

УДК 629.113.06 : 628.83

**О. Т. Возняк, канд. техн. наук, доцент**  
Національний університет  
“Львівська політехніка”**ОСОБЛИВОСТІ ЗВОРОТНОГО ПОТОКУ ПРИ ПОДАЧІ  
ПОВІТРЯ ПЛОСКИМИ НАСТИЛЬНИМИ СТРУМИНАМИ**

Як відомо, фізичний стан повітряного середовища в технологічних приміщеннях характеризується такими параметрами, як температура, вологовміст, швидкість руху повітря, шум, запиленість, запахи та ін. В робочій (обслуговуваній) зоні таких приміщень мають забезпечуватись нормовані параметри внутрішнього повітря, оскільки від того, наскільки санітарно-гігієнічні параметри мікроклімату технологічних приміщень відповідають фізіологічним потребам людини залежить, в значній мірі, її здоров'я і працездатність. Умови комфорту передовсім визначаються температурою повітря та його швидкістю руху. Ці величини підтримуються засобами вентиляційної техніки і залежать від прийнятої організації повітрообміну та схеми повітророзподілу. При цьому робоча зона знаходиться як у прямому, так і в зворотному потоці припливної струмини. Сукупність вказаних факторів визначає характер повітряних потоків та розвитку вентиляційних струмин у приміщенні [1–6].

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 в [1–6]. 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 [1]. Крім збільшення далекобійності, явище настилення струмини на стелю впливає на поле течії, на розширення струмини, на процеси підмішування і погасання швидкості в струмині. Тому найраціональнішою схемою повітророзподілу у випадку з наявністю технологічного обладнання та обслуговуючого персоналу у вироб-

ничому приміщенні з малою висотою є застосування способу подачі повітря в робочу зону настільними струминами. При цьому доцільно запропонувати застосування повітророзподілювачів з великою інтенсивністю погасання швидкості і температури припливного повітря, тобто пристроїв, які забезпечують інтенсивне перемішування припливного повітря з навколишнім [1].

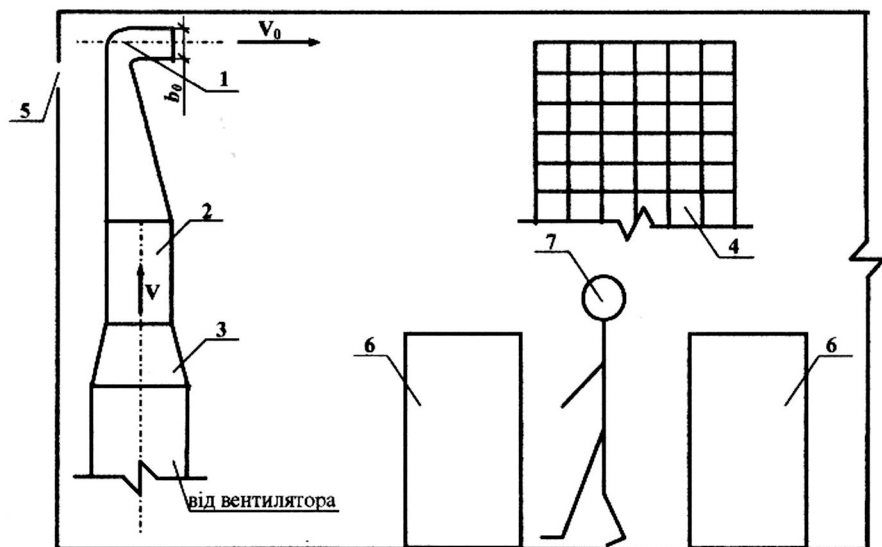


Рис. 1. Схема експериментального стенду:

- 1 – насадок з плоскою повітровипускною щілиною; 2 – повітропровід;  
3 – конфузор; 4 – координатник; 5 – витяжний отвір; 6 – технологічне  
обладнання; 7 – обслуговуючий персонал

Нині існує значна кількість різноманітних конструкцій повітророзподілювачів та схем роздачі припливного повітря як у верхню, так і в робочу зону приміщень [4; 5; 6], де використовується ефект настилання струмин на внутрішні поверхні стін або стелі, що є достатньо розповсюдженим явищем у вентиляційній техніці.

У цій статті розглядається зосереджений приплив настільними на внутрішню поверхню стелі плоскими охолодженими струминами. Повітророзподільником служить розміщений під стелею (рис. 1) пристрій з прямокутним щілинним отвором із співвідношенням сторін не меншим за 1:15 [1;2].

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

У цій статті розглядається плоска настільна струмина, що спрямовується вздовж виробничого приміщення малої висоти при наявності технологічного обладнання та обслуговуючого персоналу за тупиковою схемою, в якій витяжний отвір розміщений в тій же площині, що і припливний (див. рис. 1). При цьому обслуговувана зона, де знаходяться люди, омивається індукованою струминою зворотного потоку. У зв'язку з цим великого значення набуває питання виявлення закономірностей руху повітря у зворотному потоці. Основна увага тут приділена саме дослідженню закономірностей розвитку повітряної припливної струмини у зворотному потоці.

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

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

Експериментальні дослідження проводились в натурних умовах на стенді, схема якого представлена на рис. 1, при таких умовах та спрощеннях:

- плоска струмина є ізотермічною;
- коефіцієнт погасання швидкості припливних насадок з плоскими повітровипускними щілинами становив  $m = 2,5$ ;
- ширина щілинного отвору змінювалась і становила:  $l_o = 300$  мм;  $l_o = 450$  мм;  $l_o = 600$  мм;
- висота щілини була змінною, а саме:  $b_o = 20$  мм;  $b_o = 30$  мм;  $b_o = 40$  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 при витіканні з припливного насадка знаходилася в межах:  $V_0 = 5-15$  м/с;

- швидкість повітря у зворотному потоці розглядалася на відмітці  $h = 1,5$  м і була представлена у відносному вигляді  $\bar{V} = V_{36}/V_o$ ;
- 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 біжучі 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, що 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  $5 \times 5$  см у п'яти поперечних перерізах. У ході експериментальних досліджень були визначені границі припливної струмини в зоні її прямого та зворотного потоку.

Базуючись на експериментальних дослідженнях роздачі повітря в приміщеннях, наведемо відносні швидкості руху повітря у зворотному потоці в табличній формі (табл. 1), а також у вигляді номограми – (рис. 2), тобто представимо двофакторну функціональну залежність  $\bar{V} = f(\bar{x}; \bar{y})$ , де  $\bar{V} = V_{36}/V_o$ .

Таблиця 1

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  |

На рис. 2 представлена 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.

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

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

що виражається таким чином:

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

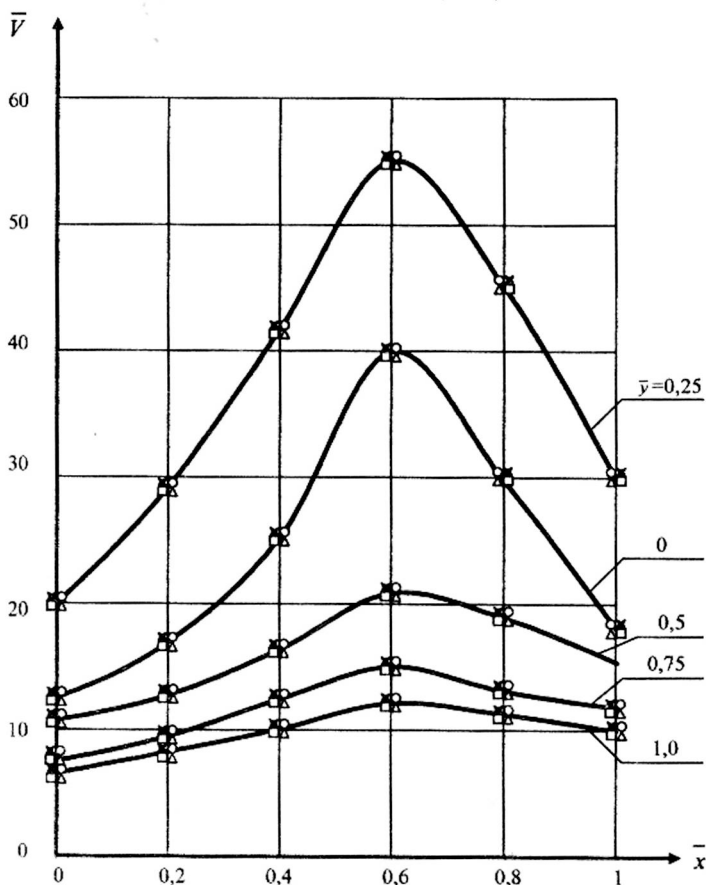


Рис. 2. Номограма для визначення відносних швидкостей у зворотному потоці

Слід відзначити, що для визначення початкової швидкості  $V_0$  необхідно знати величину саме максимальної відносної швидкості у зворотному потоці  $\bar{V}_{\max}$ . Для цього, в свою чергу, потрібно дослідити  $\bar{V}$  – функцію на екстремум, необхідні умови якого такі: якщо функція  $\bar{V} = f(\bar{x}, \bar{y})$  досягає екстремуму при  $\bar{x} = \bar{x}_0$ ,  $\bar{y} = \bar{y}_0$ , то кожна часткова похідна першого порядку від  $\bar{V}$  перетворюється в нуль при цих значеннях аргументів [7; 8].

Диференціюємо в часткових похідних:

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

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

Отримуємо систему двох рівнянь з двома невідомими (5):

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

Розв'язуючи систему рівнянь (5), знаходимо потрібне значення величин  $\bar{x}_0$ ,  $\bar{y}_0$  на деякому відрізку цих аргументів відповідно  $[\bar{x}_1; \bar{x}_2]$ ,  $[\bar{y}_1; \bar{y}_2]$ . Отже, в результаті обчислень отримуємо координати стаціонарної точки  $M(\bar{x}_0, \bar{y}_0)$ :  $\bar{x}_0 = 0,585$  та  $\bar{y}_0 = 0,165$ .

Оскільки попередньої впевненості в існуванні максимуму  $\bar{V}$  – функції немає, тому потрібне додаткове дослідження, тобто потрібно встановити достатні умови екстремуму. Якщо  $\bar{V}$  – функція буде мати в деякому довір'їлі точки  $M(\bar{x}_0, \bar{y}_0)$  неперервні другі часткові похідні і якщо в цій точці виконуються необхідні умови, то у випадку, коли другий диференціал.

$$\partial^2 \bar{V} = \sum_{i=1}^2 \cdot \sum_{j=1}^2 \cdot \frac{\partial^2 \bar{V}}{\partial x_i \partial y_j} \Big|_{(\bar{x}_0, \bar{y}_0)}^{\Delta x_i \Delta y_j} \quad (6)$$

є додатньо визначена квадратична форма, то функція  $\bar{V}(\bar{x}, \bar{y})$  має в цій точці максимум [8]. У випадку виконання цих умов  $\bar{V}$  – функція матиме в точці  $M(\bar{x}_0, \bar{y}_0)$  стаціонарне значення, а сама точка  $M$  – називатиметься стаціонарною.

Дослідимо на додатню визначеність квадратичної форми (7):

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

Доцільно ввести такі позначення:

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

Із врахуванням властивості порядку диференціювання в часткових похідних [7]

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

диференціальний визначник Якобіан ( $J$ ) набуде 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  $M(\bar{x}_0, \bar{y}_0)$  і визначасмо її характер:

$$A = \frac{\partial^2 \bar{V}}{\partial \bar{x}^2} = (-152,82 - 11,24 \bar{y}_0 + 267,84 \bar{y}_0^2) \cdot 10^{-3} = -0,147;$$

$$B = \frac{\partial^2 \bar{V}}{\partial \bar{y}^2} = (-70,56 - 319,36 \bar{x}_0 + 267,84 \bar{x}_0^2) \cdot 10^{-3} = -0,166;$$

$$C = \frac{\partial^2 \bar{V}}{\partial \bar{x} \partial \bar{y}} = \frac{\partial^2 \bar{V}}{\partial \bar{y} \partial \bar{x}} = (13,46 - 319,36 \bar{y}_0 - 11,24 \bar{x}_0 + 535,68 \bar{x}_0 \bar{y}_0) \cdot 10^{-3} = -0,006.$$

При цьому Якобіан складає:

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

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  $V_0 = V_{\text{зв}} / \bar{V}_{\max}$ , де в якості  $V_{\text{зв}}$  приймається нормована для обслуговуваної зони швидкість  $V_n$ . Це означає, що визначена початкова швидкість  $V_0$  є мінімальною, тобто ця величина є оптимізованою.

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 розраховувати початкову швидкість припливної плоскої настільної стисненої струмини у виробничому приміщенні незначної висоти з наявністю технологічних струмин обладнання та обслуговуючого персоналу і визначати геометричні параметри повітророзподільного пристрою. Застосування повітророзподільовачів із використанням ефекту настилення плоских струмин дає змогу значно підвищити критерій ADPI (Air Distribution Performance Index) при подачі в технологічне приміщення значної кількості повітря і зменшити, внаслідок цього, матеріалоемність припливної системи.

## Використана література

1. *Гримитлин М. И.* Распределение воздуха в помещениях. – М.: Стройиздат, 1982. – 164 с.
2. *Талиев В. Н.* Аэродинамика вентиляции. – М.: Стройиздат, 1979. – 295 с.
3. *Банхиди Л.* Тепловой микроклимат помещений. – М.: Стройиздат, 1981. – 248 с.
4. *Vozniak O., Kovalchuk A.* Air distribution by opposite non-coaxial air jets // Zbornik prednasok: VII Vedecka Konferencia s medzinarodnou ucastou Kosicko – Lvovsko – Rzeszowska, 2002 р. – С. 173–178.
5. *Возняк О., Ковальчук А., Іванусь Є.* Взаємодія зустрічних неспіввісних струмин // 36.: “Efektywnosc dystrybucji i wykorzystania ciepła”, Polytechnika Rzeszowska, Solina, 2001 р. – С. 397–403.
6. *Возняк О., Ковальчук А.* Повітророзподіл зустрічними неспіввісними круглими струминами // Наук.-техн. зб. КНУБА “Вентиляція, освітлення та теплогазопостачання”, вип. 6, 2003 р. – С. 5 – 10.
7. *Пискунов Н. С.* Дифференциальное и интегральное исчисления. Ч.І. – М.: Наука, 1973. – 456 с.
8. *Зорич В. А.* Математический анализ. – М.: Наука, 1981. – 427 с.