

УДК 697.922.2:2:631.237

**Г. Г. Шишко**, завідувач кафедри  
енергоресурсозбереження, професор  
Київський національний університет  
будівництва і архітектури

## ЕНЕРГОЕКОНОМІЧНІ СИСТЕМИ ПОВІТРЯНОГО ОПАЛЕННЯ БУДІВЕЛЬ ТА СПОРУД

Нині для опалення будівель та споруд з тепловою інерцією огорожуючих конструкцій  $D \leq 1,5$  (безінерційна) або  $1,5 < D \leq 4$  (малої інерції) застосовуються системи повітряного опалення, особливо при використанні низькопотенційних теплоносіїв, у тому числі геотермальних вод, вторинних енергетичних ресурсів теплових електростанцій та промислових підприємств.

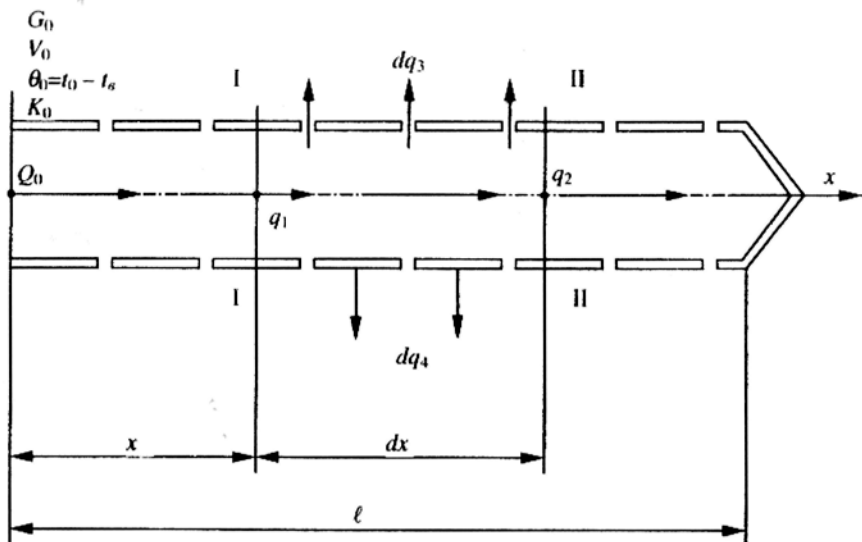
Достатньо розповсюджені системи повітряного обігріву потужними турбулентними струменями. При такій подачі нагрітого повітря спостерігається значна нерівномірність температур і швидкостей повітря в робочій зоні споруди. Тому для повітряного опалення будівель і споруд з тепловою інерцією огорожуючих конструкцій  $D < 1,5$  або  $1,5 < D \leq 4$  (наприклад: теплиці, оранжереї, ангари) застосовуються системи повітряного опалення з розосередженою подачею нагрітого повітря металевими повітроводами. Але такі системи металомісткі і громіздкі, погіршують світовий режим будівель та споруд. У зв'язку з цим, в останні роки для повітряного опалення таких будівель та споруд знайшли застосування системи повітряного обігріву з розосередженою подачею нагрітого повітря перфорованими повітроводами з плівкових полімерних матеріалів, які мають безперечні переваги перед металевими (нижча вартість і металомісткість систем, скорочення строків виготовлення і монтажу, не схильні до корозії, не погіршують світовий режим споруди). Довготривалість полімерних плівок, які експлуатуються в приміщенні без впливу сонячної радіації, фактично сумірна з застосуванням в якості повітророзподільвачів традиційних матеріалів.

Однак при використанні традиційних методів розрахунку повітроводів, спрямованих на отримання рівномірної роздачі повітря по довжині, неможливо забезпечити рівномірний розподіл теплового потоку по площі споруд з малою тепловою інерцією огорожуючих конструкцій, тому що в зв'язку зі значною довжиною повітроводів (40...100 м) і відносно високою початковою температурою нагрітого повітря (40...60 °С) спостерігається значне його охолодження при переміщенні по перфорованому повітроводу (до 15...20 °С) і відповідно зменшуються теплонадходження по довжині повітропроводу [1, 4]. У цьому випадку для компенсації охолодження повітря і створення рівномірних температур в зоні, що обслуговується, необхідно забезпечити пропорційне збільшення роздачу повітря від початку до кінця повітропроводу, тобто його необхідно розраховувати на задану нерівномірність роздачі повітря по довжині.

У роботі поставлена задача встановити, щодо вимог повітряного опалення теплиць, закономірності змін витрачення повітря, що витікає з отворів тонкостінного (плівкового) рівномірно перфорованого повітропроводу постійного перерізу, який є найбільш технологічним у виготовленні і монтажі, при яких забезпечується рівномірний розподіл теплового потоку по довжині, і одержати залежності придатні для інженерних розрахунків. Слід підкреслити, що актуальність цих питань очевидна і при комбінованих системах обігріву теплиць, в яких економічна ефективність опалення зростає з ростом питомої ваги повітряного обігріву у загальній потужності.

Розглянемо тонкостінний рівномірно перфорований повітропровід постійного перерізу, розташований у середовищі, параметри якого постійні (температура, вологість і т. ін.). Припустимо, що фізичні характеристики газу (підігріте повітря) у повітропроводі не змінюються (теплоємність, густина і т. ін.)

Енергетичний баланс будь-якого елемента перфорованого повітропроводу  $dx$  (рисунок) буде складатися з теплового потоку  $q_1$ , який поступає в елемент що розглядається через перерізи I — I і виходить з елемента частково через перерізи II — II  $q_2$ , з повітрям  $g_x$  через отвори перфорації  $d_f$ , які приходяться на довжину перфорованого повітропроводу, рівну  $dx - dq_3$  і шляхом теплопередачі через стінку повітропроводу на елементарній ділянці  $dx - dq_4$ .



Енергетичний баланс перфорованого каналу системи повітряного опалення

Отже, сумарне теплонадходження від елемента повітропроводу довжиною  $dx$

$$dq_x = dq_3 + dq_4. \quad (1)$$

Теплонадходження з повітрям через отвори перфорації  $dq_3$  і шляхом теплопередачі через стінку повітропроводу  $dq_4$  на ділянці  $dx$  визначається за відомими залежностями:

$$dq_3 = C_p g_x \left[ \frac{t_x + (t_x - dt)}{2} - t_g \right] dx; \quad (2)$$

$$dq_4 = \pi d K_x \left[ \frac{t_x + (t_x - dt)}{2} - t_g \right] dx. \quad (3)$$

Зневажаючи на нескінченно малі величини вищого порядку  $\left( \frac{dt \cdot dx}{2} \right)$  одержуємо:

$$dq_3 = C_p g_x (t_x - t_g) dx = C_p g_x \theta_x dx; \quad (4)$$

$$dq_4 = \pi d K_x (t_x - t_0) dx = \pi d K_x \theta_x dx. \quad (5)$$

З урахуванням залежностей (4), (5) рівняння (1) набуде вигляду

$$dq_x = (C_p g_x \theta_x + \pi d K_x \theta_x) dx. \quad (6)$$

Умови рівномірного розподілу теплового потоку по довжині рівномірно перфорованого повітропроводу постійного перерізу можна записати

$$dq_x = \frac{Q_0}{\ell} dx. \quad (7)$$

Дорівнюючи праві частини рівнянь (6), (7), після відповідних перетворень отримуємо

$$g_x = \left( \frac{Q_0}{C_p \ell} - \frac{\pi d}{C_p} K_x \theta_x \right) \frac{1}{\theta_x}. \quad (8)$$

З метою спрощення виразу (8) застосовуємо по аналогії з [1] безрозмірний параметр для початкових умов  $n_0 = \frac{K_0 \pi d \ell}{C_p G_0}$ . При цьому вводимо поняття безрозмірного параметру для довільного перерізу, що враховує зміну коефіцієнта теплопередачі по довжині

$$n_x = n_0 \frac{K_x}{K_0} = \frac{K_x \pi d \ell}{C_p \cdot G_0} = \frac{K_x \pi d}{C_p \cdot g_{cp}}. \quad (9)$$

Поділивши (8) на  $g_{cp}$ , з урахуванням виразу (9) і, приймаючи до уваги, що  $Q_0 = C_p G_0 \theta_0$ , рівняння (8) набуде вигляду

$$\frac{g_x}{g_{cp}} = \left( \frac{\theta_0}{\theta_x} - n_x \right). \quad (10)$$

Знаючи, що для початкових умов  $K_x = K_0$  і  $\theta_x = \theta_0$ , отримуємо з рівняння (10) вираз, який відображає зв'язок між середньою  $g_{cp}$  і початковою  $g_0$  масовою витратою повітря в отворах перфорації

$$g_{cp} = \frac{g_0}{1 - n_0}. \quad (11)$$

Підставляючи у рівняння (10) значення  $q_{cp}$  (11), маємо:

$$\frac{g_x}{g_0} = \frac{1}{1-n_0} \left( \frac{\theta_0}{\theta_x} - n_0 \frac{K_x}{K_0} \right). \quad (12)$$

Отримані рівняння (10), (12) відображають закономірності зміни по довжині повітропроводу витрати повітря, що витікає із отворів перфорації, при яких забезпечується рівномірний розподіл теплового потоку. У цьому випадку зміни витрати повітря повинні відповідати змінам його температури і коефіцієнта теплопередачі через стінку по довжині перфорованого повітропроводу.

Аналітична залежність (12) є нелінійне рівняння відносно  $g_x$ , так як у загальному випадку, згідно з проведеним теоретичним аналізом  $K_x = \varphi(\bar{x}; g_x; \theta_x)$ , а  $\theta_x = \psi(\bar{x}; g_x; K_x)$ , тобто права частина рівняння (12) також залежить від  $g_x$ .

З метою отримання кінцевого рішення рівняння (12) для випадку повітряного опалення теплиць проведені аеродинамічні і теплотехнічні дослідження в лабораторних і природних умовах рівномірно перфорованих повітропроводів постійного перерізу з поліетиленової плівки завтовшки  $\delta = 0,1 \dots 0,2$  мм. Для одночасних вимірів аеродинамічних і теплотехнічних параметрів в одній й тій самій точці розрахункової ділянки пристосовувалися пневмометричні й інтегруючі трубки, суміжні з термомпарами.

У результаті обробки експериментальних дослідів встановлено, що в діапазоні  $\lambda \bar{\ell} \leq 2$ ,  $\bar{f} = 1,5 \dots 4,0$ , характерним для повітророзподілювачів з нерівномірною роздачею повітря, значення відношень  $K_x/K_0$  і  $\theta_0/\theta_x$ , які входять в рівняння (12), практично визначаються тільки відносною координатою довільного перерізу  $\bar{x}$  і з достатньою для інженерних розрахунків точністю ( $\pm 5\%$ ) описуються емпіричними залежностями

$$\frac{K_x}{K_0} = (1 - \bar{x})^{0,2}; \quad (13)$$

$$\frac{\theta_0}{\theta_x} = (1 - \bar{x})^{-0,82n_0} = (1 - \bar{x})^{-0,0033 \frac{K_0 \ell}{\rho \cdot v_0}}. \quad (14)$$

В формулах (13), (14) коефіцієнт теплопередачі для початкових умов може бути визначений по одержаній раніше емпіричній залежності [5]

$$K_0 = \frac{1}{\frac{1}{(3,91 - 2,32\sqrt[3]{d})V_0 + 4,01 - 2,32d} + \frac{1}{(7,91 - 4,98\sqrt[3]{d} + 0,039\theta_0)}}. \quad (15)$$

Враховуючи (13), (14) і приймаючи до уваги, що для рівномірного перфорування повітроводів постійного перерізу  $\frac{g_x}{g_0} = \frac{w_x}{w_0}$ , отримуємо розрахункове рівняння умов рівномірного розподілу теплового потоку по довжині повітропроводу з полімерної плівки

$$\frac{g_x}{g_0} = \frac{w_x}{w_0} = \frac{1}{1 - n_0} \left[ (1 - \bar{x})^{-0,82n_0} - n_0(1 - \bar{x})^{0,2} \right]. \quad (16)$$

Згідно з теоретичними дослідженнями [2,3] і проведеними експериментами, при значеннях параметра каналу  $\lambda \bar{\ell} \leq 2$  швидкість протікання повітря із отворів перфорації зростає від початку до кінці повітророзподілювача. У цьому випадку можна визначити ступінь максимальної зміни швидкості повітря із отворів перфорації  $\varepsilon \left( \varepsilon = \frac{w_{\max}}{w_{\min}} = \frac{w_{\kappa}}{w_0} \right)$ , при якій забезпечується рівномірний розподіл теплового потоку по довжині перфорованого повітропроводу

$$\varepsilon = \frac{w_{\kappa}}{w_0} = \frac{1}{1 - n_0} \left( 10^{0,82n_0} - 0,63n_0 \right). \quad (17)$$

Після заміни відношень  $w_{\kappa}/w_0$  його значення із рівняння для визначення максимальної нерівномірності роздачі повітря плівковим повітророзподілювачем в залежності від аеродинамічних параметрів, які визначають  $\mu \bar{f}$  і  $\lambda \bar{\ell}$  [5] одержана у кінцевому вигляді розрахункова формула для обчислення значення  $\bar{f}$ , при якому забезпечується рівномірний розподіл теплового потоку перфорованими повітропроводами з полімерних плівкових матеріалів

$$\bar{f} = \frac{0,65}{\mu} \sqrt{\frac{\epsilon^2 - 1}{1 - 0,006G_0^{-0,1} \cdot \bar{\ell}}} \quad (18)$$

Формула (18) використовується при розрахунку повітророзподілювачів з полімерних плівкових матеріалів в діапазоні  $\lambda \bar{\ell} \leq 2$ ,  $d = 0,15 \dots 0,5$  м,  $\bar{\ell} = 50 \dots 160$ . При використанні наведеної залежності для розрахунку повітророзподілювачів з інших матеріалів необхідно ввести відповідні поправки в значення коефіцієнтів теплопередачі, опору тертя і витрати повітря.

На підставі теоретичних і експериментальних досліджень розроблені методика розрахунку перфорованих повітроводів з рівномірним розподілом теплового потоку по довжині і рекомендації [4, 5], які використовуються при проектуванні і реконструкції систем повітряного опалення теплиць, оранжерей та інших сільськогосподарських будівель і споруд.

Залежно від конструктивних особливостей теплиць і технології сільськогосподарських робіт перфоровані повітроводи розташовуються як в зоні рослин (вегетативні системи повітряного опалення), так і у верхній частині теплиць (під покрівлею). Переважним можна вважати перший варіант, тому що він виключає перегрів верхньої зони, що знижує тепловтрати на 15...20% [1, 5]. Крім того, при цьому поліпшуються умови для засвоєння поживних речовин з ґрунту.

Природні дослідження мікроклімату теплиць і дослід від їх експлуатації у господарствах показали, що системи повітряного опалення з перфорованими повітроводами, розрахованими за запропонованою методикою, рівномірно розподіляють тепловий потік по ділянці теплиць, створюють відповідні мікрокліматичні умови і при цьому надають можливість скоротити енергетичні витрати на 10...15% [4, 5].

**Умовні позначення:**  $d$  — діаметр повітроводу, м;  $V$  — швидкість повітря у повітроводі, м/с;  $w$  — швидкість витікання повітря з отворів перфорації, м/с;  $f$  — площа перерізів отвору перфорації, м<sup>2</sup>;  $F$  — площа перерізів повітроводеду, м<sup>2</sup>;  $\bar{f}$  — відносна площа отворів перфорації;  $\bar{f} = \sum f / F$ ;  $\mu$  — коефіцієнт витрачання отворів перфорації;  $\mu \bar{f}$  — параметр розподілу;  $\bar{\ell}$  — відносна довжина повітроводеду;  $\bar{\ell} = \ell / d$ ;  $\lambda$  — коефіцієнт опору тертя;  $\lambda \bar{\ell}$  = параметр каналу;  $\bar{x}$  — параметр положення;  $\bar{x} = x / \ell$ ;  $\rho$  — густина, кг/м<sup>3</sup>;  $G$  — масове витрачання у повітро-

проводі, кг/с;  $g$  — масова витрата через отвори перфорації, кг/с;  $Q$  — тепловий потік, Вт;  $C_p$  — питома теплоємність, Дж/(кг.К);  $t$  — температура повітря у повітропроводі, °С;  $t_b$  — температура внутрішнього повітря, °С;  $\theta$  — надмірна температура;  $\theta = (t - t_b)$ , °С;  $K$  — коефіцієнт теплопередачі, Вт/(м<sup>2</sup>.К); індекси:  $x$  — довільний переріз;  $o$  — початкове;  $k$  — кінцеве.

## Висновок

Наведене теоретичне обґрунтування розрахунку повітроводів з заданою нерівномірністю роздачі нагрітого повітря. Одержано розрахункове рівняння умов рівномірного розподілу теплового потоку по довжині рівномірно перфорованих повітроводів постійного перерізу із полімерних плівкових матеріалів для умов повітряного обігріву теплиць.

## Література

1. Куртєнер Д. А., Усков И. Б. Климатические факторы и тепловой режим в открытом и защищенном грунте. — Л.: Гидрометеиздат, 1982. — 231 с.
2. Талиев В. Н. Аэродинамика вентиляции. — М.: Стройиздат, 1979. — 295 с.
3. Гримитлин М. И. Распределение воздуха в помещениях. — М.: Стройиздат, 1982. — 164 с.
4. Шишко Г. Г., Потапов В. А., Злобин Л. Л. Отопление и вентиляция теплиц. — К.: Будивельник, 1984. — 112 с.
5. Теплицы и тепличные хозяйства: Справочник / Г. Г. Шишко, В. А. Потапов, Л. Т. Сулима, Л. С. Чебанов / Под редакцией Г. Г. Шишко. — К.: Урожай, 1993. — 424 с.