

УДК 533.011:533.6.011.6

М.М. Пахачук, В.М. Турик

Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», м. Київ, Україна

Вплив конструктивних параметрів вихрової камери змішування на структуру вихідного потоку

В багатьох технологічних і енергетичних установках застосовують вихрові камери (ВК) двох типів призначення: 1 — з метою інтенсифікації процесів перемішування, покращення тепло- і масообміну в робочих середовищах; 2 — для відокремлення більш важких фракцій і очищення газів і рідин. Розглядаємо вихрові камери першого типу. Більшість відомих робіт присвячено розробці конструкцій завихорювачів і вивченню аеродинаміки закручених потоків в камерах проточного типу [1 – 3]. Найчастіше це стосувалося досліджень картин течії за фронтними пристроями камер згоряння газотурбінних установок, промислових печей, топкових пальників котельних агрегатів. Відомі також дослідження інтегральних закономірностей закручених обмежених потоків у ВК з гранично близьким розташуванням глухого торця відносно вузла тангенціального входу потоку до камери. В роботах цього напрямку [4 – 6] була виявлена особливість взаємодії ядра потоку з примежовим шаром на поверхні глухого торця: частина потоку, що потрапляє до примежових шарів на торцеву поверхню з ядра течії в камері, зростає при збільшенні параметра закрутки. Для пояснення цього явища, названого «торцевим ефектом», в роботах [5, 6] проведено теоретичний аналіз течії в торцевій зоні ВК. Однак причина потрапляння частини вхідного потоку до цієї зони з'ясована не була. В подальшому циклі експериментальних робіт з досліджень аеродинаміки ВК з різною глибиною тупикової частини, наприклад, в роботах [7, 8], детально виявлено не тільки початкову причину утворення «торцевого ефекту», але й картина течії в тупиковій області ВК (рис. 1).

313

Режимні і геометричні параметри, що відповідають рис.1, такі: Re_c – число Рейнольдса, обчислене по гідравлічному діаметру вхідного сопла і середній швидкості потоку в ньому, $Re_c=46000$; $L/d_o=4,4$ (L – відстань глухого торця від середини вхідного сопла; d_o – внутрішній діаметр циліндричної частини ВК); γ – кут тангенціальності входу потоку, $\gamma=88^\circ$; α – кут орієнтації більшої сторони

вхідного отвору прямокутної форми вхідного сопла відносно поздовжньої осі камери («осьовий кут» розташування сопла), $\alpha=0^\circ$.

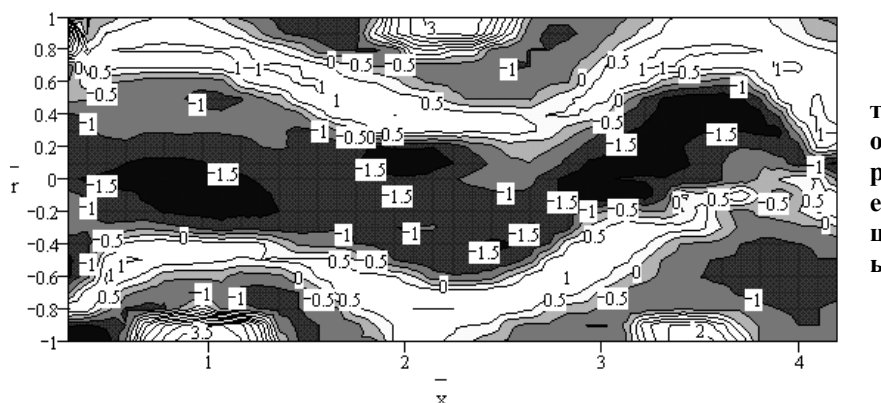


Рис. 1. Приклад розподілу ізотак безрозмірних осьових швидкостей в тупиковій частині ВК (білий і сірий кольори відповідають напрямку до торця, решта – від нього; робоче середовище – повітря) [7]

Взаємне розташування наведених на рис. 1 ліній однакової швидкості в безрозмірному вигляді (причому тенденція розташування певною мірою схожа для ВК при $Re_c=var$, $L/d_o=var$, $\gamma=var$, $\alpha=var$) показує, що тупикова течія складається з квазістійких великомасштабних вихрових утворень, які укладені одна в одну, половина з них є різноспрямованими в осьовому напрямку, в той час, як усі обертаються в одну сторону, але з різними коловими швидкостями. Зсувні ефекти на межах контактів вихрових структур спроможні генерувати більш дрібні вихори, від яких теж залежать процеси переносу у вихровій камері. Отже, тупикова частина камери є своєрідним генератором вихорів, і важливо, що його функціонування не призводить до істотного зростання аеродинамічного опору.

В даній роботі поставлена задача експериментального дослідження реакції вихідного потоку вихрової камери на зміну двох основних конструктивних параметрів — глибини розташування глухого торця циліндричної частини камери і осьового кута підведення газового потоку до цієї частини камери.

Експериментальна установка (рис. 2) являє собою незамкнену аеродинамічну трубу, робочою ділянкою якої є вихрова камера внутрішнім діаметром $d_o=0,102$ м з прозорими стінками (рис. 3). Завдяки всмоктувальній дії відцентрового вентилятора повітря потрапляє до камери через вхідне сопло,

проточний тракт якого має прямокутний переріз $0,041 \times 0,025 \text{ м}^2$, кут тангенціальності $\gamma = 88^\circ$ з можливістю варіювання осьовими кутами $\alpha = -20^\circ \div 20^\circ$. Рухомий торець дозволяє варіювати відносною відстанню глухого торця від середини вхідного сопла в межах $L/d_0 = 0 \div 4,4$. Вимірювальний комплекс являє собою апаратуру термоанемометрування фірми DISA "Elektronik", осцилограф з пам'яттю інформації, персональний комп'ютер з ліцензійним програмним забезпеченням PowerGraph, засоби візуалізації та відео- і фотореєстрації течії.

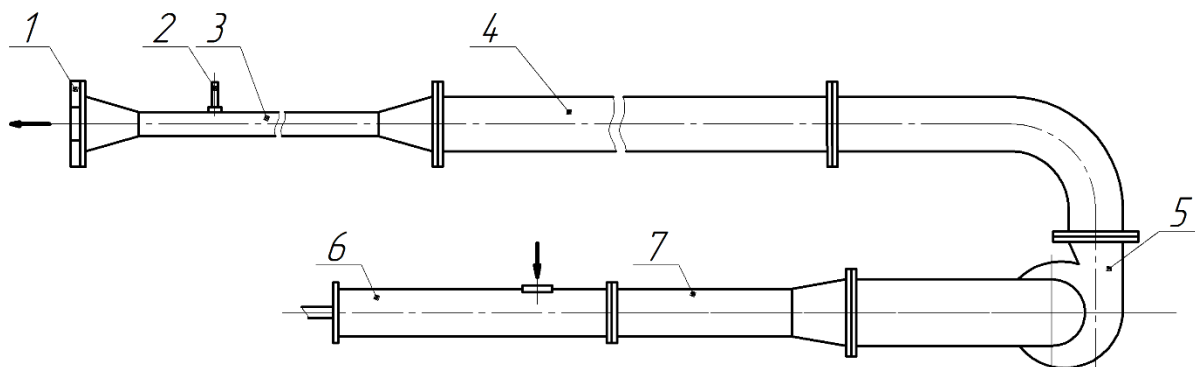


Рис. 2. Схема експериментальної установки: 1 – змінна діафрагма, 2 – пневмометрична трубка загальної витрати, 3 – витратомірна ділянка, 4 – передвключений трубопровід, 5 – відцентровий вентилятор, 6 – робоча ділянка, 7 – проміжна ділянка

315

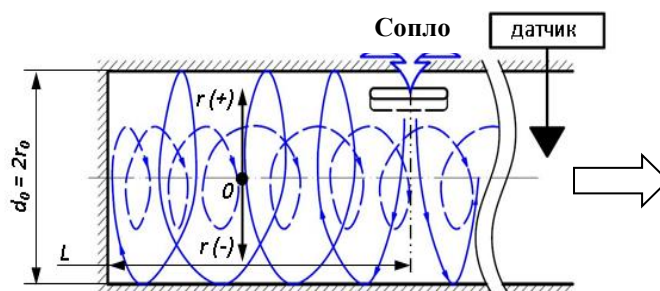


Рис. 3. Спрощена схема робочої ділянки і зона вимірювання на відстані $4,1d_0$ від центра вхідного сопла

Принцип дії термоанемометра заснований на зміні електричного опору платинової нитки датчика діаметром $5 \cdot 10^{-6} \text{ м}$ довжиною 10^{-3} м в залежності від коефіцієнта тепловіддачі при різних величинах швидкості потоку при поперечному набіганні його на нитку. Таким чином, здійснюється вимірювання місцевої миттєвої (з урахуванням пульсацій) швидкості практично в точці. Нитка

датчика термоанемометра ввімкнена в одне з плечей мостової електричної схеми, яка є збалансованою перед включенням установки. При обдуванні нитки датчика з певною місцевою швидкістю в схемі виникає відповідний сигнал неузгодженості, електронна система термоанемометра, автоматично підтримуючи температуру нитки, спрямовує сигнал на сервопідсилювач і реєструє цей сигнал у вигляді електричної напруги, виводячи покази на вольтметр середніх значень (указує напругу як аналог місцевої усередненої за часом швидкості потоку) і на вольтметр середньоквадратичних значень (указує напругу як аналог середньоквадратичних пульсацій швидкості). Крім того, аналоговий сигнал з моста термоанемометра, проходячи через фільтр нижніх частот і аналого-цифровий перетворювач, поступає до персонального комп'ютера. Похибка вимірювань профілів усередненої швидкості і середньоквадратичних пульсацій складала не більше 5%.

Досліди проводились в діапазоні чисел Рейнольдса $Re_c=50\ 000\div 100\ 000$. З цією метою за допомогою термоанемометра постійної температури було здійснено вимірювання миттєвих місцевих величин швидкості потоку вздовж вертикального діаметра вихідного перерізу ВК з наступною обробкою отриманої інформації згідно із спеціальною методикою статистичної обробки часових рядів (вибірок) відповідних даних з автоматичною реєстрацією їх на комп'ютері після перетворення із аналогової форми сигналів у цифрову. Аналіз структури вихідного потоку за характеристиками безрозмірних профілів трансверсальних складових усередненої швидкості U^* та відносної інтенсивності пульсацій ε_u у вихідному перерізі ВК в порівнянні з ВК при $L/d_0=0$ показав наступне. Як видно з рис. 4,а, при $\alpha=0^0$ видовження тупикової зони до $L/d_0=4,4$ покращує рівномірність розподілу за перерізом усередненої швидкості (до 30% в зоні переходу від вимушеного вихору до вільного).

Для інтегральної оцінки відповідної (при $L/d_0=4,4$) відмінності усереднених величин інтенсивності пульсацій $\Delta\varepsilon_{u,a} = \bar{\varepsilon}_u - \bar{\varepsilon}_{u,0}$ (по відношенню до значень $\bar{\varepsilon}_{u,0}$ для $L/d_0=0$) уведено показник впливу тупикової зони

$$k_u = \frac{\Delta\varepsilon_{u,a}}{\bar{\varepsilon}_{u,0}} \cdot 100\% = \frac{\bar{\varepsilon}_u - \bar{\varepsilon}_{u,0}}{\bar{\varepsilon}_{u,0}} \cdot 100\% .$$

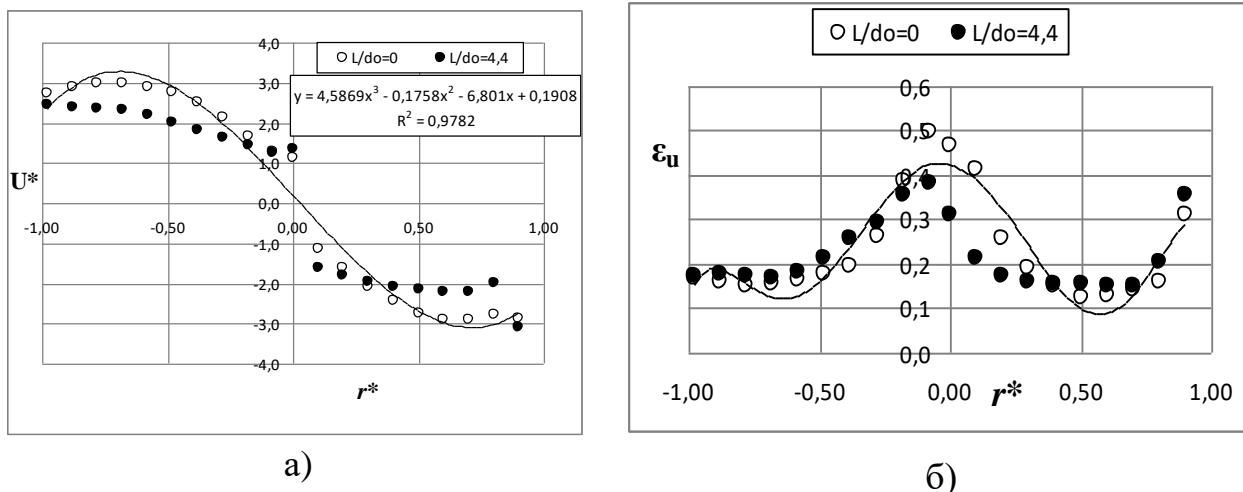


Рис. 4. Профілі трансверсальної швидкості (а) та інтенсивності пульсацій (б) при $\alpha=0^\circ$

Згідно з даними, які відображає рис. 4,б для зазначеного випадку $\alpha=0^\circ$, маємо: $\bar{\epsilon}_u = 0,22$; $\bar{\epsilon}_{u,o} = 0,23$, що дає $k_u = -4,3\%$, тобто відносно невелике зменшення середньої інтенсивності пульсацій швидкості при видовженні тупикової зони до $L/d_o = 4,4$. Однак при цьому відносна розбіжність $K_u = (\epsilon_u^{\max} - \epsilon_u^{\min}) / \bar{\epsilon}_u$ між максимальним і мінімальним значеннями ϵ_u в межах вихідного перерізу при переході від варіанта ВК з $L/d_o = 0$ до варіанта $L/d_o = 4,4$ суттєво (на 37%) зменшується.

317

Аналогічне порівняння дослідних даних для інших кутових положень вхідного сопла, свідчить про наступне. При $\alpha = +20^\circ$, згідно з дослідом, $\bar{\epsilon}_u = 0,25$, $\bar{\epsilon}_{u,o} = 0,22$, що при переході від варіанта ВК з $L/d_o = 0$ до варіанта $L/d_o = 4,4$ дає $k_u = +13,6\%$, тобто $\bar{\epsilon}_u$ зростає на 13,6% при практично незначному зростанні (+2,6%) відносної розбіжності K_u між максимальним і мінімальним значеннями ϵ_u . При $\alpha = -20^\circ$ і аналогічному переході від $L/d_o = 0$ до $L/d_o = 4,4$ маємо: $\bar{\epsilon}_u = 0,26$; $\bar{\epsilon}_{u,o} = 0,22$; $k_u = +18,0\%$, але відносна розбіжність K_u зменшується на 18,3%.

Висновки:

11. При $\alpha=0^\circ$ і $\alpha = -20^\circ$ видовження тупикової зони до $L/d_o = 4,4$ суттєво збільшує рівномірність розподілу інтенсивності пульсацій за вихідним перерізом ВК — відповідно на 37% і 18,3%, причому в останньому випадку тупикова область підсилює середню інтенсивність пульсацій на 18%. Варіант $\alpha = +20^\circ$,

$L/d_0=4,4$ збільшує середню інтенсивність пульсацій на 13,6%, але практично не покращує рівномірність її розподілу за вихідним перерізом.

2. В роботі реалізовано інтегральний метод квазістаціонарного керування інтенсивністю і рівномірністю процесів перемішування вихідних потоків вихрових камер шляхом вибору найбільш раціональних комбінації таких конструктивних параметрів, як кут осової орієнтації підведення вхідного потоку і глибина розташування глухого торця відносно проточного тракту впускного сопла, що важливо для практики проектування камер змішування.

Список використаних джерел

1. Гупта А., Лили Д. Сайред Н., Закрученные потоки / пер с англ. В. И. Васильева [и др.] под ред. С. Ю. Крашенинникова. – М. : Мир, 1987. – 588 с.
2. Халатов А.А., Авраменко А.А., Шевчук И.В. Теплообмен и гидродинамика в полях центробежным массовых сил: В 4-х т. – Киев: Ин-т техн. теплофизики НАН Украины, 2000. – Т.3: Закрученные потоки. – 474 с.
3. Изучение аэродинамической структуры потока в модели вихревой топки стереоскопическим методом цифровой трассерной визуализации / И.С. Ануфриев, П.А. Куйбин, Е.Ю. Шадрин и др. // Теплофизика и аэромеханика. – 2016. – №4. – Новосибирск. – С.645–648.
4. Wormley D. N. An Analytical Model for the Incompressible Flow in Short Vortex Chambers / D. N. Wormley // Trans. ASME. Ser. D. — 1969. — Vol. 91, No. 2. — P. 264–276.
5. Гольдштик М.А. Вихревые потоки: [монография] / М.А. Гольдштик – Новосибирск : Наука, Сиб.отд-ние, 1981. – 366 с.
6. Кутателадзе С. С. Аэродинамика и тепломассообмен в ограниченных вихревых потоках: [монография] / С. С. Кутателадзе, Э. П. Волчков, В. И. Терехов. — Новосибирск: Ин-т теплофизики СО АН СССР, 1987. — 282 с.
7. Бабенко В. В. Макет вихревых структур при течении потока в вихревой камере / В. В. Бабенко, В. Н. Турик // Прикладна гідромеханіка. — 2008. — Т. 10 (82), № 3. — С. 3–19.
8. Турик В.М. Механізм формування [торцевого ефекту в газових потоках вихрових камер](#) / В.М. Турик // Mechanics and Advanced Technologies. — 2019. — № 3 (87). — С.100–106.