

**ОХОРОНА НАВКОЛИШНЬОГО СЕРЕДОВИЩА**

УДК 629.7.067

<sup>1</sup>**В. П. Бабак**, чл.-кор. НАНУ, ректор НАУ<sup>2</sup>**Д. Г. Бабейчук**, заст. Голови Державіатрансу України<sup>3</sup>**О. І. Запорожець**, д-р техн. наук, проф.**МОДЕЛЬ ОБҐРУНТУВАННЯ ОЦІНЮВАННЯ ЕКОЛОГІЧНОЇ ВИГОДИ ВІД УПРОВАДЖЕННЯ CNS/ATM ТЕХНОЛОГІЙ КЕРУВАННЯ ПОВІТРЯНИМ РУХОМ**<sup>1</sup>НАУ, кафедра інформаційно-вимірювальних систем, E-mail: [ivs@nau.edu.ua](mailto:ivs@nau.edu.ua)<sup>2</sup>Державіатранс України<sup>3</sup>НАУ, кафедра безпеки життєдіяльності

*Попередні результати різних досліджень показують, що до 2015 р. слід чекати додаткового поліпшення споживання палива і зниження емісії CO<sub>2</sub> на 5% завдяки вжиттю заходів щодо реалізації систем CNS/ATM. Застосування систем CNS/ATM загалом матиме переваги за трьома напрямками: поліпшення пропускної здатності аеропортів, відповідно зменшення кількості затримок у завантажених аеропортах; скорочення тривалості польотів за рахунок використання більш прямих маршрутів; зменшення вертикального ешелонування. Розроблено параметричну модель для детального дослідження впливу висоти і швидкості польотів на викиди забруднювальних речовин і споживання палива авіадвигунами, що дозволяє оцінити екологічну ефективність упровадження CNS/ATM технологій.*

*Previous results of different researches show that in 2015 it follows to expect the additional improvements in fuel consumption and decrease of CO<sub>2</sub> emission on 5% by implementation of the CNS/ATM systems. Application of the CNS/ATM systems will benefit in three directions: improvement of carrying airport capacity, accordingly the reduction of number of delays in the loaded airports; shortening of flights' duration due to the use of more direct routes; and reduction of the vertical echeloning (RVSM). A parametric model for the detailed research of influencing of height and speed of the aircraft flights on engine emission and fuel consumption was developed, it allows to evaluate an ecological efficiency of the implementation of CNS/ATM technologies.*

**Вступ**

Київський протокол до Рамкової конвенції ООН про зміну клімату (United Nations Framework Convention on Climate Change – UNFCCC) вимагає від розвинених країн зменшити викиди парникових газів за період 2008–2012 рр. на 5% порівняно з обсягом викидів у 1990 р. Ця вимога не поширюється на викиди, що утворюються під час виконання міжнародних рейсів повітряними кораблями (ПК) цивільної авіації. Із підвищенням інтересу до впливу емісії двигунів ПК на навколишнє середовище ICAO постійно розглядає, які кроки може зробити міжнародне авіаційне співтовариство для контролю викидів.

У період 1999–2015 рр. у світі очікується зростання повітряного руху приблизно на 61%. Водночас плановане споживання палива і викид CO<sub>2</sub> мають підвищитися на 37 % (менше зростання передбачається за рахунок упровадження більш ефективних двигунів, списання застарілих ПК і розширення парку більш економних ПК).

Донедавна повітряні перевезення часто включали непряму маршрутизацію, неоптимальні профілі польоту, затримки, зумовлені очікуванням посадки і чергами перед зльотом, і інші чинники, які можуть сприяти підвищенню або не обов'язковому споживанню палива і відповідним викидам забруднювальних речовин в атмосферне повітря.

Результати різних досліджень показують, що до 2015 р. слід очікувати додаткового поліпшення споживання палива і зменшення емісії CO<sub>2</sub> на 5% унаслідок упровадження заходів щодо реалізації систем Communications navigation surveillance, Air traffic management (CNS/ATM) [9], а також показують подібне зниження величини викиду оксидів азоту (NO<sub>x</sub>), незгорілих вуглеводнів (HC) і оксиду вуглецю (CO), але ще потрібний подальший аналіз для їх підтвердження.

Застосування систем CNS/ATM загалом матиме переваги за трьома напрямками:

1) поліпшення пропускної здатності аеропортів та зменшення кількості затримок у завантажених аеропортах;

2) скорочення тривалості польотів за рахунок використання більш прямих маршрутів;

3) зменшення вертикального ешелонування (RVSM).

Модель, розроблена під егідою ICAO для оцінювання екологічних наслідків упровадження систем CNS/ATM, може бути поліпшена для охоплення всіх регіонів світу, але суттєво подальша робота буде спрямована на:

– збір інформації про засоби систем CNS/ATM у різних регіонах світу для моделювання;

– додаткове моделювання і оцінювання підвищення ефективності польотів за рахунок спеціальних технологічних рішень, які впливають на споживання палива і емісію;

– розроблення параметричної моделі для більш детального дослідження впливу висоти польотів на викиди і споживання палива.

#### Перелік забруднювальних речовин та оцінювання емісії авіаційних двигунів

У перелік нормованих ICAO забруднювальних атмосфери речовин, що характеризують екологічну досконалість двигуна, входять [1; 2]: оксиди вуглецю CO; незгорілі вуглеводні CH; оксиди азоту NO<sub>x</sub> (NO, NO<sub>2</sub>); дим (тверді частинки, або сажа). Продукти повного згоряння палива: двооксид вуглецю CO<sub>2</sub>; водяна пара H<sub>2</sub>O; оксиди сірки SO<sub>x</sub>. Відповідно до Кіотського протоколу в групі «Парникові гази» враховується метан CH<sub>4</sub>.

Знаючи індекс емісії і час роботи одного двигуна, можна обчислити масу викидів забруднювальних речовин  $M_j$  заданого виду. Зокрема, для будь-якого польотного циклу

$$M_j = \sum_i EI_{ji} G_{ni} \tau_i,$$

де  $EI_j$  – індекс емісії, г/кг;  $G_{ni}$  – витрата палива, кг/с;  $\tau_i$  – час роботи на  $i$ -му етапі польотного циклу, с. Величину  $G_{ni}$  визначають з використанням дросельних характеристик двигуна:

$$G_{ni} = \frac{C_{питi} R_i}{3600}.$$

Дані про  $EI_{jкр}$  і секундну витрату палива  $G_{п}$  для конкретного режиму роботи двигуна вибирають для близьких за значенням режимів роботи двигуна [2]. Більш точним джерелом даних про  $G_{п}$  і  $\tau_i$  є дані розшифрування засобів об'єктивного контролю.

Емісійні характеристики двигуна залежать від зовнішніх умов. Нормами ICAO передбачено від-

хилення фактичної температури і тиску зовнішнього повітря на вході в двигун від стандартних атмосферних умов систем автоматичного керування (САК) на рівні моря. Під час розрахунку індексів емісії забруднювальних речовин на всіх режимах роботи двигуна протягом злітно-посадкового циклу (ЗПЦ) вносяться відповідні поправки за допомогою коефіцієнта  $K_j$  [1]:

$$EI_{jзв} = K_j EI_j,$$

де  $EI_{jзв}$  – уведений індекс емісії  $j$ -ї забруднювальної речовини;  $K_j$  – коефіцієнт приведення  $j$ -ї забруднювальної речовини до САК.

Загальний вираз для визначення  $K_j$ :

$$K_j = \left( \frac{p_{кСАК}}{p_{к}} \right)^a \left( \frac{g_{тСАК}}{g_{т}} \right)^b \exp \left( \frac{T_{кСАК} - T_{к}}{C} \right) \exp(d|h - 0,00634|),$$

де  $p_{кСАК}$ ,  $T_{кСАК}$ ,  $g_{тСАК}$  – відповідно тиск, температура і відносна витрата палива в камері згоряння при САК;  $p_{к}$ ,  $T_{к}$ ,  $g_{т}$  – аналогічні параметри, що відповідають конкретним атмосферним умовам;  $h$  – вологість навколишнього повітря;  $a$ ,  $b$ ,  $c$ ,  $d$ ,  $e$  – розрахункові постійні, які можуть бути різними для кожного забруднювача і кожного типу двигуна.

У процесі всіх розрахунків  $M(\text{CH}_4)$  і  $M(\text{SO}_2)$  величина  $M_{п}$  є витратою палива за фактичний час роботи в  $i$ -му режимі.

Виходячи з типових технічних вимог ICAO до авіаційного палива, після перетворення відомих рівнянь хімічних реакцій можна визначити кількість конкретних продуктів повного згоряння залежно від маси витраченого палива:

$$\text{CO}_2 = 3,12 M_{п};$$

$$\text{H}_2\text{O} = 1,35 M_{п};$$

$$\text{SO}_2 = 0,005 M_{п}.$$

Уведені оцінки маси викидів забруднювальних речовин є максимальними, оскільки вони відповідають повному згорянню палива. Їх похибка за існуючих значень повноти згоряння палива не перевищує 2 %. Відзначимо, що за даними доповіді CAEP/5-IP/22, 2001 [3] для оцінки двооксиду вуглецю CO<sub>2</sub> питомий показник дорівнює 3,15; для оксидів сірки SO<sub>x</sub> – 0,0009 (за вмісту сірки в об'ємі палива 0,05%) і водяної пари H<sub>2</sub>O – 1,23, тобто значення близькі до отриманих у наведених співвідношеннях.

Оскільки метан – це лише один з компонентів незгорілих вуглеводнів, то для його оцінювання за типом оцінки CO<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>O, SO<sub>2</sub> необхідно визначити частку незгорілих вуглеводнів у масі тих шкідливих викидів, які є продуктами неповного згоряння палива.

Продукти неповного згоряння палива – це оксид вуглецю (CO), незгорілі вуглеводні (CH) і тверді частинки (сажа). За результатами обробки викидів забруднювальних речовин за 43 вітчизняними і зарубіжними двигунами різних класів тяги в середньому кількість незгорілих вуглеводнів у 2,58 разу менша, ніж кількість оксиду вуглецю. Виходячи з цього, а також того, що метан (CH<sub>4</sub>) за даними праці [4] становить не більше 10% загальної маси (у кілограмах) викиду вуглеводнів CH за цикл, ІСАО були отримані такі співвідношення:

$$\begin{aligned} \text{CH} &\approx 0,28 (1-\eta_r) M_{\text{п}}; \\ \text{CH}_4 &\approx 0,028(1-\eta_r) M_{\text{п}}; \\ \text{CO} &\approx 0,72 (1-\eta_r) M_{\text{п}}. \end{aligned}$$

В останніх трьох виразах  $\eta_r$  – коефіцієнт повноти згоряння палива, значення якого беруть з характеристик двигуна. Останні три вирази наближені, і їх слід використовувати тоді, коли емісійні характеристики конкретного двигуна з яких-небудь причин не відомі. За даними роботи [5] на режимах крейсерського польоту частка викидів метану CH<sub>4</sub> у незгорілих вуглеводнях незначна.

Якщо в розрахунках використовуються експлуатаційні характеристики двигунів, то в разі потреби можна скористатися формулами зведення до стандартних атмосферних умов, що дозволяє врахувати вплив атмосферного тиску і температури на вході в двигун на параметри потоку у вхідному перетині камери згоряння, витрату палива і, отже, на величину викидів забруднювальних речовин:

$$\text{– оберти } n_{\text{пр}} = n \sqrt{\frac{288}{T}}, \text{ об/хв};$$

$$\text{– тяга } R_{\text{пр}} = R \frac{101325}{p}, \text{ Н};$$

$$\text{– питома витрата палива } C_{\text{пит пр}} = C_{\text{пит}} \sqrt{\frac{288}{T}},$$

кг/(Н год);

$$\text{– витрата палива } G_{\text{п пр}} = G_{\text{п}} \frac{101325}{p} \sqrt{\frac{288}{T}}, \text{ кг/с};$$

$$\text{– витрата повітря } G_{\text{в пр}} = G_{\text{в}} \frac{101325}{p} \sqrt{\frac{T}{288}}, \text{ кг/с};$$

$$\text{– відносна витрата палива } g_{\text{р пр}} = \frac{G_{\text{п пр}}}{G_{\text{в пр}}} = g_{\text{р}} \frac{288}{T};$$

$$\text{– температура повітря за компресором (на вході в камеру згоряння) } T_{\text{к пр}} = T_{\text{к}} \frac{288}{T}, \text{ К};$$

$$\text{– тиск повітря за компресором (на вході в камеру згоряння) } p_{\text{к пр}} = p_{\text{к}} \frac{101325}{p}, \text{ Па}.$$

У наведених формулах  $T$  і  $p$  – відповідно температура (К) і тиск (Па) атмосферного повітря в конкретних умовах експлуатації.

Для конкретного режиму роботи двигуна з використанням його висотно-швидкісних характеристик визначають витрату палива:

$$G_{\text{п кр}} = \frac{C_{\text{пит кр}} R_{\text{кр}}}{3600}$$

і розраховують масу палива, витраченого у польоті:

$$M_{\text{п кр}} = n G_{\text{п кр}} \tau_{\text{кр}}.$$

Іншим, більш точним джерелом даних про  $G_{\text{п кр}}$  і  $\tau_{\text{кр}}$  є дані розшифрування засобів об'єктивного контролю польотної інформації.

Оцінюючи масу викидів забруднювальних речовин у польоті, необхідно враховувати результати і висновки [6], згідно з якими масові частинки викидів забруднювальних речовин становлять:

- оксиди азоту NO<sub>x</sub> – 84,0 %;
- оксид вуглецю CO – 11,8 %;
- вуглеводні HC – 4,0 %;
- тверді частинки (сажа) – 0,2 %.

На підставі цих даних пропонується враховувати тільки викиди NO<sub>x</sub>; значення індексу емісії якого на основній ділянці польоту розраховано за формулою

$$(EI_{\text{NO}_x})_H = (EI_{\text{NO}_x})_0 \left( \frac{p_{\text{кH}}}{p_{\text{к0}}} \right)^{0,4} \text{EXP}(19(h_0 - h_H)),$$

де  $h_0 = 0,00634$  кг води/кг сухого повітря. Індекс «H» відповідає параметрам на висоті  $H$  польоту. Тоді

$$M_{\text{NO}_x \text{ кр}} = EI_{\text{NO}_x \text{ кр}} M_{\text{п кр}}.$$

Розрахунок маси викидів SO<sub>2</sub> виконується за умови

$$M(\text{SO}_2) = 0,005 G_{\text{п кр}}.$$

Більш точно викиди окислу сірки оцінюють за кількістю витраченого палива і масовим умістом сірки в паливі за формулою

$$M(\text{SO}_x) = \sum_i M_{\text{п}} \bar{S}_i,$$

де  $M(\text{SO}_x)$  – валові викиди оксидів сірки, кг;  $M_{\text{п}}$  – кількість витраченого за політ палива  $i$ -ї марки;  $\bar{S}_i$  – відносний масовий вміст сірки в паливі  $i$ -ї марки (за паспортом).

Масу викидів  $M_{кр}$  кожного виду забруднювальної речовини певним типом ПК за політ по маршруту визначають підсумовуванням значень мас забруднювальних речовин за всіма двигунами, установленними на конкретному ПК.

### Оцінювання точності виконаних розрахунків

Виходячи із сучасних реалій обліку витрат авіапалива, у висновку з експлуатації літаків застарілих типів і природної заміни інструментальної системи обробки даних польотної інформації на більш точну визнається така точність розрахунків:

а) для простого методу розрахунку – до 30 % при розрахунку викидів забруднювальних речовин на етапах ЗПЦ і до 45 % на етапах польоту по маршруту, що узгоджується з оцінками методики [7];

б) для детального методу розрахунку забруднювальних речовин:

– без застосування даних обробки польотної інформації і стандартного графіка опробування – до 8 % (з використанням типових експлуатаційних характеристик двигуна);

– із застосуванням даних обробки польотної інформації – до 6% (з використанням інформації про витрати палива для кожного двигуна).

### Розрахунок викидів за детальною методикою

Для розрахунків за детальним методом використовують інформацію об'єктивних засобів контролю двох польотів по цьому ж маршруту (роздруки даних контролю витрати палива і часовий графік основних ділянок ЗПЦ та польоту по маршруту).

На підставі даних [6] значення індексу емісії  $NO_x$  на основній ділянці польоту розраховують за формулою

$$(EI_{NO_x})_H = (EI_{NO_x})_0 \left( \frac{P_{кH}}{P_{к0}} \right)^{0,4} EXP(19(h_0 - h_H)),$$

де  $h_0=0,00634$  кг води/кг сухого повітря. Індекс «H» відповідає параметрам на висоті H польоту. Тоді

$$M_{NO_x кр} = EI_{NO_x кр} M_{п. кр}.$$

Масу викидів  $M_{крj}$  кожного виду забруднювальної речовини певним типом ПК за політ по маршруту визначають підсумовуванням значень мас

забруднювальних речовин за всіма двигунами, установленними на ПК.

Далі, відповідно до методики, підсумовують маси кожного виду забруднювальних речовин згідно з режимами, що відповідають конкретним етапам польоту.

Результати розрахунків викидів забруднювальних речовин, отриманих за допомогою детальної методики, зведено в табл. 1–3 (з урахуванням кожного компонента з регламентованих ICAO). Результати розрахунків викидів забруднювальних речовин для певного типу ПК зведено в підсумку в табл. 4 (протокол).

Порівнюючи відповідні підсумкові маси викидів забруднювальних речовин, наведені в табл. 1–4, легко дійти висновку, що середня маса викидів кожного з компонентів, розрахованих за детальною методикою, нижча, ніж маса за простою методикою. Це, по суті, характеризує похибку простого методу, за яким зазвичай одержують завищені значення мас забруднювальних речовин, що, природно, спонукає до збільшення грошових відрахувань за забруднення навколишнього середовища.

### Висновки

Аналіз наведених в табл. 5 розбіжностей фактичного і нормованого часу ЗПЦ в умовах реальної експлуатації наочно показує переваги використання даних об'єктивного контролю. Ця перевага обумовлена урахуванням фактичного часу рулювання, оскільки час зльоту, набору висоти до 915 м, зниження і заходження на посадку з висоти 915 м досить точно усереднюється ICAO.

Як видно з таблиці, тільки в одному випадку тривалість реального ЗПЦ перевершує тривалість стандартного ЗПЦ. У решті випадків, особливо в осінні місяці, тривалість реального ЗПЦ істотно нижча від стандартного.

Таблиця 1

## Результати розрахунків викидів СН (у грамах) одним двигуном ПК-90А

Маршрут	ЗПЦ						Основна ділянка польоту			
	Запуск	Руління	Зліт	Захід на посадку	Реверс і руління	Усього за ЗПЦ	Набір висоти	Крейсерський політ	Зниження	Усього
Шереметьєво–Сімферополь	1,59	60,9	24,72	13	15,6	115,81	24,36	335,64	24,96	384,96
Шереметьєво–Сімферополь	1,44	39,9	20,04	18,4	20,4	100,18	111,6	188,64	31,92	332,16
Шереметьєво–Сімферополь	1,5	48,0	26,88	16,2	18	110,58	94,56	263,52	24,84	382,92
Шереметьєво–Сімферополь	1,41	54,0	19,68	31,4	21,6	128,09	74,16	245,76	79,44	399,36
Загалом на етапі за 4 рейси	454,66						1499,4			
У середньому за 1 рейс	113,67						374,85			

Таблиця 2

## Результати розрахунків викидів СО (у грамах) одним двигуном ПК-90А

Маршрут	ЗПЦ						Основна ділянка польоту			
	Запуск	Руління	Зліт	Захід на посадку	Реверс і руління	Усього за ЗПЦ	Набір висоти	Крейсерський політ	Зниження	Усього
Шереметьєво–Сімферополь	36,57	1400,7	72,1	58,5	358,8	1926,67	81,2	1118,8	83,2	1283,2
Шереметьєво–Сімферополь	33,12	917,7	58,45	82,8	469,2	1561,27	372	628,8	106,4	1107,2
Шереметьєво–Сімферополь	34,5	1104	78,4	72,9	414	1703,8	315,2	878,8	82,8	1276,8
Шереметьєво–Сімферополь	32,43	1242	57,4	141,3	496,8	1969,93	247,2	819,2	264,8	1331,2
Загалом на етапі за 4 рейси	7161,67						4998,4			
У середньому за 1 рейс	1790,42						1249,6			

Таблиця 3

Результати розрахунків викидів  $\text{NO}_x$  (у грамах) одним двигуном ПК-90А

Маршрут	ЗПЦ						Основна ділянка польоту			
	Запуск	Руління	Зліт	Захід на посадку	Реверс і руління	Усього за ЗПЦ	Набір висоти	Крейсерський політ	Зниження	Усього
Шереметьєво–Сімферополь	30,74	1177,4	7622	767	301,6	9898,74	6394,5	88105,5	6552	101052
Шереметьєво–Сімферополь	27,84	771,4	6179	1085,6	394,4	8458,24	29295	49518	8379	87192
Шереметьєво–Сімферополь	29,0	928,0	8288	955,8	348	10548,8	24822	69174	6520	100516
Шереметьєво–Сімферополь	27,26	1044,0	6068	1852,6	417,6	9409,46	19467	64512	20853	104832
Загалом на етапі за 4 рейси	38315,24						393592			
У середньому за 1 рейс	9578,81						98398			

Таблиця 4

Результати розрахунків викидів  $\text{NO}_x$  (у грамах) двигунами ПК Іл-96

Тип ПК	Тип двигуна	Кількість двигунів	Кількість ЗПЦ	$M_p$ , кг	Викиди забруднювальних речовин, кг							
					СН	СО	$\text{NO}_x$	Дим	$\text{SO}_x$	$\text{H}_2\text{O}$	$\text{CO}_2$	$\text{CH}_4$
Іл-96	ПК-90А	4	4	58468	7,816	48,68	1727,6	2,19	292,34	78896	182420	0,782

Таблиця 5

## Порівняння фактичного і нормованого часу на виконання ЗПЦ

Дата	Номер рейсу	Тип ПК	Аеропорт зльоту/посадки	Фактичний час ЗПЦ, хв	Нормований час ЗПЦ ІСАО, хв	Розбіжність фактичного і нормованого часу, хв / %
20.10	742	Ту-154	Шереметьєво	16,8	32,9	- 6,0 / 18
			Іркутськ	10,1		
21.10	743	Ту-154	Шереметьєво	14,2	32,9	- 8,2 / 25
			Пулково	10,5		
			Пулково	15,05		
21.10	521	Іл.-86	Шереметьєво	17,6	32,9	- 2,7 / 8
			Дубай	11,6		
11.07	199	Іл.-96	Шереметьєво	21,84	32,9	+ 2,1 / 6
			Сімферополь	13,16		
			Сімферополь	14,34		
12.07	199	Іл.-96	Шереметьєво	11,50	32,9	- 7,06 / 21
			Шереметьєво	18,36		
			Сімферополь	6,46		
			Сімферополь	20,02	32,9	- 0,82 / 2
			Шереметьєво	11,06		

### Література

1. *Международные стандарты и рекомендуемая практика «Охрана окружающей среды»*. Приложение 16 к Конвенции о международной ГА. – 2-е изд., Т. 2 «Эмиссия авиационных двигателей». – Монреаль, 1993. – 96 с.
2. *ICAO Engine Exhaust Emissions DataBank*, First Edition 1995// ICAO. Doc 9646- AN/943.
3. *Market – based measures report from WG5 to the fifth meeting of the Committee on Aviation Environmental Protection*. Paper CAEP/5-IP/22, 2001. – 109 p.
4. *Mobile combustion: aircraft*. IPCC Good Practice Guidance and Uncertainty Management in National Greenhouse Gas Inventories, 2000.
5. *Olivier, J.G.J. (1991): Inventory of Aircraft Emissions: A Review of Recent Literature*. National Institute of Public Health and Environmental Protection, Report no. 736 301 008, Bilthoven, the Netherlands.
6. *Development of the technical basis for a New Emissions Parameter covering the whole aircraft operation: NEPAIR*. CAEP/6-IP17. Final Technical Report, 2003. – 68 p.
7. *European Environment Agency, EMER/ CORINAIR*. Atmospheric Emission Inventory Guidebook, 2 nd edition, 1999.
8. *ECAC*. Methodology for emissions calculations, 2003.
9. *Environmental benefits associated with global aviation emissions and potential reduction from CNS/ATM measures*. Paper CAEP/5-IP/17, 2000. – 131 p.

Стаття надійшла до редакції 19.03.07.