

В.В. Бабенко, д-р техн. наук  
Інститут гідромеханіки НАН України, м. Київ,  
В.М. Турик, канд. техн. наук,  
Д.Є. Мілюков  
Національний технічний університет України «КПІ», м. Київ

## ВПЛИВ РОЗОСЕРЕДЖЕНОГО ПІДВЕДЕННЯ ГАЗУ НА КІНЕМАТИКУ ТЕЧІЇ У ТУПИКОВІЙ ЗОНІ ВИХРОВОЇ КАМЕРИ

На основани експериментальних досліджень пневмометричним методом поля осевих швидкостей побудовані схематичні картини руху газу в тупиковій області вихрової камери з розподіленим підводом газу при різних геометричних і режимних параметрах. Підтверджено наявність «торцевого ефекту» — явища стаціонарного регулярного течення к торцю, що складається з взаємодіючих і вложенних один в другий циліндричних вихрових потоків. Визначено суттєві відмінності в розташуванні та макроструктурі регулярних вихрових образунків в порівнянні з камерою при концентрованому підводі газу: в даному випадку відсутній спіралевидний енергонесучий периферійний вихровий потік в напрямку глухого торця (но в пристінній зоні переважає течення від торця, тому замість чотирьох меандруючих циліндричних вихрових структур виявлено три найбільш стабільних структури).

The schematic pictures of gas current in dead end zone of vortex chamber with distributed gas input for different geometrical and regime parameters are built on the basis of experimental investigations of axial velocity profiles by pneumometric method. Existence of the «dead end effect» — the phenomenon of stationary regular current to dead end with inserting one to another and revolving cylindrical vertical flows is confirmed. Essential difference of an arrangement and a macrostructure of regular vortical formations in comparison with the chamber with the concentrated gas intake is defined. In this case there is no helicoid power-bearing peripheral vortical flow in a direction to a dead end (but in a wall zone the current from an end face prevails, therefore instead of four meandering cylindrical vortical structures it is revealed three steady structures).

### Вступ

Закрутка потоків, що забезпечується вихровими камерами (ВК), широко використовується в енергетичних і технологічних машинах та апаратах для організації робочих процесів, інтенсифікації або, навпаки, послаблення переносу маси, імпульсу та теплоти [1–4]. За умов використання для місцевого закручування завихрювачів тангенційного і тангенційно-щілинного типів вздовж проточної частини ВК має місце нестабілізована закручена течія достатньо складної структури [1, 4, 5]. Причому в периферійній області ВК частина такої течії має від'ємний поздовжній градієнт статичного тиску, а у приосьовій — має місце частина течії з додатним градієнтом, що водночас з радіальними градієнтами тиску суттєво ускладнює структуру потоку [6].

При утворенні зон зворотної течії, що використовуються у камерах згоряння для попередження відриву полум'я, виникають умови інтенсифікації турбулентного перемішування. Разом з тим, якщо із збільшенням радіусу момент кількості руху та густини збільшується, то будь-яке радіальне переміщення турбулентних молекул, що викликає пульсаціями швидкості, пов'язане з виконанням

роботи проти дії відцентрової сили. Це у свою чергу призводить до гальмування процесів переносу в радіальному напрямку та сприяє усталеній стратифікації за густиною та температурою. Таке явище використовується для покращення характеристик газових завіс у високотемпературних установках та плазмовій технології з метою захисту поверхні каналів від впливу високих температур. Теоретичний аналіз та експериментальні дані робіт [1, 7, 8] також свідчать про можливість стабілізуючого та навіть блокуючого впливу закрутки на турбулентний перенос у ВК.

Визначальну роль у формуванні областей з активним та консервативним характером впливу відцентрових масових сил на структуру потоку відіграють закони радіальної зміни осьової та трансверсальної складових швидкості [3–5]. Для проточної частини ВК ці закони вивчено достатньо повно, ніж для тупикової області. Відзначається також існування так званого «торцевого ефекту» [9, 10], нове й більш повне пояснення якого на основі чітко виділених регулярних вихрових структур дано авторами [11–13] для камер із завихрювачами у вигляді поодиноких сопел та частково, авторами [14] для ВК із поясами рівномірно розподілених по колу впускних вікон прямокутного перерізу.

Мета представленої роботи — експериментальне отримання та опис картини розподілу осьових швидкостей в тупиковій зоні циліндричної ВК із визначенням особливостей, що мають місце при використанні розосередженого підведення газу через пояс впускних вікон прямокутного перерізу, рівномірно розподілених по колу камери.

### Постановка задачі дослідження

Дані роботи [14] відображають результати лише стробоскопічного дослідження розподілу осереднених у часі трансверсальних складових швидкості руху повітря в тупиковій області ВК. Але для побудови фізичної моделі течії в зазначеній зоні необхідні відомості про поля інших складових швидкості. Це потребує постановки нових експериментів з більш широкими, ніж стробоскопіювання можливостями.

У представленій роботі ставиться задача експериментального дослідження поля осьових швидкостей тупикових течій у ВК з «глибоким» розташуванням торця для з'ясування особливостей формування макроструктури течії при розосередженому підведенні газу, визначення розміщення зон зворотних течій (у напрямку глухого торця) та впливу на картину течії геометричних та режимних факторів: кутів тангенціальності впускних вікон, кутів розташування вікон по відношенню до поздовжньої осі циліндра ВК, числа Рейнольдса потоку у впускних вікнах. Глибина встановлення глухого торця циліндричної камери була фіксованою. В якості робочої рідини використовувалось повітря.

### Експериментальна установка та методика проведення досліджень

Для проведення експериментальних досліджень використовувався описаний раніше [11, 12] аеродинамічний стенд з деякими відмінностями у геометричних (рис. 1) та режимних параметрах робочої ділянки.

Як і раніше, робоча ділянка складалася з прозорої циліндричної камери із внутрішнім діаметром  $d_0 = 0,102$  м, а глибина встановлення торця відносно центра вхідного вікна складала  $L = 6,44$ ,  $d_0 = 0,657$  м. В якості завихрювачів використовувались змінні вставки з поясами вхідних вікон, які рівномірно розташовувались по периметру ВК. Розміри вікон прямокутного перерізу складала  $a \times b = 0,024 \times 0,007$  м<sup>2</sup> кожне у нормальному до вхідного потоку перерізі. Набір змінних вставок дозволив забезпечити кути тангенціальності входу потоку до ВК [12], що варіювались у діапазоні  $\gamma = 10-90^\circ$ . Площа сумарного прохідного перерізу поясів вікон, що віднесена до прохідного перерізу циліндричної частини ВК, складала  $S = 0,123$ . Вона дорівнювала відповідному параметру випробуваних раніше завихрювачів у вигляді поодиноких сопел [11, 12] для можливості порівняння картин течій у різних ВК, що відрізняються від  $S = 0,352$  вже випробуваного варіанту поясів вікон [14]. Кути розташування довшої сторони вікна прямокутного перерізу відносно поздовжньої осі ВК так само, як і в [11, 12], складала —  $20^\circ \leq \alpha \leq 20^\circ$  проти  $\alpha = 0^\circ$  у [14].

У відповідності до технічних можливостей аеродинамічного стенда дослідження проводились у діапазоні зна-

чень числа Рейнольдса, що були визначені за величиною середньої швидкості повітря у впускних вікнах та їх гідравлічного діаметра,  $Re_a = 19000-27000$  (у випадку попереднього варіанту [14]  $Re_a = 10000-27077$ ).

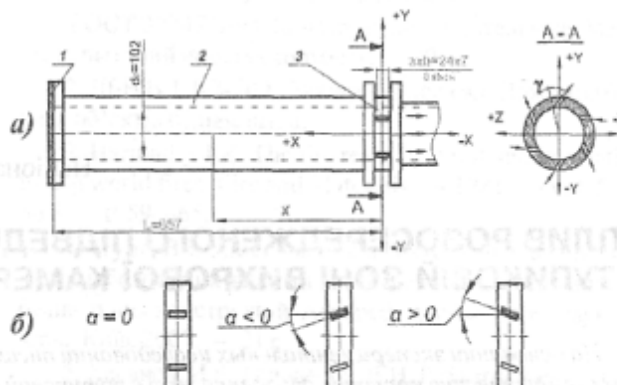


Рис. 1. Схема робочої ділянки стенда: а) вигляд ВК з боку спостерігача (1 — глухий торець, 2 — корпус камери, 3 — змінні вставки); б) різновиди змінних вставок.

Вибір однакового значення еквівалентного (гідравлічного) діаметра  $D_e$  для поодиноких сопел та досліджуваного поясу з метою порівняння результатів вимірювань розподілу швидкостей у потоках не є виправданим. По-перше, структура течії, як і природа аеродинамічного опору у напівобмежених струменях, для цих двох типів завихрювачів істотно відмінні: для поясів вхідних вікон потік у ВК та вторинні вихрові утворення формуються в результаті взаємодії шести струменів як з криволінійною стінкою, так само і між собою, на відміну від умов у камері з поодиноким впускним соплом. По-друге, розрахункові оцінки показують, що формальне витримання  $D_e = idem$  для обох випадків могло призвести до зовсім різних за формою та орієнтацією вхідних струменів безпосередньо після завихрювачів: нерівність  $a > b$  для прямокутних перерізів струменів за соплом могла перетворитися у зворотню  $b > a$  для поясу вікон з  $a \leq 0,024$  м (через конструктивні можливості забезпечення  $a > 0,024$  м у завихрювачах такої моделі ВК неможливе), а діапазон варіювання осьових кутів міг бути змінений з раніше досліджуваного [11, 12, 14] —  $20^\circ \leq \alpha \leq 20^\circ$  на  $70^\circ \leq \alpha \leq 110^\circ$ . Таким чином, від «поздовжньо-щільних» (по відношенню до поступального потоку у ВК) завихрювачів ми повинні були перейти до «поперечно-щільних», що є предметом окремих досліджень.

У представленій роботі проводились вимірювання осереднених за часом осьових  $U$  складових швидкості у тупиковій зоні ВК за допомогою Т-подібного екранованого насадка швидкості (ТЕНШ), що був підключений до спиртового похилого диференційного манометра. ТЕНШ є модифікованим варіантом Т-подібного насадка, який рекомендовано у роботах [15, 16]. Конструкція ТЕНШ забезпечує нечутливість його скосів потоку на  $\pm 40^\circ$ . За умов вимірювання однієї із складових швидкості екран насадка виділяє у потоці відповідну струминку та суттєво знижує вплив інших складових швидкості на покази приладу.

Звісно, негативний вплив екрану на точність вимірювання осьових швидкостей проявляється лише поблизу стінки ВК.

Результати вимірювання осьових швидкостей за допомогою ТЕНШ були перераховані у відповідні дійсні значення швидкостей за емпіричними залежностями. Для наочності представлення результатів використовувалось програмне забезпечення SigmaPlot 11.0 (фірми Systat Software, Inc.), за допомогою якого картини течій було представлено у вигляді контурних графіків. Використання зазначеного програмного забезпечення дало змогу за результатами вимірювань швидкостей в окремих перерізах ВК побудувати макромасштабні картини течій, які є інформаційно важливим джерелом для аналізу механізму взаємодії вихрових структур у порожнині ВК та встановлення розташування зон зворотних течій.

### Результати дослідження

Дані вимірювань осьової складової  $U$  швидкості дозволили вважати картину середньої течії у тупиковій зоні ВК осесиметричною. На рис. 2, 3, 4 та 5 (напрямок осей координат для контурних графіків прийнятий згідно схеми робочої ділянки — рис. 1) зображено у безрозмірному вигляді картини розподілу осьової швидкості  $U^* = U/U_a$  у залежності від відносного радіусу  $r^* = r/r_0$  та глибини  $x^* = x/L$  тупикової області (не враховуючи зону примежового шару вздовж циліндричної стінки) при мінімальному ( $\gamma_{\min} = 10^\circ$ ) та максимальному ( $\gamma_{\max} = 90^\circ$ ) кутах тангенціальності. Тут:  $U_a$  — середньовитратна швидкість у проточній частині ВК;  $r$  — поточний радіус,  $r_0 = d_0/2$ ;  $x$  — поздовжня координата.

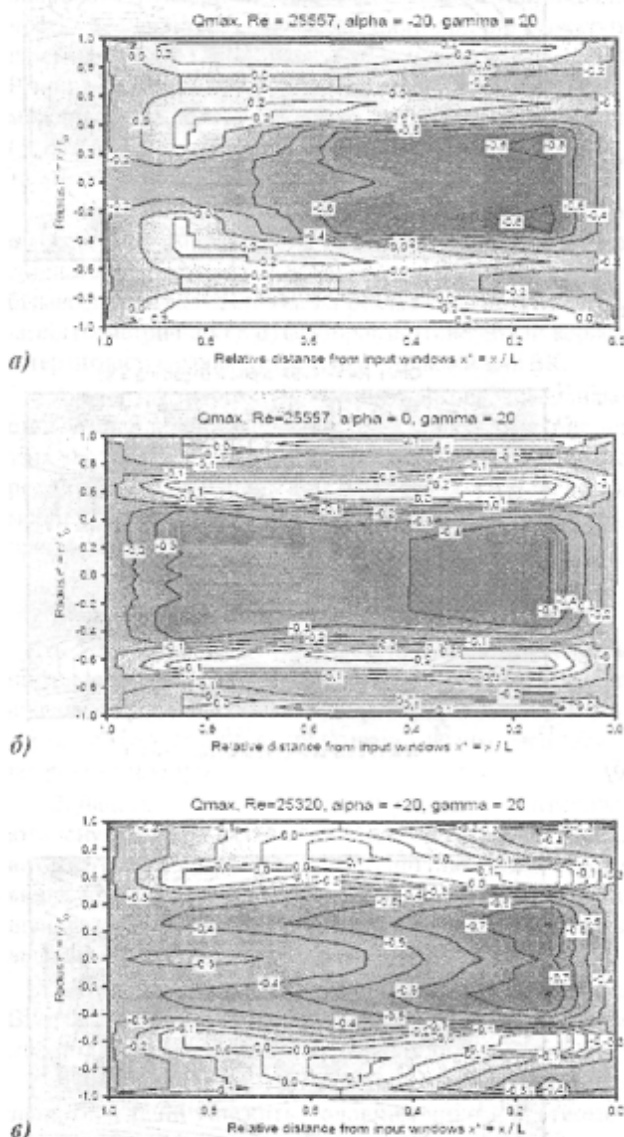


Рис. 2. Картини розподілу осьових швидкостей при  $\gamma_{\min} = 10^\circ$  та максимальній витраті (темні ділянки відповідають прямій течії від торця у бік активної зони ВК, а світлі — зони зворотних течій).

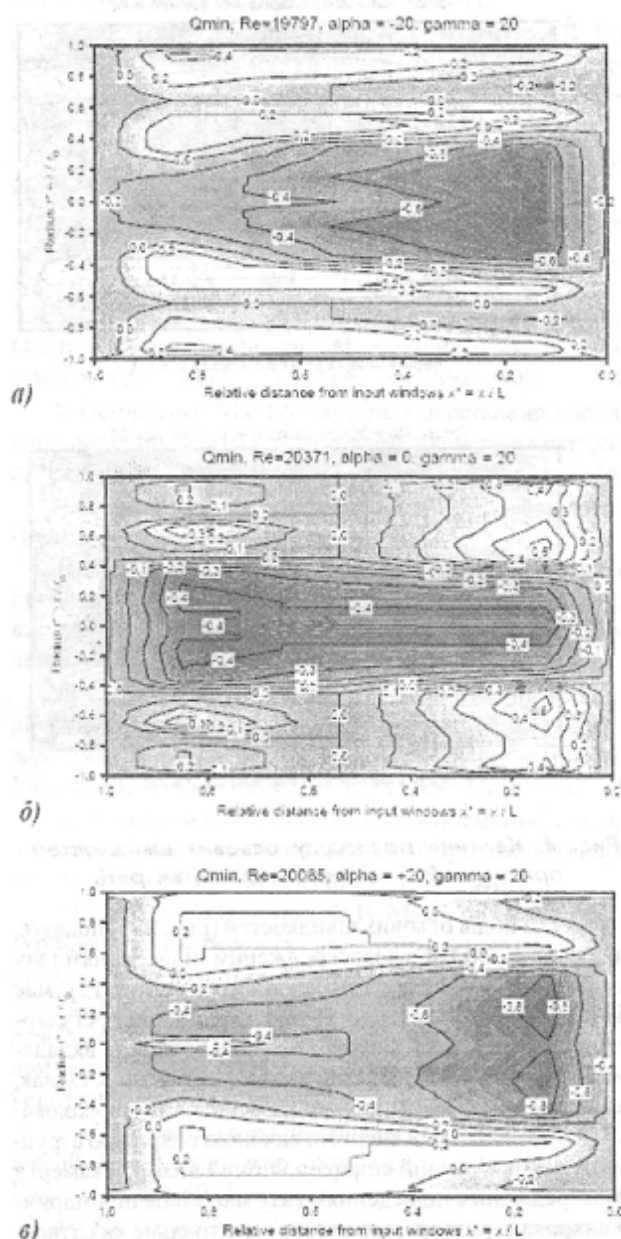


Рис. 3. Картини розподілу осьових швидкостей при  $\gamma_{\min} = 10^\circ$  та мінімальній витраті.



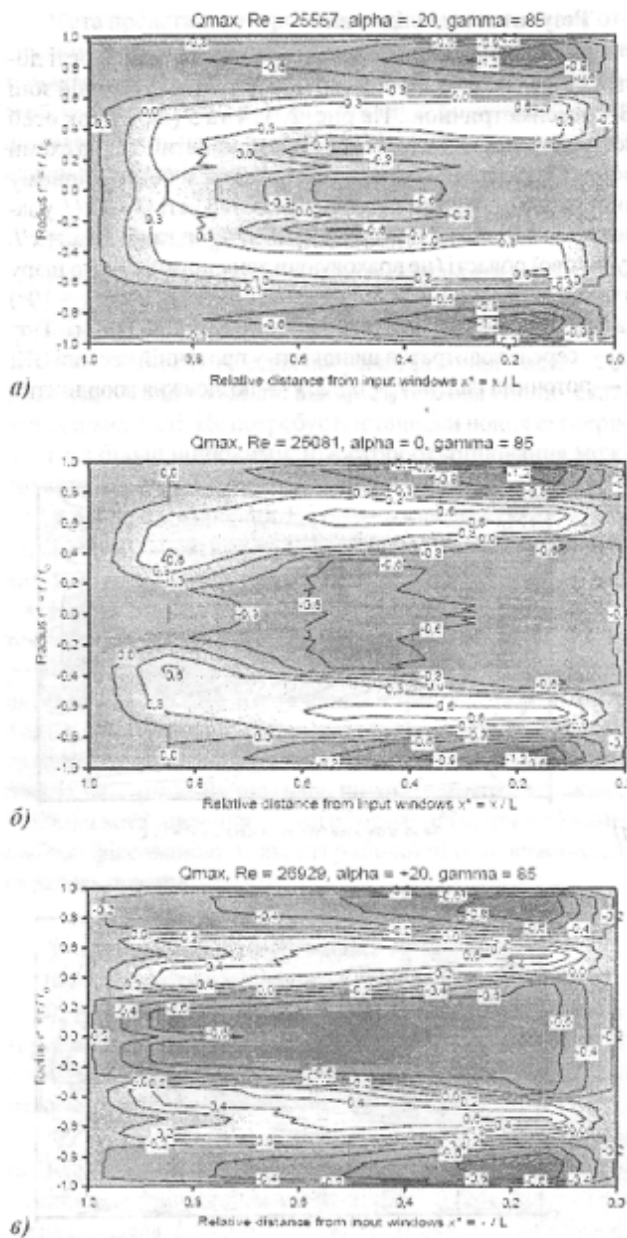


Рис. 4. Картини розподілу осьових швидкостей при  $\gamma_{\min} = 90^\circ$  та максимальній витраті.

Аналіз полів осьових швидкостей (рис. 2–5) показує, що в порожнині ВК з розосередженим підведенням газу так само, як у випадку з поодиноким соплом [12], має місце «торцевий ефект» — явище стаціонарної регулярної течії до торця, що складається з обертових та вкладених один в одний циліндричних вихрових потоків. Однак, на відміну від камери з поодиноким сопловим завихрювачем [12], де найбільш енергонасиченою вихровою структурою є пристінковий спіралеподібний вихор, у камері з розосередженим підведенням газу має місце циліндрична вихрова структура, що огортає центральне квазітвердотільне ядро основного потоку та рухається у зворотному до основного потоку напрямку. Причому, якщо розосереджений завихрювач має мінімальну тангенціальність вхідного потоку (рис. 2 та 3), то зазначена циліндрична

структура розташовується приблизно в зоні  $0,5 \leq r^* < 1$ , та може бути радіально розширована (рис. 2а, б та 3а) або поздовжньо розділена (рис. 2в та 3б, в) у залежності від зміни осьового кута впускних вікон  $\alpha$ . Розподіл ізотак руху показує, що при мінімальній тангенціальності вхідного потоку розосередженого завихрювача квазітвердотільне ядро основного потоку зберігає свою форму, але в залежності від кута  $\alpha$  та, меншою мірою, від числа  $Re$ , лише змінює внутрішню макроструктуру течії по довжині торцевої області.

Розглянемо тепер випадок із завихрювачем, що має максимальну тангенціальність (рис. 4 та 5). Тут зворотна циліндрична структура сплющується у радіальному напрямку до значень  $0,4 \leq r^* < 0,8$ .

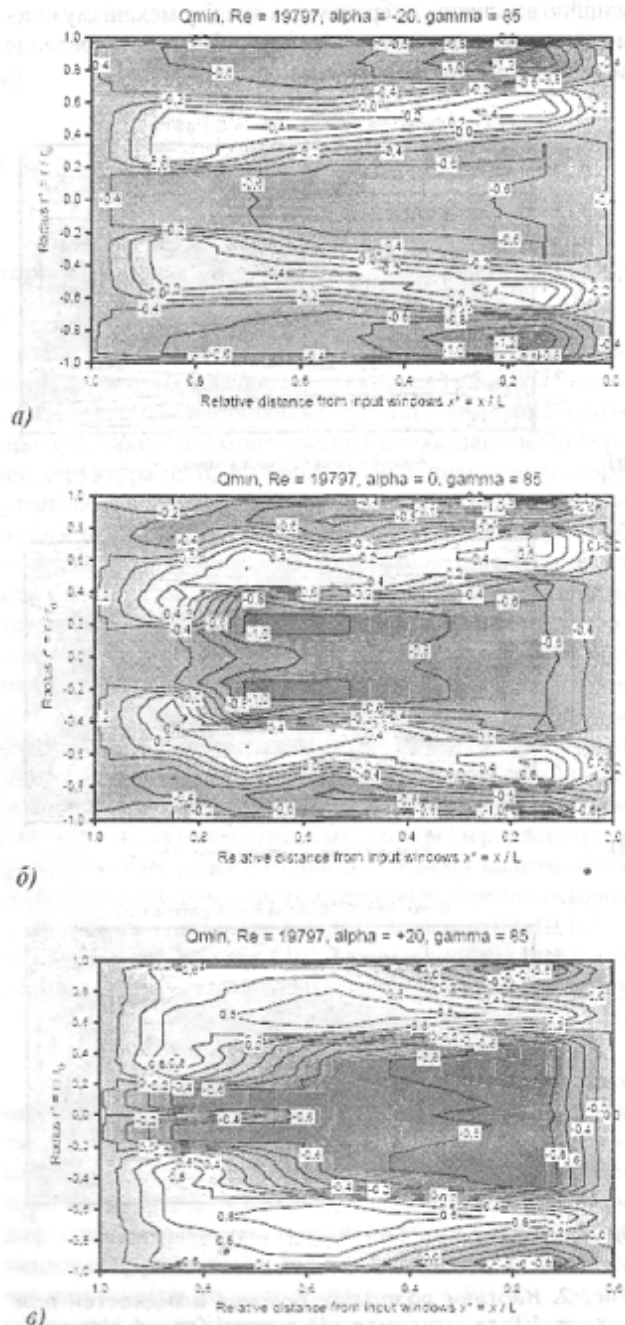


Рис. 5. Картини розподілу осьових швидкостей при  $\gamma_{\min} = 90^\circ$  та мінімальній витраті.

Таке сплющування структури призводить до збільшення середніх значень осевої швидкості в середині структури, які компенсують нестачу витрати у зворотному напрямку згідно з гіпотезою про суцільність руху середовища. Поява прямої течії у пристінковій області в напрямку виходу з ВК, що є причиною сплющування зворотної циліндричної структури, призводить до послаблення стійкості течії у ядрі потоку. Більш стабільний характер ядра прямого потоку має місце лише тоді, коли осеова складова напрямку вхідного потоку збігається з напрямком основного потоку ВК (рис. 4в та 5в). За умов зміни осеового кута в діапазоні  $-20^\circ \leq \alpha \leq 0^\circ$ , ядро потоку має менш стійкий характер, а зворотна циліндрична вихрова структура або зникає у приторцевій області (рис. 4а) або деформується у радіальному напрямку (рис. 4б та 5а, б).

Отже, зона зворотних течій у вигляді циліндричної вихрової структури за умов максимальної тангенціальності має характер, схожий на циліндричну структуру при мінімальній тангенціальності вхідного потоку до ВК. Різниця полягає лише у їх радіальному розташуванні та у можливості за допомогою зміни геометричних факторів ( $\gamma$ ,  $\alpha$ ) деформувати виявлену зону зворотної течії при  $\gamma_{\max}$  та модифікувати її при  $\gamma_{\min}$ .

Слід зазначити, що «зворотна» циліндрична структура в досліджуваному діапазоні зміни кутів тангенціальності вхідного потоку має регулярний характер і залежить у більшості випадків не стільки від режимних (число Re), скільки від геометричних ( $\gamma$ ,  $\alpha$ ) факторів, що говорить на користь когерентності вихрових структур у тупиковій зоні ВК.

Аналізуючи отримані картини полів осевих швидкостей потоку, де зони зворотних течій зникають (рис. 4а) та розходяться до самої стінки (рис. 4в), представляє інтерес поведінка цих зон у приторцевій області за умови менш глибокої порожнини камери, тобто при  $L \rightarrow 0$ , що є предметом наступного етапу досліджень.

#### Висновки

1. Удосконалено існуючу методику експериментального дослідження макроструктури течії газу в найменш вивченій частині вихрових камер — у тупиковій зоні, що характеризується дією впорядкованих великомасштабних вихрових структур.
2. Дані експериментального дослідження підтверджують існування так званого «торцевого ефекту» у вихрових камерах незалежно від організації підведення середовища, причому характер розподілу осевих складових швидкості у тупиковій області суттєво відрізняється від відомих даних для проточних частин ВК.
3. Побудовані картини руху газу в тупиковій ділянці ВК дали змогу виявити основну зону зворотних течій, що має вигляд циліндричних когерентних вихрових структур.
4. Встановлено, що розташування та модифікація зони зворотних течій залежить, головним чином, від геометричних факторів вхідного потоку, а саме осеового кута розташування вхідних вікон  $\alpha$  та кута тангенціальності  $\gamma$ .
5. Сформульовано задачу наступного етапу експериментальних досліджень, протягом якого будуть проаналізовані зміни картин розподілу осевих швидкостей при

відповідній зміні глибини тупикової порожнини вихрової камери.

#### Література

1. Кутателадзе, С.С., Волчков, Э.П., Терехов, В.И. Аэродинамика и теплообмен в ограниченных вихревых потоках. — М.: Энергоатомиздат, 1987. — 283 с.
2. Турбулентное смешение газовых струй / Г.Н.Абрамович, С.Ю.Крашениников, А.Н.Секунов и др.; Под ред. Г.Н.Абрамовича. — М.: Наука, 1974. — 272 с.
3. Щукин, В.К., Халатов, А.А. Теплообмен, массообмен и гидродинамика в ограниченных вихревых потоках. — М.: Машиностроение, 1982. — 200 с.
4. Халатов, А.А., Авраменко, А.А., Шевчук, И.В. Теплообмен и гидродинамика в полях центробежных массовых сил. — К.: Ин-т техн. теплофизики НАН Украины, 2000. — Т. 3: Закрученные потоки. — 474 с.
5. Гупта, А., Лилли, Д., Сайред, Н. Закрученные потоки. — М.: Мир, 1987. — 588 с.
6. Сухович, Е.П. Турбулентное смешение ограниченных закрученных струй // Изв. АН Латв. ССР. Сер. физ. и техн. наук. — 1982. — № 1. — С. 72—80.
7. Левин, В.Б. О стабилизирующем влиянии вращения потока на турбулентность // Теплофизика высоких температур. — 1964. — Т.2, № 6. — С. 892—900.
8. Петриченко, М.Р. Блокирующее действие вращательного движения газа на теплопередачу в камере сжатия (сгорания) // Двигателестроение. — 1990. — № 4. — С. 57—58.
9. Гольдшттик, М.А. Вихревые потоки. — Новосибирск: Наука, Сиб. отделение, 1981. — 366 с.
10. Уормли. Аналитическая модель несжимаемого потока в коротких вихревых камерах // Труды Америк. общ-ва инженеров-механиков: Теор. основы инженерных расчетов. — 1969. — 91, № 2. — С. 145—159.
11. Турик, В.Н., Макаренко, Р.А. Обобщение характеристик тангенциальных течений в тупиковой части вихревой камеры // Вестник Нац. техн. ун-та Украины «КПИ»: Машиностроение. — 2000. — 1, № 38. — С. 38—44.
12. Макаренко, Р.А., Турик, В.Н. Кинематика течения в тупиковой части вихревой камеры // Прикладная гидромеханика. — 2001. — 3(75), №1. — С. 46—51.
13. Бабенко, В.В., Турик, В.Н. Макет вихревых структур течения в вихревой камере // Прикладная гидромеханика. — 2008. — 10 (82), №3. — С. 3—19.
14. Турик, В.Н., Макаренко, Р.А. Аэродинамика вихревой камеры с равномерным тангенциальным подводом воздуха // Збірник праць Кіровоградського держ. техн. університету. — 2000. — №7. — С. 38—43.
15. Прикладная аэродинамика / Н.Ф.Краснов, В.Н.Кожешовой, А.Н.Данилов и др.; под ред. Краснова Н.Ф. — М.: Высшая школа, 1974. — 732 с.
16. Солохин, Э.Л. Испытания авиационных воздушно-реактивных двигателей. — М.: Машиностроение, 1975. — 356 с.

Надійшла 05.07.2010 р.