

6. Кузнецов, С. В. Влияние поперечных сил на качество деталей, получаемых методами листовой штамповки [Текст] / С. В. Кузнецов // Труды Нижегородского государственного технического университета им. Р. Е. Алексеева. – 2014. – № 5 (107). – С. 438–442.
7. Хвостовики плавающие для штампов листовой штамповки. Конструкция и размеры : ГОСТ 16719-71 [Текст]. – Введ. 1972-01-01. – М. : Стандартинформ, 2006. – 10 с.
8. Справочник конструктора штампов. Листовая штамповка [Текст] / под общ. ред. Л. И. Рудмана. – М. : Машиностроение, 1988. – 496 с.
9. Диамантопуло, К. К. Компенсация несоосности системы «пресс-штамп» изношенного штамповочного оборудования [Текст] / К. К. Диамантопуло, В. В. Кухарь, А. И. Евтеев // Металлургические процессы и оборудование. – 2005. – № 2. – С. 31–34.
10. Балалаева, Е. Ю. Расчёт универсальных упругих компенсаторов погрешностей системы «пресс-штамп» для операции вытяжки-формовки [Текст] / Е. Ю. Балалаева // Обработка материалов давлением : сб. науч. тр. – Краматорск : ДГМА, 2011. – № 1. – С. 193–198.
11. Кухарь, В. В. Снижение погрешности в системе пресс-штамп и безручьеовое профилирование заготовок на прессах [Текст] / В. В. Кухарь // Вестник НТУ «ХПИ». – 2009. – № 37. – С. 54 – 62.
12. Качанов, А. П. Повышение стойкости разделительных штампов за счет использования механических компенсаторов [Текст] / А. П. Качанов, В. Я. Мирзак, В. С. Запороженко // Кузнечно-штамповочное производство. – 1996. – № 4. – С. 18–22.
13. Мірзак, В. Я. Моделювання показників міцності механічного компенсатора похибок системи «прес-штамп» із застосуванням метода скінчених елементів [Текст] / В. Я. Мірзак, В. М. Боков // Техніка в сільськогосподарському виробництві, галузеве машинобудування, автоматизація : зб. наук. пр. – 2014. – Вип. 27. – С. 3–12.
14. Смирнов-Аляев, Г. А. Экспериментальные исследования в обработке металлов давлением [Текст] / Г. А. Смирнов-Аляев, В. П. Чикидовский. – Ленинград : Машиностроение, 1972. – 360 с.

Вирішено актуальну задачу підвищення ефективності повітророзподілу закрученими та настільними струминами 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 двоструминного повітророзподільника у порівнянні із альтернативними варіантами, наведено питомі показники ефективності повітророзподілу

Ключові слова: повітророзподіл, закручена струмина, настільна струмина, надлишкова температура, змінний режим

Решена актуальная задача повышения эффективности воздухораспределения закрученными и настильными струями 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 двухструйного воздухораспределителя в сравнении с альтернативными вариантами, приведены удельные показатели эффективности воздухораспределения

Ключевые слова: воздухораспределение, закрученная струя, настильная струя, избыточная температура, переменный режим

УДК 697.922.565; 697.921.47

DOI: 10.15587/1729-4061.2015.56235

ДОСЛІДЖЕННЯ ПРИСТРОЮ ДЛЯ ПОВІТРОРозПОДІЛУ ЗАКРУЧЕНИМИ І НАСТИЛЬНИМИ СТРУМИНАМИ У ЗМІННОМУ РЕЖИМІ

О. Т. Возняк

Кандидат технічних наук, доцент*

E-mail: orest.voznyak@i.ua

І. Є. Сухолова

Кандидат технічних наук, асистент*

E-mail: isukholova@gmail.com

Х. В. Миронюк

Кандидат технічних наук, доцент*

E-mail: kristim81@ukr.net

*Кафедра теплогазопостачання і вентиляції

Національний університет

«Львівська політехніка»

вул. С. Бандери, 12, м. Львів, Україна, 79013

1. Вступ

Працездатність людини залежить у значній мірі від того, наскільки санітарно-гігієнічні параметри мікроклімату приміщень відповідають її фізіологічним потребам. Фізичний стан повітряного середовища

приміщення залежить від температури, вологовмісту, швидкості руху повітря, шуму, запиленості, запахів тощо [1]. На умови комфорту значний вплив має саме швидкість руху повітря, величина якої створюється засобами вентиляційної техніки. Значний вплив на тепловий комфорт людини має також початкова тур-

булізація припливного повітряного потоку при його виході з насадка.

При виборі способу розподілу повітря слід враховувати специфіку приміщення, його призначення, конструктивні та об'ємно-планувальні особливості, розташування і розміри джерел теплоти, вологи та шкідливих газів, рівень вимог для підтримання розрахункових параметрів мікроклімату [2]. 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 струмін і з фіксованими робочими місцями. Для підтримання повітряного балансу в таких приміщеннях необхідно подавати великі кількості повітря. Основне завдання на виробництвах такого типу полягає у забезпеченні нормованих параметрів у робочій або обслуговуваній зоні та створенні комфортних умов для працівників, при цьому важливим питанням є також 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.

Одним із способів вирішення 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: закручена повітряна припливна струмина, яка надходить у робочу зону з нормованими параметрами завдяки швидкому затуханню швидкості і температури, та настільна струмина, що при виході з повітророзподільника проходить певну відстань, насталяючись на стелю, а в місці входу в робочу зону має вже нормовані швидкості і температури.

2. Аналіз літературних даних та постановка проблеми

Організація повітророзподілу та вибір конструкції повітророзподільних пристроїв 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 [3]. У теплонапружених приміщеннях доцільним є використання повітророзподільників, які використовують взаємодію струмін, що насталяються на 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 [4]. У системах припливної вентиляції виробничо-технологічних приміщень невеликого об'єму з незначними тепловими надлишками доцільним є застосування повітророзподільника, з якого витікає повітряний потік, утворений внаслідок взаємодії зустрічних неспіввісних струмін, і забезпечує достатньо високий повітрообмін при швидкостях руху повітря в обслу-

говуваній зоні в межах нормованих значень [5]. Для стиснених умов у виробничих приміщеннях з теплонадлишками рекомендовано застосовувати витісняючі вентиляцію енергоефективними маловшвидкісними повітророзподільниками зі змінною витратою [6]. 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 [7, 8].

З метою визначення переваг і недоліків способів подачі припливного повітря та існуючих повітророзподільників, був здійснений їх аналіз [9, 10]. Вихрові повітророзподільники (рис. 1, а) формують на виході закручену в'язлову 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.

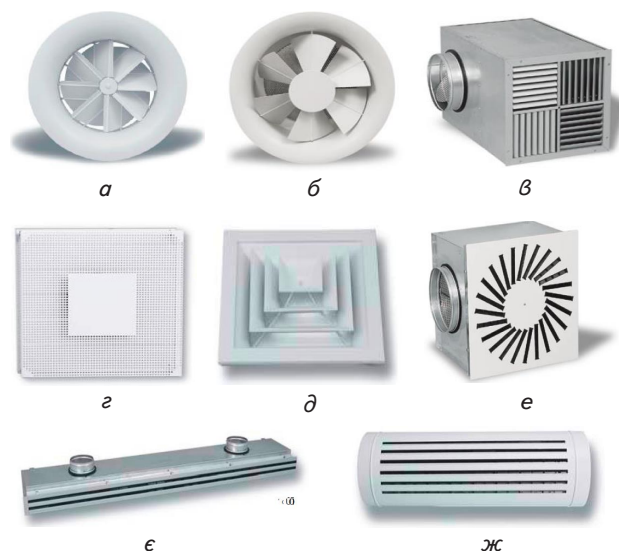


Рис. 1. Повітророзподільники для подачі повітря закрученими і настільними струминами:

- а – вихрові повітророзподільники;
- б, в – вихрові регульовані повітророзподільники;
- г, д, е – панельні повітророзподільники; з, ж – щілинні повітророзподільники

Вихрові регульовані повітророзподільники (рис.1, б, в) [11] 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 в випадку коли через той самий повітророзподільник можна подавати холодне повітря у теплий період року і нагріте у холодний період року. Також можна подавати припливне по-

вітря при досить великих значеннях робочих різниць температур. На виході з даних повітророзподільників утворюється закручена струмина, тому забезпечується ефективне перемішування при обмеженій далькочійності.

При використанні панельних повітророзподільників (рис. 1, *z, d, e*) 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, ежктують 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.

Щілинні повітророзподільники (рис. 1, *е, ж*) можуть використовуватись в системах вентиляції і кондиціонування з постійною і змінною витратою повітря. 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 ежкції навколишнього повітря і швидке затухання температури повітря у струміні. При подачі охолодженого повітря формується плоска горизонтальна струмина, що настиляється на стелю, при подачі нагрітого повітря формується плоска вертикальна струмина.

Провівши огляд повітророзподільників можемо зробити висновок про доцільність застосування у виробничому приміщенні для подачі великих кількостей повітря та створення комфортних умов для робітників двострумінного повітророзподільника, який забезпечить подачу повітря закрученою струминою у робочу зону і настільною у верхню зону приміщення та забезпечить змінні в часі параметри мікроклімату та енергоефективність при його експлуатації.

3. Ціль та задачі дослідження

Метою роботи є наукове обґрунтування повітророзподілу закрученими і настільними струминами у

змінному режимі за умови забезпечення нормованих та змінних швидкості і температури повітря в робочій зоні виробничого приміщення при досягненні максимальної енергоефективності запропонованого обладнання.

Для досягнення поставленої мети потрібно виконати такі завдання:

- проаналізувати існуючі схеми повітророзподілу та конструкції повітророзподільників, їх ефективність та методи розрахунку;
- розробити конструкцію повітророзподільника та фізичну модель його роботи, що забезпечить нормовані та змінні швидкості і температури повітря у робочій зоні виробничого приміщення;
- на основі фізичної моделі удосконалити математичну модель процесів руху повітряного потоку при його виході із запропонованої конструкції повітророзподільника з врахуванням особливостей витікання і кута нахилу закручувальних пластин;
- виконати експериментальні дослідження повітророзподілу закрученими і настільними струминами, які подаються в робочу зону запропонованою конструкцією повітророзподільника, з метою визначення їх характеристик;
- на основі проведених теоретичних і експериментальних досліджень отримати аналітичні залежності та поправні коефіцієнти для розрахунку повітророзподілу закрученими і настільними струминами у виробничому приміщенні.

4. Матеріали та методи дослідження повітророзподілу закрученими і настільними струминами у змінному режимі

4. 1. Конструкція пристрою для повітророзподілу закрученими і настільними струминами у змінному режимі

Розроблено конструкцію повітророзподільника з утворенням закрученої і настільної струмини і захищено патентом України (рис. 2) [12].

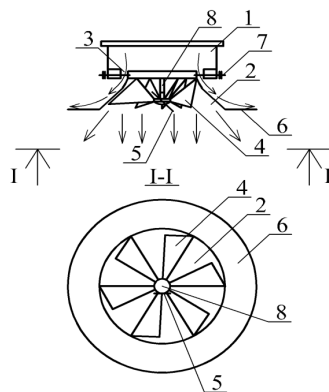


Рис. 2. Повітророзподільник із утворенням закручених і настільних струмин: 1 – припливний патрубок; 2 – дифузор; 3 – кільцева регульована щілина; 4 – пластини; 5 – ручка керування; 6 – відбійний козирок; 7 – гвинт регулювання щілини; 8 – стержень

Розроблено натурну модель запропонованого повітророзподільника із вмонтованим електроприводом

Belimo LM24A. Це дає можливість змінювати кут нахилу пластин повітророзподільника, а отже і подавати припливне повітря в необхідному напрямку залежно від необхідних параметрів. Таким чином забезпечується змінний режим у робочій зоні.

На основі запропонованої конструкції повітророзподільника для забезпечення змінного режиму у робочій зоні запропоновано систему із трьох таких пристроїв (рис. 3). 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.

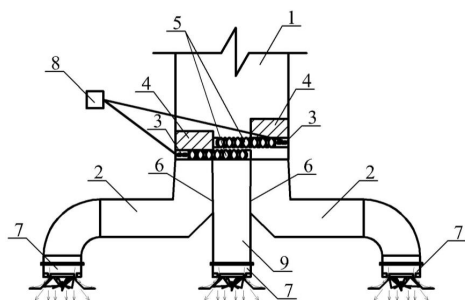


Рис. 3. Пристрій для вентиляції приміщення у змінному режимі: 1 – повітропровід; 2 – горизонтальний розподільний повітропровід; 3 – електропривод; 4 – пластина; 5 – ходовий вал; 6 – вертикальна перегородка; 7 – повітророзподільник; 8 – блок автоматики; 9 – вертикальний розподільний повітропровід

4. 2. Аналітичні дослідження повітророзподілу закрученими і настільними струминами у змінному режимі

Моделювання потоку повітря виконувалось за допомогою вирішувача CFD FLUENT (Ansys FLUENT) [13]. При моделюванні у даній програмі було прийнято такі спрощення і припущення: внутрішнє повітря нестискуване, потік повітря усталений; тепловіддача від внутрішніх поверхонь не враховувалась; припливне повітря подавалось повітророзподільником із утворенням закрученої і настільної струмин; витяжка здійснювалась із РЗ витяжним зонтом, а також із верхньої зони – решіткою; витяжка з верхньої зони поза зоною дії припливних струмин. Розглянуто розподіл лише повної швидкості і не виводились результати її розподілу на радіальну, аксіальну і тангенціальну складові у закрученій струміні [14].

Для виведення рівняння руху необхідно виконання законів збереження маси і енергії, а швидкість зміни трьох компонент імпульсу повинна дорівнювати відповідним компонентам прикладених сил. Розглянуто k-ε модель турбулентності [15].

Рівняння нерозривності

$$\frac{\partial}{\partial x}(\rho u) + \frac{\partial}{\partial y}(\rho v) + \frac{\partial}{\partial z}(\rho w) = 0, \tag{1}$$

де X, Y та Z – напрями (U, Y та W – імпульси) відповідно.

$$\begin{aligned} & \frac{\partial}{\partial t}(\rho u) + \frac{\partial}{\partial x}(\rho uu) + \frac{\partial}{\partial y}(\rho uv) + \frac{\partial}{\partial z}(\rho uw) = \\ & = -\frac{\partial p}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial x}(\mu_e \frac{\partial u}{\partial x}) + \frac{\partial}{\partial y}(\mu_e \frac{\partial u}{\partial y}) + \frac{\partial}{\partial z}(\mu_e \frac{\partial u}{\partial z}) + \\ & + \frac{\partial}{\partial x}(\mu_e \frac{\partial u}{\partial x}) + \frac{\partial}{\partial y}(\mu_e \frac{\partial v}{\partial x}) + \frac{\partial}{\partial z}(\mu_e \frac{\partial w}{\partial z}), \end{aligned} \tag{2}$$

$$\begin{aligned} & \frac{\partial}{\partial t}(\rho v) + \frac{\partial}{\partial x}(\rho uv) + \frac{\partial}{\partial y}(\rho vv) + \frac{\partial}{\partial z}(\rho vw) = \\ & = -\frac{\partial p}{\partial y} + \frac{\partial}{\partial x}(\mu_e \frac{\partial v}{\partial x}) + \frac{\partial}{\partial y}(\mu_e \frac{\partial v}{\partial y}) + \frac{\partial}{\partial z}(\mu_e \frac{\partial v}{\partial z}) + \\ & + \frac{\partial}{\partial x}(\mu_e \frac{\partial u}{\partial y}) + \frac{\partial}{\partial y}(\mu_e \frac{\partial v}{\partial y}) + \frac{\partial}{\partial z}(\mu_e \frac{\partial w}{\partial y}) - g(\rho - \rho_0), \end{aligned} \tag{3}$$

$$\begin{aligned} & \frac{\partial}{\partial t}(\rho w) + \frac{\partial}{\partial x}(\rho uw) + \frac{\partial}{\partial y}(\rho vw) + \frac{\partial}{\partial z}(\rho ww) = \\ & = -\frac{\partial p}{\partial z} + \frac{\partial}{\partial x}(\mu_e \frac{\partial w}{\partial x}) + \frac{\partial}{\partial y}(\mu_e \frac{\partial w}{\partial y}) + \frac{\partial}{\partial z}(\mu_e \frac{\partial w}{\partial z}) + \\ & + \frac{\partial}{\partial x}(\mu_e \frac{\partial u}{\partial z}) + \frac{\partial}{\partial y}(\mu_e \frac{\partial v}{\partial z}) + \frac{\partial}{\partial z}(\mu_e \frac{\partial w}{\partial z}). \end{aligned} \tag{4}$$

Для замикання турбулентності визначено зв'язок між напруженнями по Рейнольдсу і параметрами усередненого потоку за допомогою різних моделей турбулентності.

В пакеті Ansys FLUENT рівняння k-ε моделі має вигляд:

k-рівняння

$$\begin{aligned} & \frac{\partial}{\partial t}(\rho k) + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho k U_j) = \\ & = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] + G_k + G_b - \rho \epsilon - Y_M + S_k, \end{aligned} \tag{5}$$

ε-рівняння

$$\begin{aligned} & \frac{\partial}{\partial t}(\rho \epsilon) + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho \epsilon U_j) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\epsilon} \right) \frac{\partial \epsilon}{\partial x_j} \right] + \\ & + \rho C_1 S_\epsilon - \rho C_2 \frac{\epsilon^2}{k + \sqrt{\nu \epsilon}} + C_{1\epsilon} \frac{\epsilon}{k} C_{3\epsilon} G_b + S_\epsilon. \end{aligned} \tag{6}$$

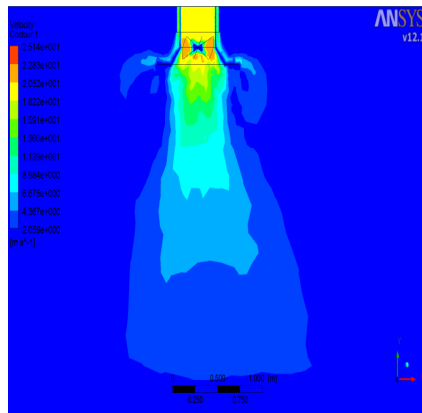
Проведено розрахунок системи рівнянь Нав'є-Стокса, усередненої по Рейнольдсу за допомогою однопараметричної моделі турбулентності Спаларта-Алмараса [16], яка в пакеті Ansys FLUENT має вигляд

$$\begin{aligned} & \frac{\partial}{\partial t}(\rho \tilde{v}) + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho \tilde{v} u_j) = \\ & = G_v + \frac{1}{\sigma_v} \left[\frac{\partial}{\partial x_j} \left\{ (\mu + \rho \tilde{v}) \frac{\partial \tilde{v}}{\partial x_j} \right\} + C_{1\tilde{v}} \rho \left(\frac{\partial \tilde{v}}{\partial x_j} \right)^2 \right] - Y_v + S_v. \end{aligned} \tag{7}$$

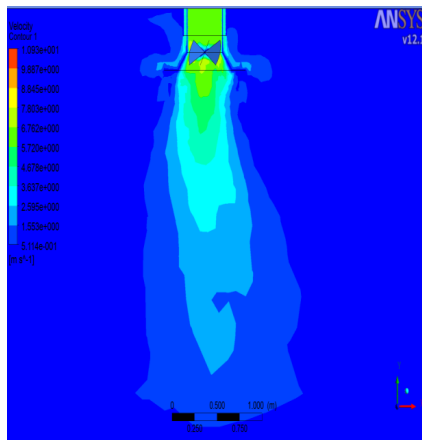
Результати моделювання свідчать про суттєве збільшення швидкостей на закручувальних пластинах, а відтак – про турбулізацію повітряного потоку при потраплянні на них.

Для визначення раціональних параметрів повітророзподільника основними характерними факторами, які в найбільшій мірі впливають на геометричні пара-

метри, є такі: відносна горизонтальна $\bar{y} = \frac{y}{b}$, відносна вертикальна біжуча координата $\bar{x} = \frac{x}{l}$ відповідно, кут нахилу закручувальних пластин α . Для визначення вказаних величин факторів: x_0, y_0, α_0 потрібно вирішити задачу мінімізації параметрів виходу повітряного потоку з повітророзподільника. Крім цього слід мінімізувати швидкості руху повітря v та надлишкової температури Δt в робочій зоні, а також коефіцієнти затухання результуючого потоку \min .



а



б

Рис. 4. Результати моделювання розподілу швидкостей припливного повітряного потоку у перерізі по осі повітророзподільника при подачі повітря закрученою і настильною струминами і куті нахилу закручувальних пластин 60° за допомогою: а – моделі турбулентності Спаларта-Алмараса і б – $k-\epsilon$ моделі

На основі розрахованих параметрів виходу результуючого повітряного потоку з повітророзподільника визначено характеристики повітророзподільника для створення комфортних умов у робочій зоні виробничого приміщення.

4.3. Дослідження повітророзподілу закрученими і настильними струминами у змінному режимі

Проведено планування повного факторного експерименту та опис установки для проведення досліджень повітророзподільника з утворенням закрученої і настильної припливних струмін (ПЗНС), описано процес дослідження, математичне оброблення отриманих

результатів. Основні дослідження проводилися для визначення взаємозв'язку характеристик повітророзподільника та результуючого потоку при повітророзподілі закрученими і настильними струминами.

Схема експериментальних досліджень представлена на рис. 5 [17]. На представленою стенді досліджено закручену струмину. Повітря з допомогою вентилятора (1) поступало у камеру статичного тиску (3), де відбувалося вирівнювання потоку, після цього нагніталось у повітронагрівник (8), а потім через гнучкий повітропровід (4) в досліджуваний повітророзподільник (5).

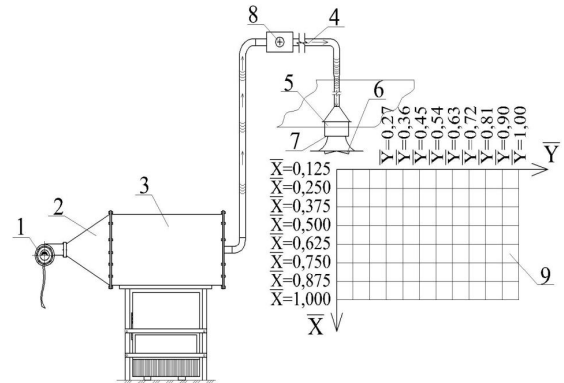


Рис. 5. Схема експериментальної установки: 1 – вентиляційний агрегат; 2 – дифузор; 3 – камера статичного тиску; 4 – гнучкий повітропровід; 5 – повітророзподільник; 6 – закручувальні пластини (6 штук); 7 – кільцева щілина; 8 – повітронагрівник; 9 – сітка координат

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

Для проведення експериментальних досліджень було складено матрицю планування експерименту з врахуванням ефекту взаємодії факторів. В якості вхідних факторів було прийнято такі величини: $x_1 = x/l$, $x_2 = y/b$ – відносна вертикальна та горизонтальна поточна координати відповідно, де x та y – відстань по вертикалі та по горизонталі відповідно від повітророздавального пристрою та від його осі (y у випадку відстані по горизонталі) до точки, у якій проводився замір швидкості, l та b – загальна відстань по вертикалі та по горизонталі відповідно від повітророздавального пристрою до робочої зони; $x_3 = \alpha$ – кут нахилу закручувальних пластин.

Експериментальні дослідження закрученої струмини проводились при таких умовах та спрощеннях: струмини неізоермічні; лінійні розміри повітророзподільника не змінювались; кут нахилу закручувальних пластин змінювався і становив $30^\circ, 60^\circ$ і 90° ; кількість закручувальних пластин складала 6 штук; кільцева щілина була закрита.

5. Результати досліджень закрученої і настильної струмін і їх взаємодії

На основі проведених досліджень отримано рівняння регресії

$$\bar{V} = 0,699 - 0,331x_1 + 0,091x_2 - 0,014x_3 + 0,091x_1x_2 - 0,014x_1x_3, \quad (8)$$

$$\Delta \bar{t} = 0,643 - 0,323x_1 + 0,1x_2 - 0,025x_3 + 0,1x_1x_2 - 0,02x_1x_3. \tag{9}$$

Досліджено розподіл швидкостей і надлишкових температур у припливній закрученій струмині на різних відстанях від повітророзподільного пристрою і при різних кутах нахилу закручувальних пластин (рис. 6). На підставі методів математичної обробки результатів отримано узагальнену номограму для визначення відносних швидкостей в залежності від відстані від повітророзподільного пристрою по горизонталі і вертикалі та кута нахилу закручувальних пластин (рис. 7).

На основі побудованих графічних залежностей (рис. 6) відносних швидкостей і відносних надлишкових температур при різних кутах нахилу закручувальних пластин слід констатувати: при куті нахилу пластин 30° (рис. 6) у перетині від $\bar{X} = 0,125$ до $\bar{X} = 0,250$ вісь припливної закрученої струмині проходить під кутом 18° до горизонталі, у перетині від $\bar{X} = 0,250$ до $\bar{X} = 0,50$ вісь струмині проходить під кутом 45° до горизонталі. Починаючи від перетину $\bar{X} = 0,50$ вісь струмині проходить паралельно до осі повітророзподільника і на відстані $\bar{Y} = 0,50$ від його осі. При куті нахилу пластин 60° у перетині від $\bar{X} = 0,125$ до $\bar{X} = 0,375$ вісь закрученої струмині проходить по осі повітророзподільника. У перетині від $\bar{X} = 0,375$ до $\bar{X} = 0,625$ вісь струмині проходить під кутом 45° до горизонталі. Починаючи від перетину $\bar{X} = 0,625$ вісь струмині проходить паралельно до осі повітророзподільника і на відстані $\bar{Y} = 0,20$ від його осі. При куті нахилу пластин 90° вісь припливної струмині співпадає з віссю повітророзподільника, таким чином струмина за своїми характеристиками близька до прямої. При куті нахилу пластин 30° струмина проходить найбільшу відстань від місця виходу із повітророзподільника до входу у робочу зону, таким чином відбувається найбільш ефективно переміщення припливного повітря із оточуючим і тому при такому куті нахилу можна подавати повітря з більшою швидкістю і різницею надлишкових температур на виході із повітророзподільника.

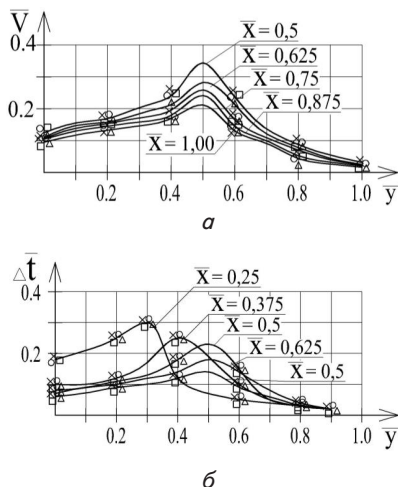


Рис. 6. Графічні залежності а – відносних швидкостей і б – відносних надлишкових температур від відносних відстаней від повітророзподільника при куті нахилу закручувальних пластин 30°

За допомогою номограми (рис. 7) запропоновано вирішення оберненої задачі. При заданій необхідній

швидкості у відповідному перетині повітророзподільника і на заданій відстані від нього можна визначити необхідний кут нахилу закручувальних пластин. Таким чином, за допомогою автоматики є можливість задати цей кут і змінювати його залежно від необхідних параметрів на вході у робочу зону. Представлену номограму (рис. 7) апроксимовано залежністю (10), а аналогічну залежність для визначення відносної надлишкової температури описано виразом (11)

$$\bar{V} = -0,28\bar{y} + (1 + 2,24\bar{y}) \cdot (1,221 - 0,126\bar{\alpha} + (-3,351 + 2,279\bar{\alpha})\bar{x} + (2,088 - 1,509\bar{\alpha})\bar{x}^2), \tag{10}$$

$$\Delta \bar{t} = -0,275\bar{y} + (1 + 2,21\bar{y}) \cdot (1,219 - 0,129\bar{\alpha} + (-3,375 + 2,248\bar{\alpha})\bar{x} + (2,076 - 1,557\bar{\alpha})\bar{x}^2). \tag{11}$$

Коефіцієнти затухання залежать від кута нахилу закручувальних пластин і визначаються за такими виразами [18]

$$m = -5 \cdot 10^{-5} \alpha^2 + 0,024 \cdot \alpha - 0,31, \tag{12}$$

$$n = -4 \cdot 10^{-5} \alpha^2 + 0,017 \cdot \alpha - 0,21. \tag{13}$$

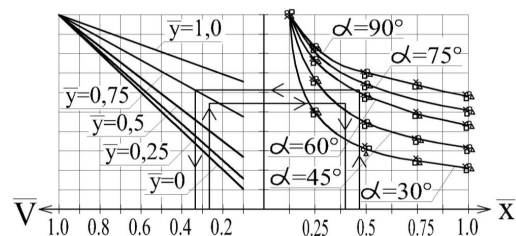


Рис. 7. Номограма для визначення відносних швидкостей залежно від відстані від повітророзподільника по горизонталі і вертикалі та кута нахилу закручувальних пластин

Чисельні значення коефіцієнтів затухання осевої швидкості m і температури n відповідно становлять $m = 0,36 - 1,43$ і $n = 0,27 - 1,04$, що свідчить про високу ефективність застосування закручених струмин. Коефіцієнти затухання суттєво збільшуються при куті нахилу пластин 90°, оскільки припливна струмина близька до прямої. Тому ефективним є використання пристрою при якомога менших кутах нахилу закручувальних пластин, де коефіцієнти затухання є мінімальними.

Експериментальні дослідження закрученої і настильної струмин проводились на установці, схема якої представлена на рис. 5 при аналогічних умовах та спрощеннях, як і при дослідженні закрученої струмині, проте в цьому випадку кільцева щілина була відкрита і змінювалась в межах 0–80 мм.

Побудовано поля відносних швидкостей при подачі повітря закрученими і настильними струминами рис. 8 та графіки розподілу швидкостей і надлишкових температур у припливній закрученій і настильній струмині на різних відстанях від повітророзподільного пристрою і при різних кутах нахилу закручувальних пластин, рис. 9. Досліджено взаємодію закрученої і настильної струмин при подачі повітря через три повітророзподільники. На основі експериментальних досліджень визначено аеродинамічний опір запропонованого повітророзподільника ПЗНС, що становить $\xi = 2,9$.

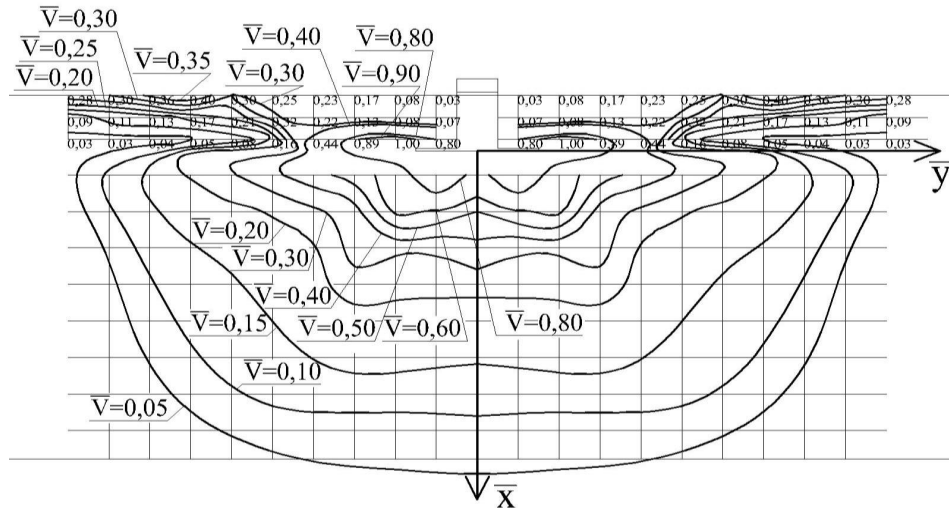


Рис. 8. Поля відносних швидкостей при подачі повітря закрученою і настільною струминами із куту нахилу пластин 30°

Досліджено рівень шуму при витіканні струмин з повітророзподільника залежно від швидкості витікання та площі вихідного отвору та встановлено, що отримані значення не перевищують допустимих для даного типу приміщень.

З отриманих результатів констатуємо, що при куті нахилу пластин 30° частина настільної струмини настає на стелю, а частина взаємодіє із закрученою струминою.

Достовірність результатів експериментальних досліджень було обґрунтовано перевіркою адекватності математичної моделі за відповідними критеріями Стюдента, 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 (14)

$$E_i = Z_i - Z_0, \tag{14}$$

де Z_i , Z_0 – річні приведені затрати відповідно трьох вибраних існуючих пристроїв (ДПУ-М, 4АПР 600x600, 1ВПТ 900x595) та запропонованого, грн./рік, які визначаються з виразу

$$Z_n = K_i \cdot E + C, \tag{15}$$

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 закрученими та настільними струминами представлено у табличній формі (табл. 1).

У табл. 1 наведено порівняння двоструминного повітророзподільника для подачі повітря закрученими і настільними струминами ПЗНС із повітророзподільником для подачі повітря зверху-вниз конічними і неповними віяловими струминами ДПУ-М, повітророзподільником для подачі повітря

зверху-вниз настільними на стелю віяловими струминами 4АПР 600x600, а також із панельним повітророзподільником 1ВПТ 900x595.

Таблиця 1

Техніко-економічні показники повітророзподільників

№ п/п	Параметри	ДПУ-М-Ø250 (14 шт.)	4АПР 600x600 (3 шт.)	1ВПТ 900x595 (4 шт.)	ПЗНС (2 шт.)
1	Капітальні затрати, грн.	49055,7	53101,6	54858,8	39319,9
2	Експлуатаційні затрати, грн./рік	18794,2	19099,5	19080,1	18223,5
3	Річні приведені затрати, грн./рік	26152,6	27064,7	27308,9	24121,5
4	Питомі річні приведені затрати, грн./(рік·м ³ /год)	7,24	7,50	7,56	6,68
5	Економічний ефект, грн./рік	2031,1	2943,2	3187,4	-

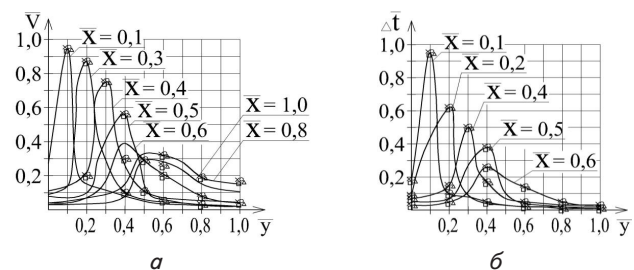


Рис. 9. Графічні залежності: а – відносних швидкостей і б – відносних надлишкових температур закрученої струмини при виході з повітророзподільника закрученою і настільною струминами при куті нахилу пластин 60°

6. Обговорення результатів дослідження ефективності використання закручених і настільних припливних струмин

Проведене техніко-економічне порівняння інженерних рішень подачі повітря у приміщення дає змогу отримати економічний ефект до 13 % у порівнянні із альтернативними схемами за рахунок скорочення ме-

режі повітропроводів, зменшення втрат тиску у системі, зменшення електричної потужності обладнання та збільшення швидкості на виході із повітророзподільника ПЗНС завдяки швидкому її затуханню до входу у робочу зону. Таким чином, доведено економічну доцільність повітророзподілу закрученими і настільними струминами.

Більш ефективним є використання пристрою при якомога менших кутах нахилу закручувальних пластин від 30° до 60° , де коефіцієнти затухання є мінімальними. Максимальний коефіцієнт аеродинамічного опору ПЗНС $\xi = 2,9$ при куті нахилу закручувальних пластин 30° .

7. Висновки

1. На основі аналізу літературних джерел обґрунтовано необхідність у розробці конструкції повітророзподільника, який забезпечить нормовані і змінні швидкості і температури повітряного середовища у робочій зоні виробничого приміщення за рахунок подачі повітря закрученими і настільними струминами.

2. Розроблено конструкцію двоструминного повітророзподільника для подачі повітря у робочу та у верхню зону приміщення закрученими і настільними струминами, що забезпечить інтенсивне затухання швидкості і температури струмини на вході у робочу зону та змінні швидкості і температури. Особливостями цієї конструкції є можливість подачі двох приплив-

них струмин, закрученої, яка утворюється пройшовши через пластини, та настільної, яка надходить із кільцевої щілини. Таким чином забезпечується інтенсивне перемішування припливних струмин із оточуючим повітрям та забезпечується змінний режим.

3. В результаті фізичного моделювання визначено динамічні та теплові характеристики теплоповітряних потоків у виробничому приміщенні при повітророзподілі закрученими і настільними струминами та удосконалено математичну модель подачі повітря двоструминним повітророзподільником при різних кутах нахилу закручувальних пластин за допомогою k – ϵ моделі турбулентності та Спаларта-Алмараса.

4. Значення коефіцієнтів затухання швидкості $m=0,36 - 1,43$ і температури $n=0,27 - 1,04$ свідчать про швидке перемішування припливного повітря із оточуючим, а отже, про високу ефективність застосування закручених струмин. Більш ефективним є використання пристрою при якомога менших кутах нахилу закручувальних пластин від 30° до 60° , де коефіцієнти затухання є мінімальними. Максимальний коефіцієнт аеродинамічного опору повітророзподільника $\xi = 2,9$ при куті нахилу закручувальних пластин 30° .

5. Виведено теоретичні залежності для розрахунку повітророзподілу закрученими і настільними струминами, представлено вплив визначальних факторів на параметри мікроклімату, проведено співставлення відомих теоретичних залежностей із отриманими експериментально і виведено відповідні поправні коефіцієнти.

Література

1. Vozniak, O. Relationship between a Person Heat Exchange and indoor climate. Technical University of Kosice Faculty of Civil Engineering [Text] / O. Vozniak, H. Myroniuk, O. Dovbush // State of Art, Trends of development and Challenges in Civil Engineering: 10th Scientific conference Rzeszyw-Lviv-Kosice. – Kosice, Slovakia, 2005. – P. 148–152.
2. Kapalo, P. Methodology for calculating the fresh air ventilation air flow rate based on CO₂ concentrations [Text] / P. Kapalo, F. Domnita, J. Lojkovics // Pollack Periodica. – 2014. – Vol. 9, Issue 2. – P. 89–97 doi: 10.1556/pollack.9.2014.2.9
3. 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.
4. 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.
5. Vozniak, O. Air distribution by opposed non-coaxial non-isothermal round air jets [Text] / O. Vozniak, Kh. Myronyuk, I. Sukholova, A. Cheterbok // Zeszyty naukowe Politechniki Rzeszowskiej. Budownictwo i Inżynieria Środowiska. – Rzeszyw, 2009. – P. 85–90.
6. 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: Budownictwo i inżynieria środowiska. – P. 151–157.
7. 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
8. Мальгин, Ю. В. Создание эффективного динамического микроклимата в помещении [Текст] / Ю. В. Мальгин // Инженерные системы. АВОК-Северо-Запад. – 2009. – № 3 (41). – С. 42–46.
9. Белова, Е. М. Центральные системы кондиционирования воздуха в зданиях [Текст] / Е. М. Белова. – М.: Евроклимат, 2006. – 640 с.
10. Lee, K. Air distribution effectiveness with stratified air distribution systems / 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>
11. Holyoake. Diffuser Performance Data Sheet, Ceiling Fixed Pattern Radial Swirl Diffuser, Model CFP Radial Induction Swirl Diffuser [Electronic resource]. – Available at: http://www.holyoake.com/home_page.html
12. Повітророзподільник. Патент на корисну модель № 40185 МПК F24F 13/06 [Текст] / Возняк О. Т., Сухолова І. Є. – № u200813086; заявл. 11.11.2008; опубл. 25.03.2009, Бюл. № 6.
13. 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, Finland. – Available at: http://acer.eng.auburn.edu/partners/conf_papers/zhang_roomvent_2007_evaluation_various_cfd_models.pdf
14. Korbut, V. Simulation of air flow in a room [Text] / V. Korbut, O. Voznyak // Nekonferency zbornik vedeckych prac. Technicka univerzita v Kosiciach. Stavebna fakulta. – Kosice, 2014. – P. 323–330.
15. Lee, H.-H. Finite Element Simulations with ANSYS Workbench 12 [Text] / H.-H. Lee. – Schroff development corporation, 2010. – 589 p.

16. Allmaras, S. R. Modi_cations and clari_cations for the implementation of the spalart-allmaras turbulence model [Text] / S. R. Allmaras, F. T. Johnson, P. R. Spalart // ICCFD7-1902 : Seventh International Conferenceon Computational Fluid Dynamics. – Big Island, Hawaii, 2012.
17. Voznyak, O. The characteristics of air swirl supply device [Text] / O. Voznyak, I. Sukholova, Kh. Myroniuk // SSP – Journal of Civil Engineering. – 2012. – Vol. 7, Issue 1. – P. 95–102. doi: 10.2478/v10299-012-0023-0
18. 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.

Подано результати чисельного моделювання і експериментальних досліджень динаміки зменшення газодинамічної стійкості ступіня осевого компресора. Виконано дослідження з визначення інформативних критеріїв виявлення передпомпажного режиму. Показано, що гармоніка зриву, що обертається, є стійкою, значно виділяється на фоні шумів, це дозволяє використати її для діагностування зриву, що обертається, як передвісника помпажу. Приведено уточнену залежність для визначення частоти зриву, що обертається. Запропоновано алгоритм виявлення передпомпажного стану компресора за рівнем вібрацій корпусу компресора для розробки автоматичних систем попередження помпажу на етапі його зародження

Ключові слова: осевий компресор, обертаний зрив, помпаж, вібросигнал, медіанна фільтрація, смуговий фільтр

Приведены результаты численного моделирования и экспериментальных исследований динамики потери газодинамической устойчивости ступени осевого компрессора. Выполнены исследования по выявлению информативных критериев обнаружения предпомпажного режима. Показано, что гармоника вращающегося срыва является устойчивой, значительно выделяется на фоне шумов, что позволяет использовать ее для диагностики вращающегося срыва как предвестника помпажа. Приведена уточненная зависимость для определения частоты вращающегося срыва. Предложен алгоритм выявления предпомпажного состояния компрессора по уровню вибраций корпуса компрессора для разработки автоматических систем предупреждения помпажа на этапе его зарождения

Ключевые слова: осевой компрессор, вращающийся срыв, помпаж, вибросигнал, медианная фильтрация, полосовой фильтр

УДК 621.452.3.037

DOI: 10.15587/1729-4061.2015.56245

ИССЛЕДОВАНИЕ МЕТОДОВ ОБНАРУЖЕНИЯ НЕУСТОЙЧИВЫХ РЕЖИМОВ РАБОТЫ ОСЕВЫХ КОМПРЕССОРОВ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ АНАЛИЗА ВИБРАЦИЙ

В. С. Чигрин

Кандидат технических наук, доцент*

E-mail: chigrin_vs@rambler.ru

С. В. Епифанов

Доктор технических наук, профессор,
заслуженный деятель науки и техники

Украины, заведующий кафедрой*

E-mail: aedlab@gmail.com

Ф. Мохаммадсадеги

Аспирант*

E-mail: farrokh_sadeghi@yahoo.com

*Кафедра конструкции
авиационных двигателей

Национальный

аэрокосмический университет

«Харьковский авиационный институт»

ул. Чкалова, 17, г. Харьков, Украина, 61070

1. Введение

В практике эксплуатации авиационной техники одной из наиболее распространенных причин отказов является нарушение устойчивой работы ГТД, что сопровождается аварийными ситуациями. Нестационарность потока воздуха на входе в компрессор авиационного двигателя может возникнуть по различным причинам:

– косая обдувка воздухозаборника при полете самолета со скольжением;

– несимметричный поток воздуха на входе в двигатель при боковом ветре;

– изменение режима работы двигателя;

– маневр самолета или вертолета с попаданием самолета или вертолета в зону турбулентности;

– отказ топливной автоматики;

– попадание струи горячих газов от предыдущего самолета на вход в двигатель при рулении или при полете группой и др.

Помпажные явления приводят к выходу из строя лопаток компрессора, перегреву лопаток турбины, низко-