

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

© Возняк О.Т., 2005

**Описані результати експериментальних досліджень зворотного потоку під час подачі повітря в приміщення плоскими настільними струминами. Побудована відповідна номограма, а також отримані аналітичні розрахункові залежності. Показана висока ефективність застосування запропонованої схеми повітророзподілу в технологічних приміщеннях.**

**In this article the results of reverse flow at air distribution by flat spread jets experimental investigations are presented. Adequate chart is composed, analytic equations are also obtained. By these results high efficiency of proposed air distribution scheme using 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, запиленість, запахи тощо. У 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 передовсім визначаються температурою повітря та його швидкістю руху. Ці величини підтримують 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 [1–9].

**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 в [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 підмішування і погасання швидкості в струмині. Тому найраціональнішою схемою повітророзподілу у випадку з наявністю технологічного обладнання та обслуговуючого персоналу у виробничому 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].

Сьогодні існує значна кількість різноманітних конструкцій повітророзподілювачів 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 достатньо поширеним явищем у вентиляційній техніці.

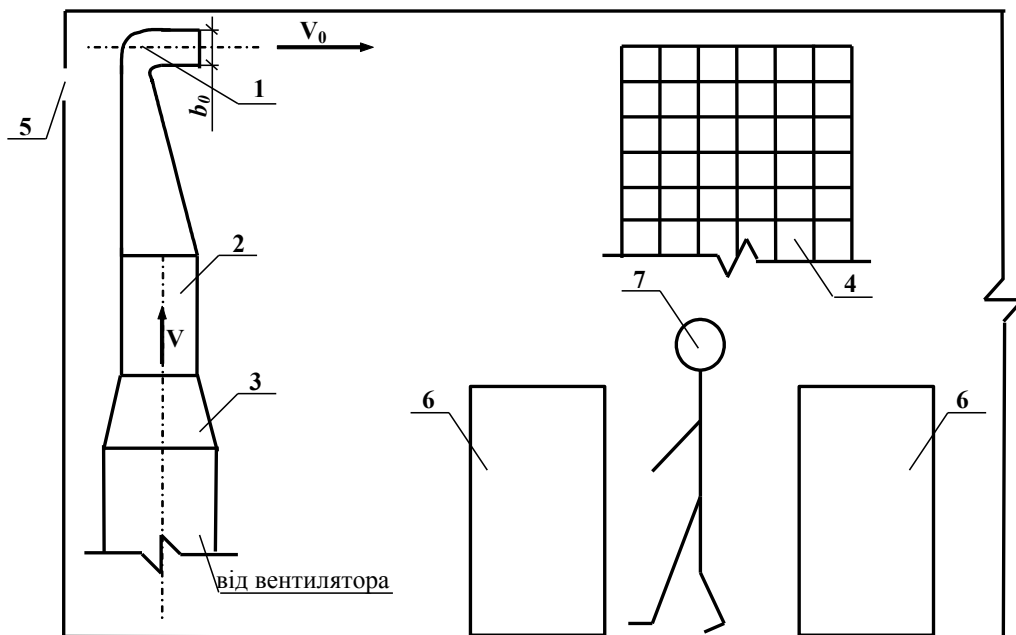


Рис. 1. Схема експериментального стенда:

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

У роботі розглядається зосереджений приплив настільними на внутрішню поверхню стелі плоскими охолодженими струминами. Повітророзподільником слугує 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 роботі розглянуто плоску настільну струмину, 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 виявлення закономірностей руху повітря у зворотному потоці. Основна увага в цій роботі приділена саме дослідженню закономірностей розвитку повітряної припливної струмини у зворотному потоці.

**Мета роботи** – дослідження характеру поширення 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.

**Виклад основного матеріалу.** Оскільки сучасні дослідження базуються на виявленні емпіричних закономірностей струминних течій [1], то саме цей спосіб був застосований у цій роботі.

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

- плоска струмина є ізотермічною;
- коефіцієнт погасання швидкості припливних насадків 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:  $V_o = 5 - 15$  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  $\bar{y} = (y - y_{зр})/(B - y_{зр})$ , де  $x$  і  $y$  – поздовжня і поперечна біжучі координати, м;  $l$  – довжина приміщення, м;  $B$  і  $y_{зр}$  – 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 вимірювали термоелектроанемометром ТА-9. Швидкості повітряного потоку, які перевищували 5 м/с, вимірювались мікроманометром з пневмометричною трубкою Піто-Прандтля. Замірювання швидкостей руху повітря в розрахункових точках здійснювали з використанням координатника із сіткою точок 5 x 5 см у п'яти поперечних перерізах. Під час експериментальних досліджень були визначені межі 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 зобразимо 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.

Таблиця 1

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

$\bar{x} \backslash \bar{y}$	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

Графік (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 так:

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

Варто відзначити, 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 при цих значеннях аргументів [10; 11]. Диференціюємо в часткових похідних:

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

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

Отримуємо систему двох рівнянь з двома невідомими (5)

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

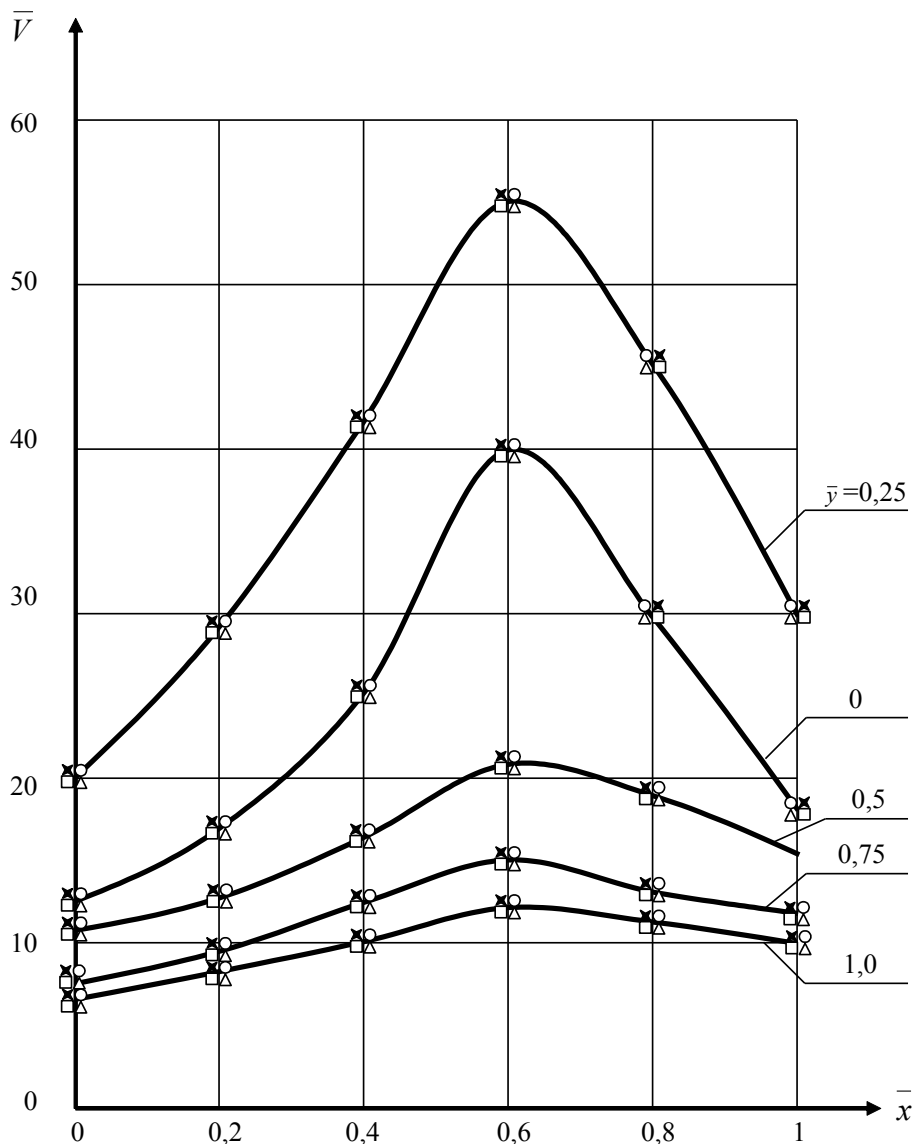


Рис. 2. Номограма для визначення відносних швидкостей у зворотному потоці

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, внаслідок обчислень отримуємо 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 околі 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

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

є додатно визначена квадратична форма, то функція  $\bar{V}(\bar{x}, \bar{y})$  має в цій точці максимум [11]. У випадку виконання цих умов  $\bar{V}$ -функція матиме в точці  $M(\bar{x}_o, \bar{y}_o)$  стаціонарне значення, а сама точка  $M$  – буде називатись стаціонарною.

Дослідимо на додатну 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 [10]

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

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  $M(\bar{x}_o, \bar{y}_o)$  і визначаємо її характер

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

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

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

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  $V_o = V_{зб} / \sqrt{\bar{V}_{max}}$ , де в якості  $V_{зб}$  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, а саме:

- 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 дозволяють розраховувати початкову швидкість припливної плоскої настільної стисненої струмини у виробничому приміщенні незначної висоти з наявністю технологічного струмин обладнання та обслуговуючого персоналу і визначати геометричні параметри повітророзподільного пристрою. Застосування повітророзподільовачів із використанням ефекту настилання плоских дає змогу значно підвищити критерій ADPI (Air Distribution Performance Index) під час подавання в технологічне приміщення значної кількості повітря і зменшити внаслідок цього матеріалоємність припливної системи.

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. Возняк О.Т. Вплив взаємодії струмин на повітророзподіл у приміщенні // *Вісн. Нац. ун-ту "Львівська політехніка"*. – Львів, 2001, – с. 27– 31.
4. Л. Банхиди. *Тепловой микроклимат помещений*. – М.: Стройиздат, 1981. – 248 с.
5. О. Возняк, А. Ковальчук. Ефективність повітророзподілу зустрічними неспіввісними струминами // *Вісн. Нац. ун-ту "Львівська політехніка"*. № 460, 2002, – с. 157 – 161.
6. O.Vozniak, A.Kovalchuk. *Air distribution by opposite non-coaxial air jets* // *Zbornik prednasok: VII Vedecka Konferencia s medzinarodnou ucastou Kosicko – Lvovsko – Rzeszowska*, 2002, – с. 173 – 178.
7. О. Возняк, А. Ковальчук, Є. Іванусь, А. Кіц. Повітророзподіл у приміщенні при взаємодії зустрічних неспіввісних струмин // *Вісн. Нац. ун-ту "Львівська політехніка"*. № 432, 2001, – с. 31–37.
8. О. Возняк, А. Ковальчук, Є. Іванусь. Взаємодія зустрічних неспіввісних струмин // *Зб.: "Efektywnosc dystrybucji i wykorzystania ciepła"*, Polytechnika Rzeszowska, Solina, 2001 р., – с. 397–403.
9. О.Возняк, А.Ковальчук. Повітророзподіл зустрічними неспіввісними круглими струминами // *Наук.-техн. зб. КНУБА "Вентиляція, освітлення та теплозапобігання"*. Вип.6, 2003, – с.5 – 10.
10. Пискунов Н.С. *Дифференциальное и интегральное исчисления. Ч.1*. – М.: Наука, 1973. – 456 с.
11. Зорич В.А. *Математический анализ*. – М.: Наука, 1981. – 427 с.