

## ОСОБЛИВОСТІ РОЗРАХУНКУ ЗВОРОТНОГО ПОТОКУ ПРИ ПОДАЧІ ПОВІТРЯ ПЛОСКИМИ НАСТИЛЬНИМИ СТРУМИНАМИ У МАЛОВИСОТНИХ ТЕХНОЛОГІЧНИХ ПРИМІЩЕННЯХ

© Возняк О., 2005

**In this article the results of air distribution by flat spread non-isothermal jets experimental investigations are presented. Adequate charts are composed, analytic equations are also obtained. By these results high efficiency of air distribution by flat spread non-isothermal jets in technological rooms is shown.**

**Постановка проблеми.** Як відомо, фізичний стан повітряного середовища в технологічних приміщеннях характеризується такими параметрами, як температура, вологовміст, швидкість руху повітря, шум, заповненість, запахи тощо. В робочій (обслуговуваній) зоні таких приміщень повинні забезпечуватись нормовані параметри внутрішнього повітря, оскільки від того, наскільки санітарно-гігієнічні параметри мікроклімату технологічних приміщень відповідають фізіологічним потребам людини, залежить значною мірою її здоров'я і працездатність. Умови комфорту передусім визначаються температурою повітря та його швидкістю руху. Ці величини підтримуються засобами вентиляційної техніки і залежать від прийнятої організації повітрообміну та схеми повіторозподілу. При цьому робоча зона знаходиться як у прямому, так і в зворотному потоці припливної струмини. Сукупність вказаних чинників визначає характер повітряних потоків та розвитку вентиляційних струмин у приміщенні [1–9].

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Важливість врахування впливу збурення повітряних потоків у зв'язку з наявністю технологічного обладнання та обслуговуючого персоналу в приміщенні на швидкісні поля повітряних потоків та їх особливості досліджено у [1–9]. У таких умовах необхідно забезпечувати достатньо велику далекобійність припливної струмини. Одним із засобів збільшення її далекобійності є застосування ефекту Коанда, тобто настилення струмини на внутрішні поверхні стін або стелі [2]. Крім збільшення далекобійності, явище настилення струмини на стелю впливає на поле течії, на розширення струмини, на процеси підмішування і погасання швидкості в струмині. Тому найбільш раціональною схемою повіторозподілу у випадку з наявністю технологічного обладнання та обслуговуючого персоналу у виробничому приміщенні з малою висотою є застосування способу подачі повітря в робочу зону настильними струминами. При цьому доцільно запропонувати застосування повіторозподілювачів з великою інтенсивністю погасання швидкості і температури припливного повітря, тобто пристроїв, які забезпечують інтенсивне перемішування припливного повітря з навколишнім [1].

Сьогодні існує значна кількість різноманітних конструкцій повіторозподілювачів та схем роздачі припливного повітря як у верхню, так і в робочу зону приміщень [5, 7, 8], де використовується ефект настилення струмин на внутрішні поверхні стін або стелі [2, 5, 7, 8], що є доволі розповсюдженим явищем у вентиляційній техніці.

У цій роботі розглядається зосереджений приплив настильними на внутрішню поверхню стелі плоскими охолодженими струминами. Повіторозподільником є розміщений під стелею (рис. 1) пристрій з прямокутним щільним отвором із співвідношенням сторін, не меншим за 1:15 [1, 2].

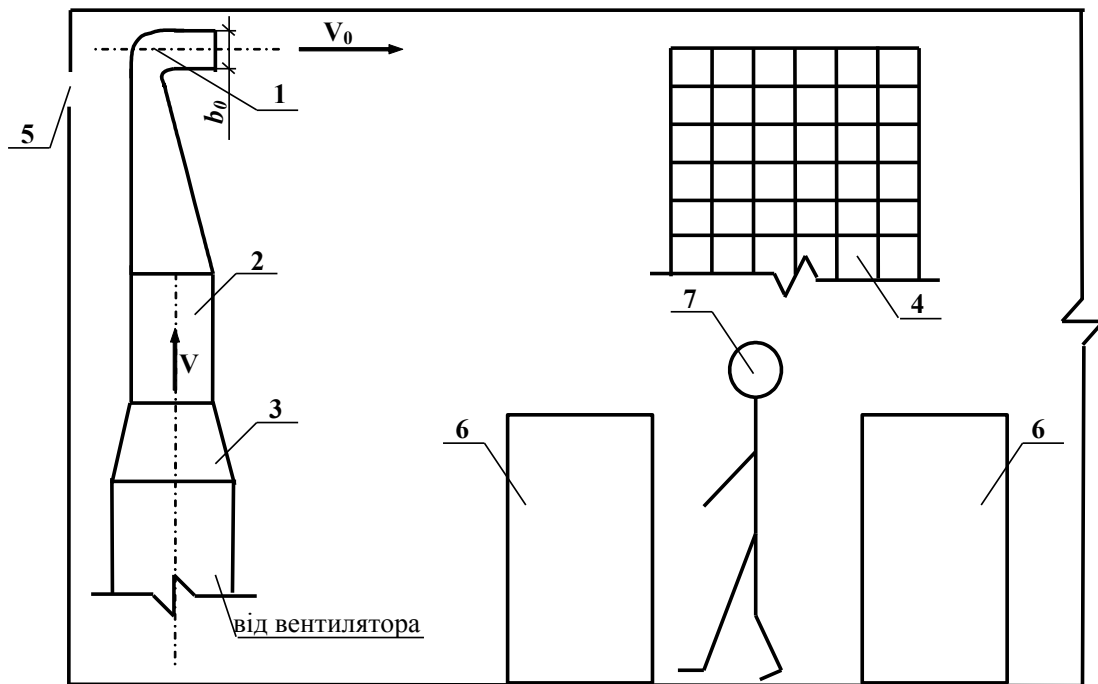


Рис. 1. Схема експериментального стенда: 1 – насадки з плоскою повітровипускною щілиною; 2 – повітропровід; 3 – конфузор; 4 – координатник; 5 – витяжний отвір; 6 – технологічне обладнання; 7 – обслуговуючий персонал

Характерною особливістю такої схеми повітророзподілу є певне обмеження простору для розвитку прямого та зворотного потоку повітряної струмینی стінами, стелею та підлогою приміщення, а також технологічним обладнанням та обслуговуючим персоналом, що створює так зване “стиснення” припливної струмینی. Повітряний потік, рухаючись в обмеженому просторі цього приміщення, тобто у “стиснених” умовах, формує плоску стиснену струмину і надходить в обслуговувану зону.

У цій роботі розглядається плоска настільна струмина, яка спрямовується вздовж виробничого приміщення малої висоти за наявності технологічного обладнання та обслуговуючого персоналу за тупиковою схемою, в якій витяжний отвір розміщений в тій самій площині, що і припливний (рис. 1). При цьому обслуговувана зона, де знаходяться люди, омивається індукованим струминою зворотним потоком. У зв’язку з цим великого значення набуває питання виявлення закономірностей руху повітря у зворотному потоці. Основна увага в цій роботі приділена саме дослідженню закономірностей розвитку повітряної припливної струмینی у зворотному потоці.

**Мета роботи** – дослідження характеру розповсюдження плоских настільних струмін в обмеженому просторі виробничого приміщення малої висоти з наявністю в ньому технологічного обладнання та обслуговуючого персоналу, виявлення закономірностей розвитку повітряної припливної струмینی у зворотному потоці та обґрунтування методики розрахунку.

Оскільки сучасні дослідження ґрунтуються на виявленні емпіричних закономірностей струминних течій [1], то саме цей спосіб був застосований у цій роботі.

Експериментальні дослідження проводились в натурних умовах на стенді, схема якого показана на рис. 1, за таких умов та спрощень:

- плоска струмина є ізотермною;
- коефіцієнт загасання швидкості припливних насадків з плоскими повітровипускними щілинами становив  $m = 2,5$ ;
- ширина щілинного отвору змінювалась і становила:  $l_0 = 300$  мм;  $l_0 = 450$  мм;  $l_0 = 600$  мм;
- висота щілини була змінною, а саме:  $b_0 = 20$  мм;  $b_0 = 30$  мм;  $b_0 = 40$  мм;
- витрата повітряного потоку  $L$  змінювалась і становила:  $L_1 = 900$  м<sup>3</sup>/год;  $L_2 = 700$  м<sup>3</sup>/год;  $L_3 = 500$  м<sup>3</sup>/год;  $L_4 = 300$  м<sup>3</sup>/год;

- початкова швидкість повітря під час витікання з припливного насадка знаходилась у межах:  $V_o = 5 - 15$  м/с;
- швидкість повітря у зворотному потоці розглядалася на відмітці  $h = 1,5$  м і була подана у відносному вигляді  $\bar{V} = V_{зв}/V_o$ ;
- величина  $\bar{V}$  залежить від двох відносних координат  $\bar{x} = x/l$  і  $\bar{y} = (y - y_{zp})/(B - y_{zp})$ , де  $x$  і  $y$  – поздовжня і поперечна поточні координати, м;  $l$  – довжина приміщення, м;  $B$  і  $y_{zp}$  – відповідно напівширина приміщення і струмини в прямому потоці, м;
- точки біля стіни, які не знаходяться у пограничному шарі, умовно вважалися з координатою  $\bar{y} = 1$ .

Швидкості і температури руху повітря вимірювались термоелектроанемометром ТА-9. Швидкості повітряного потоку, які перевищували 5 м/с, вимірювались мікроманометром з пневмометричною трубкою Піто–Прандтля. Заміри швидкостей руху повітря в розрахункових точках здійснювалися з використанням координатника із сіткою точок 5 x 5 см у п'яти поперечних перерізах. Під час експериментальних досліджень були визначені границі припливної струмини в зоні її прямого та зворотного потоку.

Ґрунтуючись на експериментальних дослідженнях роздачі повітря в приміщеннях, наведемо відносні швидкості руху повітря у зворотному потоці в табличній формі (див. таблицю), а також у вигляді номограми (рис. 2), тобто подамо двофакторну функціональну залежність  $\bar{V} = f(\bar{x}; \bar{y})$ , де  $\bar{V} = V_{зв}/V_o$ .

На рис. 2 показана графічна залежність  $\bar{V} = f(\bar{x}; \bar{y})$  за даними експериментальних натурних досліджень характеру зміни відносної швидкості у зворотному потоці при розвитку плоскої настільної стисненої струмини в технологічному приміщенні.

**Відносні швидкості у зворотному потоці  $\bar{V}$  ( $\times 10^{-3}$ )**

$\bar{y} \backslash \bar{x}$	0	0,2	0,4	0,6	0,8	1,0
0	13	17	25	40	30	18
0,25	20	30	42	55	45	30
0,5	10	12	15	20	18	15
0,75	8	10	12	15	13	12
1,0	7	8	10	12	11	10

Графічну залежність (рис. 2) доцільно апроксимувати поліноміальною залежністю (1)

$$\bar{V} = \sum_{i=0}^m \cdot \sum_{j=0}^n a_{ij} \cdot \bar{y}^j \cdot \bar{x}^i, \quad (1)$$

що виражається в такий спосіб:

$$\bar{V} = \left( 10,22 + 21,45\bar{y} - 35,28\bar{y}^2 + (88,64 + 13,46\bar{y} - 159,68\bar{y}^2) \cdot \bar{x} - \right. \\ \left. - (76,41 + 5,62\bar{y} - 133,92\bar{y}^2) \cdot \bar{x}^2 \right) \cdot 10^{-3}. \quad (2)$$

Слід зазначити, що для визначення початкової швидкості  $V_o$  необхідно знати величину саме максимальної відносної швидкості у зворотному потоці  $\bar{V}_{max}$ . Для цього, своєю чергою, потрібно дослідити  $\bar{V}$  - функцію на екстремум, необхідні умови якого такі: якщо функція  $\bar{V} = f(\bar{x}, \bar{y})$  досягає екстремуму при  $\bar{x} = \bar{x}_o$ ,  $\bar{y} = \bar{y}_o$ , то кожна часткова похідна першого порядку від  $\bar{V}$  перетворюється в нуль за цих значень аргументів [10, 11].

Диференціюємо в часткових похідних

$$\frac{\partial \bar{V}}{\partial x} = (88,64 + 13,46\bar{y} - 159,68\bar{y}^2 - 152,82\bar{x} - 11,24\bar{y}\bar{x} + 267,84\bar{y}^2\bar{x}) \cdot 10^{-3}; \quad (3)$$

$$\frac{\partial \bar{V}}{\partial y} = (21,45 + 13,46\bar{x} - 5,62\bar{x}^2 - 70,56\bar{y} - 319,36\bar{x}\bar{y} + 267,84\bar{x}^2\bar{y}) \cdot 10^{-3}. \quad (4)$$

Отримаємо систему двох рівнянь з двома невідомими (5):

$$\begin{cases} \frac{\partial \bar{V}}{\partial x} = 0 \\ \frac{\partial \bar{V}}{\partial y} = 0 \end{cases} \quad (5)$$

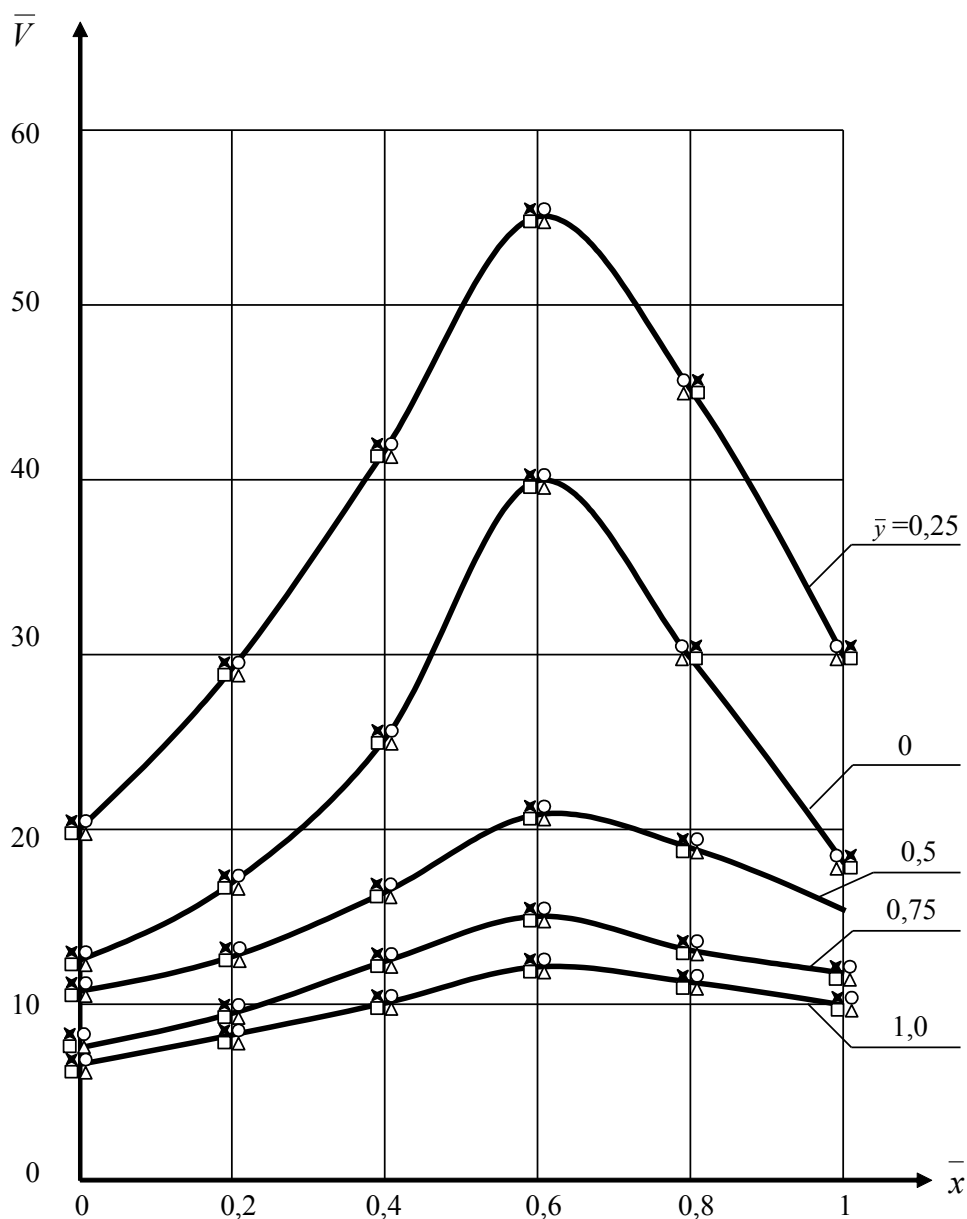


Рис. 2. Номограма для визначення відносних швидкостей у зворотному потоці

Розв'язуючи систему рівнянь (5), знаходимо потрібне значення величин  $\bar{x}_o, \bar{y}_o$  на деякому відрізку цих аргументів, відповідно  $[\bar{x}_1; \bar{x}_2], [\bar{y}_1; \bar{y}_2]$ . Отже, в результаті обчислень отримаємо координати стаціонарної точки  $M(\bar{x}_o, \bar{y}_o)$ :  $\bar{x}_o = 0,585$  та  $\bar{y}_o = 0,165$ .

Оскільки попередньої впевненості в існуванні максимуму  $\bar{V}$  - функції немає, тому потрібне додаткове дослідження, тобто потрібно встановити достатні умови екстремуму. Якщо  $\bar{V}$  - функція матиме в деякому довір'ї точки  $M(\bar{x}_o, \bar{y}_o)$  неперервні другі часткові похідні і якщо в цій точці виконуються необхідні умови, то у випадку, коли другий диференціал

$$\partial^2 \bar{V} = \sum_{i=1}^2 \cdot \sum_{j=1}^2 \cdot \frac{\partial^2 \bar{V}}{\partial x_i \partial y_j} \Big|_{(\bar{x}_o, \bar{y}_o)}^{Ax_i Ay_j} \quad (6)$$

є додатньо визначеною квадратичною формою, то функція  $\bar{V}(\bar{x}, \bar{y})$  має в цій точці максимум [11]. У разі виконання цих умов  $\bar{V}$  - функція матиме в точці  $M(\bar{x}_o, \bar{y}_o)$  стаціонарне значення, а сама точка  $M$  називатиметься стаціонарною.

Дослідимо на додатню визначеність квадратичної форми (7):

$$\begin{pmatrix} \frac{\partial^2 \bar{V}}{\partial x^2} & \frac{\partial^2 \bar{V}}{\partial x \partial y} \\ \frac{\partial^2 \bar{V}}{\partial y \partial x} & \frac{\partial^2 \bar{V}}{\partial y^2} \end{pmatrix} \quad (7)$$

Доцільно ввести такі позначення:

$$\frac{\partial^2 \bar{V}}{\partial x^2} = A; \quad \frac{\partial^2 \bar{V}}{\partial y^2} = B; \quad \frac{\partial^2 \bar{V}}{\partial x \partial y} = C. \quad (8)$$

Із врахуванням властивості порядку диференціювання в часткових похідних [10]

$$\frac{\partial^2 z}{\partial x \partial y} = \frac{\partial^2 z}{\partial y \partial x},$$

диференціальний визначник Якобіан ( $J$ ) набере вигляду

$$J = \begin{vmatrix} A & C \\ C & B \end{vmatrix}, \quad (10)$$

після розкриття якого, отримаємо

$$J = A \cdot B - C^2. \quad (11)$$

Знаходимо похідні другого порядку в стаціонарній точці  $M(\bar{x}_o, \bar{y}_o)$  і визначаємо її характер:

$$A = \frac{\partial^2 \bar{V}}{\partial x^2} = \left( -152,82 - 11,24 \bar{y}_o + 267,84 \bar{y}_o^2 \right) \cdot 10^{-3} = -0,147;$$

$$B = \frac{\partial^2 \bar{V}}{\partial y^2} = \left( -70,56 - 319,36 \bar{x}_o + 267,84 \bar{x}_o^2 \right) \cdot 10^{-3} = -0,166;$$

$$C = \frac{\partial^2 \bar{V}}{\partial x \partial y} = \frac{\partial^2 \bar{V}}{\partial y \partial x} = \left( 13,46 - 319,36 \bar{y}_o - 11,24 \bar{x}_o + 535,68 \bar{x}_o \bar{y}_o \right) \cdot 10^{-3} = -0,006.$$

При цьому Якобіан становить

$$J = AB - C^2 = (-0,147 \cdot (-0,166)) - (-0,006)^2 > 0.$$

Враховуючи, що  $J > 0$ , а  $A = -0,147 < 0$ , констатуємо, що функція  $\bar{V} = f(\bar{x}, \bar{y})$  має максимум:  $V_{max}(0,585; 0,165) = 0,057$ . З цієї умови і визначаємо початкову швидкість  $V_o = V_{36} / \bar{V}_{max}$ , де як  $V_{36}$  приймається нормована для обслуговуваної зони швидкість  $V_n$ . Це означає, що визначена початкова швидкість  $V_o$  є мінімальною, тобто ця величина є оптимізованою.

**Висновки.** На основі отриманих результатів констатуємо:

- встановлено в кількісній формі характеристики та закономірності розвитку плоских настільних стиснених струмин у зворотному потоці;
- отримано розрахункові залежності для визначення параметрів плоских настільних стиснених струмин у зворотному потоці;
- обґрунтовано, що ефективність застосування плоских настільних струмин для подачі повітря в робочу зону технологічного приміщення є високою.

Отримані результати дають змогу розрахувати початкову швидкість припливної плоскої настільної стисненої струмини у виробничому приміщенні незначної висоти з наявністю струмин технологічного обладнання та обслуговуючого персоналу і визначити геометричні параметри повітророзподільного пристрою. Застосування повітророзподільовачів із використанням ефекту настилання плоских дає змогу значно підвищити критерій ADPI (Air Distribution Performance Index) за подачі в технологічне приміщення значної кількості повітря і зменшити внаслідок цього матеріаломісткість припливної системи.

1. Гримитлин М.И. *Распределение воздуха в помещениях*. – М., 1982.
2. Талиев В. Н. *Аэродинамика вентиляции*. – М., 1979.
3. Возняк О.Т. *Вплив взаємодії струмин на повітророзподіл у приміщенні* // Вісн. НУ “Львівська політехніка” “Теплоенергетика. Інженерія доквілля. Автоматизація”. – 2001. – С. 27– 31.
4. Банхиди Л. *Тепловой микроклимат помещений*. – М., 1981.
5. Возняк О., Ковальчук А. *Ефективність повітророзподілу зустрічними неспіввісними струминами* // Вісник НУ “Львівська політехніка” “Теплоенергетика. Інженерія доквілля. Автоматизація”. – 2002. – № 460. – С.157 – 161.
6. *Vozniak O., Kovalchuk A. Air distribution by opposite non-coaxial air jets* // *Zbornik prednasok: VII Vedecka Konferencia s medzinardnou ucastou Kosicko-Lvovsko-Rzeszowska, 2002*. – С. 173 – 178.
7. Возняк О., Ковальчук А., Іванусь Є., Кіц А. *Повітророзподіл у приміщенні при взаємодії зустрічних неспіввісних струмин* // Вісник НУ “Львівська політехніка” “Теплоенергетика. Інженерія доквілля. Автоматизація”. – 2001. – № 432. – С.31 – 37.
8. Возняк О., Ковальчук А., Іванусь Є. *Взаємодія зустрічних неспіввісних струмин* // Зб.: “Efektywnosc dystrybucji i wykorzystania ciepła”. – *Polytechnika Rzeszowska, Solina, 2001*. – С. 397 – 403.
9. Возняк О., Ковальчук А. *Повітророзподіл зустрічними неспіввісними круглими струминами: Наук.-техн. зб. КНУБА “Вентиляція, освітлення та теплогазопостачання”*. – 2003. – Вип.6. – С.5 – 10.
10. Пискунов Н.С. *Дифференциальное и интегральное исчисления. Ч.1*. – М., 1973.
11. Зорич В.А. *Математический анализ*. – М., 1981.