

УДК 628.87:697.92

Енергоефективні технології організації повітророзподілу в музеях різного призначення при змінних режимах тепловологонадходжень

В. Б. Довгалюк¹, Ю. В. Човнюк², О. М. Скляренко³, А. К. Ситницька⁴

¹к.т.н., проф. Київський національний університет будівництва і архітектури, м. Київ, Україна, 2280170@ukr.net, ORCID: 0000-0002-4836-5354

²к.т.н., доц. Національний університет біоресурсів і природокористування України, м. Київ, Україна, uchovnyuk@ukr.net, ORCID: 0000-0002-0608-0203

³к.т.н., проф. Київський національний університет будівництва і архітектури, м. Київ, Україна

⁴асп. Київський національний університет будівництва і архітектури, м. Київ, Україна, sit_ann@ukr.net, ORCID: 0000-0003-1074-5762

Анотація. Розглянуто питання формування мікроклімату музейних приміщень. Ефективне формування мікроклімату вимагає змінного повітрообміну приміщень. У цих умовах до систем повітророзподілення висувуються високі вимоги щодо не порушення схеми циркуляції повітря в приміщенні. Розглянуто конструкції повітророзподільників зі змінною витратою, їхні переваги та недоліки. Форма осі припливної неізотермічної струмини залежить від початкового критерію Архімеда Ar_0 , характерної площі повітророзподільника, та коефіцієнтів зміни осьової швидкості t і надлишкової температури p . За цими параметрами визначається мінімально можлива глибина регулювання (відношення плинного навантаження $G_{пл}$, кг/год, до максимальної розрахункової витрати G_{max} , кг/год) повітрообміну в системі повітророзподілення за умови забезпечення розрахункової схеми циркуляції повітряних потоків у приміщенні. На підставі методів аналітичної геометрії та геометричної теорії управління запропоновано алгоритм визначення режиму роботи повітророзподільника залежно від потреб приміщення. Визначено коефіцієнти впливу кожного з перелічених впливових параметрів. Наочно показано, як за отриманими даними обрати конкретні дії і відповідний геометричний образ регулювання. Запропоновано повітророзподільний пристрій, який дозволяє розширити мінімально можливу глибину регулювання повітророзподільника до 0,1.

Ключові слова: мікроклімат, глибина регулювання, критерій Архімеда, неізотермічна струмина.

Постановка проблеми. Процес формування мікроклімату музейних приміщень, є складною системою з відносно великим числом змінних параметрів, частина яких змінюється непередбачувано.

Параметри повітряного середовища визначаються типом струминної течії, що формується повітророзподільним пристроєм, тобто аеродинамічною схемою повітророзподільника.

Для ефективного управління системами повітророзподілення необхідно мати алгоритм зміни аеродинамічних і теплових параметрів струмини залежно від стану внутрішнього повітряного середовища при змінних тепловологонадходженнях до приміщення.

Останні дослідження та публікації. Важливим фактором, який впливає на застосування систем вентиляції зі змінною витратою повітря, є нестационарність режиму циркуляції повітряних потоків у приміщенні і, відповідно, складність підтримання нормованих умов повітряного середовища в зоні обслуговування. При зміні умов витікання неізотермічної повітряної струмини з повітророзподільника змінюється співвідношення сил гравітації та інерції. Це може призвести до зміни форми

струмини, місця відриву її від стелі при подачі тангенціально до неї охолодженого повітря, спливання струмини при подачі нагрітого повітря тощо [1, 2]. У роботі [3] запропоновано для систем зі змінною витратою повітророзподільник з автоматичною зміною геометрії. Конструкція повітророзподільника дозволяє регулювати форму та властивості струмини (розподіл швидкості, м/с, та надлишкової температури, К, у перерізі).

Запропонована конструкція повітророзподільника може використовуватися для подачі припливного повітря в системах вентиляції та кондиціонування повітря приміщень громадського й виробничого призначення великих об'ємів та/або з високими стелями, де необхідно забезпечити роздачу значних об'ємів повітря з великою далекобійністю.

Відома конструкція повітророзподільника, що дозволяє змінювати геометрію корпусу та форму припливної струмини залежно від витрати повітря [4]. Він складається із зовнішнього конічного жорсткого корпусу та внутрішнього конічного гнучкого вкладиша-відбивача, що пересувається вздовж осі. При зміні витрати вкладиш деформується (розширюється або

стискається) та переміщується на штоку. У результаті змінюється кут розкриття припливної струмини та ступінь її заповнення. Це дозволяє регулювати інтенсивність затухання швидкості та далекобійність. Недоліком цієї конструкції є вузький діапазон зміни кута розкриття струмини, оскільки геометрія зовнішнього жорсткого конічного корпусу не регулюється. Подібна конструкція не дозволяє регулювати форму струмини, наприклад, отримувати компакту або повну віялову струмину. Це важливо при використанні повітророзподільників у системах зі змінною витратою повітря.

Повітророзподільник із змінним профілем корпусу та механізмом для регулювання форми й параметрів припливної струмини запропоновано в роботі [5]. Конструкція має еластичний повітряний насадок у формі гофрованого дифузора, виконаного з пружного матеріалу (наприклад, гуми). Його деформація в ручному режимі дозволяє встановлювати необхідну форму й далекобійність струмини, а також її напрямок. Механізм, який регулює форму й кут розкриття струмини, має форму кільця, що охоплює еластичний насадок в зоні його повітровипускного отвору. На ньому встановлені регульовальні гвинти. Проблемою конструкції є створення лише віялової струмини, тоді як в окремих режимах вентиляції приміщень потрібна далекобійна компактна струмина. Механізм регулювання забезпечує вузький діапазон зміни кута розкриття випускного патрубку, оскільки кільце має скінченні розміри. Зазначені недоліки звужують функціональні можливості повітророзподільника.

Існують різні рішення систем повітророзподілення, їхні конструкції, види струмин та схеми циркуляції повітряних потоків. Залежно від

- об'ємно-планувальних рішень музейного приміщення
- теплонапруженості
- значення повітрообміну, кг/год
- місць розміщення експонатів
- розташування зон обслуговування
- вимог до параметрів повітряного середовища

застосовують різні способи подачі повітря:

- стельові повітророзподільники різних конструкцій
- подачу повітря у верхню зону приміщення під кутом до зони обслуговування
- витісняючу вентиляцію із застосуванням малошвидкісних повітророзподільників.

Зміна витрати припливного повітря впливає на початкову швидкість припливної струмини

та параметри повітряного середовища. Найбільш загальним критерієм, який характеризує розвиток неізотермічної струмини, є плинний критерій Ar_x [6]:

$$Ar_x = Ar_0 \frac{n}{m^2} \left(\frac{x}{\sqrt{A_0}} \right)^2, \quad (1)$$

де Ar_0 – критерій Архімеда на витіканні [6]:

$$Ar_0 = \frac{g \Delta t_0 \sqrt{A_0}}{v_0^2 T_{нав}} = 1,296 \cdot 10^7 \frac{g \rho_0 \Delta t_0 A_0^{5/2}}{G^2 T_{нав}}; \quad (2)$$

g – прискорення вільного падіння, м/с²; Δt_0 – надлишкова температура на витіканні, К; v_0 – швидкість повітря на витіканні, м/с; A_0 – характерна площа повітророзподільника, м²; $T_{нав} = (273,15 + t_{нав})$ – температура навколишнього середовища, К, $t_{нав}$ – те ж, °С; n – коефіцієнт зміни надлишкової осьової температури; m – коефіцієнт зміни осьової швидкості; ρ_0 – початкова густина повітря, кг/м³; G – початкова витрата повітря, кг/год.

Плинний критерій Архімеда Ar_x показує зміну співвідношення сил гравітації та сил інерції вздовж осі струмини. Його значення за формулами (1) і (2) збільшується пропорційно квадрату витрати припливного повітря G , кг/год. Траєкторія осі припливної неізотермічної струмини залежить від Ar_0 і темпу затухання осьової швидкості m . Ці параметри визначають мінімально можливу глибину регулювання витрати повітря в системі повітророзподілення за умови забезпечення розрахункової схеми циркуляції повітряних потоків у приміщенні (відношення плинного навантаження $G_{нт}$, кг/год, за якого циркуляція не порушується, до максимального розрахункового G_{max} , кг/год):

$$D_{min} = \frac{G_{нт}}{G_{max}}. \quad (3)$$

Струмина, яка розглядається при максимальній витраті як ізотермічна або слабконеізотермічна, при зменшенні витрати стає все більш неізотермічною.

З урахуванням діапазону зміни значень плинного критерію Ar_x та допустимого перепаду температури Δt_0 , К, [6, 7] мінімальна глибина регулювання витрати G , кг/с, при змішувальній вентиляції та подачі повітря до верхньої зони дорівнює $D_{min} = 0,3 \dots 0,5$ [8].

Зміна витрати припливного повітря коригується умовами витікання повітря з повітророзподільника, що відповідає критерію Рейнольдса

$$Re = \frac{v d_0}{\nu} = \frac{G d_0}{3600 \rho_0 A_0 \nu}, \quad (4)$$

де d_0 – еквівалентний діаметр вихідного патрубку, м; ν – коефіцієнт кінематичної в'язкості повітря, м²/с.

Зменшення критерію Рейнольдса за формулою (4) відбувається пропорційно зниженню витрати та не впливає на умови витікання аж до критичного значення $Re_{кр}$. При подальшому зниженні витрати характер витікання стає неавтомоделним. Критичне значення $Re_{кр}$ знаходять дослідним шляхом для кожного конкретного типу повітророзподільника. Для більшості конструкцій можливо прийняти $Re_{кр} = (5...8) \cdot 10^4$. Мінімальна витрата повітря через один повітророзподільник, при якій не порушується автомоделність, становить $L_{min} = (220...360) d_0$ [8].

Режим неавтомоделності виникає при витраті повітря значно меншій (у 9...12 разів) ніж мінімальна витрата, що визначається за критичними значеннями плинного критерію Архімеда [8].

Отже, доцільно визначити параметри повітророзподільних пристроїв, зміна яких дозволяє збільшити мінімальну глибину регулювання.

Формулювання цілей статті. Мета роботи полягає в узагальненні й поглибленні практичних питань стосовно глибини регулювання систем повітророзподілу при змінній витраті повітря в музейних приміщеннях.

Основна частина.

Вважаємо, що при мінімальній глибині регулювання, відбувається зміна виду струмینی (відповідно, коефіцієнтів m , n) та характерна площа повітророзподільника A_0 . При зміні теплових і аеродинамічних характеристик струмینی, плинна витрата через повітророзподільний пристрій становить $G_{nl.1} = G_{nl}$, кг/год. Тоді залежність для глибини регулювання (3) з урахуванням набуває вигляду:

$$D_{min} = \frac{G_{nl.1}}{G_{max}} = \frac{v_{nl.1}}{v_{0,max}} \cdot \frac{A_{0,1}}{A_0}, \quad (5)$$

де $v_{nl.1}$, $v_{0,max}$ – відповідно, швидкість, м/с, на виході з повітророзподільника при зміні аероди-

намічної схеми і максимальному розрахунковому навантаженні; $A_{0,1}$, A_0 – характерні площі повітророзподільника при новій аеродинамічній схемі та максимальному розрахунковому навантаженні.

Підставляємо до залежності (1) формулу (2). Після перетворення отримаємо:

$$v_{nl.1} = \sqrt{\frac{g \Delta t_0 n_1 x^2}{Ar_{x.1} T_{нав.} m_1^2 \sqrt{A_{01}}}}, \quad (6)$$

$$v_{0,max} = \sqrt{\frac{g \Delta t_0 n x^2}{Ar_{x,max} T_{нав.} m^2 \sqrt{A_0}}}. \quad (7)$$

У рівнянні (6) замість плинного критерію $Ar_{x.1}$ внесемо його критичне значення $Ar_{x.1}^{кр}$, а в рівнянні (7) – $Ar_{x,max}^{кр}$. При цьому

$$Ar_{x.1}^{кр} \neq Ar_{x,max}^{кр}, \quad (8)$$

$$A_{0,1} \neq A_0. \quad (9)$$

Позначимо відношення

$$n^* = \frac{n_1}{n}, \quad (10)$$

$$m^* = \frac{m_1}{m}. \quad (11)$$

З виразів (6-11)

$$\frac{v_{nl.1}}{v_{0,max}} = \frac{(n^*)^{0,5}}{m^*} \left(\frac{A_0}{A_{0,1}} \right)^{0,75} \left(\frac{Ar_{x,max}^{кр}}{Ar_{x.1}^{кр}} \right)^{0,5}. \quad (12)$$

Підставимо рівняння (12) у (5). Отримаємо мінімальну глибину регулювання

$$D_{min} = \left(\frac{n_1}{n} \right)^{0,5} \left(\frac{m}{m_1} \right) \left(\frac{A_{0,1}}{A_0} \right)^{0,75} \left(\frac{Ar_{x,max}^{кр}}{Ar_{x.1}^{кр}} \right)^{0,5} \quad (13)$$

або

$$D_{min} = \left(\frac{n_1}{n} \right)^{0,5} \left(\frac{m}{m_1} \right) \left(\frac{A_{0,1}}{A_0} \right)^{0,75} \left(\frac{Ar_{x,max}^{кр}}{Ar_{x.1}^{кр}} \right)^{0,5}. \quad (14)$$

Аналіз формули (14) показує, що:

- $D_{min} \sim 1/m_1$, тобто глибина регулювання спадає зі зростанням коефіцієнта m_1 (рис. 1а);
- $D_{min} \sim A_{0,1}^{0,75}$ тобто глибина регулювання зростає зі зростанням площі $A_{0,1}$, м² (рис. 1б);
- $D_{min} \sim n_1^{0,5}$, тобто глибина регулювання зростає зі зростанням коефіцієнта n_1 (рис. 1в);
- $D_{min} \sim 1/(Ar_{x,1}^{kp})^{0,5}$, глибина регулювання зростає зі зростанням критерію Архімеда $Ar_{x,1}^{kp}$ (рис. 1г).

Збільшення коефіцієнта зміни осьової надлишкової температури n_1 (і, відповідно, сил гравітації) та збільшення характерної площі повітророзподільного пристрою призводить до зменшення глибини регулювання (збільшення величини D_{min}).

На основі результатів виконаних досліджень формування і розвитку струминних течій розроблені нові конструкції повітророзподільних пристроїв [9] з якісно новими властивостями (патент України № 120507). Вони дозволяють регулювати параметри припливного повітря зі зміною:

- розподілу швидкості й надлишкової температури за перерізами;
- значення коефіцієнтів m і n ;
- можливою подачею повітря двома різними типами струмин.

Для забезпечення розрахункових параметрів струмини при зміні глибини регулювання системи повітророзподілу пропонується метод вибору режимів роботи повітророзподільників [9...12] на основі сучасної методології геометричної теорії управління [13...14].

Мінімальна глибина регулювання подачі повітря через повітророзподільний пристрій визначається згідно з залежністю (14). Вона є мультиплікативною залежністю параметрів регулювання з чотирма співмножниками $a_1 = (n_1 / n)$, $a_2 = (m / m_1)$, $a_3 = (A_{0,1} / m_1)$ й $a_4 = Ar_{x,max}^{kp} / Ar_{x,1}^{kp}$. Для визначення впливу кожного з множників слід розв'язати дві задачі:

1. Встановити значимість впливу кожного з множників на D та відносну похибку визначення кожного множника;
2. Встановити кількість способів регулювання D для конкретних випадків, та обрати найбільш впливові параметри регулювання.

Запишемо рівняння (14) у вигляді з показниками степеню $\alpha_1 \dots \alpha_4$:

$$D_0 = (a_1)^{\alpha_1} \cdot (a_2)^{\alpha_2} \cdot (a_3)^{\alpha_3} \cdot (a_4)^{\alpha_4}. \quad (15)$$

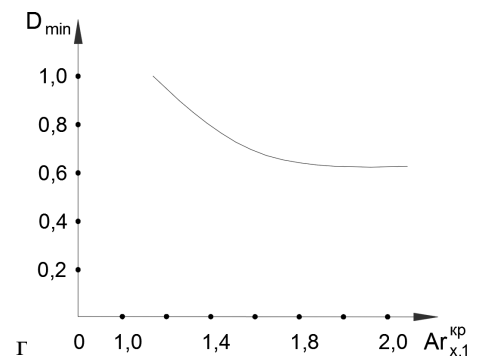
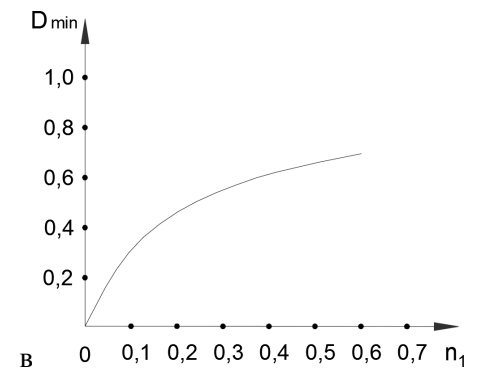
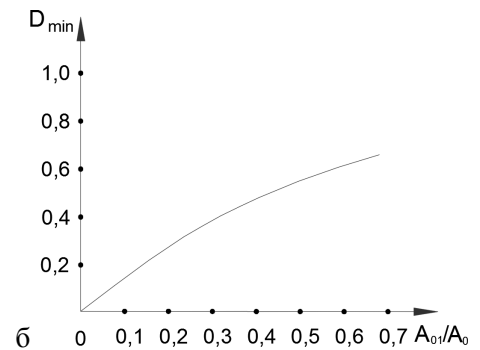
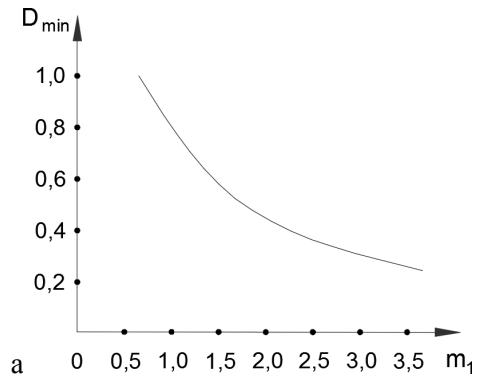


Рис. 1. Залежність глибини регулювання від аеродинамічної схеми повітророзподільних пристроїв і співвідношення сил інерції та гравітації у струмині: а – залежність D_{min} від $m_{n,1}$; б – залежність D_{min} від $A_{0n,1}$; в – залежність D_{min} від $n_{n,1}^{0,5}$; г – залежність D_{min} від $Ar_{x,1}^{kp}$

Прологарифмуємо формулу (15):

$$\ln D_0 = \alpha_1 \ln a_1 + \alpha_2 \ln a_2 + \alpha_3 \ln a_3 + \alpha_4 \ln a_4. \quad (16)$$

Відносна похибка (в частинах одиниці) при

визначенні D становить:

$$\frac{\Delta D}{D_0} = \alpha_1 \frac{\Delta a_1}{a_1} + \alpha_2 \frac{\Delta a_2}{a_2} + \alpha_3 \frac{\Delta a_3}{a_3} + \alpha_4 \frac{\Delta a_4}{a_4}, \quad (17)$$

де $\Delta a_i / a_i$ – відносна похибка визначення a .

Позначимо

$$\begin{cases} \frac{\Delta D}{D_0} = \tilde{D} (\tilde{D} < 0, \tilde{D} \neq 0); \\ x_1 = \frac{\Delta a_1}{a_1}; \\ x_2 = \frac{\Delta a_2}{a_2}; \\ x_3 = \frac{\Delta a_3}{a_3}; \\ x_4 = \frac{\Delta a_4}{a_4}. \end{cases} \quad (18)$$

У рівняннях (15...17) показники α є коефіцієнтами значущості (впливовості) кожного з множників на D . За формулою (14) $\alpha_1 = 0,5$; $\alpha_2 = 1$; $\alpha_3 = 0,75$; $\alpha_4 = 0,5$.

«Вага» у визначенні впливу кожної величини з рівняння (17) на результат розрахунку D :

$$\checkmark \text{ для } a_1: \frac{0,5}{0,5+1,0+0,75+0,5} = \frac{2}{11} \approx 0,1818;$$

$$\checkmark \text{ для } a_2: \frac{1,0}{0,5+1,0+0,75+0,5} = \frac{4}{11} \approx 0,3636;$$

$$\checkmark \text{ для } a_3: \frac{0,75}{0,5+1,0+0,75+0,5} = \frac{3}{11} \approx 0,2727;$$

$$\checkmark \text{ для } a_4: \frac{0,5}{0,5+1,0+0,75+0,5} = \frac{2}{11} \approx 0,1818.$$

Отже, найбільший вплив на глибину регулювання D_{min} справляє параметр a_2 (відношення коефіцієнтів зміни осьової швидкості – m/m_1). Параметр $a_3 = (A_{01}/A_0)$ впливає на D_{min} на 25% менше ніж параметр a_2 , а параметри $a_1 = (n/n_1)$ і $a_4 = Ar_{max}^{kp} / Ar_{x.1}^{kp}$ – менше на 50%.

Отримані дані дозволяють обрати конкретні дії регулювання і відповідний геометричний образ регулювання (гіперплощину – чотири параметри; площину – три параметри; пряму – два параметри; точку – один параметр) для заданих змін ΔD . Осями простору регулювання є ті параметри, які будуть змінюватися. Будь яка точка, що лежить на геометричному образі регулювання, проєціюється на осі координат і знаходиться сполученням регульованих параметрів, які відповідають потрібному

значенню ΔD .

При визначенні глибини регулювання для повітророзподільних пристроїв у системах зі змінною витратою, в рівнянні (15...17), четвертий параметр $a_4 = Ar_{max}^{kp} / Ar_{x.1}^{kp}$ найменше піддається регулюванню [8], тому його приймаємо незмінним ($\Delta a_4 / a_4 \equiv 0$). Тоді рівняння (17), з урахуванням прийнятих позначень можливо записати у вигляді:

$$\tilde{D} = \alpha_1 x_1 + \alpha_2 x_2 + \alpha_3 x_3 \quad (19)$$

або

$$1 = \frac{\alpha_1}{\tilde{D}} \cdot x_1 + \frac{\alpha_2}{\tilde{D}} \cdot x_2 + \frac{\alpha_3}{\tilde{D}} \cdot x_3. \quad (20)$$

Подамо рівняння (20) у канонічному вигляді як рівняння для площини (у просторі (x_1, x_2, x_3)) у відрізках:

$$1 = \frac{x_1}{\left(\frac{\tilde{D}}{\alpha_1}\right)} + \frac{x_2}{\left(\frac{\tilde{D}}{\alpha_2}\right)} + \frac{x_3}{\left(\frac{\tilde{D}}{\alpha_3}\right)}. \quad (21)$$

Рівняння (21) при $k = \tilde{D}/\alpha_1 > 0$, $l = \tilde{D}/\alpha_2 > 0$ і $p = \tilde{D}/\alpha_3 > 0$ має геометричну інтерпретацію (геометричний образ), показану на рис. 2.

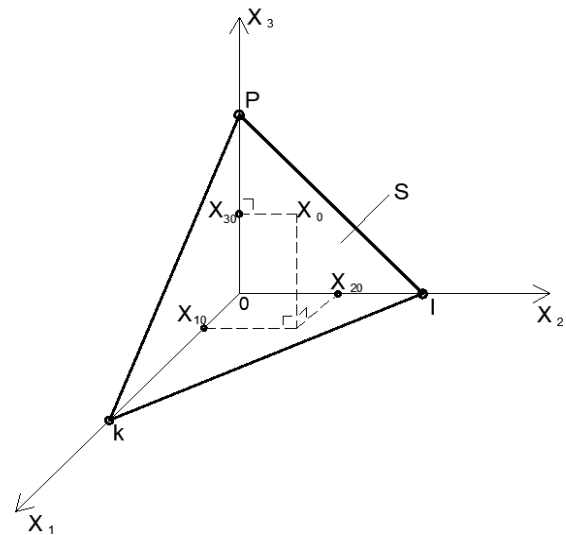


Рис. 2. S-площина регулювання D параметра

Будь яка точка цієї площини S , наприклад x_0 , має три конкретні координати (x_{10}, x_{20}, x_{30}) . Вони відповідають необхідним значенням регулювання параметрів (x_1, x_2, x_3) , що задовольняють заданій глибині регулювання D . На практиці кількість можливих способів регулювання та величина D визначається конструкцією (ае-

родинамічною схемою) й умовами експлуатації повітророзподільника. Наприклад, для малошвидкісних панельно-секційних повітророзподільників [11], що застосовуються в системах витісняючої вентиляції, регулювання D_{min} можливе лише зміною площі A_0 , m^2 .

Більш широкий діапазон регулювання параметрів припливного повітря має запропонований повітророзподільник [9] зі змінним типом припливної струмини (рис. 3). Корпус 1 з одного боку має вхідний патрубок 2, а з іншого – плавне розширення 3, де розміщена кільцева вставка 4 з розсікачами, між якими утворені канали 5. Вставка 4 може рухатися виконавчим механізмом уздовж осі повітророзподільника. На вході до каналів 5 встановлено регулювальний пристрій з нерухомою пластиною 6 із радіальними щілинами, до якої щільно притиснуто аналогічну пластину 7, що обертається виконавчим механізмом навколо осі. Співвісно з корпусом 1 розташовано циліндричний повітровід 8 з клапаном 9 та додатковим тангенціально приєднаним повітроводом 10 з клапаном 11.

Припливне повітря поступає вхідним патрубком 2 до корпусу 1, проходить через регулювальний пристрій 6-7 та розподіляється каналами 5, утвореними плавним розширенням корпусу 7, розсікачами кільцевої вставки 4 і циліндричним повітроводом 8. При цьому потік повітря обтікає їхню криволінійну поверхню і заповнює весь переріз вказаних каналів 5. Залежно від положення кільцевої вставки відносно корпусу утворюються наступні струмини: віялова струмина (кільцева вставка знаходиться у корпусі) (рис. 4, б); конічна струмина (кільцева вставка висунута з корпусу) (рис.4, г). При цьому повітряні клапани 9 і 11 закриті.

Якщо регулювальний пристрій 6-7 та клапан 11 закрити, а повітряний клапан 9 відкрити, повітря подається через повітровід 8 вісесиметричною струминою (рис. 4, а). Якщо закрити регулювальний пристрій 6-7 та клапані 9, а відкрити клапан 11, то повітря подається закрученою струминою (рис. 4, в).

Залежно від глибини регулювання $0,1 \leq D = G / G_{max} \leq 1$ повітророзподільник може працювати за однією з наступних схем (рис. 4):

- при відкритих регулювальному пристрої 6-7 та клапані 11 (клапан 9 закритий) повітророзподільник подає повітря віяловою та закрученою струминами (рис. 4, д).
- при відкритих регулювальному пристрої 6 і клапані 9 (клапан 11 закритий) повітророзподільник подає повітря вісесиметричною та віяловою струминою (рис. 4, ж).

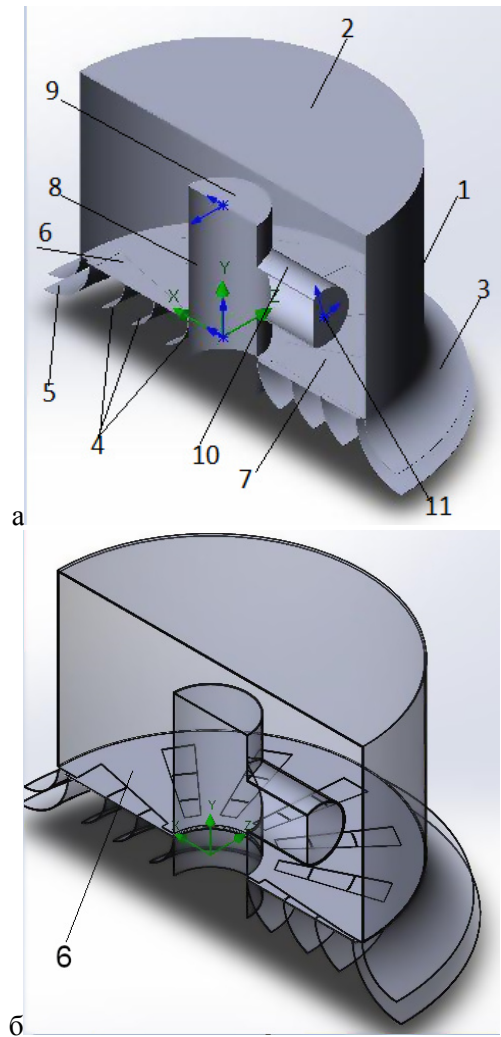


Рис. 3. Конструкція повітророзподільника зі змінним типом припливної струмини (Патент України № 120507): а) загальний вигляд; б) елементи конструкції повітророзподільника: 1 – корпус; 2, 3 – вхідний і вихідний патрубки; 4 – кільцева вставка з розсікачами; 5 – канали; 6 – нерухома пластина регулювального пристрою; 7 – рухома пластина регулювального пристрою; 8 – циліндричний повітровід; 9, 11 – повітряні клапани; 10 – тангенціально приєднаний повітровід

Якщо повітря подається одночасно конічною та вісесиметричною струминою, то при подальшому розвитку формується вісесиметрична струмина.

Розроблена конструкція повітророзподільного пристрою забезпечує можливість широкого регулювання аеродинамічних і теплових параметрів припливної струмини.

Діапазон коефіцієнтів зміни осьової швидкості й надлишкової температури $m = 0,8 \dots 6,8$; $n = 0,65 \dots 4,8$. Характерна площа A_0 , m^2 , змінюється в кілька разів залежно від діаметра, м, корпусу 1 і повітроводу 8. Отже, повітророзподільник забезпечує формування потрібних параметрів повітря в зонах обслуговування практично у всьому діапазоні регулювання D в системах змішувальної вентиляції.

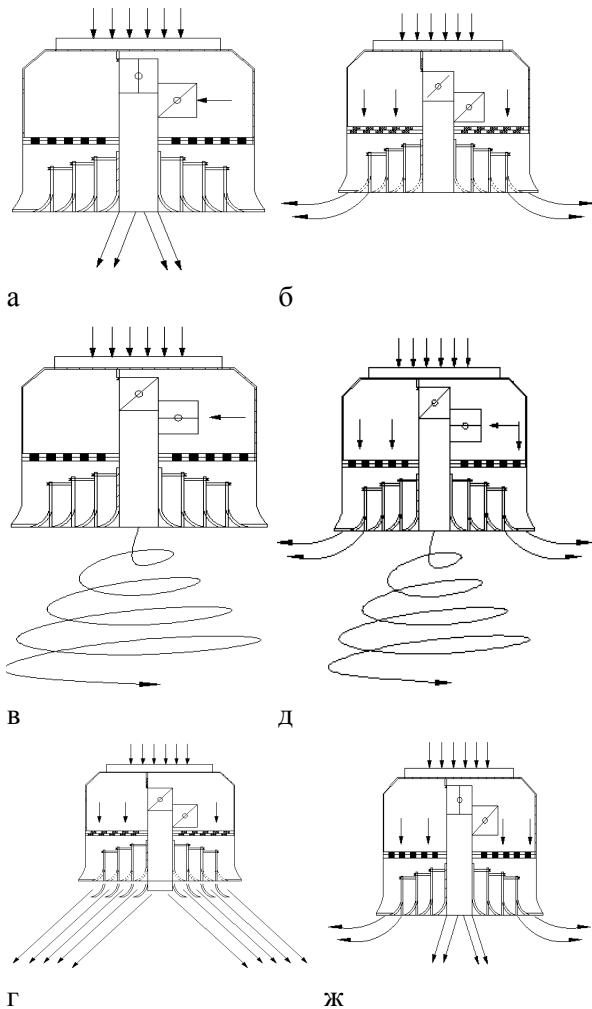


Рис. 4. Схема роботи повітророзподільника зі змінним типом струмин: а – подача вісесиметричної струмини; б – подача віялової струмини; в – подача закрученої струмини; г – подача конічної струмини; д – подача віялової і закрученої струмини; ж – подача віялової та вісесиметричної струмини

Таким чином, конструкцією забезпечується витікання потрібних типів струмин, зміна їхньої швидкості, м/с, і, отже, зміна витрати повітря, кг/год, при збереженні необхідних умов у робочій зоні (зонах обслуговування).

Розглянемо алгоритм регулювання параметра D методами аналітичної геометрії та геометричної теорії управління:

1. Відповідно до зміни температурно-вологісних параметрів повітряного середовища приміщення та кількості припливного повітря задаємо відносне значення глибини регулювання D ;
2. З використанням мультиплікативної формули (15) знаходимо суму параметрів, з яких складається \tilde{D} (10);
3. Отримуємо результатну формулу у вигляді суми відносних регулювань всіх чотирьох множників формули (17);
4. Після введення заміни x_1, x_2, x_3, x_4 визначає-

мо перелік регульованих параметрів. Параметри, що найменше впливають на глибину регулювання, приймаємо сталими (наприклад, $x_4 = 0$);

5. Отримуємо канонічне рівняння площини у відрізках для систем координат x_1, x_2, x_3 (21) або в координатах x_1, x_2 – рівняння прямої, тощо;
6. Будуємо в системі координат x_1, x_2, x_3 площину S регулювання параметра \tilde{D} (рис. 2). Будь яка точка $x_0 = (x_{01}, x_{02}, x_{03})$ з площини S ($x_0 \in S$) є комбінацією (зі своїми координатами) параметрів регулювання величини D .

Аналогічно виконуються розрахунки, коли геометричним образом регулювання є пряма або точка.

Приклад.

Ситуація 1. В приміщенні встановлено повітророзподільник зі змінним типом струмини. Глибина регулювання дорівнює $D_0 = 0,5$. За деякий проміжок часу збільшилися тепловологонадходження в приміщення, що вимагає відповідного повітрообміну і зменшення глибини регулювання до $D_{кинц} = 0,65$ (на 30%). У цьому випадку доцільно змінити два параметри x_1 та x_2 (коефіцієнти n та m), а параметр x_3 та x_4 залишити незмінними.

Тоді згідно з рівнянням (17) маємо:

$$\frac{0,15}{0,5} = 0,5 \cdot x_1 - 1 \cdot x_2 + 0,75 \cdot 0 - 0,5 \cdot 0. \quad (22)$$

Після спрощення рівняння (22) набуває вигляду

$$0,3 = 0,5 x_1 - 1 x_2. \quad (23)$$

З рівняння (23) визначаємо характерні значення x_1 і x_2 :

$$\begin{cases} \text{при } x_1=0 \ x_2=-0,3; \\ \text{при } x_2=0 \ x_1=0,6. \end{cases} \quad (24)$$

За точками (24) отримуємо графічну репрезентацію (рис. 5)

Для збільшення повітрообміну та, відповідно, зменшення глибини регулювання на 30%, шляхом зміни аеродинамічних і теплових параметрів струмини, необхідно отримати:

$$x_1 = \frac{\Delta n_1}{n_1} = 0,6 \Delta n_1 = 0,6 n_1, \quad (25)$$

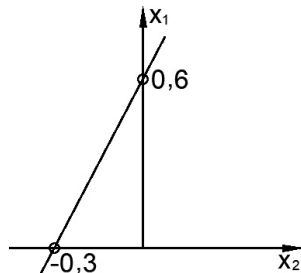


Рис. 5. Лінія регулювання

$$x_2 = \frac{\Delta m_1}{m_1} = -0,3 \Delta m_1 = -0,3 m_1. \quad (26)$$

За формулою (25) коефіцієнт зміни осьової надлишкової температури слід збільшити на 60 %, а коефіцієнт зміни осьової швидкості – зменшити на 30 %.

Ситуація 2. Необхідно збільшити глибину регулювання на 30 %, тобто на $0,3 D_0$. Тоді масмо:

$$\Delta D = D_{кінц} - D_0 = 0,7 D_0 - D_0 = -0,3 D_0. \quad (27)$$

З формул (18) і (27)

$$\tilde{D} = \frac{\Delta D}{D_0} = -0,3. \quad (28)$$

Приймаємо, згідно з рівняннями (14) і (15), $\alpha_1 = 0,5$; $\alpha_2 = -1$; $\alpha_3 = 0,75$. Рівняння площини регулювання набуває вигляду:

$$-0,3 = 0,5 x_1 - 1 x_2 + 0,75 x_3. \quad (29)$$

Перетворюємо рівняння (29) до канонічної форми:

$$\begin{aligned} 1 &= \frac{x_1}{\frac{-0,3}{0,5}} + \frac{x_2}{\frac{0,3}{1}} + \frac{x_3}{\frac{-0,3}{0,75}} = \\ &= \frac{x_1}{-0,6} + \frac{x_2}{0,3} + \frac{x_3}{-0,4}. \end{aligned} \quad (30)$$

Рівняння (30) відповідає площині регулювання на рис. 6. Щоб задовольнити рівняння (29) або (30) обираємо, наприклад, координати x_1 та x_2 (значення коефіцієнтів m і n для нової глибини регулювання):

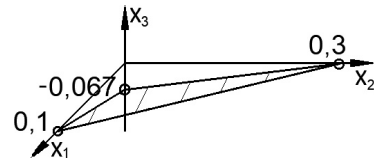


Рис. 6. Площина регулювання

$$\begin{cases} x_1 = \frac{\Delta a_1}{a_1} = 0,1; \\ x_2 = \frac{\Delta a_2}{a_2} = 0,3. \end{cases} \quad (31)$$

За формулами (30) і (31) знаходимо x_3 :

$$x_3 = -0,4 \cdot \left(1 - \frac{x_1}{-0,6} - \frac{x_2}{0,3} \right) = -\frac{1}{15} \approx -0,067.$$

Таким чином, зменшення величини D на 30 % досягається при зменшенні коефіцієнта осьової надлишкової температури n , збільшенні коефіцієнта осьової швидкості m та зменшенні характерної площі повітророзподільника.

Висновки. На глибину регулювання повітророзподільників при вентиляції зі змінною витратою повітря впливають коефіцієнти зміни осьової швидкості та надлишкової температури, критичне значення критерію Архімеда та характерна площа повітророзподільного пристрою. Збільшення глибини регулювання відбувається при збільшенні коефіцієнта зміни осьової швидкості й критичного значення критерію Архімеда та при зменшенні коефіцієнта зміни осьової надлишкової температури і характерної площі повітророзподільного пристрою. Потрібна глибина регулювання в системах змішувальної вентиляції ефективно досягається розробленим універсальним повітророзподільним пристроєм зі змінним типом припливної струмини, який дозволяє підтримувати розрахункову схему циркуляції повітряних потоків у приміщенні. На основі геометричної теорії управління запропонована метод вибору режимів роботи повітророзподільників зі змінним типом струминних течій при кількісному регулюванні системи кондиціонування повітря та забезпечує підтримання нормованих параметрів повітряного середовища, як в окремих зонах, так і в приміщенні в цілому.

Література

1. Гримитлин М. И. Вентиляция и отопление цехов машиностроительных заводов / М. И. Гримитлин, О. Н. Тимофеева, В. М. Эльтерман и др. – Москва: Машиностроение. – 1978. – 272 с.
2. Позин Г. М. О точности определения коэффициента воздухообмена / Г. М. Позин // Вестник МГСУ. – 2011. – №7. – С.319-325.
3. Посохин В. Н. Воздухораспределитель с изменяемой геометрией / В. Н. Посохин // СОК. – 2014. – №4.
4. Авторское свидетельство СССР №1333988. Воздухораспределитель / Осипов С.И., Куновский В.И. – Б.И. №32 от 30.08.87.
5. Авторское свидетельство СССР №1725033. Воздухораспределитель / Новосельцев Б.П. – Б.И. №13 от 07.04.92.
6. Гримитлин М. И. Распределение воздуха в помещениях / М. И. Гримитлин. – Санкт-Петербург: АВОК Северо-запад. – 2004. – 320 с.
7. Гримитлин М.И. Основы распределения приточного воздуха в вентилируемых и кондиционируемых помещениях / М. И. Гримитлин // Научные проблемы охраны труда на современном этапе технического прогресса. – 1977. – С. 22- 42.
8. Сотников А.Г. Системы кондиционирования с количественным регулированием / А.Г. Сотников. – Ленинград: Стройиздат. – 1976. – 168 с.
9. Пат. 120507 Україна МПК(2006.01) F24F 13/06, F24F 13/062, F24F 13/08, F24F 13/10. Повітророзподільник / Дудніков О. А. Довгалюк В. Б., Ситницька А. К. – № а201608907; заявл. 18.08.2016; опублік. 26.12.2019 бюл. №24. – 5 с.
10. Пат. 73805 Україна МПК(2012.01) A23K 1/00, A23K 1/18 (2006/01). Повітророзподільник / Кібеко О. М., Шенгелевич В. І., Довгалюк В. Б., Мілейковський В. О. – № u201203162; заявл. 19.03.2012; опублік. 10.10.2012 бюл. №19. – 6 с.
11. Пат. 94084 Україна МПК, F24F 13/06(2006.01). Повітророзподільник / Клименко Г. М., Мілейковський В. О., Довгалюк В. Б., Возняк О. Т. – № u201405689; заявл. 25.05.2014; опублік. 10.10.2012 бюл. №20. – 5 с.
12. Пат. 92961 Україна МПК (2006.01), F24F 13/06. Повітророзподільник / Гусев А. О., Довгалюк В. Б., Мілейковський В. О. – № а200902422; заявл. 18.03.2009; опублік. 27.12.2010 бюл. №24. – 5 с.
13. Бутковский А.Г. Методы управления с распределенными параметрами / А.Г. Бутковский. – Москва: Наука. – 1975. – 568 с.
14. Бабичев А.В. К единой геометрической теории управления / А.В. Бабичев, А.Г. Бутковский, Похьялайнен Сеппо. – Москва: Наука. – 2001. – 352 с.
15. Міхайленко В.М. Курс алгебри та аналітичної геометрії: навч. посіб. для студ. немат. спец. вищ. навч. закл. / В. М. Міхайленко, О. О. Кубайчук. – Київ: Університет "Україна". – 2013. – 180 с.

References

1. Grititlin M.I., Timofeeva. O.N., Elterman V.M. i dr. *Ventilyatsiia i otoplenie tsekhov mashinostroitelnykh zavodov*. Mashinostroenie, 1978.
2. Pozin G.M. "O tochnosti opredeleniia koeffitsienta vozdukhoobmena." *Vestnik MGSU*. 2011. №7. P.319-325.
3. Posokhin V.N. "Vozdukhoraspredelitel s izmeniaemoi geometriei." *SOK*. 2014 №4.
4. Osipov S.I., Kunovskij V.I. "Vozdukhoraspredelitel ." *Avtorskoe svidetelstvo SSSR 1333988*. 30.08.87.
5. Novoseltsev B.P. "Vozdukhoraspredelitel ." *Avtorskoe svidetelstvo SSSR 1725033*. 07.04.92.
6. Grititlin M.I. *Raspredelenie vozdukh v pomeshcheniakh*. AVOK Severo-zapad. 2004.
7. Grititlin M.I. "Osnovy raspredeleniia pritochnogo vozdukh v ventiliruemykh i konditsioniruemykh pomeshcheniakh." *Nauchnye problemy okhrany truda na sovremennom etape tekhnicheskogo progressa*. 1977. P. 22-42.
8. Sotnikov A.G. *Sistemy` konditsionirovaniia s kolichestvennym regulirovaniem*. Strojizdat, 1976.
9. Dudnikov O.A., Dovhaliuk V. B., Sytnytska A. K. "Povitorozpodilnyk." Patent of Ukraine 120507. 26.12.2019.
10. Kibieko O. M., Shenhelevych V. I., Dovhaliuk V. B., Mileikovskiy V. O. "Povitorozpodilnyk." Patent of Ukraine 73805. 10.10.2012.
11. Klymenko H. M., Mileikovskiy V. O., Dovhaliuk V. B., Vozniak O. T. "Povitorozpodilnyk." Patent of Ukraine 94084. 27.10.2014.
12. Husiev A. O., Dovhaliuk V. B., Mileikovskiy V. O. "Povitorozpodilnyk." Patent of Ukraine 92961. 27.12.2010.
13. Butkovskii A.G. *Metody upravleniia s raspredelennymi parametrami*. Nauka, 1975.
14. Babichev A.V., Butkovskii A.G., Pokholainen Seppo. *K edinoi geometricheskoi teorii upravleniia*. Nauka. 2001.
15. Mikhailenko V.M., Kubaichuk O.O. *Kurs alhebry ta analitychnoi heometrii: navch. posib. dlia stud. nemat. spets. vyshch. navch. zakl.* Universytet "Ukraina". 2013.

УДК 628.87:697.92

Энергоэффективные технологии организации воздухораспределения в музеях разного назначения при сменном режиме тепловлагодоступлений

В. Б. Довгалюк¹, Ю. В. Човнюк², О. М. Скляренко³, А. К. Ситницкая⁴

¹к.т.н., проф. Киевский национальный университет строительства и архитектуры, г. Киев, Украина, 2280170@ukr.net, ORCID: 0000-0002-4836-5354

²к.т.н., проф. Национальный университет биоресурсов и природопользования Украины, г. Киев, Украина, uchovnyuk@ukr.net

³к.т.н., проф. Киевский национальный университет строительства и архитектуры, г. Киев, Украина

⁴асп. Киевский национальный университет строительства и архитектуры, г. Киев, Украина, sit_ann@ukr.net, ORCID: 0000-0003-1074-5762

Аннотация. Рассмотрены вопросы формирования микроклимата музейных помещений. Эффективное формирование микроклимата требует переменного воздухообмена помещений. В этих условиях к системам воздухораспределения предъявляются высокие требования не нарушения схемы циркуляции воздуха в помещении. Рассмотрены конструкции воздухораспределителей с переменным расходом, их преимущества и недостатки. Форма оси приточной неизотермической струи зависит от начального критерия Ар₀, характерной площади воздухораспределителя, коэффициентов изменения осевой скорости m и избыточной температуры n . По этим параметрам определяется минимально возможная глубина регулирования (отношение текущей нагрузки $G_{пн}$, кг/ч, к максимальному расчётному расходу G_{max} , кг/ч) воздухообмена в системе воздухораспределения при условии обеспечения расчётной схемы циркуляции воздушных потоков в помещении. На основании методов аналитической геометрии и геометрической теории управления предложен алгоритм определения режима работы воздухораспределителя в зависимости от потребностей помещения. Определены коэффициенты влияния каждого из перечисленных влияющих параметров. Наглядно показано как по полученным данным выбрать конкретные действия и соответствующий геометрический образ регулирования. Предложено воздухораспределительное устройство, которое позволяет расширить минимально возможную глубину регулирования воздухораспределителя до 0,1.

Ключевые слова: микроклимат, глубина регулирования, критерий Архимеда, неизотермическая струя.

UDC 628.87:697.92

Energy Efficient Technologies of Organization of Air-Distribution in Museums of Different Purpose in Variable Modes of Heat and Moisture Gains

V. Dovhaliuk¹, Y. Chovniuk², O. Skliarenko³, A. Sytnytska⁴

¹PhD, professor. Kyiv National University of Construction and Architecture, Kyiv, Ukraine, 2280170@ukr.net, ORCID: 0000-0002-4836-5354

²PhD, professor. National University of Life and Environmental Sciences of Ukraine, Kyiv, Ukraine, uchovnyuk@ukr.net

³PhD, professor. Kyiv National University of Construction and Architecture, Kyiv, Ukraine

⁴Post-graduate student. Kyiv National University of Construction and Architecture, Kyiv, Ukraine, sit_ann@ukr.net, ORCID: 0000-0003-1074-5762

Abstract. The issues of forming the microclimate of museum rooms are considered. Effective microclimate formation requires variable air exchange in the rooms. In these conditions, high demands are placed on the air distribution systems without violating the scheme of air circulation in the room. The design of variable-flow air diffusers, their advantages and disadvantages are considered. The shape of the axis of the supply non-isothermal jet depends on the initial Archimedes criterion Ar_0 , the characteristic area of the air distributor, the coefficients of the axial velocity m and the excess temperature n . These parameters determine the minimum possible depth of regulation (the ratio of the current load G_{pi} [kg/h] to the maximum estimated flow rate G_{max} [kg/h]) of the air exchange in the air distribution system, provided that a design scheme for the circulation of air flows in the room is provided. Based on the methods of analytical geometry and geometric control theory, an algorithm is proposed for determining the operating mode of the air distributor depending on the needs of the room. The coefficients of influence of each of the listed influencing parameters are determined. The most influencing factor is the coefficient of change of axial velocity m . The second influencing factor is the characteristic area A_0 , m^2 . Other factors

have the same influence. It is clearly shown how to select specific actions and the corresponding geometric way of regulation from the data obtained. An air distribution device is proposed that allows to expand the minimum possible depth of regulation of the air distribution to 0.1. The device can distribute the inlet air by a compact, twisted and harp or conical jet. In addition, it can distribute air by two different types of jet simultaneously. Movement of the parts of the device is performed automatically by actuating mechanisms dependent on the current requirements of the room.

Keywords: microclimate, depth of regulation, Archimedes criterion, non-isothermal jet.

Надійшла до редакції / Received 18.03.2019