

УДК 532.53:629.784

В.А. Ковальов

АНАЛІЗ ПОЛЯ ШВИДКОСТЕЙ ТЕЧІЇ РІДИНИ ПРИ ЇЇ ОБЕРТАННІ В ЦИЛІНДРИЧНОМУ РЕЗЕРВУАРІ

The paper presents results of velocity fields experimental measurements of a fluid rotation in a spacecraft cylindrical tank. We propose the analytical expressions for distributions of the azimuthal velocity and the data collection for calculating the fluid power affects on the tank walls. We approximate the results of hot-wire measurements of the velocity vector components and build the structure of semi-empirical relationships when developing the physical model of inner flows. Graphic features of the nonlinear dependence characterize the distribution of the hydrodynamic fields, where there are near-wall, axial and intermediate flow regions interacting with each other to form a spatial picture of the velocity distribution. Taking into account the existing data of theoretical and numerical simulations we can assess results reliability of the results and the adequacy of the proposed model of the circulation of viscous incompressible fluid. The results are relevant for application in design of tools and techniques for effective impact on the internal flow of liquid fuel in the spacecraft cylindrical tanks.

Вступ

При русі орбітального модуля (ОМ) у пасивній стадії польоту з вимкненими двигунами, завдяки рухливості рідкого палива, починають проявлятися збурення, внесені раніше в потік рідини при роботі рушійної установки. Під дією сил в'язкого тертя рідина здатна впливати на орієнтацію і характер руху об'єкта. Для компенсації таких збурень та організації протилежного руху рідини ОМ виконуються спеціальні кутові маневри. При цьому напрямок і величини компенсаційних впливів при увімкненні рушійної установки можуть бути різними, тому ефективність зазначених заходів досить мала за великої витрати палива, запаси якого в польоті дуже обмежені.

Дослідження поведінки в'язкої рідини в посудинах, що мають широке застосування також при транспортуванні великих кількостей рідини, проводяться починаючи з середини минулого століття [1, 2]. Відомі результати досліджень стосуються течій у резервуарах, частково заповнених ідеальною рідиною, тож необхідним є вивчення течій в'язкої рідини, що цілком заповнює резервуари.

Оскільки центр мас рідини в зазначеній задачі сталий, то істотно впливають на конструкцію резервуара колові рухи рідини навколо однієї з осей симетрії посудини. Проблема компенсації таких збурень з боку рідини полягає у тривалості інерційних впливів та меншій величині порівняно з резонансними плесканнями рідини в частково заповнених резервуарах [2]. Отже, дослідження, присвячені визначенню картини інерційних течій у резервуарах різної геометрії, є досить актуальними.

Постановка задачі

Метою досліджень є експериментальне визначення структури замкнених циркуляційних течій і розподілу компонент сектора швидкості для виявлення особливостей силового впливу в'язкої нестисливої рідини на внутрішню поверхню циліндричного резервуара.

Експериментальна база досліджень

У лабораторії кафедри прикладної гідроаеромеханіки і механотроніки Національного технічного університету України "Київський політехнічний інститут" проводився комплекс експериментальних і теоретичних досліджень поведінки в'язкої нестисливої рідини в посудинах за допомогою спеціально розроблених експериментальних стендів, вимірювальної та реєструвальної апаратури, захищених авторськими свідоцтвами на винаходи [3, 4].

Методикою проведення експериментів передбачалося використання циліндричної моделі паливного резервуара з жорсткими стінками, заповненого рідиною різної в'язкості. Як числа подібності застосовувалися критерії Рейнольдса, Струхалія і Россбі, що дають можливість поширити результати фізичного моделювання на реальні умови польоту ОМ та інші габарити об'єкта.

Посудину з рідиною розганяли до заданої кутової швидкості Ω , а потім оболонку різко зупиняли з одночасним вимірюванням полів швидкості і тисків у потоці рідини. Вимірювання швидкості проводилися спеціально розробленими мініатюрними термоанемометричними датчиками з подальшою реєстрацією і

перетворенням результатів за допомогою вторинної аналогово-цифрової апаратури. Достовірність отриманих результатів з урахуванням теплових та електронних похибок, орієнтації датчика в потоці тощо становить приблизно 85–93 %, а зіставлення з іншими результатами досліджень свідчить про якісну відповідність даних [5, 6].

Аналіз результатів експериментальних досліджень

Структуру течії в посудині зручно оцінювати за картиною розподілу азимутальної (колової) швидкості, тому що саме ця величина входить до виразів для крутних моментів в'язкого тертя рідини на стінках [2, 6]. У рамках цієї статті побудовані профілі колової швидкості за радіусом циліндра. У розглянутій нами задачі про інерційні течії рідини після раптової зупинки обертання оболонки передбачається, що на вісі симетрії посудини і на її стінках колова швидкість u дорівнює нулю.

За результатами вимірювань у різних площинах циліндра еюра швидкості в горизонтальній площині, що ділить посудину навпіл, або у так званій “середній” площині, буде аналогічна профілям швидкості в сусідніх горизонтальних площинах. Таким чином, підтверджується гіпотеза Вейдмана [2] про приблизно однаковий характер розвитку течії в різних площинах посудини.

З урахуванням зазначених аргументів вимірювання колової швидкості u проводилися в середній площині циліндра при варіюванні відстані чутливого елемента датчика до вісі обертання посудини R , в'язкості модельної рідини ν і початкової кутової швидкості оболонки Ω_0 , а також тривалості течії T , які є основними критеріальними параметрами течії – числа Рейнольдса, Россбі та Струхалія.

Результати вимірювання колової компоненти u вектора швидкості подані на рис. 1. За нерівномірно загасаючими ділянками кривих можна точно встановити величини швидкостей безпосередньо біля стінок. Однак внаслідок впливу в'язкої дифузії такі деформації профілів швидкості згладжуються вже при $T = 9,25$.

Про міру впливу в'язкого тертя рідини на квазітверду область течії можна судити за розміщенням пікових значень безрозмірних швидкостей

$$u_i = u_i / \Omega_0 \cdot R_0. \quad (1)$$

На початковій стадії течії ($T = 0,37$) максимальне значення безрозмірної швидкості на відстані до вісі $R = 0,84$ становить 0,78. За великих значень безрозмірного часу загасання $T \geq 17,9$ пікові швидкості (близько 0,2–0,34) зміщуються до радіальної координати $R = 0,63$, позначаючи загальмовану завдяки в'язкій дифузії область течії. Залежність безрозмірної колової швидкості за числа Рейнольдса $Re = 2260$ і малих значень часу перехідної течії ($T = 0,37$) можна відобразити поліномом четвертого порядку:

$$u_i = -15,3 \cdot R^4 + 25,8 \cdot R^3 - 13,5 \cdot R^2 + 3,17 \cdot R - 0,041, \quad (2)$$

де вільним членом через його малий ваговий фактор можна знехтувати, і тоді рівняння набуде такого вигляду:

$$u_i = -15,3 \cdot R^3 + 25,8 \cdot R^2 - 13,5 \cdot R + 3,17. \quad (3)$$

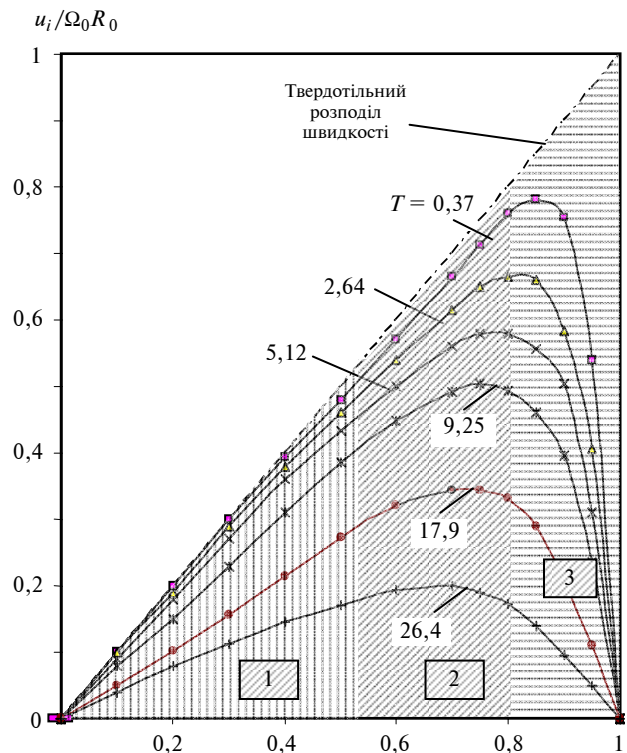


Рис. 1. Профілі колової компоненти швидкості у середній площині циліндра при $Re = 2260$

Залежність (3) досить коректно описує вплив загальмованої течії поблизу вертикальних стінок, де за умови прилипання всі компоненти швидкості дорівнюють нулю. Криві на рис. 1 добре узгоджуються з результатами ви-

мірювань швидкості Вейдмана [2] в циліндрі у різні моменти часу T нестационарної течії при розгоні та гальмуванні оболонки. При цьому коефіцієнти при координаті R змінюються незначно, зберігаючи тенденцію до експоненціального загасання швидкості. Профілі колової швидкості аж до моменту часу $T = 9,25$ описуються поліномами 4-го порядку, а потім внаслідок впливу в'язкої дифузії її порядок знижується до 3-го:

$$u_i = -3,49 \cdot R^3 + 3,77 \cdot R^2 - 0,245 \cdot R + 0,039, \quad (4)$$

причому вільними членами рівняння також можна знехтувати:

$$u_i = R(-3,49 \cdot R^2 + 3,77 \cdot R - 0,245). \quad (5)$$

Оцінивши кожен із членів поліному, можна побачити, що вільний член рівняння має досить мале значення (на 1–2 порядки менше за інші члени полінома), що не суперечить нашим твердженням про віссиметричність колової течії. З іншого боку, граничні умови на стінці, де безрозмірний радіус дорівнює $R = 1$, також має виконуватися умова рівності нулю безрозмірної швидкості течії $u_i/\Omega_0 \cdot R_0 = 0$. З урахуванням скорочення поліному, з похибкою не більше 2,2 %, на стінці модельної посудини він буде дорівнювати нулю. Профіль азимутальної швидкості набуває форми слабоасиметричної параболи, що свідчить про приблизно однаковий порядок сил інерції та в'язкого тертя в течії. Екстремум кривої розміщується на радіальній координаті $R = 0,63$, тоді як величина безрозмірної кругової швидкості у цій точці становить 0,2.

Також характер загасання швидкості u_i за часом відображають криві на рис. 2. Великі швидкості в пристінній області ($R = 0,9$) у початкові моменти часу ($T = 0-4$) змінюються швидко (при $T = 5-7$) загасанням до величин, що становлять 4–6 % від початкового значення u . Ця залежність апроксимується експоненціальною кривою

$$u_i/\Omega_0 \cdot R_0 = A \cdot e^{B \cdot T}, \quad (6)$$

де $A = 0,043$ і $B = -0,037$.

На більшій відстані від стінок $R = 0,7$, де вплив пристінної течії досить слабкий, а інерційні властивості квазітвердої області значні за величиною, спостерігаються більш плавне загасання швидкості, великі швидкості інерційної течії та менші за величиною коефіцієнти A і B :

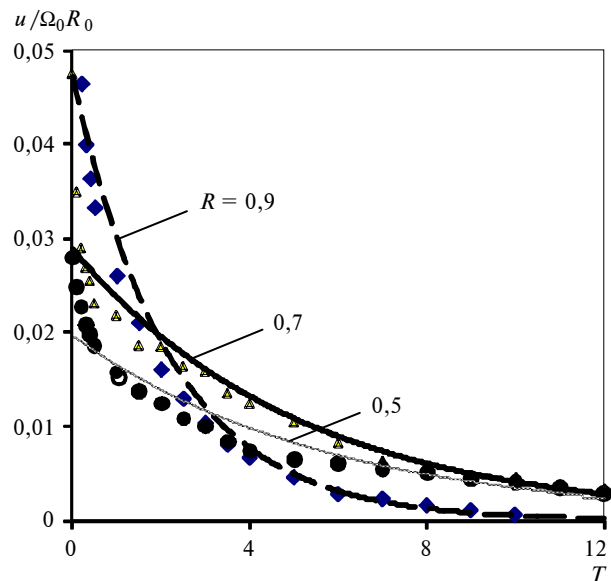


Рис. 2. Залежність безрозмірної колової швидкості течії в циліндрі від часу загасання T при $Re = 2260$

$$u_i = 0,331 \cdot e^{-0,022 \cdot T}. \quad (7)$$

Така тенденція зберігається і для шару $R = 0,5$, де спостерігається найбільш повільне загасання швидкості і вплив пристінної течії незначний:

$$u_i = 0,016 \cdot e^{-0,014 \cdot T}. \quad (8)$$

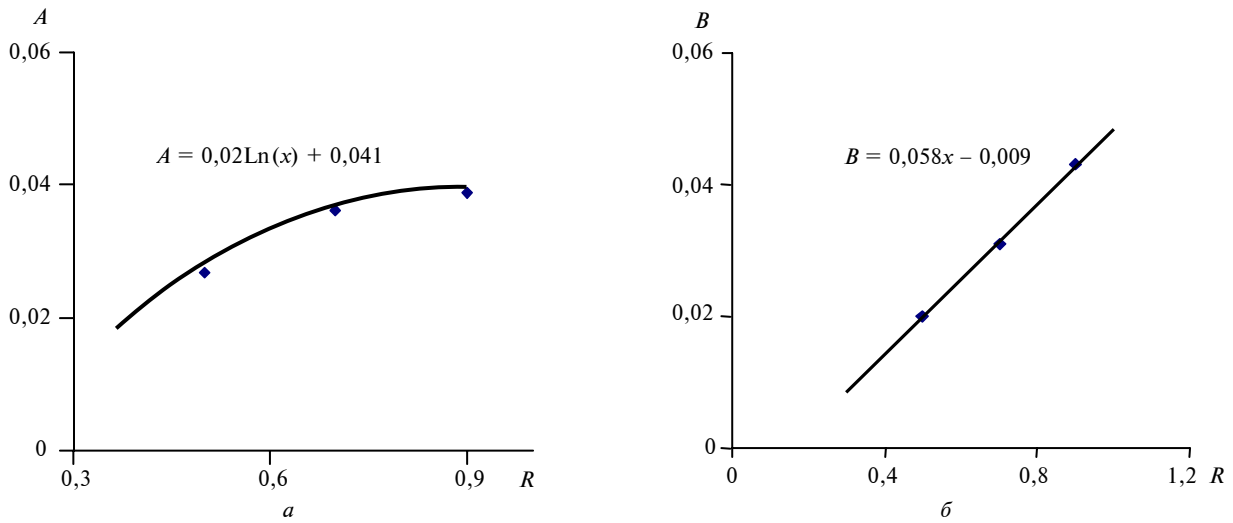
При аналізі графічних залежностей $u_i/\Omega_0 \times R_0 = f(T)$ доцільно розділити процес загасання швидкості на три характерних стадії.

1. Початкова ділянка кривої ($T = 0-1,5$), що характеризує майже твердотільний рух рідини, де вплив стінок ще неістотний, а інерційні сили достатньо великі. При цьому циркуляційні течії в меридіональних площинах ще не сформувалися.

2. Основна ділянка кривої ($T = 1,5-7$), коли утворилися меридіональні циркуляційні течії. Їх вплив на поле швидкості основного потоку зростає, що зумовлює основні нелінійності розподілу колової швидкості u_i .

3. Заключна ділянка кривої ($T = 7,0-25$), на якій сили інерції стають приблизно однаковими за порядком з силами в'язкості рідини і залежності швидкості від часу стають майже лінійними.

Наприклад, початкові ділянки кривих за різних відстаней від осі обертання можна об'єднати одним характерним параметром – малими коефіцієнтами A і B у виразах (6) і (7):

Рис. 3. Залежність коефіцієнтів A (a) і B (b) від відстані до вісі обертання

$$u_i = 0,078 \cdot e^{-0,19 \cdot T} \text{ при } R = 0,9,$$

$$u_i = 0,034 \cdot e^{-0,031 \cdot T} \text{ при } R = 0,7, \quad (10)$$

$$u_i = 0,063 \cdot e^{-0,23 \cdot T} \text{ при } R = 0,7,$$

$$u_i = 0,027 \cdot e^{-0,02 \cdot T} \text{ при } R = 0,5.$$

тоді як у початкові моменти часу в квазітвердій області течії ($R = 0,5$) відбувається майже лінійна зміна швидкості згідно із залежністю

$$u_i = -0,7 \cdot 10^{-3} T + 0,023. \quad (8)$$

На заключній стадії загасання швидкості (3-я ділянка кривої) слабка експоненціальність на радіусі 0,7

$$u_i = 0,0223 \cdot e^{-0,023 \cdot T} \quad (9)$$

чергується з лінійним характером загасання швидкості:

$$u_i = -6 \cdot 10^{-5} T + 0,0061 \text{ при } R = 0,9,$$

$$u_i = -5 \cdot 10^{-5} T + 0,0093 \text{ при } R = 0,5,$$

де за малих швидкостей u найбільш сильно виражені в'язкі властивості течії.

Незважаючи на те, що порівняно з течіями у сфері циліндрична конфігурація вторинних течій не настільки сильно розвинена і значно менше впливає на поле швидкості u , її слід враховувати при розрахунках силових впливів на конструкції рухомих об'єктів з рідиною. Одним із свідчень цього є залежності, що описують основні ділянки кривих загасання швидкості із сильно вираженою експоненціальністю:

$$u_i = u_i / \Omega_0 R_0 = 0,039 \cdot e^{-0,043 \cdot T} \text{ при } R = 0,9,$$

Аналіз зазначених ділянок кривих у виразах (10) дає змогу побудувати залежності коефіцієнтів A і B від відстані R циліндричних шарів до вісі обертання посудини (рис. 3). Якщо в першому випадку (рис. 3, a) крива відображає логарифмічну залежність, то в другому (рис. 3, b) – лінійну.

Помітних змін у характері розподілу швидкості u в циліндрі зі зростанням початкових чисел Рейнольдса в діапазоні $Re_0 = 2600-5700$ не встановлено. Експоненціальний характер загасання за малих значень A і B свідчить про істотний вплив сил інерції в початкові моменти часу і досить слабкий їх вплив за малих швидкостей упродовж 3-ї стадії загасання швидкості течії. Однак на 2-й стадії течії, коли циркуляції досить сильно розвинені, як і у випадку обертання рідини у сфері, мають місце деякі відхилення швидкості основного потоку $u_i / \Omega_0 R_0$ від твердотільного розподілу. Вони не настільки великі і становлять 5,0–8,5 % від величини колової швидкості та існують протягом досить короткого часу $T = 2,5$.

Висновки

Аналіз результатів експериментальних вимірювань полів швидкості течії у циліндрі дав змогу отримати емпіричні вирази для визначення колової швидкості залежно від відстані

до вісі обертання посудини. Ці залежності можна використовувати при побудові картини розподілу силових впливів на стінки резервуарів, які необхідно враховувати при організації компенсаційних заходів для орбітального модуля, який рухається за заданою траєкторією. Крім того, отримані дані доцільно враховувати при проектуванні космічних апаратів і плануванні програми польоту орбітальних станцій, а також об'єктів, стабілізованих обертанням. Ці результати дають можливість підвищити стійкість об'єкта, ефективність керування ним і скоро-

тити витрати рідкого пального для різних програмних маневрів об'єкта.

Подальші дослідження мають на меті визначення силових впливів внутрішніх напрямних апаратів у вигляді плоских жорстких і пружних перегородок на структуру та характер розвитку замкнених течій. Конструкції пристроїв, їх розміщення в потоці з урахуванням просторової картини течії сприяють збільшенню ефективності керування рухомим об'єктом, оптимізації роботи рушійної установки та зрештою зростанню тривалості існування космічного апарата.

1. *Богомаз Г.И., Сирота С.А.* Колебания жидкости в баках. Методы и результаты экспериментальных исследований. – Днепропетровск: Ин-т техн. механики НАНУ, 2002. – 306 с.
2. *Луковский И.А., Нариманов Г.С., Докучаев Л.В.* Нелинейная динамика летательного аппарата с жидкостью. – М.: Машиностроение, 1977. – 208 с.
3. *Устройство для измерения скорости и направления потока жидкости или газа:* А.с. 1432405 СССР: МКИ G 01 P 5/02. / В.А. Ковалев, И.В. Сидорко, А.Н. Ковальчук и др. (СССР). – № 4214826/24: Заявлено 25.03.87; Опубл. 23.10.88, Бюл. № 39.
4. *Способ градуировки датчиков скорости потока жидкости и устройство для его осуществления:* А.с. 1531001 СССР: МКИ G 01 P 215/02 / В.А.Ковалев, А.Н. Ковальчук (СССР). – № 4287740/24: Заявлено 21.07.87; Опубл. 23.12.89, Бюл. № 47.
5. *Ковалев В.А.* Критериальная оценка физической модели гидродинамических процессов в топливных баках космического аппарата // Вестник НТУУ "КПИ". Сер. Машиностроение. – 2009. – Вып. 55. – С. 22–28.
6. *Ковалев В.А.* Полиномиальная аппроксимация полей скорости течений в ограниченных объемах // Гідравліка і гідротехніка. – 2011. – Вип. 65. – С. 111–117.

Рекомендована Радою
Механіко-машинобудівного інституту
НТУУ "КПІ"

Надійшла до редакції
25 вересня 2012 року