

В.А. Ковальов

Національний технічний університет України
 “Київський політехнічний інститут”,
 кафедра прикладної гідроаеромеханіки і механотроніки

СТРУКТУРА ЦИРКУЛЯЦІЙНИХ ТЕЧІЙ В'ЯЗКОЇ НЕСТИСЛИВОЇ РІДИНИ ПОБЛИЗУ РАДІАЛЬНИХ ПЕРЕГОРОДОК

© Ковальов В.А., 2013

Наведені результати чисельного моделювання осесиметричних течій в резервуарах з жорсткими перегородками, проведений аналіз структури циркуляції і характеру розвитку течії за часом залежно від геометричних параметрів перегородок і чисел подібності Рейнольдса, Ейлера і Россбі. Подано результати порівняння чисельних даних з експериментальними, встановлені якісні характеристики течій і практичні рекомендації з проектування подібних внутрішніх конструкцій стабілізуючих пристроїв.

The results of numerous simulation of axisymmetric flows in limited quantities with hard baffles, analyzed the structure and nature of the flow circulation in time, depending on the geometrical parameters of the baffles and the Reynolds, Euler and Rossby numbers. The results of the numerous and experimental data comparison, set the qualitative characteristics of flow and practical recommendations for the design of these internal structures stabilizing devices.

Постановка проблеми. Чисельне моделювання течій нестисливої рідини в резервуарах широко використовують для випробування елементів і систем рушійних установок космічних апаратів (КА), що містять велику кількість рідкого палива на борту. Під час руху в умовах невагомості КА піддаються сильному впливу з боку рухомої рідини, що може спричинити втрату стійкості та аварійні ситуації на борту.

Для ефективного впливу на інерційні течії рідкого палива застосовують різноманітні конструкції внутрішніх стабілізуючих пристроїв (ВСП) у вигляді капілярних забірних пристроїв, придонних радіальних і кільцевих конструкцій для уловлювання рідини і забезпечення гарантованого запуску рушійної установки КА. Велика маса і габарити подібних пристроїв приводять до необхідності оптимізації їх конструкції та визначення оптимальних режимів компенсації збурень з боку рідини.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Експериментальні дослідження внутрішніх інерційних течій пов'язані з великими матеріальними витратами на засоби вимірювання та реєстрації [1, 2], трудомісткі за часом і доповнюються, зазвичай, результатами математичного моделювання, проведеного з урахуванням певних гіпотез і граничних умов для наближеного розв'язання рівнянь руху рідини сучасними чисельними методами. Від потужності обчислювальних засобів залежить тривалість обчислень, адекватність математичної моделі і точність відтворення замкнених осесиметричних течій рідини в резервуарах.

Формулювання мети дослідження. Математичне моделювання замкнених потоків, наприклад, осесиметричних течій в'язкої нестисливої рідини в резервуарах, ґрунтується, зазвичай, на використанні повних рівнянь руху Нав'є-Стокса, виражених у відповідних координатах. Для течій у циліндрі застосовуються циліндричні координати (R, φ, Z) , а для течій у сферичному резервуарі – сферичні (R, θ, φ) .

З урахуванням граничних умов прилипання рідини на стінках і нульових швидкостей на осі обертання посудини, а також твердотілого розподілу швидкості у початковий момент часу течії в усьому

просторі резервуару можна розглядати нелінійну модель нестационарного розподілу швидкостей, тисків і крутних моментів в'язкого тертя рідини на стінках і динамічного впливу на ВСП.

Застосування ВСП передбачало варіювання геометрією перегородок, характеру розташування поблизу стінок посудини і проникності їх поверхні за рахунок перфорації отворами різного діаметра. Розв'язання подібної параметричної задачі можна отримати для різних критеріальних параметрів, наприклад, чисел Рейнольдса, Россбі, Ейлера тощо. Тому результати моделювання можна поширити на інші обертові об'єкти з рідиною, умови руху і різну геометрію паливних резервуарів КА.

За результатами розрахунків можна визначити як інтенсивність циркуляцій, так і їх геометричні параметри – довжину, ширину і орієнтацію вторинних течій у супутньому сліді за перегородками. Ці дані дозволять оцінити загальну структуру течії у разі обтікання перешкод, а також кількісно визначити тривалість існування тих чи інших вторинних течій. Це своєю чергою надасть можливість точно встановити силові впливи на перегородки та визначити необхідні компенсаційні заходи для впливу на збурення з боку рідини, які мають місце в паливних резервуарах КА при кутовому маневруванні або обертанні на орбіті.

Доволі потужним обчислювальним інструментом для чисельного моделювання подібних задач є пакет прикладних програм типу ANSYS 12.1, ліцензований варіант якого є у Центрі суперкомп'ютерних обчислень при НТУУ «КПІ», який використовувався у пропонованих дослідженнях. Результати тестових і робочих розрахунків на циліндричній та сферичній моделях паливних резервуарів КА наведені в цій статті.

Викладення основного матеріалу дослідження. Для перевірки адекватності математичної моделі в розглянутому діапазоні чисел Рейнольдса $Re=700...12500$ проводилися тестові розрахунки двовимірних задач обтікання перешкод у вигляді плоских ортогональних перегородок, прилеглих до стінки та віддалених від стінки посудини із зазорами різної величини. Побудовано поля швидкостей поблизу перегородок, які дозволяють кількісно визначити структуру течії в характерних областях – супутньому сліді за перегородкою, біля стінки, а також на кромках перегородок.

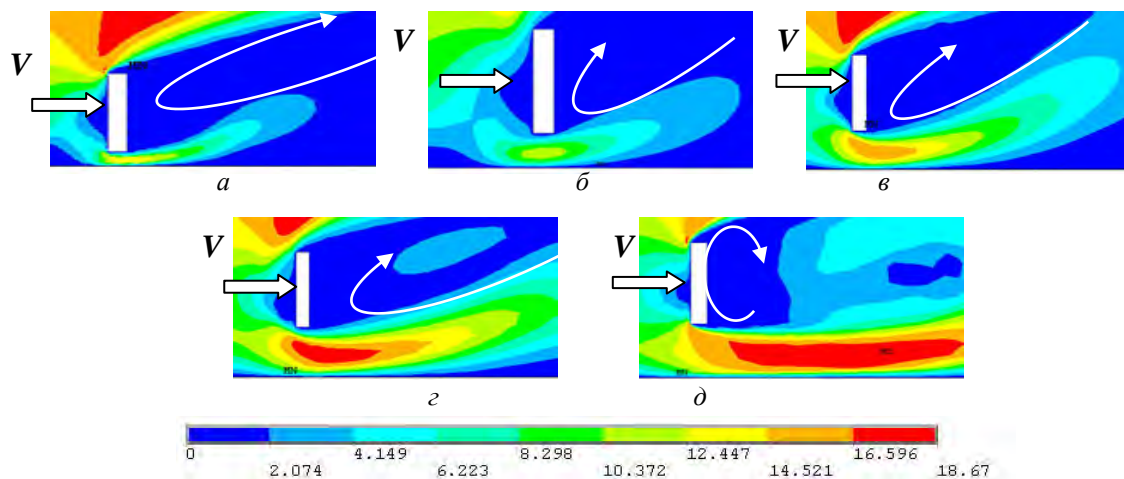


Рис. 1. Контури профілів швидкості між перегородкою та стінкою сфери при різних зазорах, $Re_0=1020$: а – $b_0=0,03$; б – $0,07$; в – $0,1$; г – $0,13$; д – $0,17$

Приклад результатів розрахунків наведено на рис. 1, де зображені контурні зображення розподілу азимутальної складової вектора швидкості у зазорі між зовнішньою кромкою перегородки та стінкою сфери при різних величинах зазору $\Delta=0,03...0,17$, а також структура течії в супутньому сліді за перегородкою, де формуються стійкі та інтенсивні циркуляції.

Численними дослідженнями встановлено не тільки зростання азимутальних швидкостей у зазорі, але й деформацій профілів швидкості у напрямку від стінки, що дає змогу судити про вплив

течії у самому зазорі на структуру супутнього сліду. У діапазоні чисел Рейнольдса $Re_0=870...1020$, побудованих за величинами кутової швидкості оболонки Ω , радіуса посудини R і кінематичного коефіцієнта в'язкості ν , вплив зазору стає помітним вже за безрозмірною шириною перегородки $b/R=0,1$, при якій спостерігається істотне зменшення, на 20... 25%, довжини області розрідження. Подальше зростання параметра b/R приводить до виникнення стійкої пристінної течії (рис. 1, δ), у той час як безрозмірна довжина супутнього сліду зменшуються приблизно до $l/R=0,2...0,3$.

Розвиток за часом течії у зазорі свідчить про слабкий вплив в'язкої дифузії на величини швидкості в цій області протягом основного періоду нестационарної течії ($T=\Omega \cdot t=0...7,8$), а величина зазору $b/R=0,13...0,17$ є надмірно великою. Тому при чисельному моделюванні за основу приймалися зазори порядку $b/R=0,03...0,1$. Під час оцінювання розмірів циркуляцій за віддаленою від стінки перегородкою доцільно встановити вплив на супутній слід деформованого профілю азимутальної швидкості u , результати розрахунку якої наведено на рис. 2.

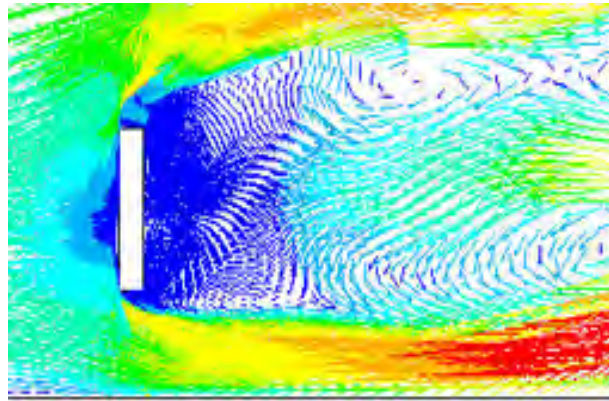


Рис. 2. Структура супутнього сліду за суцільною перегородкою, віддаленою від стінки на безрозмірній відстані $\Delta=0,07$, $Re_0=1070$: 1 – різнонапрямлені циркуляції

Експериментально встановлено [3], що течія в зазорі обмежує розміри супутнього сліду, однак зростання початкових чисел Рейнольдса до $Re_0=1070...1120$ помітного впливу на розміри супутнього сліду не здійснює. Ширина вільної області, на яку поширюється вплив віддаленої суцільної перегородки, в діапазоні $Re_0=1070...1920$ залишається доволі стійкою і становить $b_2=0,44...0,75 \cdot b_0$. Результати чисельних розрахунків з достовірністю порядку 90–95 % підтверджують дані термоанемометричних вимірювань навколо перегородок [4]. З рис. 2 виходить, що пристінні течії, завдяки деформації у бік супутнього сліду, впливають на розмір циркуляції, зменшуючи її на 7–13 %. Крім того, збільшення зазору між перегородкою та стінкою до $\Delta=0,1$ сприяє сильнішому і тривалішому впливу пристінної течії на супутній слід за перегородкою.

Зазначимо, що при чисельному моделюванні течій у діапазоні $Re_0=1070...1120$ із застосуванням віддалених суцільних перегородок структура супутнього сліду може містити дві різнонапрямлені циркуляції, ініційовані течіями в квазітвердій області та поблизу стінки. Приклади цих чисельних результатів наведені на рис. 2, де показані траєкторії рідких часток у супутньому сліду за перегородкою. З рисунку чітко видно зсув циркуляцій у бік менш швидкісної квазітвердої області течії, не охопленої перегородкою, яка існує упродовж $T=2,5...4,2$. При цьому менші початкові швидкості ($Re_0=1070$) обумовлюють ширші циркуляції $b=1,8$, у той же час при $Re_0=1120$ ширина циркуляції становитиме $b=1,53$ та існує доволі довго, до $T=11,2$. За цими результатами можна зробити висновок про стійкість подібної парної циркуляції та помітний її вплив на квазітверду ділянку течії.

Структура течії поблизу кромки перегородки. Перехідна зона поблизу внутрішньої кромки перегородки містить відривні течії, які помітно відрізняються від експериментального розподілу швидкості та становлять до $0,2 \cdot b_0$ – ширини перегородки, істотно впливаючи на квадітверду ділянку

течії. При використанні декількох послідовно розташованих перегородок (рис. 3) можна простежити ефективність впливу перегородок на масштаб циркуляцій, довжина l яких залежить від початкової кутової швидкості течії.

Як видно з рис.3, довжина циркуляції l_1 може становити 1,2–1,4 ширини перегородки. При цьому структура циркуляцій утворює своєрідний ланцюжок, подібний доріжці Кармана, віддалений при цьому від перегородки на величину $\Delta l = 0,67 \cdot b_0$. Спостерігається зсув циркуляцій у бік квазітвердої ділянки течії $l_1 = 1,2 \cdot b_0$ – для першої циркуляції, і $l_1 = 1,62 \cdot b_0$ – для другої.

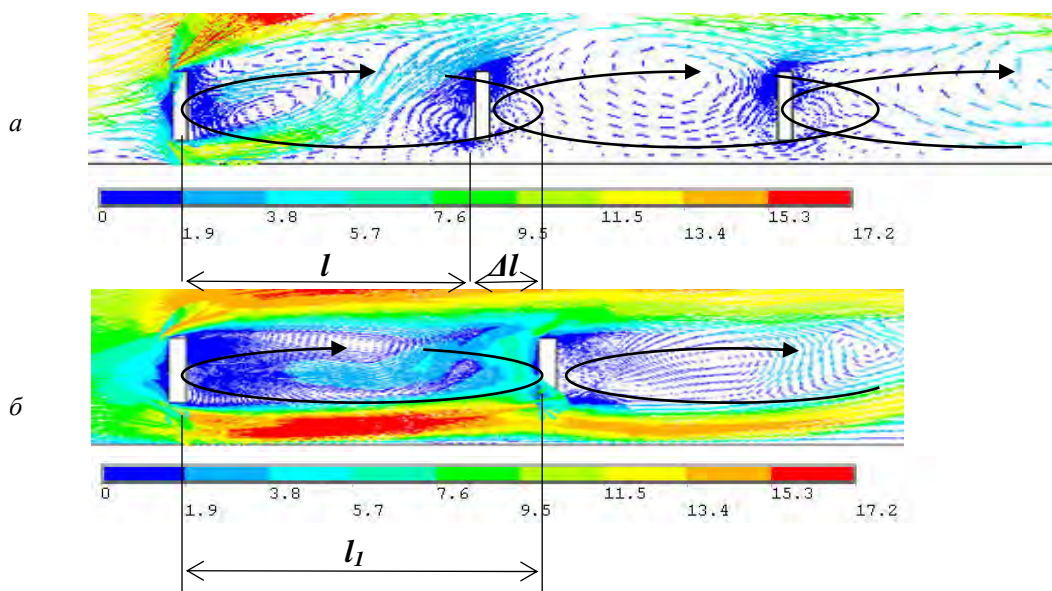


Рис. 3. Результати чисельного розрахунку швидкостей у сліді за суцільними віддаленими перегородками при $Re_0 = 1720$:
а – 6-елементний ВСП; б – 4-елементний ВСП

Аналіз отриманих експериментальних і чисельних результатів дозволив не тільки визначити картину розподілу швидкостей і поле тисків у осесиметричній течії, але й встановити структуру і характер розвитку за часом циркуляційних течій у супутньому сліді за перегородками. Це дає змогу прогнозувати вплив перегородок певної геометрії на течії та кількісно визначити діапазон силових впливів на характер розвитку нестационарної течії.

Як видно з рис.2, однією з важливих особливостей течій в'язкої рідини у резервуарі з перегородками є те, що внутрішні кромки перегородок, ініціюють утворення перехідних ділянок течії у вільному просторі посудини. Товщина подібних характерних ділянок течії – від супутнього сліду до квазітвердої ділянки перевищує майже на 27 % результати експериментальних вимірювань [3, 4], що свідчить про якісну відповідність результатів.

Зазначені перехідні ділянки течії помітно зменшують простір модельної посудини, не охопленій перегородками, на який слабо поширюється вплив в'язкої дифузії. Отже, вплив перегородок може поширюватися на простір, більший, ніж на 17%, ніж це було встановлено при експериментальних вимірюваннях компонент вектора швидкості інерційної течії. Порівняння результатів чисельного розрахунку з експериментальними даними дозволяє зробити висновок про те, що застосування перегородок, розташованих з певним зазором до стінок посудини, у початкові моменти інерційної течії створює ефект «проковзування» рідини у пристінних ділянках у початковій стадії нестационарної течії. Це помітно знижує пікові значення крутних моментів динамічного впливу рідини на перегородки і дозволяє рівномірніше розподілити компенсаційні заходи для мінімізації збурень з боку інерційної течії.

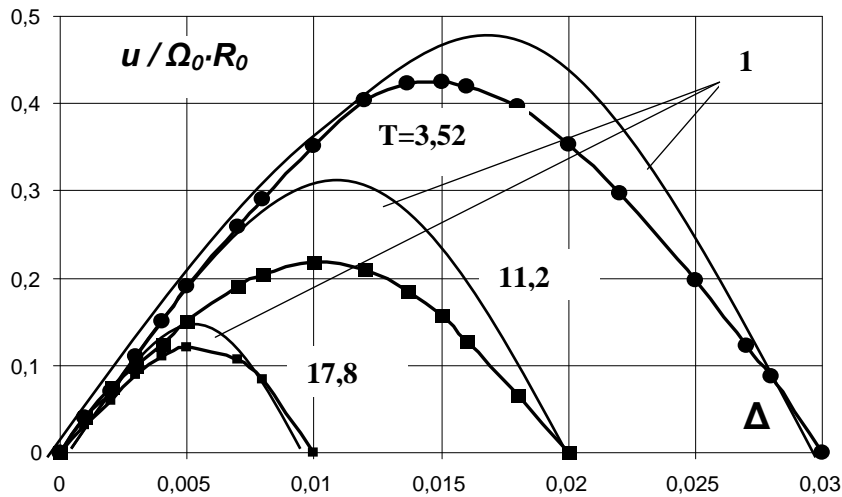


Рис. 4. Порівняння результатів чисельних розрахунків з експериментальними даними у сфері для азимутальної швидкості у зазорі між стінкою та перегородкою при $Re_0=2750$: 1 – результати розрахунку

На рис. 4 наведено порівняння експериментальних профілів азимутальної швидкості у зазорі між стінкою та кромкою перегородки з розрахунковими даними при $T=3,52$. Геометрія розподілу швидкості має параболічний характер, однак оскільки величини швидкостей відрізняються на 13–21 %, можна стверджувати лише про якісний збіг результатів. Крім того, при зростанні зазору до 30мм у пристінній ділянці спостерігається деяка асиметрія профілю швидкості, яка свідчить про вплив відстані до осі обертання. Зі зростанням терміну течії в діапазоні $T=5,73...11,2$ відмінності результатів зменшуються і становлять приблизно 7–11 %, при цьому профілі швидкості майже збігаються.

При цьому спостерігаються помітні розбіжності результатів, які становлять 14% у початковій стадії течії, а при зростанні терміну течії – до 42 %. Більш плавний характер загасання крутного моменту на розрахункових кривих дещо суперечить особливостям розподілу циркуляцій у супутньому сліді та їх впливу на квазітверду ділянку течії. Подібні відмінності можуть бути обумовлені обмеженим діапазоном застосування емпіричних залежностей для визначення крутних моментів, а також необхідністю врахування впливу циркуляцій на розподіл азимутальної швидкості течії.

Висновки. У разі зростання терміну течії, завдяки впливу в'язкої дифузії, товщина пристінної загальмованої течії зростає. Вона поширюється не тільки на всю ділянку зазору між перегородкою та стінкою посудини, але й впливає на циркуляційні течії в межах супутнього сліду за перегородкою. При цьому циркуляції за перегородкою деформуються, зміщуючись у напрямку до осі обертання посудини. Отже, виникає не тільки таке джерело розповсюдження збурень в інерційному потоці як кромка перегородки, але й циркуляції в супутньому сліді, що впливають на ближчу до осі обертання вільну від впливу перегородок ділянку течії. Ця ділянка, своєю чергою, впливає на вільні шари інерційної течії, спричиняючи нелінійності розподілу швидкості та градієнтів тиску у осесиметричному потоці.

Як встановлено в роботі, однією з важливих особливостей проникних перегородок в інерційному потоці є менший майже на 12 % за величиною, проте триваліший ($T=2,5...4,2$) вплив на азимутальну швидкість течії. Завдяки цьому пікові силові впливи у початковій стадії течії величини динамічного тиску на перегородки зменшуються і стають прогнозованішими. Крім того, проникність перегородки дозволяє контролювати розміри супутнього сліду за перегородкою і регулювати структуру циркуляційних течій у цій ділянці потоку. Це, своєю чергою, приводить до такої властивості течії, як поширення впливу циркуляції у супутньому сліді на течію у просторі, не охопленому перегородками.

Завдяки наведеним експериментальним та теоретичним даним щодо розподілу швидкостей поблизу перегородок можна сформулювати масив інформації з силових впливів з боку інерційних течій рідкого палива на борту КА, що вводиться до бортового комп'ютера і забезпечує ефективніше

керування КА, високу надійність польоту та допомагає заощадити доволі великі запаси рідкого пального упродовж тривалих орбітальних місій.

1. Микишев Г.Н. Экспериментальные методы в динамике космического аппарата / Г.Н. Микишев. – М.: Машиностроение, 1978. – 247 с. 2. Бужинский В. А. О колебаниях жидкости в топливных баках с демпфирующими перегородками / В.А. Бужинский // Космонавтика и ракетостроение. – 2007. – № 1. – С. 110–120. 3. Ковалев В.А. Эффективность перемешивания топлива в баках космического аппарата внутри-баковыми перегородками / В.А. Ковалев // Промислова гідравліка і пневматика. – 2009. – № 1 (23). – С. 48–51. 4. Ковалев В.А. Численное моделирование течений жидкости в емкостях с перегородками / В.А.Ковалев, Н.Г.Кришук, А.С.Конюхов // Вестник Нац. техн. ун-та Украины «Киевский политехнический институт», Машиностроение. – 2010. – Вып. 59. – С. 51–55.

УДК 539.56

О.А. Kuzin, М.О. Kuzin²

Lviv Polytechnic National University,
Department of Applied Materials and Material Processing;
Lviv Research Forensic Institute,
Department of Railway Transport Research

THE STRUCTURE OF THE NEAR-BOUNDARY ZONES OF GRAINS AND INTERGRANULAR DESTRUCTION OF STEELS

© Kuzin O.A., Kuzin M.O., 2013

З використанням моделі функціонально-градієнтної будови зернограничного шару великокутових границь подано аналіз впливу параметрів структури міжзеренних поверхонь на інтеркристалітне руйнування сталей. Керівним параметром схильності полікристалічних систем до міжзеренного руйнування є їх здатність до утворення вакансій і пор на границях зерен. Визначення оптимальних параметрів структурно-енергетичного стану міжзеренних поверхонь дає змогу вибирати раціональні технологічні рішення з підвищення міцності границь зерен сплавів.

Using the model of functional gradient structure of the grain boundary layer of large angle of borders presents the analysis of the influence of structural parameters on the grain surfaces intercrystalline destruction steels. The governing parameter of polycrystalline tendency to intergranular fracture systems is their ability to form pores on vacancies and grain boundaries. Determination of the optimal parameters of the structural and energetic state of the grain surfaces makes it possible to choose rational technological solutions to improve the strength of the alloy grain boundaries.

Statement of the problem. The current state of energy and transportation systems, metal stock aging require new scientific evidence-based recommendations for the possibility of safe operation of individual parts that went through their expected lifetime and have been through restoring repair.