

УДК 656.71: 504.75 (045)

К.І. Кажан, асп.

## КОРОТКОСТРОКОВЕ ТА ДОВГОСТРОКОВЕ ПРОГНОЗУВАННЯ ЕКОЛОГІЧНОЇ МІСТКОСТІ АЕРОПОРТІВ ЦИВІЛЬНОЇ АВІАЦІЇ

*Досліджено вплив основних екологічних факторів – шуму та викидів забруднюючих речовин – на екологічну місткість аеропортів цивільної авіації. Подано методику прогнозування екологічної місткості з можливістю визначення оптимального складу парку літаків та сценаріїв розвитку аеропорту.*

*Impact of the main environmental factors – noise and air pollution – on the environmental capacity of civil aviation airports was investigated in the article. The method of environmental capacity forecasting taking into account opportunity of definition of optimal aircraft fleet and airport development scenarios was proposed.*

**авіаційний шум, викиди забруднюючих речовин, прогнозування екологічної місткості**

### Вступ

Серед екологічних показників авіаційний шум та викиди забруднюючих речовин (ЗР) стають головними факторами, що обмежують місткість аеропортів цивільної авіації. Для деяких аеропортів загальну місткість можна збільшити лише під час впровадження ефективної системи керування транспортом.

### Аналіз досліджень та публікацій

Серед стратегічних цілей ІКАО для забезпечення стійкого розвитку цивільної авіації безпека польотів має найбільший пріоритет [1], тому прогнозування обсягів авіаційних перевезень здійснюють з урахуванням, перш за все, вимог безпеки польотів.

Проблемі прогнозування загальної місткості аеропортів цивільної авіації присвячені ґрунтовні дослідження [2; 3]. Детальну модель пропускну спроможності злітно-посадкових смуг (ЗПС) та маршрутів підльотів було побудовано фахівцями NASA та реалізовано в вигляді прикладної програми ASAC [2]. Втім, екологічні обмеження враховуються в таких моделях лише частково (передбачена можливість обмеження кількості операцій під час перевищення нормативів щодо шуму).

Останніми десятиліттями зі значним зростанням авіаційних перевезень в багатьох аеропортах через екологічні нормативи встановлюють додаткові, часом більш суворі обмеження щодо експлуатації повітряних кораблів (ПК). Тому врахування впливу таких факторів, як шум та викиди ЗР є важливим під час прогнозування ємності аеропортів.

Численні прикладні програми дозволяють оцінювати існуючий тиск на довкілля в районі аеропорту як на регіональному, так і на глобальному

рівнях, і визначати очікувані збільшення навантаження сценаріїв розвитку аеропорту (INM, EDMS та ін.) [4; 5; 6]. Проте, такі моделі не забезпечують можливість розробки рекомендацій для прийняття рішень щодо перспективних сценаріїв розвитку аеропорту та щодо розширення екологічної ємності шляхом застосування експлуатаційних методів.

Мета дослідження – розробка методики прогнозування екологічної ємності цивільної авіації з врахуванням найбільш чутливих факторів – шуму та викидів ЗР, з можливістю визначення оптимального режиму експлуатації аеропорту, парку ПК та сценаріїв розвитку аеропорту.

### Короткострокове прогнозування

Складання короткострокових прогнозів пов'язане з такими параметрами функціонування аеропортів:

- як типи ПК, що експлуатуються;
- інтенсивність;
- експлуатації ПК в денний та нічний періоди;
- маршрути руху,
- методи зниження шуму та/або викидів;
- розміщення житлової забудови (вибір критичних зон) в околицях аеропорту.

Короткострокове прогнозування здійснюють на кілька тижнів чи місяців наперед (до одного року).

Відома загальна кількість ПК типу  $i$  –  $Q_i$ , гранично допустимий викид ПК –  $C_{ГДВ}$  для ЗР  $k$ , а нормативні значення рівнів шуму в  $s$  контрольних зонах ( $l=1, \dots, s$ ). Існує можливість використання  $x$  методів зниження шуму на місцевості та  $u$  методів зниження викидів ЗР. Перелічені умови записуємо в вигляді таких обмежень:

$$\sum_{j,m,x,y} T_{ijm}^{xy} = Q_i,$$

$$\sum_{i,j,m,x,y} T_{ijm}^{xy} q_{ijm}^{xy}(k) = C_{ГДВ}(k);$$

$$\sum_{i,j,m,x,y} T_{ijm}^{xy} P_{ijm}^{xy}(l) = 1, \quad (1)$$

де

$T_{ijm}^{xy}$  – кількість ПК  $i$ -го типу, що рухаються за  $j$ -м експлуатаційним маршрутом із застосуванням  $x$  та  $y$  методів зниження шуму та емісії за метеоумов, характерних для місяця  $m$ ;

$q_{ijm}^{xy}(k)$  – викид  $k$ -ї ЗР під час прольоту  $T_{ijm}^{xy}$ ;

$$P_{ijm}^{xy}(l) = \frac{1}{T_0} 10^{0,1L_{Aijm}^{xy}(l) - 0,1L_{Aeq}(l)},$$

$T_0$  – тривалість періоду, що досліджують;

$L_{Aijm}^{xy}$  – рівні шуму, що утворюються під час прольоту  $T_{ijm}^{xy}$ ;

$L_A(l)$  – нормативні рівні шуму в зоні  $l$  для періоду  $T_0$ .

Важливим фактором під час цього виявляється набір метеорологічних параметрів – усереднених значень для кожного місяця року. Такі параметри, як температура, тиск, напрямок та швидкість руху вітру, враховуються на етапі оцінки рівнів шуму та забруднення повітря в околицях аеропортів. Вітрове завантаження аеропорту, частота повторюваності несприятливих напрямків вітру протягом року впливають на формування розкладу руху ПК та можливість застосування експлуатаційних процедур зниження шуму та емісії. Вони враховуються під час визначення нормованої частоти використання парку ПК:

$$v_{im} = c a_{im} b_m D_m S_m,$$

$$\sum_{i,m} v_{im} = 1, \quad (2)$$

де

$c$  – коефіцієнт нормування;

$a_{im}$  – апіорна оцінка частоти використання ПК  $i$ -го типу протягом місяця  $m$  ( $m = 1, 12$ );

$b_m$  – частота використання заданого курсу зльоту протягом року, що визначається з аналізу вітрового режиму аеропорту;

$D_m, S_m$  – відносні частоти повторюваності несприятливого напрямку вітру та кількості періодів заданої швидкості вітру.

Для вирішення задачі з обмеженнями (1) та (2) можна застосовувати ентропійний метод [7; 8], що дозволяє визначати найбільш імовірний розподіл ПК за маршрутами та доцільність використання процедур зниження шуму та емісії за умови максимуму ентропії системи:

$$S = \ln T! + \sum_{i,j,m,x,y} T_{ijm}^{xy} \left( \ln \frac{v_{im}}{T_{ijm}^{xy}} + 1 \right). \quad (3)$$

За умов дотримання обмежень (1) та (2) найбільш імовірний розподіл ПК визначаємо за ітеративною формулою [8]:

$$T_{ijm}^{xy} = \frac{v_{im} Q_i \exp \left[ -\alpha q_{ijm}^{xy}(k) - \sum_l \beta_l P_{ijm}^{xy}(l) \right]}{\sum_{j,m,x,y} v_{im} \exp \left[ -\alpha q_{ijm}^{xy}(k) - \sum_l \beta_l P_{ijm}^{xy}(l) \right]},$$

де множники Лагранжа  $\alpha, \beta_l$  визначаються з умови (1).

Як приклад, прогнозування екологічної ємності міжнародного аеропорту цивільної авіації виконали на один рік ( $m = 1, 12$ ) під час дотримання експлуатаційних  $\sum_{j,m} T_{ijm} = Q_i$  та екологічних об-

межень, що забезпечують виконання нормативних рівнів шуму в зоні  $l$   $\sum_{i,j,m} T_{ijm} P_{ijm}(l) = 1$  без

урахування вимог щодо викидів ЗР.

Як експлуатаційний спосіб зниження шуму застосовано перерозподіл ПК за маршрутами. Оптимальний розподіл ПК за маршрутами визначається за формулою:

$$T_{ijm} = \frac{v_{im} Q_i \exp \left[ -\sum_l \beta_l P_{ijm}(l) \right]}{\sum_{j,m} v_{im} \exp \left[ -\sum_l \beta_l P_{ijm}(l) \right]}. \quad (4)$$

Вихідною інформацією для оцінки розподілу ПК за маршрутами є щоденний розклад руху ПК, прогнозні значення метеопараметрів та характеристики аеропорту. В аеропорту експлуатують 21 тип ПК ( $i = 1, 21$ ) за 12 маршрутами ( $j = 1, 12$ ). Для досліджуваного сценарію обрали одну контрольну зону  $l = 1$ . Оскільки розглядають етап зльоту в денний період часу, то нормативні рівні шуму для зони обмеження житлової забудови становлять 55 дБА.

Важливим елементом підходу є складання матриці значень частоти використання парку ПК  $v_{im}$ . Частота використання заданого курсу  $b_m$  визначається з аналізу вітрового режиму аеропорту за формулою

$$b_m = \frac{\sum_{m=1,12} k_m N_m}{100},$$

де

$k_m$  – коефіцієнт експлуатації;

$N_m$  – повторюваність напрямку вітрів для місяця  $m$ .

Якщо  $k_m = 1$  можлива експлуатація ПК з заданим курсом під час переважаючого напрямку вітру, якщо  $k_m = 0$  – неможлива.

Коефіцієнт експлуатації для заданого курсу зльоту (МК 360) дорівнює 1 для південно-східних, південних, південно-західних, західних напрямків вітру,  $k_m = 0$  – для інших напрямків вітру [7]. Повторюваність несприятливих швидкостей вітру  $D/m$  визначаємо з таблиць щодо повторюваності вітру за градаціями швидкостей [9] обираючи дані для швидкостей 0–2 м/с (табл. 1).

Таблиця 1

#### Параметри для кожного місяця року

Місяць	$b_m$	$D_m$	$W$	$S_m$
1	0,589	0,254	80,6	0,194
2	0,553	0,268	77,8	0,222
3	0,565	0,296	85,2	0,148
4	0,443	0,261	83,5	0,165
5	0,464	0,364	87	0,13
6	0,473	0,389	90,8	0,092
7	0,515	0,443	89,6	0,104
8	0,392	0,472	93	0,07
9	0,537	0,394	85,3	0,147
10	0,629	0,335	84,2	0,158
11	0,790	0,237	79	0,21
12	0,693	0,205	79	0,21

Відносну частоту повторюваності періодів заданої швидкості вітру  $S_m$  (табл. 1) визначаємо на основі даних про вітрове завантаження аеропорту  $W$  за місяцями під час заданої бокової складової вітру 5 м/с за формулою [9]:

$$S_m = \frac{100 - W}{100}.$$

Ураховуючи дані щодо частоти використання парку ПК за місяцями (дані за 2008 р.) та коефіцієнт нормування  $c$ , отримуємо значення нормованої частоти використання парку  $v_{im}$  (табл. 2).

Таблиця 2

#### Нормована частота використання парку $v_{im} \cdot 1000$

$i$	$m$											
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
1	3.7	6.3	3.1	1.8	0.7	2.2	2.3	1.6	4.9	4.2	5.0	3.8
2	4.6	3.1	3.9	2.4	1.4	2.7	3.0	2.1	4.9	5.3	6.2	3.8
3	4.6	2.1	4.7	2.4	1.4	2.7	2.3	2.1	4.9	5.3	6.2	4.7
4	5.5	4.2	5.5	1.8	5.6	1.6	2.3	2.9	5.9	6.3	11.	6.6
5	3.7	7.3	2.4	4.2	1.4	2.2	3.0	1.6	4.0	4.2	1.2	3.8
6	8.3	9.4	6.3	8.5	7.0	4.8	6.0	4.5	8.9	9.5	11.	9.5
7	14.	14.	11.	7.3	11.	9.1	14.	6.2	15.	17.	19.	15.
8	11.	11.	9.	5.5	10.	6.5	10.	5.3	12.	13.	16.	11.
9	7.4	12.5	6.3	4.2	7.7	4.3	6.8	3.3	8.9	8.5	10.	7.6
10	5.5	6.3	5.5	4.8	4.2	3.2	5.3	2.1	5.9	6.3	7.5	5.7
11	1.8	3.1	0.8	0.6	1.4	1.1	2.3	0.8	2.0	2.1	2.5	1.9
12	0.9	1.0	2.4	1.2	0.7	0.5	0.8	0.4	1.0	1.1	1.2	0.9
13	0.9	1.0	0.8	1.2	0.7	0.5	0.8	0.4	1.0	2.1	2.5	1.9
14	1.8	2.1	0.8	1.2	0.7	1.1	0.8	0.8	2.0	2.1	1.2	1.9
15	1.8	1.0	2.4	1.2	4.2	1.1	1.5	0.8	2.0	2.1	1.2	1.9
16	2.8	3.1	0.8	3.6	2.1	0.5	0.8	1.2	3.0	3.2	3.7	1.9
17	0.9	1.0	0.8	0.6	0.7	0.5	0.8	0.4	1.0	1.1	3.7	0.9
18	1.8	2.1	1.6	1.2	1.4	1.1	1.5	0.8	2.0	2.1	2.5	1.9
19	4.6	6.3	3.9	2.4	2.1	2.7	3.8	2.1	4.9	5.3	6.2	4.7
20	3.7	2.1	3.1	2.4	3.5	3.2	3.8	0.8	2.0	4.2	5.0	3.8
21	2.8	5.2	3.1	1.8	1.4	2.2	3.0	0.8	3.0	1.1	1.2	0.9

Розроблений ітераційний алгоритм рішення системи рівнянь (1) – (4), що базується на методі Ньютона–Рафсона, дозволяє визначити кількість ПК на маршрутах для кожного місяця року.

Оптимальний розподіл ПК для досліджуваної експлуатаційної ситуації отримано для коефіцієнта Лагранжа  $\beta = 164$  на 111-й ітерації. Відносна похибка обчислень  $\delta_l \leq 0,01$ . Результати моделювання подано в табл. 3 (для місяця  $m = 12$ ), узагальнені результати для кожного місяця року на рис. 1.

Таблиця 3

Розподіл ПК за маршрутами для місяця  $m=12$

$i$	$j$											
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
1	7	5	5	6	7	7	7	4	4	4	6	7
2	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
3	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4
4	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9
5	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7
6	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
7	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
8	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
9	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4
10	16	16	16	16	16	16	16	15	15	15	16	16
11	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
12	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
13	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
14	3	2	2	3	3	3	3	1	1	1	3	3
15	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
16	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
17	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
18	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
19	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
20	14	14	14	14	14	14	14	14	14	14	14	14
21	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
Су- ма	72	69	69	71	72	72	72	66	66	66	71	72

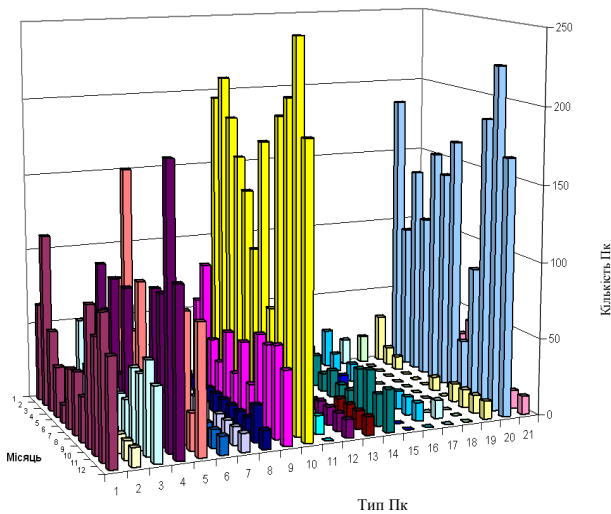
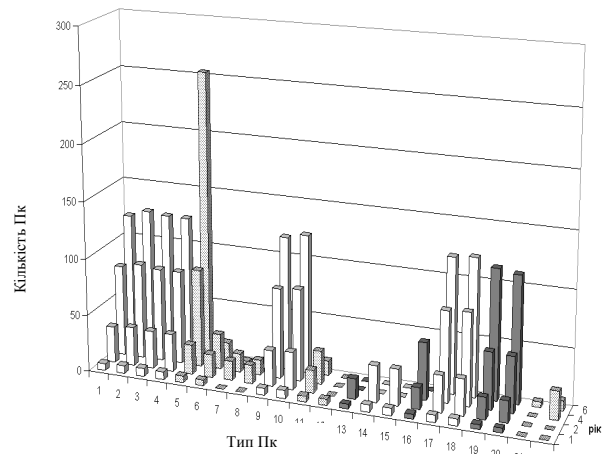


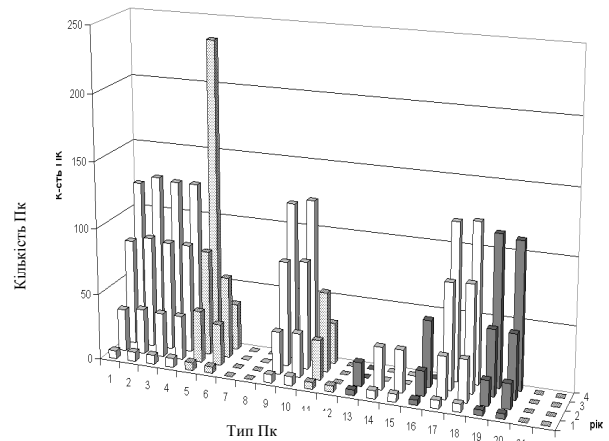
Рис. 1. Розподіл типів ПК за місяцями

Аналіз результатів короткотермінового прогнозування та дослідження експлуатаційних умов міжнародного аеропорту показав, що важливим фактором під час визначення екологічної ємності аеропорту є метеоумови.

Як показано на рис. 2, залежно від набору метеопараметрів, значення максимальної екологічної ємності може коливатися в межах  $\pm 25\%$  за добу. Врахування метеоумов відбувається в два етапи: – під час визначення рівнів досліджуваного шуму в контрольних зонах (середньомісячні температура, тиск, швидкість вітру); – під час визначення коефіцієнтів нормування (превалюючий напрямок вітру, вітрове завантаження аеропорту та ін).



а



б

Рис. 2. Результати прогнозування  $T_{ir}$  для сценарію 1 (а) та сценарію 2 (б):

- – регіональні ПК;
- ▨ – далекомагістральні ПК;
- – ПК місцевих авіаліній

Наприклад, максимальна акустична місткість для міжнародного аеропорту цивільної авіації становить 1055 для  $m = 11$ , мінімальна – 315 для  $m = 8$  (табл. 3, рис. 1).

Для  $m = 8$  маємо найбільшу частоту повторюваності несприятливих швидкостей вітру  $D_m$ , в той же час для  $D_m m = 11$  має невисоке значення. Відповідно вітрове завантаження аеропорту  $S_m$  для місяця  $m = 8$  – мінімальне.

Дослідження засвідчили, що оптимізований розподіл ПК за маршрутами за певних експлуатаційних умов дозволяє знизити навантаження на довкілля в околицях аеропортів до нормативних рівнів без застосування спеціальних прийомів пілотування [8]. Зокрема, для експлуатаційної ситуації, що досліджувалася, встановлено, що наступний перерозподіл ПК за маршрутами дозволяє максимально збільшити акустичну місткість (рис. 1): найменшу частоту експлуатації отримують маршрути  $j = 8, 9$  – 5 % за рік, а найбільшу – 14 % – маршрути  $j = 1, 6, 7, 12$ .

### Довгострокове прогнозування

Довгострокове прогнозування екологічної ємності передбачає визначення складу парку ПК терміном від одного до кількох десятків років на основі понять про загальну енергетичну оцінку парку ПК та оцінку сумарних викидів з врахуванням прогнозованих обсягів авіаційних перевезень для даного регіону. Очікувані обсяги авіаційних перевезень задаються в вигляді таких експлуатаційних обмежень:

$$\sum_{i,j,x,y} T_{ijr}^{xy} = T_r, \quad (5)$$

де

$T_r$  – кількість ПК, що прогнозується в рік  $r$  прогнозу.

Екологічні обмеження враховують – обсяги викидів ЗР:

$$\sum_{i,j,x,y} T_{ijr}^{xy} q_{ij}^{xy}(k) = C_r(k), \quad (6)$$

$C_r$  – обсяг викидів ЗР, що не може бути перевищена в рік  $r$ ;

– шум:

$$\sum_{i,j,x,y} T_{ijr}^{xy} \bar{b}_{ij}^{xy} = 1, \quad (7)$$

де

$$\bar{b}_{ij}^{xy} = B \cdot 10^{0,1 \cdot \text{EPNL}_{ij}^{xy}};$$

$$B = 10^{-0,1 \cdot \text{NEF}_r - 8,8}.$$

Під час оцінки впливу шуму ПК на місцевості можна застосувати поняття про еквівалентний (за критерієм  $\text{NEF}$ ) парк літаків одного типу, які здійснюють той же вплив на довкілля, що і ПК різних типів, що експлуатуються.

Для денного періоду експлуатації:

$$\text{NEF}_r = 10 \lg \left[ \sum_i T_{ir} \cdot 10^{0,1 \cdot \text{EPNL}_{ij}^{xy}} - 8,8 \right] \quad (8)$$

де

$\text{NEF}_r$  – задана величина рівня  $\text{NEF}$  для року експлуатації  $r$ ;

$\text{EPNL}_{ij}^{xy}$  – ефективний рівень шуму в контрольній зоні при прольоті ПК  $T_{ijr}^{xy}$ .

Визначаючи умовний екстремум ентропії під час виконанні умов (5)–(8), отримуємо найбільш ймовірний розподіл ПК за роками експлуатації:

$$T_{ijr} = \frac{T_r v_{ijr} \exp(-\alpha_r q_{ij}^{xy} - \beta_r \bar{b}_{ij}^{xy})}{\sum_{ij} v_{ijr} \exp(-\alpha_r q_{ij}^{xy} - \beta_r \bar{b}_{ij}^{xy})}, \quad (9)$$

$v_{ijr}$  – апіорна оцінка частоти використання  $i$ -го типу ПК  $j$ -го маршруту в  $r$ -му році з врахуванням кількості пасажирів на борту та дальності польоту:

$$v_{ijr} = V_{vi} V_{ijr},$$

де

$V_{ijr}$  – апіорна оцінка частоти використання  $i$ -м типом ПК  $j$ -го маршруту в  $r$ -му році:

$$V_{vi} = a_{vi} \cdot b_{vi};$$

$$a_{vi} = \frac{a_i}{a};$$

$$b_{vi} = \frac{b_i}{b},$$

$a_i$  – середня дальність польоту типу  $i$ ;

$a$  – середня дальність польотів всіх типів;

$b_i$  – кількість пасажирів даного типу;

$b$  – середня кількість пасажирів всіх типів.

$V_{vi}$  – коефіцієнт, що враховує кількість пасажирів на борту  $i$ -го типу та дальність польоту ПК цього типу.

Таким чином, параметр  $v_{ijr}$  визначає сценарії розвитку аеропорту в наступні роки і через цей параметр можна керувати, наприклад, стратегією зміни парку ПК на акустично більш досконалий.

Під час прогнозування складу парку ПК в умовному аеропорті на шість років ( $r = 1, 2, 4, 6$ ). Як екологічні обмеження встановлено необхідність дотримання сумарного для всіх типів значення параметру  $\text{NEF}$  та обсягів викидів на рівні першого року, тобто:

$$\text{NEF}^0 = \text{NEF}_1,$$

$$C_r = C_1$$

Контрольну зону обрано на відстані 6,5 км від торця ЗПС ( $l = 1$ ). Експлуатаційні методи зниження рівня шуму та емісії не застосовуються

( $j = 1, x = 1, y = 1$ ).

Модель прогнозування реалізовано для умовного аеропорту з врахуванням кількох екологічних факторів, що впливають на місткість:

- викиди оксидів азоту  $\text{NO}_x$  та шум;
- парникові гази ( $\text{CO}_2$  та  $\text{H}_2\text{O}$ ) та шум.

Розрахунок індексів емісії та обсягів викидів  $\text{NO}_x$  та парникових газів для типів ПК базувався на основі даних джерел [10; 11]. Індекс емісії для  $\text{CO}_2$  встановлюється на рівні 3,15 кг  $\text{CO}_2$  палива.

### Прогнозування з врахуванням викидів $\text{NO}_x$ та шуму

Вихідні дані щодо обсягів викидів  $q(\text{NO}_x)$  та рівнів шуму EPNL для етапу зльоту подано в табл. 4, а коефіцієнти нормування та прогнозовані рівні авіаційних перевезень – в табл. 5 (сценарій 1).

Таблиця 4

### Обсяги викидів $\text{NO}_x$ , $\text{CO}_2$ та рівні шуму EPNL<sub>i</sub>

$i$	Тип ПК	EPNL <sub>i</sub> , EPNLdB	$q(\text{NO}_x)$ , кг	$q(\text{CO}_2)$ , т
1	B 727 200	104.3	9.8574	2.5997
2	B 737 300	83.6	5.2209	1.3582
3	B 737 400	85.2	7.1675	1.5884
4	B 737 500	83.8	5.2209	1.3582
5	B 737 800	87.5	9.4905	1.6020
6	B 767 300	90.3	21.912	3.2757
7	B 777 200	86.7	21.912	3.2757
8	B 777 300	90.6	21.912	3.2757
9	A319	84.1	7.1627	1.4016
10	A320	87.1	7.1051	1.3954
11	A330-301	90.4	26.634	3.5063
12	Ил-62	63.9	14.194	4.6570
13	Ту-134	97.6	6.6473	1.6301
14	Ту-154	104.3	10.148	3.5154
15	Як-42	100.2	6.7603	0.9353
16	Ан-24	83.4	0.6647	0.3820
17	MD82	92.4	9.4432	1.8681
18	DC950	99.9	6.7151	1.8253
19	ATR72	91.4	1.2311	0.3820
20	ERJ 145	77.4	2.3735	0.5840
21	A380	90.4	54.458	7.7566
22	B 747 400	94.1	40.6447	6.8856

Оптимальний розподіл ПК з урахуванням обмежень (5)–(10) для сценарію 1 отримано для коефіцієнтів Лагранжа:

$$\alpha_1 = \alpha_2 = \alpha_3 = \alpha_4 = 1;$$

$$\beta_1 = \beta_2 = 1;$$

$$\beta_3 = 62;$$

$$\beta_4 = 304$$

на 416-й ітерації. Відносна похибка обчислень  $\delta_l \leq 0,01$ . Результати прогнозування сценарію 1 зображено на рис. 2, а.

Також досліджено альтернативний сценарій 2 зміни складу парку ПК, що не передбачає введення нових типів ПК в експлуатацію ( $v_{ir} = \text{const}$ , за виключенням:

$$v_{7r} = v_{8r} = v_{21r} = v_{22r} = 0;$$

$$v_{12,2} = v_{12,3} = v_{12,4} = 0;$$

$$v_{13,3} = v_{13,4} = 0; v_{14,3} = v_{14,4} = 0;$$

$$v_{16,4} = 0; v_{15,3} = v_{15,4} = 0).$$

Оптимальний склад парку ПК для сценарію 2 показано на рис. 2, б.

Таблиця 5

### Коефіцієнти нормування $v_{ij}$ та прогнозовані рівні авіаційних перевезень $T_r$

$i$	$r$			
	1	2	3	4
1	0.0556	0.0526	0.0588	0.0588
2	0.0556	0.0526	0.0588	0.0588
3	0.0556	0.0526	0.0588	0.0588
4	0.0556	0.0526	0.0588	0.0588
5	0.0556	0.0526	0.0588	0.0588
6	0.0556	0.0526	0.0588	0.0588
7	0.0	0.0526	0.0588	0.0588
8	0.0	0.0526	0.0588	0.0588
9	0.0556	0.0526	0.0588	0.0588
10	0.0556	0.0526	0.0588	0.0588
11	0.0556	0.0526	0.0588	0.0588
12	0.0556	0.0	0.0	0.0
13	0.0556	0.0526	0.0	0.0
14	0.0556	0.0526	0.0	0.0
15	0.0556	0.0526	0.0	0.0
16	0.0556	0.0526	0.0588	0.0000
17	0.0556	0.0526	0.0588	0.0588
18	0.0556	0.0526	0.0588	0.0588
19	0.0556	0.0526	0.0588	0.0588
20	0.0556	0.0526	0.0588	0.0588
21	0.0	0.0	0.0	0.0588
22	0.0	0.0	0.0588	0.0588
$T_r$	100	500	1000	1500

Коефіцієнти Лагранжа

$$\alpha_1 = \alpha_2 = \alpha_3 = 1;$$

$$\alpha_4 = 23;$$

$$\beta_1 = 1;$$

$$\beta_2 = 24;$$

$$\beta_3 = 113;$$

$$\beta_4 = 945.$$

Відносна похибка обчислень  $\delta_l \leq 0,01$ .

У результаті дослідження сценаріїв розвитку аеропорту на довгостроковий період із врахуванням рівнів шуму та обсягів викидів  $\text{NO}_x$  встановлено, що:

– зміна складу парку ПК залежить від параметру  $v_{ir}$ , що визначає стратегію довгострокового розвитку аеропорту;

– визначення параметру  $v_{ir}$  відбувається незалежно від рівнів шуму та емісії в околицях аеропорту;

– порівняння сценаріїв розвитку 1 та 2 показало, що зміна стратегії розвитку аеропорту значно впливає на склад парку ПК та здійснюваний вплив на довкілля.

Поступове введення в експлуатацію нових далекомагістральних ПК з великою пасажиромісткістю ( $i = 7,8,21,22$ ) дозволяє змінювати типи ПК, що перебувають в експлуатації тривалий період, (наприклад,  $i = 12$ ), або ж збільшити кількість пасажирів та багажу ( $i = 6,11$ ) (рис. 2). За будь-якого сценарію використання серед далекомагістральних ПК типу  $i = 5$  (B 737 800) виявляється найбільш ефективним не лише з погляду рівнів екологічного навантаження, але й з врахуванням пасажиромісткості та максимальної дальності польоту. Досить високі індекси емісії  $\text{NO}_x$  для типів  $i = 7,8$  не дають можливість застосовувати ці типи в великому обсязі.

Для ПК, що призначені для місцевих авіаційних перевезень не досягнуто максимальної ємності за екологічними параметрами для обох сценаріїв розвитку аеропорту. Певну перевагу має тип ПК  $i = 19$  (ATR72), експлуатація якого здійснює помірні рівні шуму, а турбогвинтові двигуни мають невисокі індекси емісії для  $\text{NO}_x$ .

Для заданих експлуатаційних умов та сценаріїв розвитку парку ПК, регіональні ПК розподілені рівномірно для всіх чотирьох прогнозованих років, що свідчить про можливість збільшення обсягів руху ПК цієї групи без перевищення заданих рівнів шуму та викидів.

## Прогнозування з врахуванням викидів парникових газів та шуму

Вихідні дані для дослідження сценарію з розвитку аеропорту щодо очікуваних обсягів перевезень подано в табл. 5, а рівні шуму EPNL та обсяги викидів  $\text{CO}_2$  для етапу зльоту – в табл. 4. Результати прогнозування, що враховують сукупний вплив викидів  $\text{CO}_2$  та рівнів шуму в районі аеропорту показано на рис. 3.

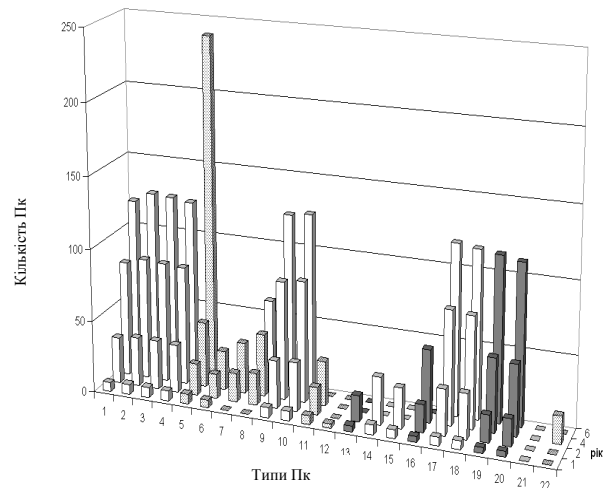


Рис. 3. Результат прогнозування  $T_{ir}$ , сценарій 3:

- – регіональні ПК;
- ▤ – далекомагістральні ПК;
- – ПК місцевих авіаліній

Коефіцієнти Лагранжа:

$$\alpha_1 = \alpha_2 = \alpha_3 = \alpha_4 = 1;$$

$$\beta_1 = 1;$$

$$\beta_2 = 8;$$

$$\beta_3 = 567,$$

$$\beta_4 = 1121.$$

Відносна похибка обчислень  $\delta_l \leq 0,01$ .

Як бачимо з рис. 3, в цілому склад парку ПК, прогнозований з врахуванням викидів  $\text{CO}_2$ , корелює з результатами прогнозування для  $\text{NO}_x$  (рис. 2, а), хоча існують певні принципів відмінності. Зокрема, зменшення частки в загальному складі парку таких типів як  $i = 6,7,11,21,22$  спостерігаємо для  $r = 4$  порівняно з прогнозом з параметром  $\text{NO}_x$ . Це пов'язано з конструктивними особливостями двигунів ПК, які мають великі витрати палива, що збільшує загальний обсяг викидів  $\text{CO}_2$ .

Найбільша частка серед далекомагістральних ПК, як і для сценаріїв 1 та 2, буде припадати на  $i = 5$ , але, на відміну від них, збільшиться кількість ПК типу  $i = 8$  – на 25 %. Серед регіональних ПК спостерігаємо незначне збільшення частки ПК типу  $i = 9$  на фоні зниження кількості  $i = 18$ .

Результати прогнозування для парів води будуть аналогічними до сценарію 3, оскільки індекси емісії для  $H_2O$  пропорційні індексам емісії  $CO_2$ .

### Висновки

Сформульовано основні етапи методики прогнозування екологічної ємності аеропортів цивільної авіації на основі ентропійного методу. Досліджено особливості прогнозування в короткотерміновий та довгостроковий періоди. У межах поданого підходу можливе не лише визначення максимальної екологічної місткості аеропорту, але й розроблення рекомендацій щодо зниження тиску на довкілля в районі аеропорту до нормативних рівнів, або ж підвищення екологічної місткості за рахунок застосування експлуатаційних процедур зниження рівнів шуму та емісії (короткотермінове прогнозування) або за рахунок коригування стратегії зміни складу парку ПК (довгостроковий період).

До переваг підходу також можна віднести оцінку сукупного впливу шуму та викидів ЗР на околиці аеропортів цивільної авіації, а також врахування додаткових експлуатаційних чи екологічних обмежень.

Результати прогнозування, виконані в роботі, дозволили зробити такі висновки:

- метеорологічні умови в районі аеропорту можуть мати вагомий вплив на визначення максимальної екологічної ємності;
- застосування понять про загальну енергетичну оцінку парку ПК та сумарний викид ЗР оптимізує дослідження альтернативних сценаріїв розвитку аеропорту;
- урахування пасажиромісткості та дальності польотів ПК рекомендується під час довгострокового прогнозування;

– для комплексної оцінки впливу авіатранспортних процесів для довгострокових прогнозів необхідно враховувати викиди парникових газів.

Результати дослідження планують взяти за основу під час розроблення моделі екологічної місткості аеропорту.

### Література

1. *Strategic objectives of ICAO for 2005-2010. Consolidated vision and mission statement.* – 3 p. // [http://www.icao.int/icao/en/strategic\\_objectives\\_2005\\_2010\\_en.pdf](http://www.icao.int/icao/en/strategic_objectives_2005_2010_en.pdf)
2. *NASA/CR-1998-207659. The Aviation System Analysis Capability. Airport Capacity and Delay Models.* – April 1998. – 74 p.
3. *Feasibility of coupling of an Airport capacity model to Airport noise model / L. Montrone, J.F.M. Wubben, A.J.C. Roeloffs, P. Vogel.* – 2001. – 9 p. // <http://www.nlr.nl/smartsite.dws?id=4391>
4. *Lépinay Iv. Assessing Environmental Tradeoffs in Flight Operations. Lessons Learnt and Ways Forward / Iv. Lépinay, N. Duchene, G. Benderli // Proc. Symposium on Aviation Environmental Tradeoffs and Interdependencies.* – Kiev, Ukraine. – 2008.
5. *Integrated noise model (INM). Version 5.0. User's guide.* – Technical Information Center. – Springfield, VA. – 1995. – 339 p.
6. *Emissions and Dispersion Modeling System (EDMS). User's Manual.* – Washington, DC. – 2008. – 156 p. // [http://www.faa.gov/about/office\\_org/headquarters\\_offices/aep/models/edms\\_model/media/EDMS%201%20User%20Manual.pdf](http://www.faa.gov/about/office_org/headquarters_offices/aep/models/edms_model/media/EDMS%201%20User%20Manual.pdf)
7. *Вильсон А. Дж. Энтропийные методы моделирования сложных систем / Дж. А. Вильсон.* – М.: Наука, 1978. – 248 с.
8. *Кажан К.І. Застосування ентропійного методу для вибору оптимальних за шумом режимів експлуатації повітряних кораблів в аеропортах цивільної авіації / К.І. Кажан // Вісник НАУ. – 2007. – №2. – С.71–75.*
9. *Климатическая характеристика аэропорта Борисполь.* – К., 1989. – 282 с.
10. *Emission Inventory Guidebook/December, 2006.* – B851-1 – 33 p. // <http://www.eea.europa.eu/publications/EMEP-CORINAIR4/B851vs2.4.pdf>
11. *ICAO Engine Emissions Data Bank Issue 15C* // <http://www.caa.co.uk/default.aspx?catid=702>

Стаття надійшла до редакції 07.09.09.