

УДК 629.7.534.2(045)

¹О.І. Запорожець, д-р техн. наук
²О.В. Коновалова**ВИЗНАЧЕННЯ АЛГОРИТМІВ ОБҐРУНТУВАННЯ ПРОПУСКНОЇ ЗДАТНОСТІ АЕРОПОРТУ З ОБМЕЖЕННЯМИ ПО АВІАЦІЙНОМУ ШУМУ**Інститут екології та дизайну НАУ, e-mail: ¹zap@nau.edu.ua, ²ekon@nau.edu.ua*Розглянуто алгоритми обґрунтування пропускної здатності аеропорту з обмеженнями по авіаційному шуму з метою забезпечення експлуатаційної пропускної здатності, яка є базовою при проектуванні аеропорту.***Постановка проблеми**

Головною екологічною проблемою в аеропортах Європи, що впливає на їх пропускну здатність (ПЗ) сьогодні і в майбутні двадцять років, є постійний неспокій населення в околиці аеропортів, що обумовлений впливом авіаційного шуму.

Результати досліджень цих аеропортів вказують, що натепер 66% серед них мають обмеження по експлуатації, пов'язані з впливом авіаційного шуму, і в найближчі строки передбачаються ще додатково 13% аеропортів, які матимуть обмеження по шуму [1].

Існує декілька визначень ПЗ аеропорту[2–4]:

- експлуатаційна;
- з умов безпеки польотів;
- економічна;
- екологічна.

У праці [5] проаналізовано зазначені види ПЗ та їх взаємозв'язок.

Екологічна ПЗ аеропорту близька за визначенням до екологічної ємності навколишнього середовища. Екологічна ПЗ аеропорту – це умови експлуатації, при яких навколишнє середовище здатне сприймати, поглинати або підпадати під вплив показників експлуатації аеропорту. Екологічна ПЗ аеропорту може виражатися максимальною кількістю повітряних суден, пасажирів і вантажів, обслуговуваних протягом даного періоду без порушення екологічних обмежень.

Пропускна здатність аеропорту по шуму – це максимальна кількість повітряних суден, які можуть експлуатуватися протягом даного періоду за умови, що рівень авіаційного шуму не перевищить задане нормативне обмеження. Як правило, обмеження шуму включають рівні шуму в критичних зонах навколо аеропорту.

До таких зон належать:

- робочі зони авіаційного персоналу, задіяного на обслуговування й експлуатацію авіаційної техніки і засобів аеропорту;
- зони розміщення пасажирів;
- зони проживання населення навколо аеропорту.

Оцінка проектів будівництва або реконструкції аеропорту на відповідність до вимог по шуму на території аеропорту або на його околицях може бути реалізована визначенням екологічної ПЗ аеропорту. Для доведення екологічної ПЗ аеропорту до експлуатаційної пропонується методика, згідно з якою на початкових етапах проектування розглядаються інтегральні критерії дії шуму і використовується попередня початкова інформація з інтенсивності польотів і складу парку повітряних суден на рівні ПЗ аеропорту, а не на рівні поточних або прогнозованих на п'ять–десять років уперед умов експлуатації.

Дія шуму

Обмеження дії шуму протягом часу спостереження T_{observ} встановлюються в зонах (точках) контролю шуму у вигляді рівнів звуку L_{AGoal} та як правило, мають структуру еквівалентних або добових (також еквівалентних, але які включають особливості дії шуму у вечірні і нічні години доби) рівнів. В Україні таким критерієм є еквівалентний рівень звуку в денний $L_{\text{AGoal}}=65$ дБА і нічний $L_{\text{AGoal}}=55$ дБА час доби.

Еквівалентні рівні звуку утворюються в результаті окремих подій випромінювання шуму – прольотів літаків над зоною контролю, що характеризуються рівнями експозиції шуму L_{Aijk} або іншими рівнями звуку, наприклад, максимальними (i – тип літака, j – маршрут руху, k – методика пілотування, наприклад, стандартна або із зменшенням шуму на місцевості).

Експозиція звуку також може використовуватися для оцінки акустичної дії окремої події випромінювання шуму в зоні контролю $SE_i=T10^{0,1L_{\text{Ai}}}$. Сумарна (зміряна) експозиція шуму TSE_{real} в зоні контролю становить

$$TSE_{\text{real}}(l)=\sum_i\sum_j\sum_k SE(i,j,k,l)$$

або

$$TSE_{\text{real}}(l)=\sum TSE(i,j,k,l), \quad (1)$$

$$TSE(i,j,k,l)=NCT(i,j,k)\cdot SE(i,j,k,l),$$

де NCT – кількість прольотів літаків i -го типу за j -м маршрутом руху з використанням k -ї методики пілотування над l -ю зоною контролю.

Для обмеження шуму в точці l експозиція встановлюється як

$$TSE_{Goal}(l) = T_{observ} 10^{(0,1 \cdot L_{Aeq}(l))}$$

Якщо виконується умова $TSE_{real}(l) > TSE_{goal}(l)$, необхідно застосовувати заходи щодо регулювання шуму в зоні контролю, у т. ч. з обмеження реальної ПЗ аеропорту в результаті заборони на польоти літаків вище за значення NCT, яке задовольняє $TSE_{Goal}(l)$.

Якщо зробити допущення, що умовний тип літака, який має експозицію SE_i , усереднену за величиною експозиції шуму для даного парку літаків, то обмежена кількість зльотів/посадок C в аеропорту буде:

$$C = TSE_{Goal} / SE_i$$

Довгострокові і короткострокові рішення проблеми шуму і пропускної здатності аеропорту

У 2004 р. ІКАО розробила та розповсюдила інструктивний матеріал щодо збалансованого підходу до управління авіаційним шумом, що враховує найкращу світову практику і реалізація якого рекомендується в усіх аеропортах світу.

Такий підхід є комплексним і його складовими в конкретному випадку можуть бути:

- визначення вимог до акустичних характеристик літаків та обмеження з експлуатації літаків з невідповідними характеристиками шуму, наприклад, несертифікованих або сертифікованих [6, розд. 2];

- впровадження нових правил зонування і визначення нових зон заборони та обмеження щодо забудовування навколо аеропортів;

- визначення вимог до звукоізоляції будинків та інших заходів зниження впливу шуму, реалізація цих заходів;

- впровадження акустичних екранів;

- впровадження системи контролю (моніторингу) шуму;

- впровадження системи сплачування авіакомпаніями за шум, що утворюється при експлуатації їхнього парку літаків, що стимулює їх до впровадження літаків з поліпшеними акустичними характеристиками тощо.

Серед перелічених є заходи довгострокового характеру (стратегічні рішення проблеми), наприклад, такі, як вилучення з експлуатації літаків, які не відповідають вимогам стандартів [6, розд. 3], та заходи щодо зонування і використання земель в межах зон надмірного впливу авіаційного шуму.

Запровадження регулюючих рішень залежить від множини факторів:

- нормативу обмеження авіаційного шуму навколо аеропорту L_{AGoal} ;

- віддаленості населених зон від аеропорту;

- розміщення маршрутів повітряного руху в районі аеропорту;

- парку літаків;

- аеропорту, експлуатація якого обумовлює дійсне значення еквівалентного рівня звуку L_{Aeq} в зонах контролю.

Залежно від значення різниці рівнів звуку

$$\Delta L_A = L_{Areal} - L_{AGoal}$$

або різниці експозиції шуму

$$\Delta TSE_{Goal} = TSE_{real} - TSE_{Goal}$$

приймається рішення стосовно регулювання шуму навколо та на території аеропорту.

Поточне значення експозиції шуму визначається для поточних умов експлуатації парку літаків в аеропорту – для України в більшості випадків парк складається з літаків, що несертифіковані або сертифіковані відповідно до вимог стандартів [6, розд. 2].

За умови $\Delta TSE > 0$ необхідно виконати розрахунки для парку з тією самою інтенсивністю польотів, який складається з літаків з поліпшеними акустичними характеристиками, ніж поточний парк, наприклад, з літаків, сертифікованих відповідно до вимог стандартів [6, розд. 3].

Якщо $\Delta TSE_3 > 0$, процедура перерахунку продовжується для літаків з характеристиками за вимогами стандартів [6, розд. 4]. Таким чином визначається значення ΔTSE_4 , яке також може бути позитивним. На сьогодні існують найсуворіші вимоги до характеристик шуму літаків, але умова $\Delta TSE_4 > 0$ означає необхідність визначення нових вимог до перспективних літаків за формулою

$$\Delta TSE_4 / n_{ijk} = \Delta SE_{ijk},$$

де ΔSE_{ijk} – необхідна різниця в експозиції шуму нового літака порівняно з поточними типами літаків, кількість яких становить n_{ijk} .

Такий підхід є методологічним. Насправді парк літаків є складним, він включає літаки усіх категорій, від несертифікованих до відповідних вимогам стандартів [6, розд. 4]. Тому визначення ΔSE_{ijk} необхідно виконувати з урахуванням заходів щодо удосконалення акустичних характеристик літаків та збитків від експлуатації літаків, які не відповідають вимогам стандартів [6, розд. 3].

Експлуатаційні методи зниження шуму, тобто використання методів пілотування зі зниженням шуму на місцевості та заборона польотів деяких типів літаків на окремих маршрутах в певні періоди доби тощо – є короткостроковими (оперативними) рішеннями, які дозволяють в окремих аеропортах здійснювати експлуатацію літаків, не

порушуючи нормативи (обмеження) охорони навколишнього середовища.

Як правило, методи пілотування зі зниженням шуму на місцевості визначаються окремо для кожного типу літака, але основні елементи таких методів описані в інструктивних матеріалах [7].

Якщо такі методики запровадити для всіх літаків на всіх маршрутах, що розглядаються, то загальна експозиція шуму в зоні контролю досягне мінімуму TSE_{\min} :

$$SE_{\min}(i,j) = \min(SE_{\min}(i,j), SE(i,j,k,l)),$$

$$TSE_{\min}(l) = \sum_i \sum_j \sum_k SE_{\min}(i,j,k,l).$$

Якщо $TSE_{\min}(l) \leq TSE_{\text{goal}}(l)$, то можливість регулювання існує. Але таке запровадження не вигідне з погляду економічної ефективності, тому що такі методи потребують більших витрат палива порівняно зі стандартними методами пілотування. З цієї причини розв'язання необхідно шукати для умови

$$TSE_{\min}(l) = TSE_{\text{goal}}(l),$$

тобто методи пілотування із зниженням шуму на місцевості необхідно застосовувати для обмеженої кількості літаків.

У загальному випадку задача формулюється так.

На досліджуваному маршруті руху здійснюються польоти із загальною інтенсивністю N декількома типами літаків.

Кількість літаків кожного типу дорівнює $C(i)$, $i = 1, 2, \dots, n$. Для кожного типу літака встановлена методика пілотування по маршруту зі зменшенням рівня шуму під траєкторією польоту.

Таким чином, для досліджуваної зони контролю для кожного типу літака визначені рівні експозиції звуку L_A ($j = 1, 2, \dots, m$), для декількох методик пілотування, принаймні для двох ($m \geq 2$).

Для досліджуваної зони контролю встановлено обмеження з нормативного критерію дії шуму, наприклад, з $L_{\text{Аекв}}$. Необхідно визначити такий розподіл заданої інтенсивності за типами літаків та за методикою пілотування N_{ij} , який забезпечуватиме задане обмеження з критерію дії шуму в контрольній точці.

У праці [8] для вирішення сформульованої задачі використаний метод пошуку найвірогіднішого розподілу з умови екстремуму ентропії системи (аеропорт з маршрутами руху і поточним парком літаків) з такими обмеженнями:

– на інтенсивність руху літаків на маршруті:

$$\sum_j N_{ij} = C_j; \quad \sum_i C_i = N; \quad (2)$$

– на еквівалентний рівень шуму в зоні контролю:

$$L_{\text{Аекв}} = 10 \lg \left[\frac{T_0}{T} \sum N_{ij} \tau_{ij} 10^{0,1 L_{\text{Аmax } j}} \right]. \quad (3)$$

Вираз (3) можна записати в еквівалентній формі:

$$\sum_{i,j} (N_{ij} P_{ij}) = 1, \quad (4)$$

$$P_{ij} = \frac{\tau_{ij} T_0}{T} 10^{(0,1 L_{\text{Аmax } j} - 0,1 L_{\text{Аmax } i})}.$$

У формулах (2), (4) рівень експозиції визначений через максимальний рівень звуку $L_{\text{Аmax}}$ введенням ефективного часу звучання τ_{ij} [8].

Ентропія системи для даної задачі визначається так само, як і для загального випадку:

$$S = \ln(N!) + \sum N_{ij} \left[\ln \frac{V_{ij}}{N_{ij}} + 1 \right], \quad (5)$$

де V_{ij} – нормована частота використання j -ї методики пілотування i -м типом літака на маршруті.

Найвірогідніший розподіл N_{ij} , що забезпечує виконання обмеження на рівень дії шуму, повинен забезпечувати умову відносного екстремуму виразу (5) за умов (2), (4):

$$N_{ij} = V_{ij} A_i C_i B_1 T_1 \exp(-b P_{ij}); \quad (6)$$

де A_i, B_1 – балансуючі множники; b – коефіцієнт Лагранжа для досліджуваної задачі.

$$A_i = \left[\sum_j V_j B_1 T_1 \exp(-b P_{ij}) \right]^{-1};$$

$$B_1 = \left[\sum_i V_i A_i C_i \exp(-b P_{ij}) \right]^{-1}.$$

Індекс 1 при B означає, що розглядається тільки один маршрут руху літаків, тому $T_1 = N$.

Значення коефіцієнта b Лагранжа залежить від умов задачі. Алгоритм розв'язання задачі відповідає узагальненому алгоритму і для її вирішення використаний програмний модуль DISTRI.

Розглянемо найпростіші початкові умови нетипової задачі для реальної експлуатації в районі аеропорту.

Кількість типів літаків $n=1$, для якого встановлено дві методики пілотування за маршрутом $m=2$. Рівні шуму в контрольній зоні дорівнюють $L_{\text{А1}}=79$ дБА, $L_{\text{А2}}=74$ дБА. Необхідно знайти розв'язання для умови контролю $L_{\text{Аекв}}=65$ дБА при інтенсивності польотів 302 за добу.

Початковий розподіл літаків за методиками пілотування $N_{11}=104$ і $N_{12}=198$ обумовлює рівень шуму $L_{\text{Аекв}}=65,3$ дБА в зоні контролю.

Розв'язання задачі з використанням програми DISTRI отримано для коефіцієнта Лагранжа $b=360$ у вигляді: $N_{11}=73$ і $N_{12}=229$.

Особливістю процесу розв'язання задачі є пошук оптимального значення коефіцієнта Лагранжа b і відповідних йому значень множників

A, B, оскільки при неоптимальних значеннях *b* остаточного розв’язання $L_{\text{Аекв}}=L_{\text{Аекв.об}}$ звичайно не отримуємо. Наприклад, в процесі розв’язання задачі на послідовних ітераціях значень коефіцієнта Лагранжа 1000, 500, 400 “умовні розв’язки” задачі обумовлювали значення рівнів у зоні 64, 64,6 і 64,9 дБА відповідно.

Оскільки кількість рівнянь в системі (2), (4), (5) завжди менше кількості невідомих (задача є недовизначеною), для пошуку остаточного розв’язання необхідно використовувати неформальні ітераційні процедури рішення.

Спрощені початкові умови задачі дозволяють визначити аналітичний вираз:

$$N_{12} = \frac{T}{\tau} \frac{(10^{0,1LA_{ekd}} - N10^{0,1LA_{\max 11}})}{10^{0,1LA_{\max 12}} - 10^{0,1LA_{\max 11}}},$$

$$N_{11} = N - N_{12}, \tag{7}$$

яке для початкових значень дає такий розв’язок:

$$N_{11}=75 \text{ і } N_{12}=227.$$

У межах заданої точності розв’язок, отриманий за допомогою умови (6), відповідає аналітичному розв’язку (7).

Недоліком даного методу є наявність кількості невідомих, яка більша кількості рівнянь, що вирішуються (за такої умови рішень, як правило, багато і необхідно дати обґрунтоване остаточне), та необхідність пошуку оптимального значення коефіцієнта Лагранжа *b*, від якого залежить остаточне рішення.

Пошук спрощених розв’язань задачі

Перший досліджений метод розв’язання задачі заснований на аналізі загальної експозиції шуму в зоні контролю шляхом визначення внеску в експозицію від кожного маршруту

$$TSE_{\text{route}(j)} = \sum_k TSE(i, j, k, l)$$

і від кожного типу літака на маршруті

$$TSE_{\text{type}(i)} = \sum_k TSE(i, j, k, l).$$

Цей метод дістав назву “грубого” аналізу експозиції шуму.

Розподіл застосування методів пілотування виконується спочатку для домінуючих типів літаків і маршрутів, тобто для тих, внесок яких в експозицію шуму в зоні контролю є максимальним:

$$n_{ij} = \Delta TSE_{\text{Goal}}/SE_{ij}. \tag{8}$$

Особливість методу розв’язання задачі, що розглядається, полягає в тому, що методи пілотування зі зниженням шуму на місцевості застосовуються послідовно для домінуючих літаків і маршрутів (з максимальними внесками), а для літаків, чий внесок найменший, застосовуються стандартні методи пілотування.

З табл. 1 видно, що розв’язання задачі суттєво відрізняється від аналітичного розв’язання (5).

Таблиця 1

Результати розв’язання задачі для одного маршруту

<i>i</i>	<i>j</i>	<i>m</i>	L_{Aij}	N_{ij}	Формули			
					5	8	9,10	11
1	1	1	80	154	25	0	13	42
1	1	2	75	0	129	154	141	112
2	1	1	82	148	36	0	79	36
2	1	2	77	0	112	148	69	112

Метод “тонкого” аналізу експозиції шуму полягає у тому, що для домінуючого ряду експозицій $TSE_1, TSE_2, \dots, TSE_n$ (TSE_1 – максимальний внесок у загальну експозицію в зоні контролю від *i*-го літака на *j*-му маршруті, TSE_n – мінімальний внесок) визначається різниця між сусідніми значеннями внесків, наприклад для перших двох як

$$\Delta TSE_1 = TSE_1 - TSE_2. \tag{9}$$

Для знайденої різниці визначається кількість літаків, для яких застосовуються методи пілотування із зниженням шуму на місцевості:

$$n_{12} = \Delta TSE_1 / (SE_{11} - SE_{12}), \tag{10}$$

де SE_{11}, SE_{12} – відповідно експозиції шуму літака для стандартних методів пілотування та зі зниженням шуму на місцевості.

Якщо виконується умова $\Delta TSE_{\text{goal}} - \Delta TSE_1 > 0$,

процедура визначення кількості літаків, для яких застосовуються методи пілотування зі зниженням шуму на місцевості, продовжується:

$$\Delta TSE_1 = TSE_1 - TSE_3; N_{12} = \Delta TSE_1 / (SE_{11} - SE_{12});$$

$$\Delta TSE_2 = TSE_2 - TSE_3; N_{22} = \Delta TSE_2 / (SE_{21} - SE_{22}).$$

Процедура завершується домінують *n*, якщо виконується умова

$$\Delta TSE_{\text{goal}} - \Delta TSE_1 - \dots - \Delta TSE_n < 0.$$

Результати розв’язання задачі за методами (8), (10) ближчі до результатів методу (5).

Пропонується метод зважених коефіцієнтів ω_{ij} , які визначають через експозиції шуму від прольоту літаків на окремих маршрутах, що є складовими загальної експозиції шуму в зоні контролю:

$$\omega_{ij} = SE_{ij} / SE_{\min} \geq 1, 0, \tag{11}$$

де $SE_{\min} = \min \{SE_{ij}\}$.

У цьому випадку різниця експозиції внеску від кожного типу літака *i* на маршруті *j*, для якої визначається кількість літаків, що застосовують методи пілотування із зниженням шуму на місцевості, дорівнює:

$$\Delta TSE_{ij} = TSE_{\text{goal}} \omega_{ij} / \sum_j \omega_{ij}.$$

Результати розв'язання задачі

У табл. 1 наведено розв'язання задачі для таких початкових даних: кількість зльотів–посадок – 302, кількість типів літаків – 2 (154 і 148 зльотів–посадок відповідно для кожного типу літака), кількість маршрутів – 1, кількість точок контролю – 1, методів пілотування 2.

Рівні експозиції L_{Aij} для літаків, що досліджуються, наведені в табл. 1. Рівень шуму в зоні контролю $L_{Аекв} = 67,3$ дБА, нормативне значення, якого необхідно досягти $L_{Аекв} = 65,0$ дБА.

З наведених розв'язків очевидно, що результати застосування методу (11) є найближчим до методу (5), оскільки коефіцієнти P_{ij} у формулах (4) визначаються через експозиції відповідних літаків. Але метод (11) є значно простішим у застосуванні до розв'язання поставленої задачі розподілу методів пілотування між літаками на маршрутах, що розглядаються. Метод реалізований в програмному комплексі DISTRALL.

Наступні умови ускладнюються введенням двох маршрутів, а загальна кількість літаків розподіляється між ними початково, як показано в табл. 2.

Таблиця 2

Результати розв'язання задачі для двох маршрутів

i	j	m	L_{Aij}	N_{ij}	Формули			
					5	9	9,10	11
1	1	1	80	80	13	0	7	18
1	1	2	75	0	66	80	73	62
1	2	1	81	74	10	0	29	12
1	2	2	76	0	66	74	45	62
2	1	1	82	72	18	72	14	10
2	1	2	77	0	55	0	58	62
2	2	1	83	76	16	0	0	14
2	2	2	78	0	59	76	76	62

Висновки

У статті наведено методи розв'язання задачі задоволення експлуатаційної ПЗ аеропорту при заданих нормативних обмеженнях по авіаційному шуму, тобто приведення екологічної ПЗ до експлуатаційної, яка є базовою при проектуванні аеропорту.

Список літератури

1. *The Concept Of Airport Environmental Capacity*. Manchester Metropolitan University, Department of Environmental & Geographical Sciences. – 2002. – Oct. – 84 p.
2. *Callum Th*. Environmental capacity of airports – what does it mean? // Workshop Proc. 2, Environmental Capacity. The challenge for the aircraft industry. Heathrow airport. – 2000. – Jun. – P. 9–11.
3. *Summary of Working Group Discussions*. Environmental Capacity. The challenge for the aircraft industry // Workshop Proc. 2. Heathrow airport. – 2000. – Jun. – P. 19–20.
4. *Janic M*. An Analysis of the Concepts of Airport Sustainable Capacity and Development // Ist Intern. Conf. “Environmental Capacity at Airports”. – The Manchester Metropolitan Univ. – Manchester, Great Britain. – 2001. – 2nd and 3rd Apr. – P. 1–20.
5. *Коновалова О.В*. Особливості проектування аеропорту з урахуванням екологічних критеріїв по шуму // Вісн. НАУ. – 2004. – №3. – С. 107–110.
6. *Environmental protection*. Annex 16 to the convention on international civil aviation. Aircraft noise // ICAO. 3-d Ed. – 1993. – Vol. 1.
7. *Руководство по выполнению полетов*. PAN-OPS. Т.1: Процедуры выполнения полетов. – Монреаль: ИКАО, Doc.8168-1. – 4-е изд. – 1993. – 116 с.
8. *Токарев В.И., Запорожец А.И., Страхолес В.В*. Снижение шума при эксплуатации пассажирских самолетов. – К.: Техніка, 1990. – 127 с.

Стаття надійшла до редакції 31.03.05.

А.И. Запорожец, Е.В. Коновалова

Определение алгоритмов обоснования пропускной способности аэропорта с ограничениями по авиационному шуму

Рассмотрены алгоритмы обоснования пропускной способности аэропорта с ограничениями по авиационному шуму с целью обеспечения эксплуатационной пропускной способности, которая является базовой при проектировании аэропорта.

A.I. Zaporozhets, E.V. Konovalova

Developing the algorithms of airport capacity rationalisation according to restrictions on aircraft noise

The algorithms of airport capacity rationalisation according to restrictions on aircraft noise are considered with the aim to provide airport operational capacity, which is the basic capacity at the stage of airport design.