma_z}, \text{м}$	$\frac{2805,7}{3650,7}$	$\frac{2089,5}{2705,6}$	$\frac{1657,5}{2137,6}$	$\frac{1374,0}{1766,2}$	$\frac{1172,0}{1502,0}$
	$q_{NOpoint}$	0,00058	0,00086	0,001	0,001	0,0011
	$q_{NOmoving}$	0,00086	0,0019	0,0029	0,004	0,0052

Таблиця 2

**Порівняння концентрацій NO<sub>x</sub> вимірних DOAS і розрахованих за комплексною моделлю НАУ в районі МАА**

Період часу	АД	Витрата викиду NO <sub>x</sub> , г/с	Виміряна DOAS концентрація NO <sub>x</sub> , мг/м <sup>3</sup>	Метеоумови		Розрахована концентрація NO <sub>x</sub> , мг/м <sup>3</sup>		Відстань між DOAS і ПК, м
				швидкість вітру	напрямок вітру	без урахування струменя	з урахуванням струменя	
14:15   14:17	CFM56-3	78,80	33,00	5,85	46,10	0,365	0,229	1209,04
Коефіцієнти атмосферної дифузії				$K_z=3,0$	$K_{xy}=2,2/2$			
14:17   14:19	CFM56-3	78,80	32,90	5,67	46,24	0,391	0,237	1185,9
Коефіцієнти атмосферної дифузії				$K_z=3,0$	$K_{xy}=2,2/2$			
14:22   14:25	CFM56-3B-2	78,80	30,57	5,50	45,60	0,435	0,237	1259,2
Коефіцієнти атмосферної дифузії				$K_z=3,0$	$K_{xy}=2,2/2$			
14:32   14:34	CFM56-3B-2	78,80	62,64	5,76	46,70	0,401	0,246	1131,1
Коефіцієнти атмосферної дифузії				$K_z=3,0$	$K_{xy}=2,2/2$			
14:35   14:37	CF6-80C	169,74	89,46	7,33	51,00	1,320	1,104	811,4
Коефіцієнти атмосферної дифузії				$K_z=4,0$	$K_{xy}=2,2/2$			
14:38   14:40	CFM56-5B-5	38,98	46,09	4,76	45,00	0,925	0,186	1342,4
Коефіцієнти атмосферної дифузії				$K_z=2,5$	$K_{xy}=1,5$			
14:56   14:58	JT9D-7R4G	401,44	90,41	5,72	43,08	12,31	7,87	1508,9
Коефіцієнти атмосферної дифузії				$K_z=3,0$	$K_{xy}=2,2/2,0$			
15:10   15:13	CFM56-5B-3	90,36	51,70	5,49	46,60	1,004	0,576	1141,6
Коефіцієнти атмосферної дифузії				$K_z=2,5$	$K_{xy}=1,5$			
15:34   15:37	CFM56-5B-4	68,88	23,32	4,54	42,90	2,17	1,012	1118,0
Коефіцієнти атмосферної дифузії				$K_z=2,3$	$K_{xy}=1,5$			
15:38   15:41	CFM56-3	78,80	17,98	5,54	45,3	0,480	0,196	1299,6
Коефіцієнти атмосферної дифузії				$K_z=3$	$K_{xy}=2,2/2$			

### Література

1. Zaporozhets O., Sinilo K. PolEmiCa – tool for air pollution and aircraft engine emission assessment in airports // 2nd World Congress Proc. “Aviation in XXI Century”. – Environment Protection Symposium, September 19-21 2005. – P. 4.22–4.29.  
 2. Методика контролю атмосферного повітря в окрестности аеропорта. – М.: Министерство гражданской авиации; Департамент воздушного транспорта; ГосНИИГА, 1992. – 18 с.

3. Методика расчета выбросов загрязняющих веществ двигателями воздушных судов гражданской авиации. – М.: ФГУП ГосНИИГА, ЗАО ЦЭБ ГА, 2007. – 50 с.  
 4. Международные стандарты и рекомендуемая практика «Охрана окружающей среды». Приложение 16 к Конвенции о международной организации ГА. Т. 2. «Эмиссия авиационных двигателей». – 2-е изд. – Монреаль, 1993. – 96 с.  
 5. Банк данных ИКАО по эмиссии выхлопных газов двигателей. – Вып. 15 от 08.04.2007.

Стаття надійшла до редакції 17.03.09.