УДК 697.92

Аналітичні дослідження повітряної струмини при витіканні з перфорованої поверхні

В.Б. Довгалюк[1], В. О. Мілейковський[2], Г. М. Клименко[3]
[1]к.т.н., доцент, Київський національний університет будівництва і архітектури, 228-01-70@ukr.net
[2]к.т.н., доцент, Київський національний університет будівництва і архітектури, v_mil@ukr.net
[3]асистент, Національний університет «Львівська політехніка», Україна, anett.lviv@gmail.com

Вказано на умови підтримання допустимих параметрів мікроклімату теплонапружених приміщень та необхідність застосування в них енергоефективних схем організації повітрообміну, серед яких витісняюча вентиляція. Проаналізовано недоліки повітророзподільних пристроїв систем витісняючої вентиляції. Запропоновано конструкцію малошвидкісного двокамерного панельно-секційного повітророзподільника, що дозволяє ефективно регулювати витрату повітря. Представлено схему течії, утвореної напівобмеженою турбулентною струминою, що витікає з перфорованої поверхні. Отримано характеристику ділянок струмини та визначено їхні параметри.

Ключові слова: повітрообмін; витісняюча вентиляція; повітророзподільник; струмина.

Вступ. Підвищення вимог [1,2] до енергоефективності систем вентиляції та кондиціонування повітря призводить до необхідності розробки теоретичних основ розрахунку вентиляційних струмин, які формують параметри повітряного середовища у приміщеннях. Одним з визначальних факторів, що впливає на енергоефективність систем вентиляції та кондиціонування повітря, є організація повітрообміну. Для теплонапружених приміщень невеликого об'єму зі щільним компонуванням обладнання найбільш доцільною є подача повітря до робочої зони з малими швидкостями і перепадами температур. Такий тип вентиляції отримав назву витісняючої [1,3,4]. Для забезпечення роботи такого виду вентиляції використовують спеціальні повітророзподільники [5]. Проте більшість з них не забезпечує достатній рівень регулювання характеру розвитку струмин, рівномірність розподілу статичних тисків за висотою повітророзподільників та рівень регулювання витрати. Зміна величини повітрообміну залежно від експлуатаційного режиму приміщення на кожний конкретний момент часу підвищує енергоефективність вентиляції. При використанні таких повітророзподільників знижується ефективність повітрообміну приміщення, що призводить до появи непровітрюваних зон.

Нами запропоновані малошвидкісні двокамерні повітророзподільники [6], що забезпечують рівномірність розподілу початкових швидкостей за висотою повітророзподільників та забезпечують достатній рівень регулювання характеру розвитку струмин. Крім цього ці повітророзподільники складаються з секцій, які можна окремо вимкнути, що дозволяє ефективно регулювати витрату повітря з

практично незмінною швидкістю виходу повітря. Це дозволяє підтримувати постійну далекобійність струмин та уникнути появи непровітрюваних зон.

Аналіз досліджень

Теорія вільних турбулентних струмин достатньо повно висвітлена в науковій літературі. Найбільш повне дослідження турбулентних вентиляційних припливних виконали Г.Н. Абрамович [7], В.М. Талієв [8] та ін. Професор А.Я. Ткачук [9], запропонував аналогію між турбулентним рухом та рухом ідеальної рідини (газу) в турбулентних примежових шарах. Він запропонував розділити струминний примежовий шар на дві частини: з опуклим та увігнутим профілями швидкостей. Експериментально встановлено, що поверхнею поділу двох підшарів є поверхня, що розділяє їх приблизно навпіл.

У роботі [10], розглядається можливіть отримання закономірності розвитку струмини на підставі геометричного та кінематичного аналізу макроструктури струминних течій, що є продовженням роботи професора А.Я. Ткачука.

У роботі [6] представлений повітророзподільник має на виході перфоровану панель, яка створює окремі струминки, що взаємодіють між собою. Для забезпечення ефективної роботи повітророзподільника постає задача аналітичного опису повітряної струмини, що утворюється в результаті рівномірного розподілення повітря крізь з перфорованої поверхні. Це дозволить визначити параметри повітряної струмини.

Постановка питання

Для розробки нового способу подачі повітря необхідно проаналізувати усі три ділянки струмини, сформованої перфорованою панеллю. У даній роботі використані теорії Г.Н Абрамовича [7] та Л.М. Дудінцева [11], які є загальноприйнятими.

Аналітичні дослідження

Розглянемо формування струмини та її характеристики. Струмина складається з трьох ділянок (рис.1).

Ділянка, яка розміщена між перерізами I-I та II-II, – це ділянка взаємодії. На ній взаємодіють окремі струминки до утворення суцільного потоку. Початкова ділянка розміщена між перерізами II-II і III-III. Ця ділянка містить ядро постійних швидкостей і температур 1. На ній відбувається формування струминного 2 та пристінного 3 примежових шарів, відповідно, біля вільної межі і поверхні настилання струмини. Від перерізу III-III починається основна ділянка.

Розглянемо ділянку взаємодії. Потік зі швидкістю v_1 у патрубку постійного перерізу перед перфорованою панеллю є рівномірним і спрямований перпендикулярно до площини перфорованої поверхні (рис.1).

У результаті аналітичних досліджень витікання повітряної струмини з перфорованої панелі, Л.М. Дудінцев [11] отримав параметри потоку, зокрема: швидкість потоку v_x, що підсмоктується біля першого ряду отворів, на відстані x від площини I-I; швидкість потоку v_2, що підсмоктується перерізі I-I;

кількість потоку L_2, що підсмоктується в перерізі I-I; витрату повітря в перерізі II-II L_3.

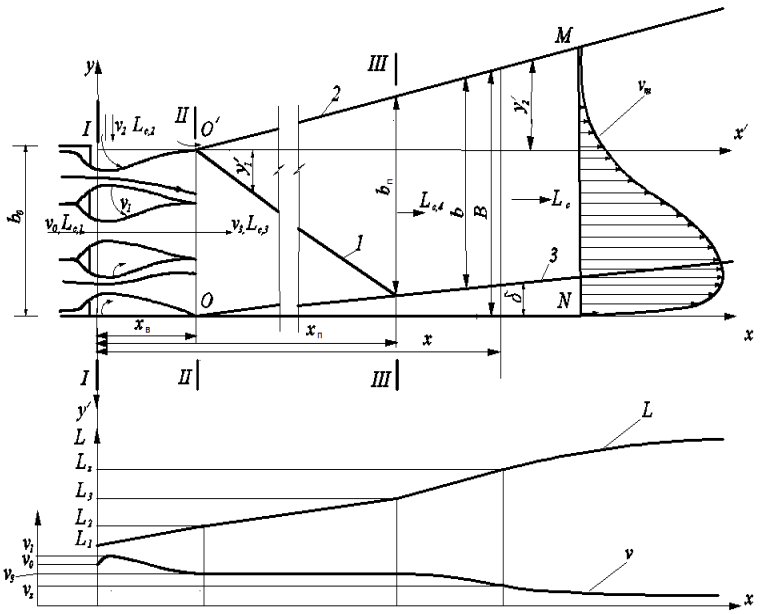

Рис.1. Схема течії при витіканні повітря із перфорованої поверхні біля підлоги:
1-ядро постійних швидкостей; 2-струминний примежовий шар; 3-пристінний примежовий шар

Розглянемо ділянку взаємодії струминок (рис.1). Оскільки ця ділянка є достатньо короткою, технологічне обладнання знаходиться поза її зоною. Тому важливо розглянути лише перший перехідний переріз II-II з абсцисою $x_в$. Параметри потоку у цьому перерізі визначають подальший розвиток струмини. Глибина ділянки дорівнює висоті перфорованої панелі.

Після злиття струминок отримаємо струмину, аналогічну напівобмеженій струмині. Її глибина дорівнює висоті повітророзподільника. Початкова швидкість становить v_3.

Вважаємо, що в початковому перерізі на вільній межі відбувається раптова зміна швидкості від v_0 до 0. Товщина струминного примежового шару дорівнює нулю. Приймаємо, що в цьому перерізі товщина пристінного примежового шару на підлозі також дорівнює нулю. Тобто примежові шари на обох межах струмини починають розвиватися в початковому перерізі II-II.

У перерізі III-III, де здійснюється злиття примежових шарів, закінчується початкова ділянка течії. Абсциса даного перерізу становить $x_п$, а довжина початкової ділянки дорівнює $x_п - x_в$. При цьому розподіл швидкостей у

пристінному примежовому шарі вважається таким, як і в турбулентному примежовому шарі при обтіканні пластини або в трубах і каналах.

У перерізі III-III починається основна ділянка струмини, в якій осьова швидкість v_{m} зменшується асимптотично від значення v_0.

Для початкової ділянки I безрозмірні координати меж за даними [7]: $y'/b = 0{,}416;\ \ y'_2/b = -0{,}684$. Глибина струмини $b = 0{,}27\Delta x$.

Знайдемо координату $x_{\text{п}}$ кінця початкової ділянки струмини. Довжина початкової ділянки струмини визначається з умови:

$$b_0 = \delta_{\text{п}} \cdot y'_{1\text{п}}, \tag{1}$$

де $\delta_{\text{п}}, y'_{1\text{п}}$ - відповідно значення товщини пристінного примежового шару на стінці і ордината внутрішньої межі зони змішування наприкінці початкової ділянки. З рівняння (1) з використанням даних [7] безрозмірна абсциса початкового перерізу:

$$x_{\text{ï}}/b_0 = 1/\left(\delta_{\text{ï}}/\left(x_{\text{ï}} - x_{\text{â}}\right) \pm 0{,}27 \cdot 0{,}416\right);\ \delta_{\text{ï}}/(x_{\text{ï}} - x_{\text{â}}) = 0{,}37/\text{Re}_{x_{\text{ï}}}^{0,2}, \tag{2}$$

де $\text{Re}_{x_{\text{п}}} = v_0 x_0/\upsilon$ число Рейнольдса.

З рівнянь 2 маємо:

$$x_{\text{п}} = x_{\text{в}} + b_0/\left(0{,}37\left(v_0(x_{\text{п}} - x_{\text{в}})/\upsilon\right)^{-0,2} \pm 0{,}27 \cdot 0{,}416\right) \tag{3}$$

Розглянемо характерні особливості основної ділянки струмини. Вважаємо, що профіль швидкості в основній ділянці складається із відрізків профілів струминного та пристінного примежових шарів. Спряження цих профілів здійснюється на межі пристінного примежового шару при $y = \delta$. Цією межею є поверхня максимальних швидкостей (рис.1), де швидкість дорівнює максимальній v_{m} у кожному перерізі основної ділянки. Залежність швидкості наростання товщини струминного примежового шару згідно з роботою [7]:

$$db/dx = 0{,}22;\ \delta/b = 0{,}1 \tag{4}$$

Таким чином, загальна глибина струмини

$$B = b + \delta = 1{,}1b = 1{,}1(b_{\text{п}} + 0{,}22(x - x_{\text{п}})). \tag{5}$$

Тоді отримаємо:

$$\widetilde{v}_m \delta \int_0^x (d\widetilde{v}/dx)d\overline{y} + b\int_{\delta}^{b+\delta} (d\widetilde{v}^2/dx)d\xi = 0, \tag{6}$$

де $\widetilde{v} = v/v_0$ - відносна швидкість, $\xi = (y - \delta)/b$ - відносна ордината в межах струминного шару.

Приймаємо закон розподілу швидкості в межах пристінного примежового шару: $\widetilde{v} = \widetilde{v}_m(\overline{y})^{1/7}$, а в струминному примежовому шарі:

$$\widetilde{v} = \widetilde{v}_m\left(1 - \xi^{3/2}\right)^2. \tag{7}$$

Після перетворень отримаємо диференціальне рівняння, що пов'язує параметри $\widetilde{v}_m$, b і δ:

$$7/8\left[\widetilde{v}_m'\delta+\widetilde{v}_m\delta'\right]+0{,}632\widetilde{v}_m'b+0{,}312\widetilde{v}b'=0. \qquad (8)$$

Розв'язуємо сумісно рівняння (5), (6), та отримаємо залежності, що пов'язують безрозмірну швидкість $\widetilde{v}_m$ з безрозмірними товщиною струмини $\widetilde{b}=b/b_{\text{п}}$ і координати $\overline{x}$:

$$\widetilde{b}=1/\widetilde{v}_m^{1,8}, \qquad \overline{x}-\overline{x}_{\text{н}}=\overline{b}_{\text{н}}\left[(1/\widetilde{v}_m^{1,8})-1\right]/0{,}22;\ b/b_{\text{н}}=1/\left(v_m/v_o\right)^{1,8} \qquad (9)$$

Витрата в перерізі II-II визначається за формулою: $L_3=L_1+L_2$.

Витрата підтікання залежить від швидкості підтікання v_2.

Для визначення витрати повітря L_3 слід знайти витрату підтікання L_2 за рівністю [11]:

$$L_2=2l\int_0^h v_x dx=2\text{v}_2hl\int_0^1\sqrt{1-\xi}\,d\xi=3{,}03l^2v_2, \qquad (10)$$

За формулами (2) товщина струминного примежового шару початкової ділянки змінюється лінійно. Максимальна швидкість на початковій ділянці не змінюється. Товщина пристінного примежового шару змінюється приблизно лінійно. Товщина ядра спадає також приблизно лінійно, тому з достатньою для інженерних розрахунків точністю можна вважати, що витрата на початковій ділянці зростає лінійно.

Таким чином, достатньо визначити витрату повітря на початку L_3 і наприкінці потоку L_4.

Товщина перехідного перерізу $\overline{b}_{\sqsubset}$ за [11] становить $\overline{b}_{\sqsubset}=b_{\sqsubset}/b_0=2{,}48$. Ширина струмини $B_{\text{п}}=1{,}1\cdot 2{,}48B_0=2{,}728B_0$.

Оскільки ширина пристінного примежового шару дорівнює 10 відсотків ширини струмини, то маємо: $\delta_{\text{п}}=b=0{,}27b_0;\ x=x_{\text{п}};L=L_4;$

$$L=L_3+\left(L_4-L_3\right)\left((x-x_{\text{п}})/x_{\sqsubset}-x_{\text{п}}\right). \qquad (11)$$

Максимальна швидкість у другому перехідному перерізі дорівнює початковій v_0.

За результатами підрахунків коефіцієнта поля швидкості відповідно до формул роботи [7] маємо $k_{\text{пш}}=0{,}489$. Тоді витрата в перехідному перерізі дорівнює:

$$L_{c4}=v_0B_{\text{в}}k_{\text{пш}}=v_02{,}728B_00{,}489=1{,}334v_0B_0=1{,}334L_{c,3}. \qquad (12)$$

Визначаємо швидкість та витрату повітря у довільному перерізі основної ділянки: $\widetilde{b}=0{,}22((x-x_{\text{п}})/b_{\text{п}})+1$. З урахуванням (7),

$$0{,}22((x-x_{\text{п}})/b_{\text{п}})+1=1/\widetilde{v}_m^{1,8} \qquad (13)$$

Після перетворень маємо:

$$\widetilde{v}_m = 1/\widetilde{b}^{\,0,556}. \qquad (14)$$

Знаходимо витрату: $L/L_4 = \nu/\nu_{\text{п}} = B/B_{\text{п}} = \widetilde{b}\widetilde{v}$; $L = L_4\widetilde{b}\widetilde{v}$.

Згідно з [6],

$$L = L_4\widetilde{b}/\widetilde{b}^{\,0,556} = L_4\widetilde{b}^{\,0,444} \qquad (15)$$

Характер зміни швидкості та витрати за отриманими залежностями (8…12) показано на рис.1. Ці залежності дозволяють розрахувати струмину для конкретних значень.

Висновки. Запропоновано нову схему течії, утвореної напівобмеженою турбулентною струминою при витіканні повітря із перфорованої поверхні.

У результаті аналітичних досліджень отримано залежності, що дозволяють визначити швидкість та витрату повітря у початковій, перехідній та основній ділянці струмини.

Література

1. ДБН-В.2.5.-67:2013. Опалення, вентиляція та кондиціювання повітря. Видання офіційне. Київ 20І3. 141с.

2. Standard ASHRAE 62.1-2013. - Ventilation for Acceptable Indoor Air Quality (ANSI Approved),2004.53p.

3. *Живов А.М*., P.V. Nielsen, G. Riskovski, Шилькрот Е.О. Системы вытесняющей вентиляции для промышленних зданий. Типи область применения, принципы проектирования, „АВОК”, 2001/№5, С. 36-46.

4. *Довгалюк В.Б*., Мілейковський В.О., Клименко Г.М. Аналітичні дослідження застосування витискальної вентиляції у теплонапружених приміщеннях. // Енергоефективність в будівництві та архітектурі: Науково-техн. збірник.-Вип.6.-К.: КНУБА, 2014. С.81-85.

5. *Жуковський С.С.,* Клименко Г.М. Конструкційні особливості джерельних (фільтраційних) повітророзподільників і пропозиції щодо їх удосконалення. Науковий вісник. Збірник науково-технічних праць.-Львів: НЛТУУ.-2007, вип.17.6, С. 101-106.

6. *Жуковський С.С*., Довбуш О.М., Клименко Г.М. Повітророзподільник. Патент України № 19497. від 15.12. 20006, Бюл. № 1.

7. *Абрамович Г.Н*. Теория турбулентных струй.-М.: Физматгиз,1960.-715с.

8. *Талиев В.Н*. Аэродинамика вентиляции. – М.: Стройиздат, 1979. – 295 с.

9. *Ткачук А.Я.* Розрахункова модель усередненого руху // Вентиляція, освітлення та теплогазопостачання: Науково-техн. збірник.-Вип.2.-К.: КНУБА, 2001. С.27-49.

10. *Довгалюк В.Б.,* Мілейковський В.О. Аналітичні дослідження макроструктури струминних течій для розрахунку енергоефективних систем повітророзподілення Науково-технічний збірник «Енергоефективність в будівництві та архітектурі». Випуск 4. Відповідальний редактор П.М. Куліков. – К.: КНУБА, 2013 р. – 328 с, С.73-81.

11. *Дудинцев Л.М*. Истечение воздуха из перфорированой пластинки. Труды всесоюзной межвузовской научной конференции. Минск, 1967. С.313-317.

Аналитические исследования воздушной струи при истечении с перфорированной поверхности

В.Б. Довгалюк, В.А. Милейковский, А.Н. Клименко

Указаны условия поддержания допустимых параметров микроклимата теплонапряженных помещений и необходимость применения в них энергоэффективных схем организации воздухообмена, среди которых вытесняющая вентиляция. Проанализированы недостатки воздухораспределительных устройств систем вытесняющей вентиляции. Предложена конструкция низкоскоростного двухкамерного панельно – секционного воздухораспределителя, что позволяет эффективно регулировать расход воздуха. Представлена схема течения, образованння полуограниченной турбулентной струей, вытекающей из перфорированной поверхности. Получены характеристики участков струи и определены их параметры .

Ключевые слова: воздухообмен; вытесняющая вентиляція; воздухораспределитель, струя.

Analytical research of the air jet flowing out of a perforated surface

V. Dovhaluk,V. Mileikovskyi, G. Klymenko.

Conditions of valid microclimate parameters maintaining in high-heat rooms are highlighted in the article as well as the necessity to apply in such rooms energy-efficient air exchange organization schemes including displacement ventilation. The drawbacks of air-distributors for displacement ventilation systems are analyzed. The construction of a low-velocity two-chamber panel-sectional air distributor that allows effective air flow control is suggested. A diagram of the flow formed by a half-restricted turbulent jet flowing out from a perforated surface is presented. The description of jet regions has been obtained and their parameters has been defined.

Keywords: ventilation; displacement ventilation; air diffuser; jet.

Надійшла до редакції 11.06.2014 р.