

УДК 629.139

М.М. Дмитрієв, д-р техн. наук, проф.
О.М. Папченко, д-р техн. наук, проф.
О.Б. Деркачов, канд. техн. наук, старш. наук. співроб.
І.А. Рутковська, канд. техн. наук, доц.

ВИЗНАЧЕННЯ КРАЙОВИХ УМОВ НА ПОВЕРХНІ АЕРОДРОМНОГО ПОКРИТТЯ ДЛЯ ПОСТАНОВКИ ЗАВДАННЯ МОДЕЛЮВАННЯ ЙОГО ТЕПЛООВОГО ПОЛЯ

Розглянуто питання визначення межових умов на поверхні аеродромного покриття для постановки крайового завдання моделювання його теплового поля, до якого належать теплопровідність верхнього шару покриття, коефіцієнт поглинання сонячної радіації, потужність потоку сонячного випромінювання залежно від географічної широти місця, пори року, часу доби, погодних умов, тепловіддачі випромінюванням та конвекцією. Отримано розрахункові формули для чисельного розрахунку цих величин. Наведено приклад розрахунку теплового балансу поверхневого шару покриття за конкретних межових умов.

There is considered in this report the question of border circumstances on the airfield surface estimation by organization of the edge task of simulation of its heat field. To this circumstances refer: heat conductivity, power of sun radiation which depends on geographic latitude, season, hour of the day, weather, heat emission by radiation and convection. There are received calculation formulas for quantity meaning of these subject. The example of calculation of the covering surface heat balance is given.

Постановка проблеми

Відомо, що теорія неруйнівного теплового контролю стану аеродромного покриття ґрунтується на математичній моделі його теплового поля, яку визначають розв'язанням крайової задачі теплопередачі в тілі покриття та ґрунту під ним [1].

На межах між шарами покриття з відмінними теплофізичними характеристиками та між покриттям і “подушкою” діють крайові умови четвертого роду, коли теплообмін між контактуючими твердими тілами відбувається за умови

$$\lambda_1 \frac{\partial T_1}{\partial n} = \lambda_2 \frac{\partial T_2}{\partial n}; \quad (1)$$

між подушкою і ґрунтом – першого роду, коли задається температура на межі

$$T = \text{const}, \quad (2)$$

а на поверхні покриття – третього роду, коли задається баланс теплових потоків на межі

$$-\lambda_1 \frac{\partial T_1}{\partial n} = kq_p(t) - q_b(t) - q_k(t) - q_c(t), \quad (3)$$

де λ_i – теплопровідність i -го шару;

k , – коефіцієнт поглинання сонячної радіації покриттям;

$q_p(t)$ – потік сонячної радіації, який досягає поверхні покриття;

$q_b(t)$ – тепловіддача випромінюванням;

$q_k(t)$ – тепловіддача конвекцією;

$q_c(t)$ – тепловіддача на випаровування.

Визначення умов (1) та (2) не викликає будь-яких труднощів, а для поверхні покриття всі величини, які входять у праву частину рівняння (3), потребують подальшого дослідження. Особливо це стосується величини $q_p(t)$.

Вплив Сонця та навколишнього середовища на тепловий баланс аеродромного покриття

Для визначення функції $q_p(t)$ розглянемо залежність енергетичного впливу Сонця та навколишнього середовища на тепловий баланс аеродромного покриття.

Схематичне зображення меридіонального перетину земної кулі (відхиленням форми геоїда від ідеальної кулі знехтуємо) показано на рисунку.

Позначимо довжину радіуса Землі через R . Тоді, виходячи з паралельності прямих AB та DE і рівності кутів DOA та OAC , визначаємо:

$$AC = BC = R \cos \beta;$$

$$OC = R \sin \beta;$$

$$CF = OC \operatorname{tg} \alpha = R \sin \beta \operatorname{tg} \alpha;$$

$$FB = AC - CF = R \cos \beta - R \sin \beta \operatorname{tg} \alpha.$$

Меридіональний перетин земної кулі, який проєктується як лінія AB , показано на рисунку (а). З рисунку (б) випливає:

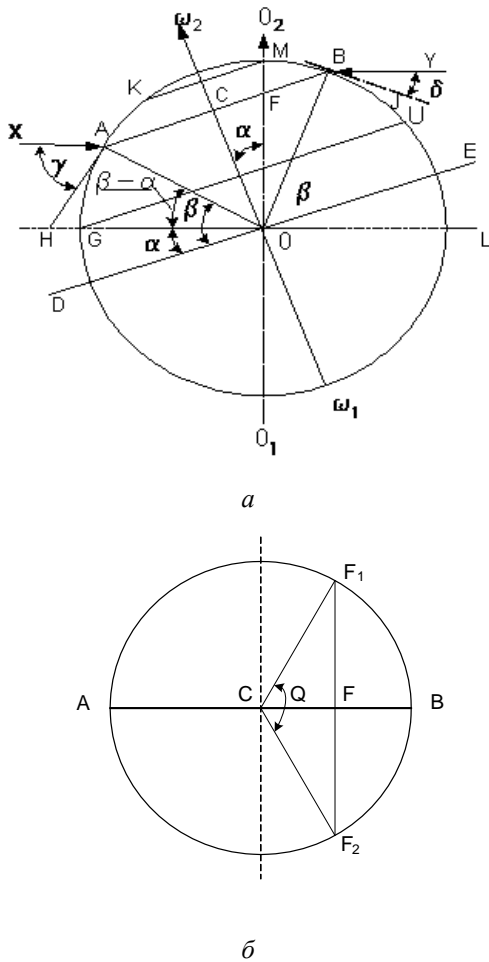
$$CF_1: \frac{\pi}{2} = F_1F: \frac{\theta}{2}.$$

Звідси кут повороту Землі навколо Сонця θ

$$\theta = \pi \cdot \operatorname{tg} \beta \cdot \operatorname{tg} \alpha,$$

і тривалість дня залежно від широти місця

$$T_\beta = 12 \cdot (1 + \operatorname{tg} \beta \cdot \operatorname{tg} \alpha). \quad (4)$$



Меридіональний перетин земної кулі:
a – літо в північній півкулі;
б – вид з боку північного полюса;
 ω_2 – північний полюс;
 ω_1 – південний полюс;
AX – напрям на Сонце;
 $\omega_1\omega_2$ – вісь обертання Землі;
 O_1O_2 – термінатор;
DE – екватор;
GL – площина екліптики;
 кут $\text{FOC} = \text{DON} = \alpha = 23^\circ 6' 20''$ – кут нахилу осі обертання Землі до площини екліптики;
DE – екватор;
GU – північний тропік;
KM – полярне коло;
 $\text{AOD} = \beta$ – кут географічної широти розташування аеродрому;
A – точка розташування розглядуваного об'єкта на південь;
AB – проекція шляху переміщення цієї точки на площину перетину Землі;
F – проекція точки заходу Сонця;
 $\text{XAH} = \gamma$ – кут максимальної висоти Сонця над горизонтом у день літнього сонцестояння для широти *AOD*;
 $\text{YBJ} = \delta$ – кут максимальної висоти Сонця над горизонтом у день зимового сонцестояння

Рух Землі по орбіті призводить до зміни кута нахилу проекції земної осі на площину, в якій лежать Сонце і Земля. Цей кут α_1 змінюється від плюс α 22 червня до мінус α 22 грудня за синусоїдальним законом, тобто:

$$\alpha_1 = \alpha(1 - \sin \theta). \tag{5}$$

Для довільного часу року (*y* годинах) формулу (4) записуємо у вигляді

$$T_{\beta\alpha} = 12 \cdot (1 + \text{tg}\beta \cdot \text{tg}\alpha_1).$$

Розрахункові значення тривалості дня залежно від географічної широти місця та пори року для північної півкулі наведено в табл. 1.

Беручи до уваги паралельність прямих *XA* та *OH*, із трикутника *OAH* (див. рисунок) визначаємо кут *AHO*, який дорівнює куту максимальної висоти Сонця над горизонтом, тобто $\text{XAH} = \gamma$.

З рисунку видно, що

$$\gamma = \frac{\pi}{2} - (\beta - \alpha_1),$$

або, підставляючи замість α_1 його значення з виразу, маємо

$$\gamma = \frac{\pi}{2} - [\beta - \alpha(1 - \sin \theta)].$$

Табл. 2 ілюструє залежність максимального енергетичного потоку від Сонця, що діє в умовах ясної погоди на 1 м^2 покриття залежно від географічної широти та пори року (без урахування поглинання в атмосфері).

Упродовж доби до кута γ додається кут, спричинений обертанням Землі навколо своєї осі:

$$\gamma_1 = \frac{T - T_c}{T_d} \pi,$$

де *T* – поточний час;

T_c – час сходу Сонця.

З урахуванням кутів γ та γ_1 , енергетичний потік *P*, що падає на одиницю поверхні аеродромного покриття, визначаємо як

$$P = W \sin \gamma \sin \gamma_1, \tag{6}$$

де *W* – потужність сонячного випромінювання на одиницю поверхні, нормальної до напрямку на Сонце.

Потужність енергетичного потоку W_R від Сонця на відстані радіуса земної орбіти дорівнює [2]

$$W_R = 1,36 \cdot 10^3 \text{ Вт/м}^2. \tag{7}$$

Таблиця 1

Розрахункові значення тривалості дня залежно від географічної широти місця

β , град	Місяць						
	Червень	Липень	Серпень	Вересень	Жовтень	Листопад	Грудень
10	12 год 55 хв	12 год 26 хв	12 год 07 хв	12 год 07 хв	11 год 53 хв	11 год 34 хв	11 год 05 хв
20	13 год 53 хв	12 год 54 хв	12 год 14 хв	12 год 14 хв	11 год 46 хв	11 год 06 хв	10 год 07 хв
30	14 год 59 хв	13 год 26 хв	12 год 26 хв	12 год 26 хв	11 год 34 хв	10 год 34 хв	9 год 01 хв
40	16 год 20 хв	14 год 07 хв	12 год 33 хв	12 год 33 хв	11 год 27 хв	9 год 53 хв	7 год 40 хв
50	18 год 09 хв	14 год 56 хв	12 год 47 хв	12 год 47 хв	11 год 13 хв	9 год 03 хв	5 год 51 хв
60	20 год 54 хв	16 год 16 хв	13 год 08 хв	13 год 08 хв	10 год 52 хв	5 год 44 хв	3 год 06 хв

Таблиця 2

Залежність максимального енергетичного потоку від Сонця від широти місця

β , град	Місяць						
	Червень	Липень	Серпень	Вересень	Жовтень	Листопад	Грудень
50	1,16	1,01	0,88	0,83	0,78	0,61	0,35
40	1,24	1,14	1,03	1,00	0,95	0,80	0,57
30	1,29	1,03	1,15	1,02	1,08	0,97	0,76
20	1,30	1,00	1,24	1,21	1,19	1,10	0,94

Якщо знехтувати поглинанням енергії в атмосфері, то, підставляючи значення W_R з рівняння (6) у вираз (5), замість W отримаємо, наприклад, для червня:

$$P = 1,36 \cdot 0,876 \approx 1,16 \cdot 10^3 \text{ Вт/м}^2.$$

Розглянемо зв'язок між потужністю опромінення та нагрівом покриття. Якщо потужність енергетичного потоку, що падає на поверхню покриття, дорівнює P , то енергія, витрачена на нагрівання матеріалу за час t , становить

$$E = PtS, \quad (7)$$

де S – площа поверхні одиничного об'єму покриття, м^2 .

Приріст температури ΔT тіла об'єму V за час t

$$\Delta T = \frac{E}{E_0 V}, \quad (8)$$

де E_0 – енергія, потрібна для нагрівання 1 м^3 бетону за 1 год на 1 К , $\text{Дж}/(\text{м}^3 \cdot \text{К})$;

V – одиничний об'єм матеріалу покриття (бетону), м^3 .

Енергію E_0 визначають за формулою

$$E_0 = c\rho,$$

де c – питома теплоємність бетону, $\text{Дж}/(\text{кг} \cdot \text{К})$;

ρ – щільність бетону, $\text{кг}/\text{м}^3$.

Із праці [3] відомо, що:

$$c\rho = \frac{\lambda}{a}, \quad (9)$$

де λ – теплопровідність бетону, $\text{Вт}/(\text{м} \cdot \text{К})$;

a – температуропровідність, $\text{м}^2/\text{год}$.

З урахуванням рівняння (7) вираз (8) набуде вигляду

$$\Delta T = \frac{PtS}{\lambda V}. \quad (9)$$

Приклад. Бетонне покриття злітно-посадкової смуги аеродрому умовно розбито на чарунки $0,1 \times 0,1 \times 0,1 \text{ м}^3$.

Потужність сонячного випромінювання

$$P = 800 \text{ Вт/м}^2.$$

Температуропровідність

$$a = 1,07 \cdot 10^{-3} \text{ м}^2/\text{год}.$$

Теплопровідність бетону

$$\lambda = 0,9 \text{ Вт}/(\text{м} \cdot \text{К}).$$

Час $t = 0,03$ год.

Приріст температури

$$\Delta T = \frac{800 \cdot 0,03 \cdot 1,07 \cdot 10^{-3} \cdot 0,01}{0,9 \cdot 10^{-3}} = 0,277 \text{ К}.$$

За час t за різниці температур поверхні та повітря Δt з площі 1 м^2 віддається енергія в навколишнє середовище:

$$E_b = \alpha_t t \Delta t,$$

де α_t – коефіцієнт тепловіддачі, $\text{Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$.

Із поверхні S буде віддано енергію

$$E_b = \alpha_t t \Delta t S.$$

Відносячи цю енергію до модельованого об'єму матеріалу покриття та вважаючи температуру поверхні рівною її середній температурі, отримаємо за аналогією з формулою (9) такий вираз для охолодження верхнього шару за рахунок тепловіддачі конвекцією:

$$\delta T = \frac{E_v a}{\lambda V} = \frac{\alpha_t t S \Delta t a}{\lambda V}.$$

Приклад. Бетонне покриття злітно-посадкової смуги аеродрому умовно розбийте на чарунки

$$0,1 \times 0,1 \times 0,1 \text{ м}^3.$$

Потужність сонячного випромінювання

$$P = 800 \text{ Вт/м}^2.$$

Температуропровідність

$$a = 1,07 \cdot 10^{-3} \text{ м}^2/\text{год}.$$

Теплопровідність бетону

$$\lambda = 0,9 \text{ Вт/(м}\cdot\text{К)}.$$

Час

$$t = 0,03 \text{ год}.$$

Коефіцієнт тепловіддачі

$$\alpha_t = 25 \text{ Вт/(м}^2\cdot\text{К)}.$$

Різниця температур поверхні та повітря $\Delta t = 10 \text{ К}$.

Коефіцієнт тепловіддачі покриття конвекцією у загальному випадку є функцією швидкості та температури повітря, його вологості і наявності опадів:

$$\delta T = \frac{25 \cdot 0,03 \cdot 0,01 \cdot 10 \cdot 1,07 \cdot 10^{-3}}{0,9 \cdot 10^{-3}} = 0,089 \text{ К}.$$

По-різному перебігає процес тепловіддачі залежно від пори року та часу доби. Наприклад, коефіцієнт тепловіддачі бетонного покриття сухому повітрю дорівнює приблизно $10 \text{ Вт/(м}^2\cdot\text{К)}$, а в

разі конденсації водяної пари на твердій поверхні доходить до $1200 \text{ Вт/(м}^2\cdot\text{К)}$, тобто в 120 разів більше [4]. Тепловіддача за рахунок випромінювання $q_v(t)$ за реальних температур покриття ($260\text{--}330 \text{ К}$) мала і згідно із законом Стефана – Больцмана дорівнює в середньому $0,6 \text{ Вт/(м}^2\cdot\text{К)}$. Тому нею можна знехтувати. Теплоту випаровування $q_c(t)$ ураховують коефіцієнтом тепловіддачі конвекцією.

Висновки

1. Отримані результати важливі для наближення моделей теплового поля аеродромних покриттів до реальності, а отже, сприяють удосконаленню бази, на якій будують методології теплової діагностики.
2. Роботи в цьому напрямі доцільно продовжувати, зокрема, для з'ясування, на яку глибину поширюються добові коливання температури в різні пори року, який характер сезонних теплових потоків, як впливають нестійкі погодні умови на нижчі шари покриття і як швидко відновлюється первісний розподіл температур після висихання покриття, як залежить коефіцієнт поглинання сонячного випромінювання атмосферою від її стану тощо.

Література

1. *Дмитриев Н.Н.* Основы контроля и диагностики аэродромных покрытий. – К.: УТУ, 1998. – 360 с.
2. *Украинская Советская Энциклопедия.* Т. 10. – К.: Гл. ред. Укр. Сов. Энциклопедии, 1984. – С. 233.
3. *Исаченко В.П., Осипова В. П., Сукомел А. С.* Теплопередача. – М.: Энергоиздат, 1981. – 416 с.
4. *Юдаев Б. Н.* Теплопередача. – М.: Высш. шк. 1973. – 359 с.

Стаття надійшла до редакції 21.12.07.