

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.

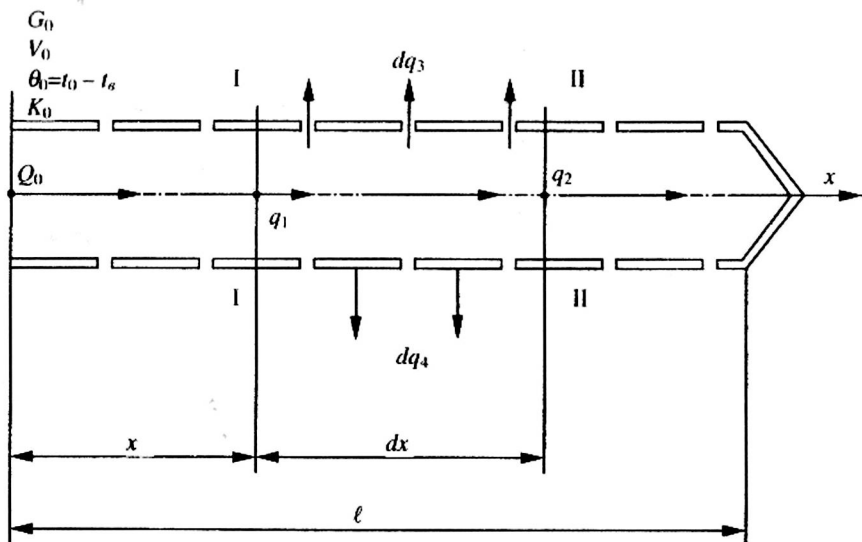
Достатньо розповсюджені системи повітряного обігріву потужними турбулентними струменями. При такій подачі нагрітого повітря спостерігається значна нерівномірність температур і швидкостей повітря в робочій зоні споруди. Тому для повітряного опалення будівель і споруд з тепловою інерцією огорожуючих конструкцій $D < 1,5$ або $1,5 < D \leq 4$ (наприклад: теплиці, оранжереї, ангари) застосовуються системи повітряного опалення з розосередженою подачею нагрітого повітря металевими повітропроводами. 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 повітропроводами 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 повітророзподілювачів 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 θ_0/θ_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_{κ}/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, м²; F — площа перерізів повітроводеду, м²; \bar{f} — відносна площа отворів перфорації; $\bar{f} = \sum f / F$; μ — коефіцієнт витрачання отворів перфорації; $\mu \bar{f}$ — параметр розподілу; $\bar{\ell}$ — відносна довжина повітроводеду; $\bar{\ell} = \ell / d$; λ — коефіцієнт опору тертя; $\lambda \bar{\ell}$ = параметр каналу; \bar{x} — параметр положення; $\bar{x} = x / \ell$; ρ — густина, кг/м³; 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; θ — надмірна температура; $\theta = (t - t_b)$, °С; K — коефіцієнт теплопередачі, Вт/(м².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.: Гидрометеоздат, 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.