УДК 697.92

П.Л. Зінич, кандидат технічних наук, доцент

В.В. Трофімович, кандидат технічних наук, професор

Київський національний університет будівництва і архітектури

АНАЛІТИЧНІ РОЗВ'ЗУВАННЯ РІВНОМІРНОГО РОЗДАВАННЯ ВЕНТИЛЯЦІЙНОГО ПОВІТРЯ ПОВІТРОПРОВОДАМИ ПОСТІЙНОГО ПОПЕРЕЧНОГО ПЕРЕРІЗУ ЗІ ЗМІННОЮ ПО ВИСОТІ ЩІЛИНОЮ АБО ОТВОРАМИ ЗМІННОЇ ПЛОЩІ

Наведено аналітичний розрахунок висоти припливної щілини та площі отворів для виходу повітря в будь-якому незмінному за площею поперечному перерізі кінцевого повітропроводу рівномірного по довжині роздавання повітря припливної системи вентиляції з механічним збудженням.

В основу аналітичного розв'язання задачі рівномірності роздавання вентиляційного припливного повітря покладено рівняння Бернуллі.

Одними з розповсюджених елементів припливної механічної системи вентиляції є повітропровід рівномірного роздавання, який використовується в повітряно-теплових або повітряних завісах з метою підвищення ефективності місцевих відсмоктувачів на гальванічних ваннах для здування шкідливих речовин з поверхні випаровування у бік всмоктування [1]. Рівномірність роздачі повітря по довжині має на меті лінійну залежність втрати повітря в поперечному перерізі повітропроводу від його довжини.

Рівномірну роздачу повітря можна виконати різними технічними рішеннями. Найбільш часто використовують повітропроводи постійного поперечного перерізу зі змінними по висоті щілинами або рядом отворів зі змінною площею для виходу повітря. При цьому негативним є налипання припливної струмини на поверхню стінки повітропроводу, що призводить до створення у приміщенні нерівномірних повітряних потоків [2,3]. Для вирішення даної проблеми можливе встановлення на виході напрямних лопаток, які будуть спрямовувати припливну струмину в необхідному напрямку.

Розрахунок повітропроводів рівномірної по довжині роздачі зводиться до визначення висоти припливної щілини чи площі отвору для витікання повітря в будь-якому X-му перерізі.

В основу аналітичного розв'язання рівномірності роздачі вентиляційного повітря покладено рівняння Бернуллі. При цьому приймаються такі припущення: коефіцієнт втрати повітря по всій довжині щілини або для всіх отворів повітропроводу постійний; коефіцієнт опору тертя по всій довжині повітропроводу також постійний; поля швидкостей повітря в поперечних перерізах повітропроводу рівномірні.

Розрахункову схему кінцевого повітропроводу постійного поперечного перерізу зі щілиною змінної ширини для роздачі повітря наведено на рис.1.

Для аналітичного розв'язання поставленої задачі припустимо, що f – площа поперечного перерізу повітропроводу (залишається постійною); l – довжина повітропроводу, яка збігається з довжиною щілини змінної ширини; μ – коефіцієнт втрати повітря роздавальної щілини; λ – коефіцієнт гідравлічного опору; $L_п$ – сумарна початкова втрата повітря на роздачу через повітропровід; $V_п$ – початкова швидкість повітря в поперечному перерізі повітропроводу.

Рівномірне по довжині повітропроводу від'єднання (роздача) повітря від загальної кількості відбувається при забезпеченні відповідності розмірів роздавальної щілини надлишковому тиску в будь-якому його перерізі.

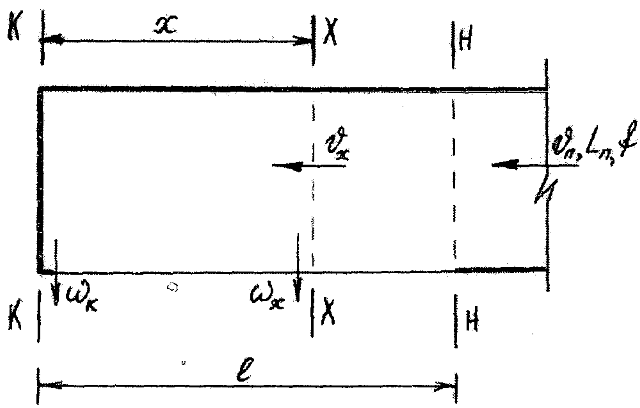

Рис.1. Схема кінцевого повітропроводу постійного поперечного перерізу зі щілиною змінної ширини для роздачі повітря

Для визначення надлишкового тиску в будь-якому перерізі на відстані X від глухого торця використаємо рівняння Бернуллі і розглянемо об'єм, обмежений перерізами $K - K$ і $X - X$, стінками повітропроводу і площиною роздавального отвору:

$$P_K + \Delta P_{K-X} = P_X + P_{gX}, \qquad (1)$$

де $P_K = \dfrac{\rho \cdot \omega_x^2}{\mu^2 \cdot 2}$ - сила тиску повітря сухого торця повітропроводу в перерізі $K–K$;

$\Delta P_{K-X} = \int_0^X \dfrac{\lambda}{d_e} \cdot \rho \cdot \dfrac{V_X^2}{2} \cdot dx = \dfrac{1}{3} \dfrac{\lambda \cdot x^3 \cdot \rho}{d_e \cdot l^2} \cdot \dfrac{V_H^2}{2}$ - втрата тиску на подолання опору тертя при проходженні повітря в межах перерізів $K - K$ і $X - X$;

$P_X = \dfrac{\rho \cdot \omega_x^2}{\mu^2 \cdot 2}$ - сила тиску в перерізі $X - X$;

$P_{\partial x}$ – динамічний тиск повітряного потоку в перерізі $X - X$, $P_{\partial x} = \dfrac{\rho V_x^2}{2}$.

Врахувавши, що швидкість повітря в перерізі $X - X$ як $V_X = \dfrac{V_H}{l} \cdot x = V_H \cdot \bar{x}$, а коефіцієнт втрати $\mu = \dfrac{1}{\sqrt{\zeta + 1}}$ або $\zeta + 1 = \dfrac{1}{\mu^2}$, швидкість витікання повітря із щілини в перерізах $K - K$ і $X - X$., відповідно, ω_K і ω_X, рівняння (1) матиме такий вигляд:

$$\frac{\rho \cdot \omega_K^2}{\mu^2 \cdot 2} + \frac{1}{3} \cdot \frac{\lambda \cdot x^3}{d_e \cdot l^2} \cdot \frac{V_H^2}{2} = \frac{\rho \cdot \omega_X^2}{\mu^2 \cdot 2} + \frac{\rho V_H^2 \cdot \bar{x}^2}{2}. \qquad (2)$$

Розв'язуючи рівняння (2), віднесемо швидкості витікання повітря ω_X із щілини на відстані X від торця повітропроводу. Тоді дістанемо

$$\omega_x = \sqrt{\omega_K^2 + \mu^2 \frac{\lambda}{3} \bar{x}^2 \cdot x_d \cdot V_H^2 - \mu^2 \cdot V_H^2 \cdot \bar{x}^2} \qquad (3)$$

або

$$\bar{\omega}_x = \sqrt{\bar{\omega}_K^2 + \frac{\mu^2 \cdot \lambda \cdot \bar{x}^2 \cdot x_d}{3} - \mu^2 \cdot \bar{x}^2}, \qquad (4)$$

де $\overline{\omega}_x = \frac{\omega_x}{V_H}; \overline{\omega}_K = \frac{\omega_K}{V_H}; x_d = \frac{x}{d}$.

Таким чином отримане рівняння (4) є базовим для розрахунку відносної швидкості роздачі повітря, використовуючи яку можна знайти ширину роздавальної щілини - δ_X у будь якому X-му перерізі, тобто

$$\delta_x = \frac{L}{l \cdot \omega_x} = \frac{f}{l \cdot \overline{\omega}_x}. \tag{5}$$

Коефіцієнт місцевого опору роздавального повітропроводу визначається по повному тиску в початковому перерізі $H - H$, віднесеному до динамічного тиску в цьому самому перерізі.

Повний тиск в перерізі $H - H$ (переріз приєднання) визначаємо залежністю

$$P_{\Pi_H} = \frac{\rho \cdot \omega_H^2}{\mu^2 \cdot 2} + \frac{\rho \cdot V_H^2}{2}.$$

На основі вищевикладеного коефіцієнт місцевого опору повітропроводу

$$\zeta = \frac{P_H + P_{\partial P}}{P_{\partial H}} = \frac{\omega_H^2}{\mu^2} + 1. \tag{7}$$

Повний тиск в перерізі приєднання повітропроводу визначається так:

$$P_{\Pi H} = P_{K-K} + \Delta P_{K-H} = \frac{\omega_K^2 \cdot \rho}{\mu^2 \cdot 2} + \frac{\lambda}{3} \cdot \frac{l}{d} \cdot \rho \cdot \frac{V_H^2}{2}, \tag{8}$$

а коефіцієнт місцевого опору

$$\zeta = \frac{\omega_K^2}{\mu^2} - \frac{\lambda \cdot l}{3 \cdot d}. \tag{9}$$

Необхідно зазначити, що значення коефіцієнта місцевого опору повітропроводу рівномірної роздачі, визначені за формулами (7) і (9), ідентичні.

Аналіз формул (3) і (4) показує, що залежно від співвідношення складових під знаком радикала швидкість витікання повітря має різні значення по довжині щілини з можливим екстремумом у проміжку між перерізами $K - K$ і $H - H$.

При певних умовах швидкість витікання може досягти надто малих значень, що спричинює до збільшення щілини до розміру більшого за висоту стінки повітропроводу, в якій вона встановлюється. Отже, необхідно знати загальний характер зміни розмірів щілини, тобто насамперед знати місця розташування екстремумів швидкості витікання повітря.

Дослідження функції $\overline{\omega}_x$ (4) виконано її диференціюванням

$$2\omega_x = \frac{d\overline{\omega}_x}{d\overline{x}} = \frac{\lambda \cdot \mu^2 \cdot l \cdot \overline{x}^2}{d} - 2\overline{x} \cdot \mu^2 \tag{10}$$

і прирівнюванням похідної $\frac{d\overline{\omega}_x}{d\overline{x}}$ до нуля.

Точками екстремумів є корені рівняння

$$\frac{\overline{x}^2 \cdot \lambda \cdot \mu^2 \cdot l}{d} - 2\overline{x} \cdot \mu^2 = 0, \tag{11}$$

тобто $\overline{x}_1 = 0$ і $\overline{x}_2 = \frac{2d}{\lambda \cdot l}$.

При цьому в точці $\overline{x}_1$ буде максимум, в точці $\overline{x}_2$ - мінімум значення швидкості витікання повітря. В нашому випадку значення $\overline{x}_2 > 0$ і може набувати значень більших за одиницю, хоча за умовою задачі $\overline{x}$ може змінюватися тільки в межах від нуля до одиниці.

У більшості випадків при $\lambda < 0{,}05$ і $\frac{l}{d} < 40$ екстремальна точка $\overline{x}_2$ знаходиться за межами повітропроводу, так званого "короткого повітропроводу". Повітропровід, у якого $\overline{x}_2 < 1$, називається довгим.

Для виконання розрахунку без послідовних наближень необхідно задавати додаткові умови: мінімум опору повітропроводу; не перевищувати допустиму швидкість витоку; не перевищувати задане співвідношення швидкостей в екстремальних точках, тобто

$$\frac{\omega_{\overline{x}_1}}{\omega_{\overline{x}_2}} \le m.$$

Мінімум коефіцієнта місцевого опору повітропроводу досягається при максимально можливому розкритті роздавальної щілини.

Якщо $\bar{x}_2 \geq 1$, то найбільше значення висоти щілини, що дорівнює висоті стінки повітропроводу *b*, буде мати місце при $\bar{x} = 1$.

З урахуванням (5) і (4) визначаємо швидкість витікання повітря зі щілини в перерізі $K - K$:

$$\overline{\omega}_K^2 = \left(\frac{f}{b \cdot l}\right)^2 - \frac{\lambda}{3} \cdot \frac{l}{d} \cdot \mu^2 + \mu^2. \tag{12}$$

Коефіцієнт місцевого опору повітропроводу

$$\zeta = \left(\frac{f}{b \cdot l \cdot \mu}\right)^2 + 1. \tag{13}$$

Якщо $\bar{x}_2 = \dfrac{2 \cdot d}{\lambda \cdot l} < 1$, то швидкість витікання повітря в перерізі $K - K$ буде визначатись залежністю

$$\overline{\omega}_K^2 = \left(\frac{f}{b \cdot l}\right)^2 + \frac{\lambda \cdot l}{3 \cdot d} \cdot \mu^2 \cdot \left(\frac{2 \cdot d}{\lambda \cdot l}\right)^3 + \mu^2 \cdot \left(\frac{2 \cdot d}{\lambda \cdot l}\right)^2. \qquad 14)$$

З використанням залежності (9) коефіцієнт місцевого опору

$$\zeta = \left(\frac{f}{b \cdot l \cdot \mu}\right)^2 + \frac{4}{3}\left(\frac{d}{\lambda \cdot l}\right)^2. \tag{15}$$

Для кінцевих повітропроводів рівномірної роздачі повітря постійного поперечного перерізу (рис.2) з N отворами визначення їх площ на витоці повітря виконується аналогічно до попередньої задачі. Початкові дані аналітичного розв'язання прийнято відповідно до попередніх викладок. Відстань між центрами отворів – с, еквівалентний діаметр повітропроводу $d_l = \dfrac{2 \cdot a \cdot b}{a + b}$.

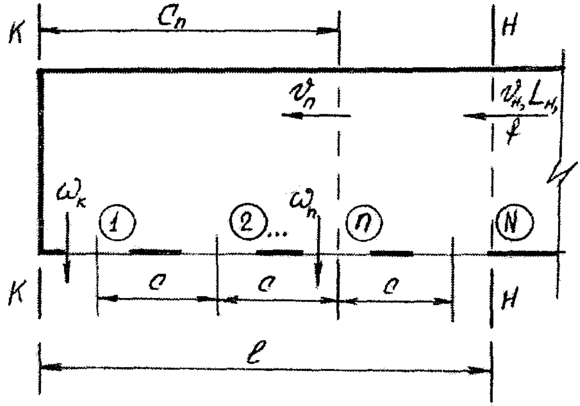

Рис.2. Схема кінцевого повітропроводу постійного поперечного перерізу з N отворами на витікання для рівномірної роздачі повітря

Вихідне рівняння для визначення надлишкового тиску в будь-якому перерізі на відстані C_n від глухого торця має вигляд

$$P_K + \Delta P_{K-n} = P_n + P_{\partial_n}, \qquad (16)$$

де P_K - за аналогією з (1); $P_n = \dfrac{\rho \cdot \omega_n^2}{2 \cdot \mu^2}$ - сила тиску в перерізі $n-n$;

$P_{\partial_n} = \dfrac{\rho \cdot V_H^2}{2} \cdot \dfrac{n}{N} = \dfrac{\rho \cdot V_H^2}{2} \cdot \overline{n}$ - динамічний тиск повітряного потоку в перерізі $n-n$;

$\Delta P_{K-n} = \int\limits_0^{c \cdot n} \dfrac{\lambda \cdot \rho}{2 \cdot d} \cdot V_n^2 \cdot d(c \cdot n) = \dfrac{\lambda \cdot c \cdot n}{3 \cdot d} \cdot \overline{n}^2 \cdot \rho \cdot \dfrac{V_H^2}{2}$ - втрата тиску на подолання опору тертя при проходженні повітря в межах перерізу $K-K$ і $n-n$.

Врахувавши, що швидкість витікання повітря з n-го отвору по відношенню до швидкості повітря в перерізі $H-H$ $\overline{\omega}_n = \dfrac{\omega_n}{V_H}$, розв'язуючи рівняння (16) відносно ω_n і $\overline{\omega}_n$ дістанемо:

$$\omega_n = \sqrt{\overline{\omega}_K^2 + \mu^2 \cdot \frac{\lambda \cdot c \cdot \overline{n}^2 \cdot n}{3 \cdot d} \cdot V_H^2 - \mu^2 \cdot V_H^2 \cdot \overline{n}^2} \tag{17}$$

або

$$\omega_n = \sqrt{\overline{\omega}_K^2 + \mu^2 \cdot \frac{\lambda \cdot c \cdot \overline{n}^2 \cdot n}{3 \cdot d} - \mu^2 \cdot \overline{n}^2}, \tag{18}$$

де $\overline{\omega}_K = \dfrac{\omega_K}{V_H}; \overline{n} = \dfrac{n}{N}$.

Використовуючи залежності (17) і (18) як базові можна розрахувати площу n-го отвору для витікання повітря з повітропроводу за такою залежністю:

$$f_n = \frac{L_H}{N \cdot \omega_n}, \tag{19}$$

або

$$f_n = \frac{f}{N \cdot \overline{\omega}_n}, \tag{20}$$

де f – площа поперечного перерізу повітропроводу.

Коефіцієнт місцевого опору повітропроводу рівномірної роздачі з N отворами визначається за залежностями (7) і (9) при $\overline{\omega}_H = \overline{\omega}_N$ і $\overline{\omega}_K = \overline{\omega}_1$.

Аналізуючи умови мінімуму опору для повітропроводу з отворами, коли найбільший з них має площу $b \cdot c$, при $\overline{n}_2 > 1$

$$\overline{\omega}_K^2 = \left(\frac{f}{N \cdot b \cdot c}\right)^2 - \frac{\lambda \cdot l \cdot \mu^2}{3 \cdot d} + \mu^2, \tag{21}$$

тоді

$$\zeta = \left(\frac{f}{b \cdot l \cdot \mu}\right)^2 + 1. \tag{22}$$

При $\overline{n}_2 = \dfrac{2 \cdot d}{\lambda \cdot l} < 1$,

$$\overline{\omega}_K^2 = \left(\frac{f}{N \cdot b \cdot c}\right)^2 + \frac{\lambda \cdot l}{3 \cdot d} \cdot \mu^2 \left(\frac{2 \cdot d}{\lambda \cdot l}\right)^3 + \mu^2 \left(\frac{2 \cdot d}{\lambda \cdot l}\right), \tag{23}$$

тоді

$$\zeta=\left(\frac{f}{N\cdot b\cdot c\cdot\mu}\right)^2+\frac{4}{3}\left(\frac{d}{\lambda\cdot l}\right)^2. \qquad (24)$$

Для уточнення площі останнього отвору її треба розрахувати за півсумою значень у підкореневому виразі залежності (18) для останнього і передостаннього отворів.

Список літератури

1. **Богословский В.Н.** и др. Отопление и вентиляция. Учебник для вузов. 4.2. Вентиляция. – М.: Стройиздат, 1976. - 439с.
2. **Талиев В.Н.** Аэродинамика вентиляции. – М.: Стройиздат, 1979. – 295 с.
3. **Лобаев Б.Н.** Расчет воздуховодов. – Киев: Гостройиздат, 1959. – 100 с.

УДК 536.24: 697.1

В.П.Корбут, кандидат технічних наук, доцент
Б.В.Давиденко, кандидат технічних наук, старший науковий співробітник
Київський національний університет будівництва і архітектури

ОСОБЛИВОСТІ ЧИСЛОВОГО МОДЕЛЮВАННЯ АЕРОДИНАМІКИ ТА ТЕМПЕРАТУРНОГО СТАНУ ПРИМІЩЕНЬ З ТЕПЛОНАДХОДЖЕННЯМИ

Розроблено прямий метод розв'язання системи різницевих рівнянь для двовимірних задач руху повітря та конвективного теплообміну у приміщенні, що містить джерела теплонадходжень. Метод придатний для розв'язування задач в одно- та багатозв'язних областях за будь-яких граничних умов.

Для забезпечення належних умов експлуатації приміщень з теплонадходженнями, які б відповідали санітарним або технологічним нормам, необхідно підтримувати в цих приміщеннях певні рівні температури та швидкості руху повітря. Такі умови можуть забезпечуватися системами повітрообміну. Їх проектування, тобто визначення необхідних витрат та температури повітря, схем його подачі та видалення, має здійснюватися на основі точних та надійних методів розрахунку повітряно-температурного