

Керування динамічними і тепловими характеристиками турбулентних струминних течій методами вібраційного впливу

Вадим Корбут, д-р техн. наук, проф. ¹ (ORCID: 0000-0002-4560-5463),
Олексій Дудніков, асистент ¹ (ORCID: 0009-0000-2656-2683)

¹ *Київський національний університет будівництва і архітектури, Україна*

АНОТАЦІЯ

У роботі розглянуто підхід до активного керування характеристиками повітряних струмин для формування динамічного мікроклімату в приміщеннях із нестационарними тепловими та масообмінними процесами. Запропоновано використання вібраційного збудження елементів повітророзподільника для цілеспрямованого підвищення початкової турбулентності, скорочення довжини початкової ділянки та інтенсифікації змішування.

Ключові слова: вентиляція, динамічний мікроклімат, струминні течії, вібраційне збудження, турбулентність, коефіцієнт турбулентності, k - ϵ модель, CFD-моделювання, енергоефективна вентиляція.

1. ВСТУП

Сучасні системи вентиляції та кондиціонування повітря які працюють у приміщеннях з нестационарними тепловими і масообмінними процесами вимагають не лише стабільної подачі повітря, а й можливості динамічного керування мікрокліматом. Одним із перспективних методів є створення контрольованої турбулентності за допомогою вібраційного збудження повітряних струмин. Такий підхід дозволяє активно впливати на структуру потоку, змінювати довжину початкової ділянки, прискорювати змішування та підвищувати рівномірність температурного поля у приміщенні. На відміну від традиційних систем із фіксованими параметрами подачі повітря, технології вібраційного впливу дають змогу оперативно реагувати на зміну теплового навантаження, кількості людей чи технологічних процесів у приміщенні. Це відкриває перспективи створення адаптивних систем мікроклімату нового покоління.

2. Огляд досліджень

В попередніх дослідженнях показано, що навіть періодичні пульсації потоку призводять до істотного прискорення затухання осьової швидкості та скорочення довжини потенційного ядра. Введення параметра Струхала дозволило узагальнити експериментальні дані й сформулювати універсальні закономірності розвитку турбулентних струмин при збуреннях певної частоти [1,3].

З подальшим розвитком досліджень було чисельні моделі турбулентності. Найбільш поширеною є двохпараметрична k - ϵ модель, що описує кінетичну енергію турбулентності та швидкість її дисипації. Вона дозволяє проводити чисельні експерименти для широкого діапазону режимів і адекватно відображає процеси енергетичного обміну між середніми й пульсаційними складовими потоку. На її основі були виконані чисельні розрахунки струминних течій, що підтвердили експериментальні результати і дозволили краще описати зони інтенсивного змішування [2].

Дослідження пов'язаний із вібраційним впливом на повітряні струмини свідчать, що навіть незначні вібрації вбудованих елементів у повітророзподільного пристрою викликають зростання початкової турбулентності. Це веде

до зменшення довжини ламінарної ділянки, утворення додаткових вихорів і прискореного перемішування з навколишнім середовищем.

Сучасні CFD-моделювання (з використанням ANSYS Fluent, OpenFOAM тощо) дають змогу аналізувати не лише осьові швидкісні профілі, а й тривимірний розподіл турбулентної кінетичної енергії та температурних полів. Дослідження показали, що застосування низькочастотних вібрацій дає ефект, співставний з акустичними методами, але при цьому потребує менших енергетичних витрат і може бути простіше інтегроване у практичні повітророзподільники [2,3].

Серед методів активного впливу на струминні течії виділяють акустичне збудження, імпульсну подачу повітря та механічні вібрації. Останній метод демонструє стабільний ефект при мінімальних енергетичних витратах.

Аналіз попередніх досліджень підтверджує ключову тезу: штучне збудження турбулентності є дієвим інструментом активного керування характеристиками струмини, а його впровадження відкриває нові можливості для формування динамічного мікроклімату у приміщеннях із нестационарними процесами.

3. ВІБРАЦІЙНЕ ЗБУДЖЕННЯ ЯК МЕТОД АКТИВНОГО КЕРУВАННЯ

У класичних системах повітророзподілу властивості струминних течій визначаються геометрією і конструктивними елементами повітророзподільників. Такий підхід має обмежені можливості і не дозволяє швидко адаптувати параметри мікроклімату під змінні теплові та масообмінні навантаження. Натомість активне керування струминами передбачає навмисне введення збурень у потік, що дає змогу змінювати його структуру в реальному часі.

Серед різних методів активного впливу особливе місце посідає вібраційний вплив у повітророзподільних елементів. Коливання створюють у початковій зоні струмини додаткові вихори, які суттєво змінюють її аеродинаміку. Внаслідок цього спостерігається:

- підвищення коефіцієнта турбулентності (γ 1,5–3 рази);
- скорочення довжини початкової динамічної ділянки;
- інтенсифікація процесів змішування з навколишнім повітрям;

- формування більш рівномірного температурного поля.
Для кількісної оцінки ефекту використовується коефіцієнт турбулентності (Tu):

$$\overline{Tu} = \frac{u'}{v} \cdot 100\% \quad Tu = \frac{u'}{v} \cdot 100\% , \quad (1)$$

де u' - середньоквадратичне значення флуктуацій швидкості, $\overline{M}/\zeta_{M/c}$; v - середня осьова швидкість $\overline{M}/\zeta_{M/c}$
У стаціонарному режимі (без вібрацій) коефіцієнт турбулентності визначається за емпіричною залежністю:

$$Tu_0 \approx \frac{0,16}{Re^{1/8}} , \quad (2)$$

де $Re = \frac{U \cdot D}{\nu}$ - число Рейнольдса; $\overline{D}D$ - еквівалентний діаметр припливного отвору (ширина щілини для плоских струмин); $\overline{\nu}$ - кінематична вязкість повітря $\nu = 1,5 \cdot 10^{-5}, m^2/c$ при $t = 20^\circ C$

Щоб врахувати вібраційне збудження, вводиться коефіцієнт посилення турбулентності $\overline{K}_v K_v$:

$$\overline{Tu} = \overline{K}_v \cdot Tu_0 \quad Tu = K_v \cdot Tu_0 , \quad (3)$$

де $\overline{K}_v K_v$ - коефіцієнт посилення турбулентності від вібрацій (визначається експериментально і залежить від частоти та амплітуди коливань).

Застосування коефіцієнтів $\overline{Tu} Tu$ та $\overline{K}_v K_v$ у розрахунках дає змогу прогнозувати вплив вібрацій на довжину початкової ділянки струмини, ширину її розповсюдження та коефіцієнт ежекції. Це дозволяє адаптивно керувати характеристиками потоку і забезпечувати формування динамічного мікроклімату.

Таким чином, вібраційне збудження дозволяє реалізувати концепцію регульованої турбулентності, коли характеристики струмини задаються не тільки початковими умовами потоку, а й керованими збуреннями. Це відкриває нові можливості для формування динамічного мікроклімату - середовища, що здатне гнучко адаптуватися до нестационарних процесів у приміщеннях. Крім того, керування параметрами коливань (частотою, амплітудою та формою сигналу) створює передумови для розроблення інтелектуальних систем вентиляції, здатних автоматично реагувати на зміни температури чи концентрації забруднень у повітрі.

4. Практична значущість

Використання вібраційного збудження у повітророзподільних пристроях дозволяє перейти від пасивних систем вентиляції до активних та адаптивних технологій формування мікроклімату. Завдяки цьому досягаються наступні переваги:

- **Енергоефективність.** Інтенсифікація змішування повітря дозволяє забезпечити необхідний рівень комфорту при меншій витраті припливного повітря. Це знижує навантаження на вентилятори і системи охолодження чи нагріву.

- **Рівномірність розподілу параметрів.** Підвищення турбулентності в початковій зоні струмини зменшує довжину ламінарної ділянки, завдяки чому температура і швидкість повітря у робочій зоні стають більш однорідними. Це особливо важливо для приміщень з локальними джерелами тепла або забруднень.

- **Адаптивність.** Зміна частоти та амплітуди коливань дозволяє регулювати турбулентність у реальному часі. Таким чином, система може підлаштовуватись під змінні умови експлуатації - від різкого зростання теплових навантажень до зміни кількості людей у приміщенні або інтенсивності технологічних процесів. Це створює умови для динамічного мікроклімату, де параметри не залишаються сталими, а постійно оптимізуються.

- **Покращення умов праці.** Завдяки скороченню зон дискомфорту зменшуються ризики локального перегріву, протягів чи накопичення шкідливих домішок. Це сприяє створенню безпечних та комфортних робочих умов, що позитивно впливає на продуктивність персоналу та якість технологічних операцій.

- **Гнучкість застосування.** Вібраційні повітророзподільники можуть бути інтегровані у різні типи систем - від промислових вентиляційних комплексів до сучасних офісних і лабораторних будівель.

Подальші роботи доцільно спрямувати на чисельне моделювання процесів у струминних течіях з вібраційним збудженням, що дозволить кількісно оцінити вплив частоти та амплітуди коливань на параметри турбулентності. Такий підхід забезпечить можливість оптимізації конструкції повітророзподільників і підвищення ефективності реальних вентиляційних систем.

Таким чином, практична значущість методу полягає у можливості створення динамічного мікроклімату з високою енергоефективністю та стабільними параметрами у приміщеннях із нестационарними тепловими і масообмінними процесами. Це визначає перспективність подальших експериментальних досліджень та розроблення нових типів вібраційних повітророзподільників.

Отримані результати можуть стати основою для створення адаптивних систем вентиляції нового покоління, які поєднують вібраційні технології з автоматизованим керуванням мікрокліматом. Подальший розвиток цього напрямку дозволить зменшити енергоспоживання будівель і підвищити якість повітряного середовища.

Список літератури

- [1] Investigation on the unsteady ventilation performance of oscillating jet air supply through both spontaneous vortex street effect and active modulation / H. Wang et al. *Journal of Building Engineering*. 2023. Vol. 80. P. 108028. URL: <https://doi.org/10.1016/j.jobe.2023.108028>.
- [2] Modelling of air flow supply in a room at variable regime by using both K - E and spalart – allmaras turbulent model / V. Korbud et al. *Selected Scientific Papers - Journal of Civil Engineering*. 2017. Vol. 12, no. 2. P. 15–22. URL: <https://doi.org/10.1515/sspice-2017-0014>
- [3] Yao J., Yao Y. Unsteady Flow Oscillations in a 3-D Ventilated Model Room with Convective Heat Transfer. *Fluids*. 2022. Vol. 7, no. 6. P. 192. URL: <https://doi.org/10.3390/fluids7060192>.