

УДК 697.922.565; 697.921.47

DOI: 10.15587/1729-4061.2017.96774

Вирішено актуальну задачу підвищення ефективності повітророзподілу взаємодією зустрічних неспіввісних струмин для забезпечення нормативних параметрів повітря у приміщеннях. Показано, що для досягнення максимальної ефективності повітророзподілу необхідно подавати повітря струминами, що інтенсивно затухають ще до входу в робочу зону. Показано економічну ефективність використання повітророзподільника порівняно з альтернативними варіантами, наведено питомі показники ефективності повітророзподілу

Ключові слова: повітророзподіл, зустрічні неспіввісні плоскі струмини, швидкість, надлишкова температура, змінний режим

Решена актуальная задача повышения эффективности воздухораспределения взаимодействием встречных несоосных струй для обеспечения нормируемых параметров воздуха в производственных помещениях. Показано, что для достижения максимальной эффективности воздухораспределения необходимо подавать воздух струями, интенсивно затухающими еще до входа в рабочую зону. Показана экономическая эффективность использования воздухораспределителя в сравнении с альтернативными вариантами, приведены удельные показатели эффективности воздухораспределения

Ключевые слова: воздухораспределение, встречные несоосные плоские струи, скорость, избыточная температура, переменный режим

ДОСЛІДЖЕННЯ ПРИСТРОЮ ДЛЯ ПОВІТРОРОЗПОДІЛУ ВЗАЄМОДІЄЮ ЗУСТРІЧНИХ НЕСПІВВІСНИХ СТРУМИН У ЗМІННОМУ РЕЖИМІ

В. П. Корбут

Доктор технічних наук, професор
Кафедра теплогазопостачання і вентиляції
Київський національний університет
будівництва і архітектури
пр. Повітрофлотський, 31, м. Київ, Україна, 03037
E-mail: predsedatel@emv.kiev.ua

О. Т. Возняк

Кандидат технічних наук, доцент*
E-mail: orest.voznyak@i.ua

Х. В. Миронюк

Кандидат технічних наук, доцент*
E-mail: kristim81@ukr.net

І. Є. Сухолова

Кандидат технічних наук, асистент*
E-mail: isukholova@gmail.com

П. Капало

Кандидат технічних наук, інженер
Кафедра технічного обладнання будівель
Кошицький технічний університет
вул. Високошкольська, 4, м. Кошице, Словаччина, 04200
E-mail: peter.kapalo@tuke.sk

*Кафедра теплогазопостачання і вентиляції
Національний університет «Львівська політехніка»
вул. С. Бандери, 12, м. Львів, Україна, 79013

1. Вступ

Сучасний розвиток суспільства пов'язаний з потребами покращення санітарно-гігієнічних умов у виробничих та невиробничих приміщеннях, а також економії матеріальних і паливно-енергетичних ресурсів. Сьогодні в Україні успішно розвиваються такі галузі промисловості як текстильне виробництво, мікроелектроніка, комп'ютерні технології, виробництво нових матеріалів, інструментів, ювелірне виробництво тощо. В обслуговуваній зоні цих виробничих приміщеннях підтримання нормованих параметрів повітря у значній мірі залежить від організації повітророзподілу. Умови праці, ефективність та надійність роботи устаткування значною мірою залежить від умов повітряного середовища виробничо-технологічних приміщень, які повинні забезпечуватися системами вентиляції.

У приміщеннях невеликого об'єму з розсередженими джерелами шкідливостей, незначними тепловими

надлишками і фіксованими робочими місцями, вирішення цієї задачі ускладнюється через обмежені відстані до робочої зони при подачі повітря вертикальними струминами. У зв'язку з цим виникає необхідність розроблення нових конструктивних вирішень повітророзподілення, які забезпечили б одночасно створення необхідного мікроклімату та економію матеріальних і енергетичних ресурсів. Недостатньо вивченим і, як наслідок, мало застосовуваним є питання інтенсифікації затухання параметрів повітряного потоку завдяки взаємодії зустрічних струмин [1, 2].

Одним із заходів у вирішенні цього питання є застосування повітророзподільника, з якого витікає повітряний потік, утворений внаслідок взаємодії зустрічних неспіввісних струмин. При цьому забезпечується достатньо великий повітрообмін при дотриманні нормованих швидкостей руху повітря в обслуговуваній зоні. Таким чином, підвищення ефективності повітророзподілу зустрічними неспіввісними струминами є надзвичайно актуальною задачею.

При виборі способу розподілу повітря слід враховувати специфіку приміщення, його призначення та конструктивні особливості, розташування і розміри джерел теплоти, вологи та шкідливих газів, рівень вимог для підтримання розрахункових параметрів мікроклімату [2, 3]. В Україні широко розвивається мале виробництво. Зазвичай це виробничі приміщення без чітких вимог технологічного процесу щодо підтримання певних параметрів мікроклімату, з обмеженим простором для розвитку припливних струмин і з фіксованими робочими місцями. Для підтримання повітряного балансу в таких приміщеннях необхідно подавати великі кількості повітря [4]. Основне завдання на виробництвах такого типу полягає у забезпеченні нормованих параметрів повітря у робочій зоні та створенні комфортних умов для працівників. При цьому важливим питанням є енергоефективність запропонованого рішення. Вагомим фактором, який потрібно враховувати при вентиляванні приміщень такого типу, є інтенсивність затухання швидкості і температури припливного повітряного потоку. Отже, виникає необхідність у створенні нових конструктивних рішень повітророзподільників, які забезпечили б необхідний мікроклімат у робочій зоні [5–7].

Одним із способів вирішень цього питання є застосування повітророзподільника для забезпечення змінного режиму, який подає два повітряні потоки, кожен з яких характеризується швидким перемішуванням припливного повітря із оточуючим. Такими потоками є: неспіввісні припливні струмини, які рухаються назустріч одна одній та надходять у робочу зону результируючим потоком з нормованими параметрами завдяки швидкому затухання швидкості і температури [8].

2. Аналіз літературних даних та постановка проблеми

Однією з найбільш складних та актуальних проблем сучасного будівництва є забезпечення якості повітря в приміщеннях будівель. Люди, що знаходяться в цивільних і промислових приміщеннях, а також технологічні процеси в промислових цехах потребують підтримання в них необхідних метеорологічних умов – певного мікроклімату. Огороджувальні конструкції будівель захищають приміщення від безпосередніх атмосферних впливів, але тільки зовнішнього захисту недостатньо, щоб протягом року підтримувати необхідні умови всередині приміщень. Необхідні умови створюються за допомогою систем опалення, вентиляції і кондиціонування повітря або, як в загальному можна їх назвати, систем кондиціонування мікроклімату. У закритих приміщеннях створюються різні умови щодо температури і вологості залежно від їх призначення [2, 8].

Організм людини має систему терморегуляції і пристосовується до деяких змін кліматичних умов. Але ця властивість організму обмежена і тому метеорологічні параметри в приміщенні повинні досить стійко підтримуватись системами опалення, вентиляції та кондиціонування повітря на потрібному рівні.

Знання допустимих границь коливань температури, вологості і рухомості повітря дозволяє регламентувати використання тих чи інших видів СКП.

Завдяки автоматичній терморегуляції організму людина пристосовується до зміни параметрів навколишнього повітря. Але ця терморегуляція ефективна лише за повільних і малих відхилень параметрів від нормальних, необхідних для хорошого самопочуття. За великих і швидких відхилень параметрів повітряного середовища порушуються фізіологічні функції організму: терморегуляція, обмін речовин, робота серцево-судинної і нервової систем і т. д. При цьому можуть спостерігатись і серйозні відхилення в організмі людини [9, 10].

Задача кондиціонування повітря полягає в підтриманні комфортних для людини параметрів повітряного середовища.

Принцип роботи систем зі змінною витратою полягає у використанні витрати повітря в системі чи її частині як керуючого впливу з метою раціонального використання капіталовкладень і енергозатрат [10].

Змінність витрати повітря в системі є найбільш важливою і суттєвою ознакою систем зі змінною витратою. Мабуть, жоден інший параметр так не змінює систему, умови її проектування і роботи. Поряд з термодинамічними параметрами стану, витрата повітря є вихідною величиною для розрахунку процесів і вибору обладнання. Таким чином, традиційні системи з постійною продуктивністю є частковим випадком порівняно зі системами зі змінною витратою [8, 9].

Дослідження в приміщеннях як громадських, так і промислових будинків свідчать про те, що на тепловідчуття людини сприятливо впливають саме змінні подразники. Змінний режим витікання припливних струмин означає створення динамічного мікроклімату і на терморегуляції організму людини відображається позитивно [10].

Коротка характеристика змінного температурного режиму і області його застосування зводяться до такого: у виробничо-технологічних приміщеннях для підвищення “тренованості” апарату терморегуляції, покращення самопочуття і зниження втомлюваності працюючих, особливо при монотонному характері роботи, гігієнічно обґрунтовано змінювати один з параметрів, наприклад температуру чи швидкість руху повітря, тобто створювати змінний температурний режим.

Технічне забезпечення змінного температурного режиму пов'язане з застосуванням спеціальних систем кондиціонування повітря і вентиляції. В приміщенні необхідно стабілізувати середню температуру $t_{в,ср}$ при змінному тепловому навантаженні, середню відносну вологість (чи вологовміст) при змінному вологісному навантаженні, а крім того, генерувати температурні коливання припливного повітря, при яких будуть забезпечуватись бажані амплітуда і період температурних коливань в приміщенні [6, 5].

Проведений аналіз показав, що при змінному тепловому навантаженні середнє значення температури $t_{в,ср}$ доцільно стабілізувати зміною витрати повітря, що подається в приміщення. Оскільки теплове навантаження при змінному режимі зменшується порівняно з розрахунковим значенням, відповідно зменшуються затрати тепла, холоду і електроенергії порівняно зі системами постійної продуктивності. При використанні змінної витрати повітря її слід під час одного з півперіодів зменшувати, а під час другого – збіль-

шувати, зберігаючи при цьому приблизно постійне значення [9].

Вибір конструкції повітророзподільних пристроїв та організація повітророзподілу відіграє важливу роль при забезпеченні необхідного і комфортного мікроклімату у приміщеннях різного призначення. При виборі конструкції повітророзподільника важливим є вивчення структури і характеристик турбулентних вентиляційних струменів [2]. У теплонпружених приміщеннях доцільним є використання повітророзподільників, які використовують взаємодію струмин, що насталяються на різні плоскі та опуклі поверхні. Припливні струмини взаємодіють з конвективними потоками та іншими потоками повітря у приміщенні, що необхідно враховувати при побудові ефективних схем організації повітрообміну такого типу приміщень [11]. У виробничих приміщеннях з монотонним характером роботи сталі параметри мікроклімату підвищують втомлюваність працівників і негативно відображаються на продуктивності їх праці. Одним із найбільш ефективних методів вирішення даної проблеми є створення змінних у часі параметрів, зокрема швидкості руху повітря і температури в робочій зоні виробничого приміщення [2, 3, 10].

З метою визначення переваг і недоліків способів подачі припливного повітря та існуючих повітророзподільників, був здійснений їх аналіз [2]. Вихрові повітророзподільники (рис. 1, а) формують на виході закручену віялову струмину, що забезпечує ефективне перемішування струмини з повітрям приміщення, а отже, швидке вирівнювання температури і швидкості в струмині при низькому рівні шуму. Повітророзподільники можуть працювати як в системах з постійною витратою, так і змінною, що даватиме можливість забезпечувати змінний мікроклімат у приміщенні. Проте недоліком даних повітророзподільників є фіксовані лопаті, кут нахилу яких неможливо змінювати в залежності від пори року, що в певні моменти не забезпечуватиме необхідні параметри у приміщенні.

Вихрові регульовані повітророзподільники (рис. 1, б, в) [2] мають рухомі лопаті, якими можна управляти в ручному режимі або за допомогою електроприводу чи термостату. Тобто дані повітророзподільники можна використовувати у приміщеннях зі змінним тепловим режимом. Тобто у випадку коли через самий повітророзподільник можна подавати холодне повітря у теплий період року і нагріте у холодний період року. Також можна подавати припливне повітря при досить великих значеннях робочих різниць температур. На виході з даних повітророзподільників утворюється закручена струмина, тому забезпечується ефективне перемішування при обмеженій далекобійності.

При використанні панельних повітророзподільників (рис. 1, г-е) розподіл охолодженого повітря через повітророзподільники з перфорованою панеллю

застосовують у невисоких приміщеннях (до 4 м) для створення малих швидкостей повітря у робочій зоні і рівномірного поля температури і швидкості при великих витратах повітря в приміщенні. Повітророзподільник з перфорованою панеллю, призначений для подачі повітря у приміщення висотою від 2,6 до 4 м, призначений для встановлення у підвісній стелі. Повітря розподіляється через щілини у горизонтальному напрямку, при цьому формується настільна віялова струмина, і через перфоровану лицеву панель у вертикальному, формуючи конічну струмину. Повітря, що проходить через перфоровану лицеву панель, змішується з повітрям приміщення на виході із повітророзподільника. Струмини припливного повітря, що виходять із щілин, ежектують цю суміш, що сприяє рівномірному розподілу припливного повітря у приміщенні. Так утворюється комбінований повітряний потік для розподілу великих об'ємів припливного повітря. Панельні повітророзподільники, що формують закручену конічну струмину використовують для подачі повітря з висоти 3–5 м. Завдяки закручуванню припливної струмини відбувається інтенсивне перемішування повітря у приміщенні, швидка зміна параметрів струмини. Вихровий режим руху повітря формується нерухомими направляючими елементами, що складають єдине ціле з панеллю повітророзподільника. Також можливе встановлення в панелі пластикових направляючих, які забезпечують зміну напрямку подачі повітря і закручування струмини [2, 8].

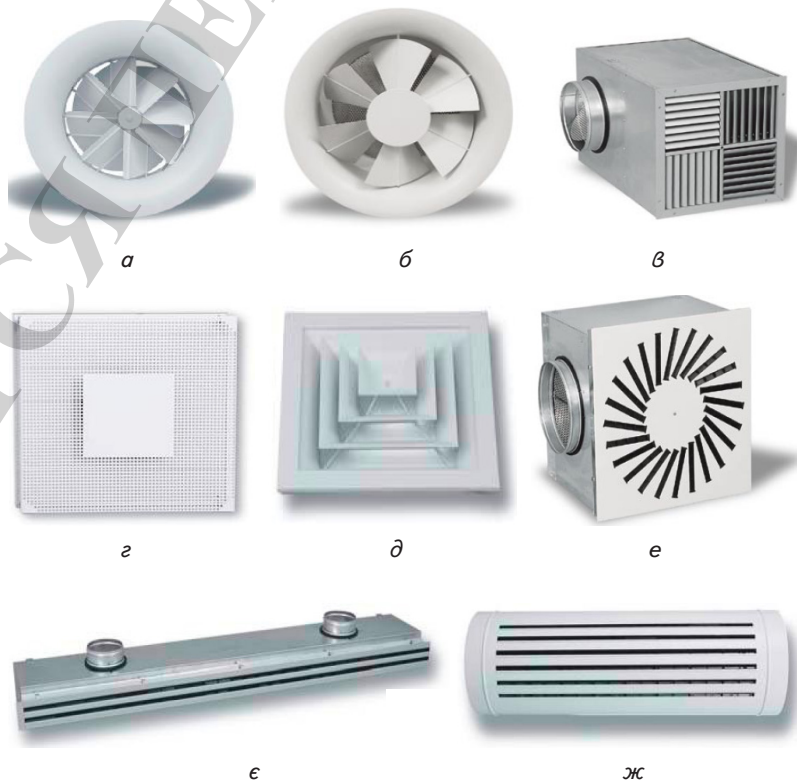


Рис. 1. Повітророзподільники для подачі повітря закрученими і настільними струминами: а – вихрові повітророзподільники; б, в – вихрові регульовані повітророзподільники; г, д, е – панельні повітророзподільники; є, ж – щілинні повітророзподільники

Щілинні повітророзподільники (рис. 1, є, ж) можуть використовуватись в системах вентиляції і кондиціонування з постійною і змінною витратою пові-

тря. В конструкції повітророзподільника передбачена можливість зміни напрямку подачі повітря в залежності від пори року. Щілинні повітророзподільники формують плоску струмину, для якої є характерною висока степінь ежекції навколишнього повітря і швидке затухання температури повітря у струміні. При подачі охолодженого повітря формується плоска горизонтальна струмина, що настається на стелю, при подачі нагрітого повітря формується плоска вертикальна струмина.

Провівши огляд повітророзподільників, констатуємо доцільність застосування у виробничих приміщеннях повітророзподільника із взаємодією зустрічних неспіввісних струмин, який подасть необхідну кількість повітря у робочу зону та забезпечить змінні параметри мікроклімату та динамічний мікроклімат.

3. Ціль та задачі дослідження

Метою роботи є наукове обґрунтування повітророзподілу із взаємодією зустрічних неспіввісних струмин у змінному режимі за умови забезпечення комфортних умов у робочій зоні виробничого приміщення.

Для досягнення поставленої мети потрібно виконати такі завдання:

- розробити повітророзподільники із взаємодією зустрічних неспіввісних струмин з подачею повітря в стаціонарному та змінному режимі з можливістю регулювання витрати повітря у розподільних повітропроводах, а також їх методи їх розрахунку;

- експериментально дослідити запропоновані нові повітророзподільні пристрої, які можуть подавати повітря у виробничі приміщення в стаціонарному і пульсуючому режимах;

- розробити математичну модель процесу взаємодії зустрічних неспіввісних струмин та визначити параметри результуючого повітряного потоку залежно від геометричних характеристик пристрою;

- вдосконалити інженерну методику для розрахунку основних параметрів мікроклімату в приміщенні та характеристик повітророзподільного пристрою.

4. Матеріали та методи дослідження повітророзподілу взаємодією зустрічних неспіввісних струмин у змінному режимі

4.1. Конструкція пристрою для повітророзподілу взаємодією зустрічних неспіввісних струмин у змінному режимі

Розроблено конструкцію повітророзподільника із взаємодією зустрічних неспіввісних плоских струмин і захищено патентом України (рис. 2) [12].

Крім того, авторами розроблено натурну модель запропонованого повітророзподільника для створення динамічного мікроклімату в приміщенні за допомогою вмонтованого електроприводу Belimo LM24A (Швейцарія). Це дає можливість змінювати витрату повітря в опозитних повітропроводах повітророзподільника, а отже, і подавати припливне повітря в необхідному напрямку залежно від необхідних параметрів. Таким чином забезпечується змінний режим у робочій зоні.

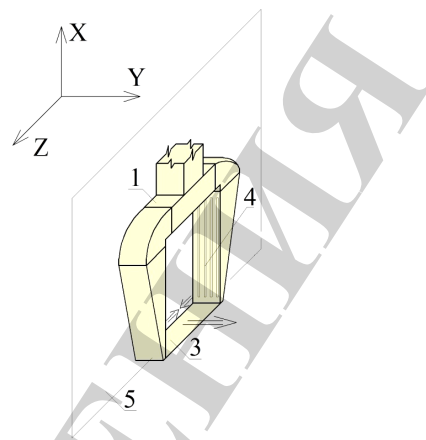


Рис. 2. Повітророзподільник із взаємодією зустрічних неспіввісних плоских струмин: 1 – повітропровід; 2 – конструктивна частина повітророзподільника; 3 – конструктивна частина повітророзподільника; 4 – припливні щілини $b_0=20$ мм; 5 – основа

На основі запропонованої конструкції повітророзподільника для забезпечення змінного режиму у робочій зоні запропоновано систему із трьох таких пристроїв. Приєднання електроприводу, який керується від блоку автоматики, дає можливість плавно розподіляти загальну витрату повітря у повітропроводі між трьома повітророзподільниками. Витрата припливного повітря через повітророзподільники змінюється плавно, період задається блоком автоматики, створюючи таким чином змінний мікроклімат у робочій зоні, що дає можливість покращити санітарно-гігієнічні умови у приміщенні.

4.2. Аналітичні дослідження повітророзподілу взаємодією зустрічних неспіввісних струмин у змінному режимі

На формування повітряного середовища приміщення впливає кінетична енергія припливних струмин, що міститься у великомасштабних вихорах припливних і конвективних струмин. Вони розділяються на менші, перетворюючи кінетичну енергію в теплоту. Турбулентне перенесення енергії та речовини зумовлюють розподіл шкідливостей, температур та швидкостей по всій площі та об'єму приміщення.

Величина питомої кінетичної енергії E , яка вноситься струминою за одиницю часу, віднесена до маси повітря в об'ємі приміщення:

$$E = \frac{Gv^2}{2V}, \quad (1)$$

де G – масова витрата повітря, кг/с; v – швидкість повітря, м/с; V , m^3 та F , m^2 – відповідно об'єм та площа приміщення.

Розглянемо витікання повітря із щілини (рис. 3). У поперечному перерізі плоскої припливної струмини у повітропроводі значення питомої кінетичної енергії для різних точок різними у зв'язку з нерівномірністю швидкостей виходу повітря. На початку щілини вектор швидкості потоку та повздовжня вісь каналу OZ майже паралельні, а в кінці каналу напрямок швидкості перпендикулярний до цієї осі.

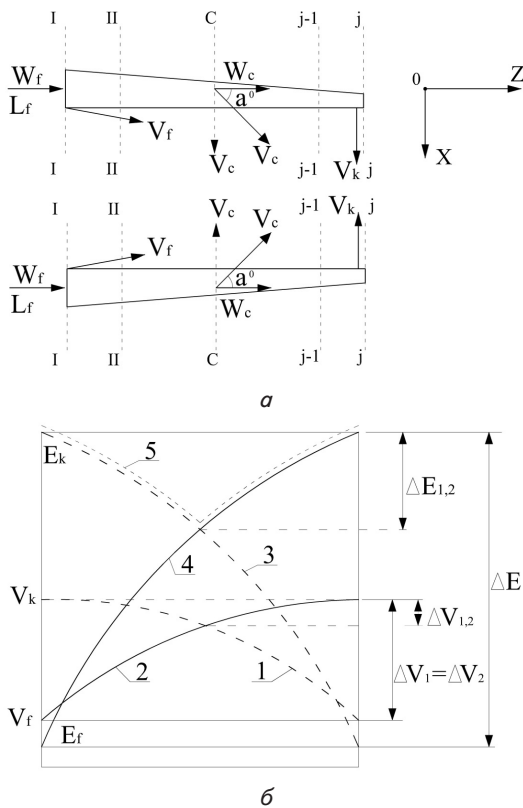


Рис. 3. Зміна швидкості та питомої кінетичної енергії по довжині щілин при витіканні зустрічних струмин, які взаємодіють: а – зміна швидкості; б – зміна питомої кінетичної енергії

Рівномірний розподіл кінетичної енергії в приміщенні можливий, коли алгебраїчна сума питомої енергії $E_{н.с}$ складових припливних струмин в робочій зоні буде постійною:

$$\Sigma E'_{н.с} = \Sigma E''_{н.с} = \dots = \Sigma E^{i-1}_{н.с} < \Sigma E^i_{н.с}. \quad (2)$$

Виділимо узагальнений характерний переріз С-С (рис. 3, а). Швидкість виходу v_k (рис. 3, б) з обох розподільних повітропроводів, які виконані у вигляді повітропроводів рівномірної роздачі, є максимальною до площини зіткнення зустрічних плоских струмин. При зіткненні відбувається затухання параметрів струмин і швидкість їх руху зменшується. Криві 3 та 4 енергії струмини (рис. 3, б) аналогічні кривим 1 та 2 зміни швидкостей, проте характеризуються значною стрімкістю. Можна припустити, що крива 5 питомої енергії результуючої потоку буде змінюватися більш плавно.

Додаючи величини питомих енергій $E_{н.с}$ у відповідних перерізах, одержимо сумарну енергію потоку з близьким до рівномірного розподіленням (рис. 3, б):

$$(E_1 + E_2)'_{н.с} = (E_1 + E_2)''_{н.с} = \dots = (E_1 + E_2)^{i-1}_{н.с} = (E_1 + E_2)^i_{н.с}. \quad (3)$$

При запропонованій схемі взаємодії струмин утворюється результуючий припливний потік з новими аеродинамічними характеристиками. Різний напрям швидкостей двох струмин, що взаємодіють, інтенсифікує переміщення повітря із взаємним погашенням їх початкової енергії (рис. 3, б) [2, 8].

Той факт, що осі струмин у вертикальній площині не співпадають, дозволяє максимально використати ефект їхньої взаємодії з метою перетворення пари обертань складових потоку в поступальних рух.

Як видно з рис. 4, абсолютна швидкість точки M не залежить від її положення. Отже, швидкості v всіх точок площини зіткнення неспіввісних струмин в будь-який момент часу геометрично дорівнюють одна одній. Це означає, що результуючий рух будь-якої точки цієї площини буде поступальним (рис. 4), зміниться напрям його руху на взаємно перпендикулярний. Такий характер руху повітряного потоку позитивно впливатиме на розподіл швидкостей в робочій зоні приміщення і забезпечуватиме нормовані швидкості руху повітря.

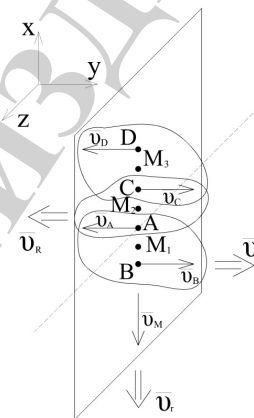


Рис. 4. Вектор \vec{v}_p швидкості (поступальний рух) результуючого повітряного потоку як результат взаємодії зустрічних неспіввісних плоских струмин (пара обертань) із швидкостями \vec{v}_a і \vec{v}_b

Належна інтенсифікація затухання швидкості повітряного потоку досягається при використанні ефекту взаємодії струмин. Розглянемо їх співударяння під деяким кутом α (рис. 5). Для оцінки ефекту такої взаємодії потоків було прийнято припущення: течія є усталеною; струмини, які взаємодіють, є слабко неізоентермічними; напрям результуючого потоку визначається діагоналлю паралелограма, побудованого на векторах кількості руху $m_1 v_1$ і $m_2 v_2$.

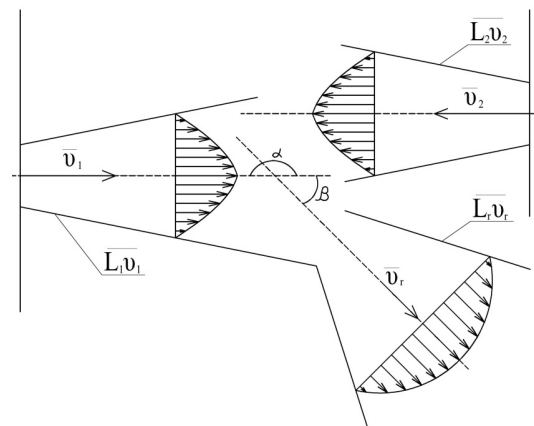


Рис. 5. Схема співударяння зустрічних неспіввісних струмин

За законом збереження імпульсу:

$$\overline{m_1 v_1} + \overline{m_2 v_2} = \overline{m_p v_p}, \quad (4)$$

Виконуючи почленне ділення на час t і густину ρ та використовуючи теорему косинусів, переходимо до скалярних величин:

$$\begin{aligned} (L_p \times v_p)^2 &= (L_1 \times v_1)^2 + (L_2 \times v_2)^2 - \\ &- 2 \times (L_1 \times v_1) \times (L_2 \times v_2) \times \cos \alpha. \end{aligned} \quad (5)$$

З урахуванням $L_p = L_1 + L_2$, знаходимо результуючу початкову швидкість v_p :

$$v_p = \frac{\sqrt{(L_1 \times v_1)^2 + (L_2 \times v_2)^2 + 2 \times (L_1 \times v_1) \times (L_2 \times v_2) \cos \alpha}}{L_1 + L_2}, \quad (6)$$

де $L_1, L_2, m^3/c$ і $v_1, v_2, m/c$ – відповідно витрата і середня швидкість повітряних струмин, що витікають, до їх взаємодії, а v_p – швидкість результуючого повітряного потоку після співударання струмин, m/c .

Для визначення та оптимізації параметрів повітро-розподільника основними характерними факторами є такі: поточна відносна поперечна координата $h = h/H$; відносна відстань між осями зустрічних плоских струмин $\bar{l} = l_0/b_0$; відносна відстань між зустрічними насадками $x = x/X_n$ та відносна витрата повітряних потоків у повітропроводах $\bar{L} = L_1/L_2$.

Критерієм оптимізації є мінімізація швидкості руху повітря v та надлишкової температури Δt в робочій зоні, а також коефіцієнтів затухання результуючого потоку m і n .

Таким чином отримуємо оптимізовані параметри результуючого повітряного потоку з повітророзподільника. Це необхідно для оптимізації його геометричних параметрів з метою підтримання комфортних умов у приміщеннях з незначними тепловими надлишками.

4. 3. Дослідження повітророзподілу взаємодією зустрічних неспіввісних струмин у змінному режимі

Проведено планування експерименту та опис установки для проведення експериментальних досліджень повітророзподільника з використанням взаємодії зустрічних неспіввісних круглих (повний факторний експеримент) та плоских струмин (дробовий факторний експеримент). Описано процес дослідження, математичне оброблення отриманих результатів та їх представлення у вигляді графіків, номограм та аналітичних залежностей. Основні дослідження проводилися для визначення оптимальних геометричних розмірів повітророзподільника, а також визначення взаємозв'язку характеристик повітророзподільника та результуючого потоку при взаємодії струмин.

Схема експериментальних досліджень представлена на рис. 6 [8]. На представленому стенді досліджено повітророзподільник із взаємодією зустрічних неспіввісних струмин.

Заміри швидкості руху повітря V здійснювалися термоелектроанемометром testo-405 із використанням координатника із сіткою точок 10×10 см.

Повітря за допомогою вентилятора 1 нагніталось через повітропроводи 3 ($a \times b = 350 \times 350$ мм), і через при-

пливні плоскі щілини $b_0 = 20$ мм нагніталось в конструктивну частину повітророзподільника 6.

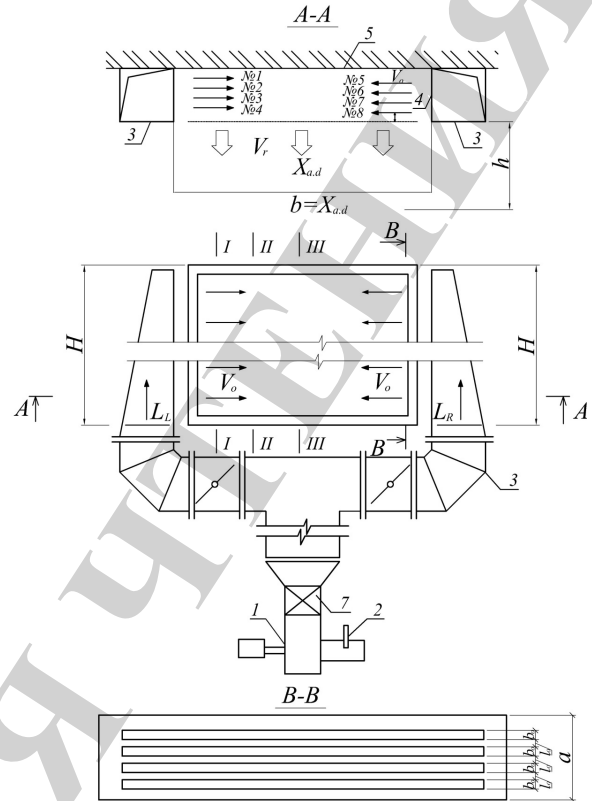


Рис. 6. Схема експериментальної установки для дослідження потоку, утвореного взаємодією зустрічних неспіввісних плоских струмин, де 1 – вентиляційний агрегат; 2 – заслінка; 3 – повітропровід розміром $a \times b = 350 \times 350$ мм; 4 – припливні насадки шириною $b_0 = 20$ мм; 5 – основа; 6 – конструктивна частина повітророзподільника; 7 – повітрянагрівач; h – відстань до характерної площини полів швидкостей

Для проведення експериментальних досліджень була складена матриця планування 4-факторного експерименту з врахуванням ефекту взаємодії факторів, при цьому прийнято нелінійну математичну модель. Було використано планування дробового факторного експерименту 2_{IV}^{4-1} , в якому кількість необхідних дослідів є вдвічі меншою, ніж у повному факторному експерименті [13, 14].

В якості вхідних факторів були прийняті величини:

- $x_1 = h/H$ – відносна вертикальна поточна координата;
- $x_2 = X/X_n$ – відносна горизонтальна поточна координата (X_n – відстань між розподільними повітропроводами);
- $x_3 = l_0/b_0$ – відносна відстань між осями щілин.
- $x_4 = L_n/L_{np}$ – співвідношення витрат повітряних потоків у розподільних повітропроводах.

Функціями відгуку служать:

- $\bar{v}_h = v_h/v_0$ – відносна швидкість руху повітря в приміщенні, де v_h – біжуча швидкість результуючого потоку повітря в розрахунковій площині повітророзподільника, а v_0 – початкова швидкість;
- $\Delta t_h = \Delta t_h / \Delta t_0$ – відносна надлишкова температура повітря в приміщенні, де Δt_h – біжуча над-

лишкова температура результуючого потоку повітря в розрахунковій площині повітророзподільника, а Δt_0 – початкова надлишкова температура (на виході з насадки).

5. Результати досліджень результуючого повітряного потоку за взаємодії неспіввісних зустрічних струмин

На рис. 7, а, б представлені деякі з результатів проведених експериментальних досліджень вимірювання швидкості та надлишкової температури припливного потоку згідно матриці дробового факторного експерименту 2_{IV}^{4-1} .

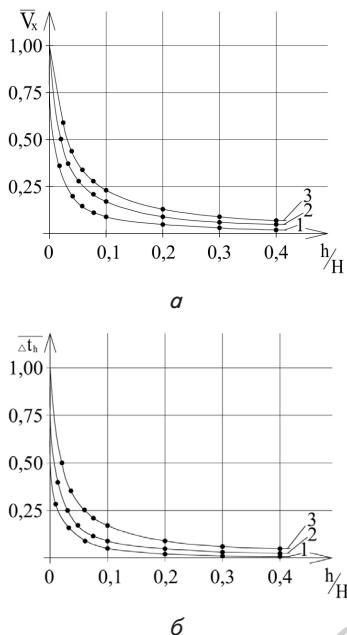


Рис. 7. Графік залежності відносної швидкості \bar{v}_h та відносної надлишкової температури Δt_h від поточних координат: h/H та x/X_n : а – графік залежності відносної швидкості \bar{v}_h ; б – графік залежності відносної надлишкової температури Δt_h . 1 – $x_2=x/X_n=0,5$; 2 – $x_2=x/X_n=0,25$; 3 – $x_2=x/X_n=0$

При цьому відносна відстань між осями щілин становила $x_3=l_0/b_0=2$, а співвідношення витрат $x_4=L_1/L_2=2$ (рис. 7, а) та $x_4=L_1/L_2=1$ (рис. 7, б).

Для узагальнення за результатами експериментальних досліджень складені відповідні об'єднані 4-факторні номограми.

Номограми, які в подальшому використовуються в інженерних розрахунках, показують графічну залежність п'яти величин, з яких одна є залежною (ліва частина рівняння), а інші – незалежні (права частина рівняння), що відображається різними ключами на рис. 8, а – для визначення відносної швидкості руху повітря \bar{v} та рис. 8, б – для визначення відносної надлишкової температури в приміщенні Δt_h . За цих умов було розглянуто приклади розв'язку прямої та чотирьох обернених задач [15].

Представлені на рис. 8 номограми апроксимовані залежностями (7), (8):

$$\bar{v} = \frac{0,025 \frac{l}{b_0} - 0,05 \frac{x}{X_n} + 0,02 \frac{L_1}{L_{np}} - 0,01}{1,15 \frac{h}{H} - 0,01 + 0,025 \frac{l}{b_0} - 0,05 \frac{x}{X_n} + 0,02 \frac{L_1}{L_{np}}}; \quad (7)$$

$$\Delta t_h = \frac{0,02 \frac{l}{b_0} - 0,035 \frac{x}{X_n} + 0,015 \frac{L_1}{L_{np}} - 0,007}{1,15 \frac{h}{H} - 0,01 + 0,025 \frac{l}{b_0} - 0,05 \frac{x}{X_n} + 0,02 \frac{L_1}{L_{np}}}. \quad (8)$$

З номограм (рис. 8) та формул (7) і (8) видно, що збільшення величин x/X_n та h/H призводить до спадання відносної швидкості та надлишкової температури, а збільшення l_0/b_0 та L_1/L_2 призводить зростання відносної швидкості та надлишкової температури, що узгоджується з характером процесу.

Представлені на рис. 9, 10 номограми апроксимовані залежностями (9), (10):

$$m = 0,0225 \frac{L_1}{L_2} + \left(0,015 + 0,0075 \frac{L_1}{L_2} \right) \left(5 + \frac{1}{b_0} - 12 \frac{x}{X_n} \right) - 0,025, \quad (9)$$

$$n = 0,017 \frac{L_1}{L_2} + \left(0,013 + 0,003 \frac{L_1}{L_2} \right) \left(5 + \frac{1}{b_0} - 12 \frac{x}{X_n} \right) - 0,006. \quad (10)$$

З номограм (рис. 9, 10) та формул (9) і (10) видно, що збільшення величини x/X_n призводить до спадання коефіцієнтів затухання швидкості m та температури n , а збільшення l_0/b_0 та L_1/L_{np} призводить до їх зростання. Коефіцієнти затухання знаходяться в межах $m=0,05-0,35$, $n=0,03-0,24$ залежно від різних початкових умов. При цьому коефіцієнт турбулентного переносу Прандтля σ

$$\sigma = \frac{n}{m} = 0,645 \approx 0,67.$$

На рис. 11 зображено графік падіння осьової швидкості плоскої та круглої струмин залежно від координати.

На рис. 11 \bar{X} – відносна координата, X_{max} – далькوبійність струмини, m , X – поточна координата, $m; \bar{v}$ – відносна швидкість струмини.

I – $\bar{X}=0-0,4$ – область доцільності використання ефекту взаємодії;

II – $\bar{X}=0,4-0,6$ – перехідна область;

III – $\bar{X}=0,6-1,0$ – область недоцільності використання ефекту взаємодії.

Для відчутності ефекту взаємодії струмин приймаємо припущення, що величина відносної граничної швидкості складає $\bar{v}=0,15-0,20$. Відтак визначимо граничну відносну відстань – так звану граничну далькобійність $\bar{X}=0,4-0,6$ (відстань до області взаємодії струмин). Перехідна область є граничною відносною відстанню і являє собою поріг відчутності

ефекту взаємодії неспіввісних струмин. Графік описує параметри однієї з струмин, що взаємодіє. Оскільки параметри другої струмини описуються аналогічно, то відстань між розподільними повітропроводами X_{II} (гранична ширина приміщення) визначається як подвоєна величина відстані до перехідної області:

$$X_{II} = 2\bar{X} \times X_{max} = 2(0,4...0,6)X_{max}. \quad (11)$$

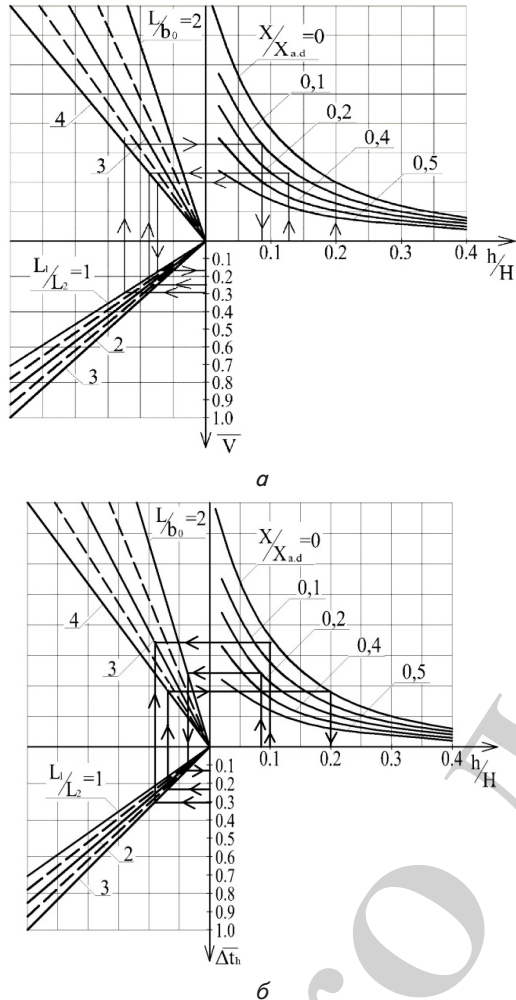


Рис. 8. Номограми для визначення відносної швидкості руху повітря v та відносної надлишкової температури в приміщенні Δt_h : *a* – номограма для визначення відносної швидкості руху повітря v ; *б* – номограма для визначення відносної надлишкової температури в приміщенні Δt_h

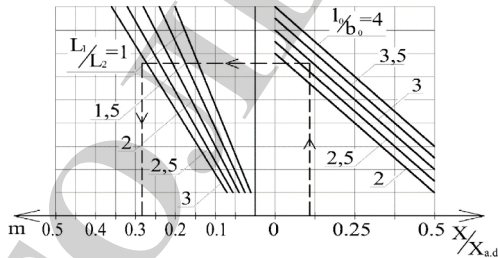


Рис. 9. Номограма для визначення коефіцієнта затухання швидкості m

На основі експериментальних досліджень визначено аеродинамічний опір запропонованих повітро-

розподільників із взаємодією зустрічних неспіввісних струмин: $\xi=2,44$. Встановлено, що рівень шуму при витіканні струмин з повітророзподільника не перевищує допустимого для даного типу приміщень.

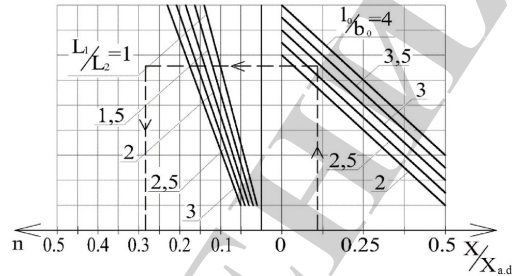


Рис. 10. Номограма для визначення коефіцієнта затухання температури n

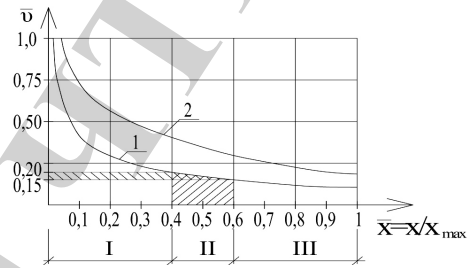


Рис. 11. Визначення далекобійності струмин: 1 – для плоских струмин; 2 – для круглих струмин

Достовірність результатів експериментальних досліджень було обґрунтовано перевіркою адекватності математичної моделі за відповідними критеріями Стьюдента, Фішера та Кохрена при границі довірчого інтервалу $\alpha' = 0,95$.

На основі проведених експериментальних досліджень представлено техніко-економічний аналіз використання повітророзподільника для забезпечення необхідних параметрів припливного повітря в робочу зону приміщення. Економічний ефект оцінювався за приведеними затратами (12)

$$E_i = Z_i - Z_0, \quad (12)$$

де Z_0 , Z_i – річні приведені затрати відповідно трьох вибраних для порівняння пристроїв (перфорованої панелі ПН, ПВЗНКС та ПВЗНПС), грн./рік, які визначаються з виразу

$$Z_i = K_i \times E_n + C_i, \quad (13)$$

де K_i – капітальні вкладення, грн; C_i – експлуатаційні затрати за рік, грн./рік; E_n – нормативний коефіцієнт економічної ефективності капітальних вкладень, 1/рік (величина, обернена до строку окупності);

Результати порівняльного аналізу існуючих повітророзподільників та запропонованого для подачі повітря неспіввісними зустрічними струминами представлено у табличній формі (табл. 1).

Для оцінки економічної ефективності запропонованого рішення проведено порівняння техніко-економічних показників використання перфорованої стелі та повітророзподільників ПВЗНКС і ПВЗНПС у виробничо-технологічному приміщенні невеликого

об'єму. Після проведених розрахунків, показано заощадження у межах 16–22 %. Економічний ефект від впровадження такої схеми отриманий за рахунок зниження як капітальних, так і експлуатаційних затрат.

Таблиця 1

Техніко-економічні показники
повітророзподільників (на 2016 р.)

№	Назва витрат	Перфорована панель	Повітро-розподільники	
			ПВЗНКС	ПВЗНПС
1	Вартість пристрою, €	220	201,42	181,28
2	Вартість монтажних робіт, €	20	15	15
3	Всього капітальні вкладення за варіантами, грн.	240	216,42	196,28
4	Вартість спожитої електроенергії, €/рік	26,78	21,43	19,64
5	Обслуговування, €/рік	25	20	20
6	Всього експлуатаційні витрати, €/рік	51,78	41,43	39,64
7	Приведені затрати за варіантом, €/рік	87,78	73,90	69,08

Системи вентиляції з повітророзподільниками ПВЗНКС та ПВЗНПС можуть бути використані в промислових цехах інших галузей індустрії: мікроелектроніка, комп'ютерні технології, виробництво нових матеріалів та інструментів.

6. Обговорення результатів досліджень результуючого повітряного потоку за взаємодії неспіввісних зустрічних струмин

Техніко-економічне порівняння інженерних вирішень подачі повітря у приміщення засвідчує економічний ефект до 18 % порівняно з альтернативними схемами. Ефект отримується за рахунок скорочення мережі повітропроводів, зменшення втрат тиску у системі, зменшення електричної потужності обладнання та збільшення швидкості на виході із повітророзподільника завдяки швидкому її затуханню до входу у робочу зону.

Таким чином, доведено економічну доцільність повітророзподілу зустрічними неспіввісними струминами.

Проте, такого типу повітророзподільники недоцільно використовувати в приміщеннях великих об'ємів, оскільки через швидке затухання швидкості неспіввісних струмин шляхом взаємного погашення зменшується дальнобійність результуючого повітряного потоку.

7. Висновки

1. Вдосконалено пристрої та схеми повітророзподілу у виробничо-технологічних приміщеннях невеликого об'єму з незначними тепловими надлишками. Запропоновано повітророзподільники, що забезпечують інтенсивне затухання швидкості і температури повітряного потоку, який утворюється в результаті взаємодії зустрічних неспіввісних струмин.

2. Характерною особливістю розроблених повітророзподільників є можливість змінювати витрату, а отже, і швидкість результуючого повітряного потоку. Це дає можливість створювати динамічний мікроклімат у приміщенні. При цьому визначено їх оптимальні конструктивні розміри, які забезпечують можливість підтримувати необхідні параметри результуючого повітряного потоку, утвореного взаємодією зустрічних неспіввісних струмин.

3. Удосконалено математичну модель процесу взаємодії зустрічних неспіввісних струмин у приміщеннях невеликого об'єму з незначними тепловими надлишками і одержано відповідні теоретичні залежності.

4. На підставі удосконаленої математичної моделі результуючого потоку, утвореного внаслідок взаємодії зустрічних неспіввісних струмин, та результатів експериментальних досліджень, обґрунтовано доцільність використання в приміщеннях невеликого об'єму з незначними тепловими надлишками повітророзподілу взаємодією зустрічних неспіввісних плоских струмин.

5. Розроблено та захищено патентом України [12] конструкцію повітророзподільника із взаємодією зустрічних неспіввісних струмин (ПВНЗПС), який може подавати повітря в усталеному та змінному режимах у виробничо-технологічних приміщеннях невеликого об'єму з незначними тепловими надлишками. Коефіцієнти затухання знаходяться в межах $m=0,05...0,35$, $n=0,03...0,24$ залежно від різних початкових умов, а техніко-економічні розрахунки дозволяють констатувати економічний ефект – до 18 % порівняно з повітророзподільником з круглими насадками та до 22 % порівняно з використанням перфорованих панелей.

Література

1. Kapalo, P. Using experimental measurements the concentrations of carbon dioxide for determining the intensity of ventilation in the rooms [Text] / P. Kapalo, S. Vilcekova, O. Voznyak // Chemical Engineering Transactions. – 2014. – Vol. 39. – P. 1789–1794.
2. Возняк, О. Дослідження пристрою для повітророзподілу закрученими і настільними струминами у змінному режимі [Текст] / О. Т. Возняк, І. Є. Сухолова, Х. В. Миронюк // Східно-Європейський журнал передових технологій. – 2015. – Т. 6, № 7 (78). – С. 15–23. doi: 10.15587/1729-4061.2015.56235
3. Korbut, V. Modelovanie prudov vzduchu v miestnosti v pulzujucem rezime a jeho kvalita [Text] / V. Korbut, O. Voznyak, P. Kapalo, I. Sukholova // Plynar-vodar-kurenar. – 2016. – Issue 1. – P. 19–21.
4. Zhukovsky, S. Experimental and analytical research of pressure effects inside the sectional source air distributor [Text] / S. Zhukovsky, H. Klymenko // Zeszyty naukowe Politechniki Rzeszowskiej. – 2009. – Vol. 266. – P. 151–157.

5. Lee, K. Air distribution effectiveness with stratified air distribution systems [Text] / K. Lee, Z. Jiang, Q. Chen // ASHRAE Transactions. – 2009. – Vol. 115, Issue 2. – P. 1–16. – Available at: <https://engineering.purdue.edu/~yanchen/paper/2009-9.pdf>
6. Zhang, Z. Evaluation of various CFD models in predicting room airflow and turbulence [Text] / Z. Zhang, J. Z. Zhai, Q. Chen // Roomvent 2007: 10th International Conference on Air Distribution in Rooms. – Helsinki, 2007.
7. Lee, H.-H. Finite Element Simulations with ANSYS Workbench 12 [Text] / H.-H. Lee. – Schroff development corporation, 2010. – 589 p.
8. Voznyak, O. Energy saving at creation of dynamic indoor climate in a room [Text] / O. Voznyak, K. Myroniuk, I. Sukholova // Current issues of Civil and Environmental Engineering in Kosice, Lviv and Rzeszow: XIII international scientific conference. – Kosice, 2011.
9. Наумов, А. Л. Вентиляция с переменным расходом воздуха для офисных зданий [Текст] / А. Л. Наумов, Д. В. Капко // АВОК. – 2012. – № 8. – С. 16–21. – Режим доступа: http://www.abok.ru/for_spec/articles.php?nid=5395
10. Мальгин, Ю. В. Создание эффективного динамического микроклимата в помещении [Текст] / Ю. В. Мальгин // Инженерные системы. АВОК-Северо-Запад. – 2009. – № 3 (41). – С. 42–46.
11. Довгалоук, В. Б. Аналітичні дослідження макроструктури струминних течій для розрахунку енергоефективних систем повітророзподілення [Текст] / В. Б. Довгалоук, В. О. Мілейковський // Енергоефективність в будівництві та архітектурі. – 2013. – Вип. 4. – С. 73–81.
12. Пат. № 16828 UA. Повітророзподільник. МПК7 F24F 13/06 [Текст] / Возняк О. Т., Ковальчук А. О., Миронюк Х. В.; власник Нац. ун-т «Львів. політехніка». – № 200602951; заявл. 20.03.2006; опублік. 15.08.2006, Бюл. № 8. – 2 с.
13. Allmaras, S. R. Modifications and clarifications for the implementation of the spalart-allmaras turbulence model [Text] / S. R. Allmaras, F. T. Johnson, P. R. Spalart // ICCFD7-1902: Seventh International Conference on Computational Fluid Dynamics. – Big Island, Hawaii, 2012.
14. Mileikovskiy, V. Geometrical Modelling of the Jet Boundary Layer [Text] / V. Mileikovskiy // 3rd International Scientific Conference moNGeometrija 2012, Serbia, Novi Sad. – Novi Sad, 2012. – P. 189.
15. Zhelykh, V. Using of thermosiphon solar collector in an air heating system of passive house [Text] / V. Zhelykh, C. Kozak, O. Savchenko // Pollack Periodica. – 2016. – Vol. 11, Issue 2. – P. 125–133. doi: 10.1556/606.2016.11.2.11

ТОЛЬКО ДЛЯ ЧЛЕНОВ

