

Фізична модель течій рідини у резервуарах космічного апарату

В. Ковальов¹ • В. Калюжний¹ • В. Горностаї¹

Received: 3 September 2021 / Accepted: 25 October 2021

Анотація. Наведено результати експериментального дослідження течій рідкого палива у резервуарах космічного апарату при його обертанні. Проводиться аналіз структури і характеру розвитку течій за часом, пропонуються варіанти апроксимації графічних залежностей. Представлено графічні залежності, за якими зручно представити трьохмірну нелінійну картину нестационарної осесиметричної течії у сферичному резервуарі, а також способи впливу на течії за допомогою внутрішніх напрямних апаратів. Оцінка вірогідності отриманих експериментальних даних свідчить про досить високу якість результатів вимірювань та побудовану картину течій у сферичному резервуарі з внутрішніми перегородками.

Ключові слова: сферичний резервуар, циркуляційні течії, космічний апарат, поле швидкості, термін загасання швидкості.

Вступ

Створення сучасних космічних апаратів (КА) включає в себе розробку і вдосконалення конструкції об'єднаної рушійної установки (ОРУ), що включає в себе реактивні двигуни з відповідною запірною-регулюючою апаратурою і паливні резервуари з компонентами рідкого палива та окислювача. При польоті КА на паливо діють різні зовнішні сили (рис. 1), наприклад, сила тяги, кругові моменти при виконанні штатних маневрів, обумовлюючи випадкові та неконтрольовані течії рідини [1, 2]. У свою чергу, рухома рідина впливає на стінки резервуарів та різні внутрішні конструкції і може спричинити відхилення КА від заданої траєкторії польоту і режимів роботи двигунів ОРУ.

Для компенсації подібних інерційних впливів на борту КА, забезпечення стабільності та надійності польоту об'єкта служить система орієнтації і стабілізації (СОС) КА, що складається з декількох реактивних двигунів, розташованих на корпусі (рис. 2). Періодичні увімкнення СОС для корекції траєкторії та орієнтації об'єкта вимагають додаткової витрати палива, запаси

якого на борту важкопоновлювані, тому завдання раціонального керування КА і зниження витрат палива є досить актуальною як з точки зору тривалості та надійності польоту, так і екології навколоремного простору.

Для підвищення ефективності керування КА з урахуванням впливу рідкого палива в натурних умовах потрібно системне дослідження фізичних особливостей внутрішніх гідродинамічних процесів. Для цього необхідне створення експериментальних стендів і методів моделювання течій рідкого палива, проведення лабораторних досліджень з урахуванням відомих критеріїв подібності, наприклад, чисел Рейнольдса, Ейлера, Россбі, Струхалія та ін., а також спеціально побудованих безрозмірних комплексів.

Як відомо, одним з поширених видів руху рідкого палива є його обертання навколо однієї з осей резервуара [3]. Обертання КА можна розглядати як ефективний метод стабілізації об'єкта у просторі, керувати яким значно простіше і надійніше. Однак, рідина, що обертається, завдяки в'язкому тертю на стінках резервуара, здатна формувати круговий дестабілізуючий момент тертя і динамічний тиск на конструкції КА в цілому. Тому при розробці системи керування КА визначення величин і напрямків впливу таких збурюючих моментів є досить актуальним завданням.

✉ В.А. Ковальов
vaskov@ukr.net

¹ КПІ ім. Ігоря Сікорського м. Київ, Україна



Рис. 1. Зовнішні сили, що діють на КА при польоті на навколосезній орбіті

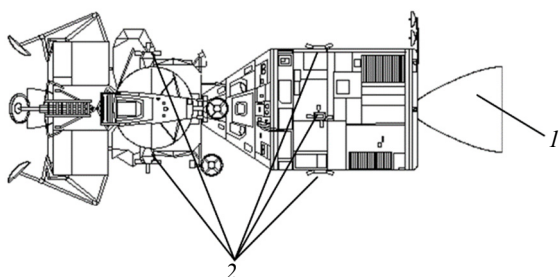


Рис. 2. Розташування двигунів на корпусі КА [1]: 1 – маршевий двигун; 2 – двигуни системи орієнтації та стабілізації

Мета і постановка завдання досліджень

Метою поданих досліджень є визначення гідромеханічного механізму розвитку замкнених течій рідкого палива в резервуарах космічного апарату для розробки раціональних та ефективних методів і засобів впливу на неконтрольовані збудження рідини у польоті.

На кафедрі прикладної гідроаеромеханіки і механотроніки Національного Технічного університету України “Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського” створений комплекс експериментальних стендів і методів фізичного моделювання гідродинамічних процесів, що відбуваються при польоті КА на навколосезній орбіті [4, 5]. На рис. 3 наведена схема однієї з конструкцій стендів, який представляє собою центрифугу з горизонтальним поворотним столом 1, на якому встановлена модель паливного бака 2 з рідиною. Дослідження перехідних процесів у модельних резервуарах проводилося за спеціально розробленими методами моделювання.

За командою з пульта керування приводом 3 проводиться розгін платформи 1, а потім різке її гальмування з одночасним вимірюванням складових швидкості потоку за допомогою термоанемометричних датчиків швидкості потоку 4. При визначенні діапазону кутових швидкостей резервуара і в'язкості модельної рідини враховувалися критеріальні відповідності натурним числам Рейнольдса, Струхала, Россбі та іншим безрозмірним комплексам.

В якості моделі паливного резервуара була обрана сфера діаметром 0,3 м, виконана з органічного скла товщиною 10 мм для забезпечення необхідної жорсткості бака. Сферична форма посудини досить поширена у конструкціях КА через максимальну місткість при мінімальній площі поверхні, що важливо при забезпеченні її теплоізоляції. Крім того, сферичні елементи можуть бути включені у циліндричні конструкції баків [1, 2].

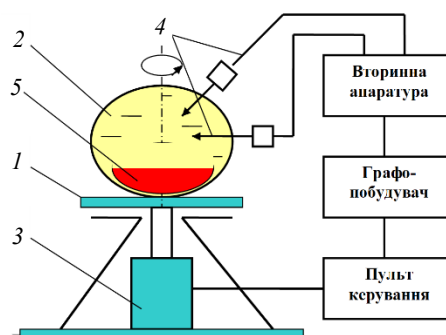


Рис. 3. Схема експериментального стенда, системи вимірювання та реєстрації параметрів потоку у сферичному резервуарі: 1 – поворотна платформа; 2 – модельна ємність; 3 – привод обертання; 4 – датчики швидкості потоку; 5 – ВВП

Аналіз результатів експериментальних досліджень

За результатами вимірювань отримані нестационарні поля швидкостей рідини в діапазоні відцентрових чисел Рейнольдса

$$Re = \frac{uR}{\nu} = \frac{\Omega R^2}{\nu} = 2200 - 12600,$$

де Ω – кутова швидкість резервуара, R – його радіус, ν – кінематичний коефіцієнт в'язкості модельної рідини. Нестационарність перехідного процесу у резервуарі оцінювалася за критерієм гомохронності, який являє собою функцію, зворотну числу Струхала, в діапазоні

$$Ho = 1 / Sh = \frac{ut}{R} = \frac{\Omega R t}{R} = \Omega t = 0 - 32,$$

де t – час загасання швидкості течії. Компоненти вектора швидкості потоку u , v і w з'являлися з початковими величинами кутової швидкості та відстанню контрольної точки до осі обертання резервуара і формували відцентрові числа Россбі в діапазоні

$$Ro = \frac{u}{\Omega R} = 0 - 1.$$

Аналіз величин швидкості в різні моменти часу перехідного процесу, представлених на рис. 4, дозволив встановити експонентний характер залежності

$$u/V = Ae^{-Bt},$$

де A і B – коефіцієнти пропорційності, що змінюються в межах $A=0,0195-0,0473$, $B=0,0173-0,0454$, t – час перехідної течії. За результатами вимірювань швидкостей побудовані профілі швидкості по радіусу сферичної посудини (рис. 5) в екваторіальній площині сфери, як найбільш динамічної та схильної до нелінійного впливу рідини. Для профілів в екваторіальній площині характерні сидлоподібні ділянки кривих при $R=0,03-0,08$, що свідчить про виникнення і досить сильний вплив на осесиметричну течію вторинних циркуляційних структур у меридіональних площинах резервуара.

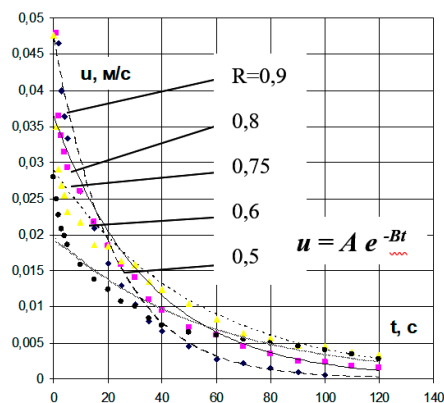


Рис. 4. Загасання швидкості течії у сферичному баці при різних відстанях до осі обертання

Пікові значення швидкості у пристінній області течії ($R=0,125$) характеризують взаємодію з одного боку квазитвердого ядра течії та з іншого боку пристінною загальмованою течією. Поширення в'язкої дифузії на твердотільне ядро інерційної течії збільшує товщину загальмованої області течії і дозволяє згладити екстремуми профілів швидкості (при $T=10,43$).

Поліноміальна оцінка результатів вимірювань у початкові моменти часу перехідної течії ($T=0,42$) призводить до такого виразу

$$u/V = -263 \cdot R^4 + 617 \cdot R^3 + 7235 \cdot R^2 + 0,1819 \cdot R - 0,0003,$$

тоді як при великих значеннях часу течії ($T=24,8$) порядок функції помітно знижується і являє собою квадратичну криву

$$u/V = -0,2541R^2 + 0,042R - 0,0004$$

з досить малими коефіцієнтами пропорційності, що свідчить про істотний вплив в'язкості на розподіл швидкості осесиметричної течії.

Характер розвитку вторинних течій в меридіональних площинах дозволяє зробити висновок про суттєвий вплив компонент швидкості v і w на формування окружної складової u . Як відомо, у приосьовій області сфери формується екмановська течія, направлена від осі обертання до периферії сфери під дією відцентрових сил інерції, куди в свою чергу приливає рідина з приосьової області.

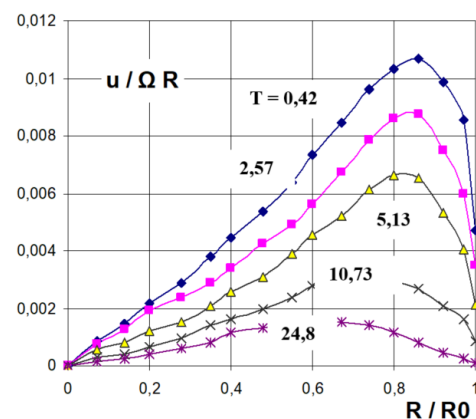


Рис. 5. Профілі кругової компоненти швидкості в екваторіальній площині сферичного резервуара у різні моменти затухання течії

На рис. 6 приведена схема формування вторинної циркуляційної течії при числах Рейнольдса $Re=5650$ і $R=0,0$. Як зазначалося, характер розвитку інерційної течії у сфері багато в чому залежить від ступеня впливу в'язкої дифузії на квазитверду область течії ($R=0-0,12m$). Зростання товщини примежового шару на увігнутих стінках докладно описане у роботах [5, 6] тому у рамках цієї статті обмежимося лише якісною оцінкою результатів вимірювань кутової швидкості сферичного шару залежно від відстані до осі обертання сфери.

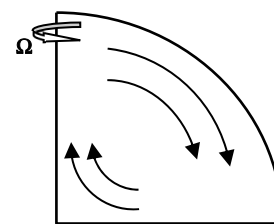


Рис. 6. Схема меридіональної течії у квадранті сфери

На рис. 7 показано графіки впливу пристінної течії на внутрішній простір сферичного резервуару, де протягом часу $T = 0,42 - 24,8$ товщина прилежого шару зростає майже у 7,5 разів, а її вплив поширюється вже на половину об'єму сфери. Поліноміальна апроксимація зазначених графічних залежностей у початковій стадії процесу призводить до рівнянь шостого порядку

$$\Omega / \Omega_0 = -3E6R^6 + 1E6R^5 - 173526R^4 + 11790R^3 - 358R^2 + 3,82R + 0,996,$$

а при великих значеннях часу загасання складає рівняння другого порядку

$$\Omega / \Omega_0 = -263,35R^2 + 46,624R - 1,0751.$$

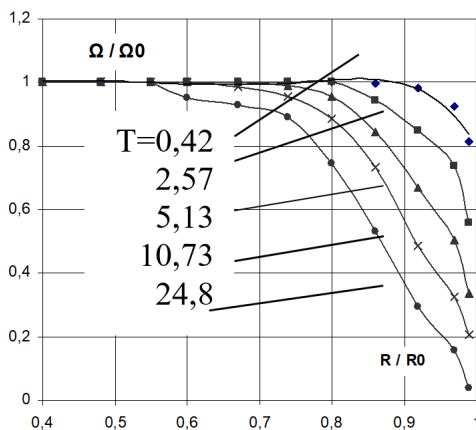


Рис. 7. Залежність кутових швидкостей шарів рідини у сфері від часу загасання

Це свідчить про те, що при досить малих швидкостях течії ($u =$ до 3 см/с) в'язкість модельної рідини вже істотно впливає на характер розподілу швидкості не тільки у пристінних областях течії, але і у приосьовому просторі сфери.

Засоби впливу на інерційні течії рідини

Отримані результати для осесиметричної течії рідини в сферичному резервуарі без застосування перегородок [4, 5], дозволили встановити структуру тривимірної течії і запропонувати методи і засоби впливу на неї за допомогою спеціальних конструкцій внутрішніх напрямних пристроїв (ВНП). Як правило, ВНП є комбінацією кільцевих і радіальних перегородок, встановлених поруч із забірним отвором резервуара або на бічних стінках з метою забезпечення жорсткості всієї конструкції. Зазвичай перегородки примикають до внутрішніх стінок посудини і охоплюють тонкі шари рідини [1, 2]. Збільшення ширини перегородки призведе до зростання їх маси, що небажано при проектуванні конструкції КА, тому збільшення області їх

впливу слід шукати в раціональному розташуванні щодо стінок і з урахуванням структури інерційних течій рідини.

Проведені дослідження дозволили експериментально встановити раціональну ширину радіальних перегородок та відстань між їх зовнішніми крайками і внутрішніми стінками бака [5]. Для визначення коефіцієнтів гідродинамічного опору C_M перегородок були проведені вимірювання на спеціальному стенді і отримані дані, наведені на рис. 8. Наприклад, перегородки шириною 0,3 м розташовані на бічних стінках резервуара на відстані 0,25 м від стінки дозволили знизити пікові динамічні впливи приблизно на 23%. В результаті порівняння вимірювань у сфері з відомими експериментальними даними К. Накабаясі [6] для течії в зазорі між концентричними сферами, вираженими у вигляді

$$C_M = \frac{16\pi}{\text{Re}(1 - R_1/R_2)^3},$$

де R_1 і R_2 – радіуси внутрішньої і зовнішньої сфер, можна зробити висновок про деяку аналогію розглянутої нами течії у сферичному зазорі. За внутрішній радіус R_1 можна прийняти радіус квазітвердого ядра течії.

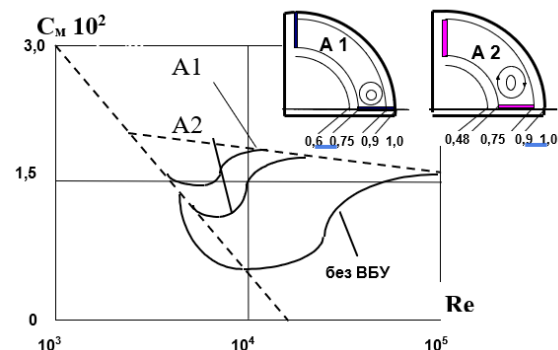


Рис. 8. Залежність коефіцієнтів опору C_M перегородок від числа Рейнольдса для штатної (A1) та запропонованої (A2) конструкції ВНП

Однак більш прийнятним виразом для коефіцієнта опору C_M в нашому випадку є отримана емпірично величина

$$C_M = 16,84\pi / \text{Re};$$

де $\text{Re} = \Omega R^2/\nu$ – відцентрове число Рейнольдса.

Численні експериментальні дослідження конструкцій ВНП, їх розташування та орієнтація у модельному резервуарі, а також ступеня проникності перегородок дозволили встановити структуру течії за перегородками, розміри і тривалість існування вихрових супутніх слідів. Узагальнені характеристики таких течій представлені на рис. 9 і дозволяють якісно представити характер розвитку течії в резервуарі з ВНП.

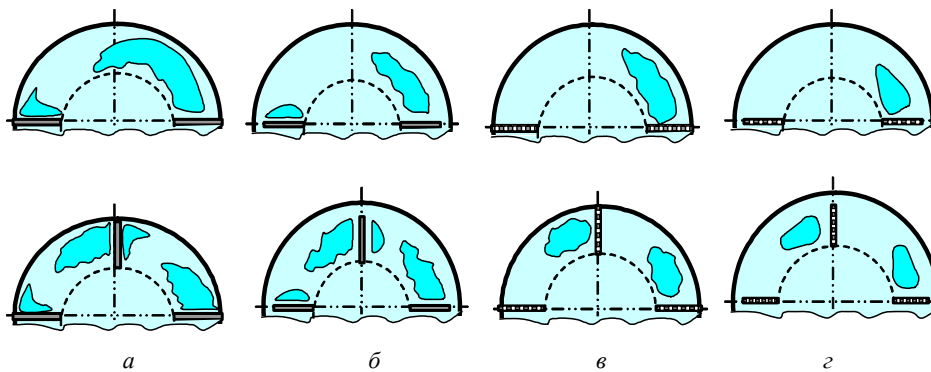


Рис. 9. Структура вихрових областей в околі радіальних перегородок при різних варіантах їх розташування: *a* – суцільна, прилегла до стінки; *б* – суцільна, відстоїть від стінки; *в* – перфорована прилегла; *г* – перфорована відстоїть

Як зазначалося, при використанні прилеглих до стінок перегородок (рис. 9, *a*, *в*) утворюються чималі області збурень, які стають на 27–33 % менше при виникненні зазору (рис. 9, *б*) між перегородкою і стінкою бака $R/R_0=0,17$. Застосування перфорованих перегородок (рис. 9, *в*, *г*) ще на 12–14% знижує екстремуми функції $C_m = f(\text{Re})$ і дозволяє з великою ймовірністю прогнозувати силові дії з боку рідини на ВНП.

Наведені вище результати вимірювань впливу перегородок на внутрішні інерційні течії можуть служити для визначення характеру впливу рідини на реальні конструкції КА. Для цього необхідно визначити масу і моменти інерції реального об'єкта, координати центру мас і розташування двигунів системи орієнтації та стабілізації.

Крім того, важливо враховувати координати розташування паливних баків, масу рідкого палива і площі поверхонь гідродинамічного тертя. При виконанні того чи іншого маневру КА на орбіті ці параметри слід враховувати для оптимізації компенсаційних дій з боку системи орієнтації і стабілізації.

Висновки

Проведені експериментальні дослідження з моделювання внутрішніх течій рідкого палива на борту КА дозволили встановити експонентний характер загасання полів швидкості за часом перехідної течії. Нелі-

нійний характер розподілу швидкості за радіусом резервуара викликаний досить сильним впливом вторинних циркуляційних структур і свідчить про істотну нелінійність розподілу швидкості.

Структура примежового шару на увігнутих стінках сфери помітно відрізняється від подібних течій, наприклад, у циліндрі, і залежить від геометрії ємності. Це дозволяє встановити найбільш динамічні і слабозагасаючі області інерційної течії. Використані для впливу на рідке паливо радіальні перегородки дозволяють підвищити ефективність впливу не тільки на пристінні шари рідини, але і на області квазітвердої приосової течії.

Створення зазору між кромками перегородок та стінками резервуара забезпечує помітне зниження пікових значень коефіцієнтів гідродинамічного опору і кругових моментів, зменшуючи вихрові області за перегородками. Для підвищення надійності управління КА і більш раціонального використання палива на борту дані по круговим моментам і силам вводяться до бортового комп'ютера і враховуються при виконанні КА маневрів, пов'язаних з обертанням його навколо однієї або декількох осей.

Перспективні експериментальні та чисельні дослідження мають полягати у тримірному моделюванні інерційних течій, зокрема у пристінних областях потоку. Такі відомості допоможуть найбільш точно встановити величини та зміни за часом потоку силових впливів з боку рідкого палива.

References

- [1] N.M. Belyaev *et al.*, *Reaktivnye sistemy upravleniya kosmicheskimi letatel'nymi apparatami*, Moscow: Mashinostroenie, 1979.
- [2] G.I. Bogomaz and S.A. Sirota, *Kolebaniya zhidkosti v bakakh. Metody i rezul'taty eksperimental'nykh issledovaniy*. Dnepropetrovsk: NAN Ukrainy, In-t tekhn. mekhaniki. 2002.
- [3] Kh. Grinspen, *Teoriya vrashchayushchikhsya zhidkosti*. Moscow: Gidrometeoizdat, 1975.
- [4] V. Kovalov *et al.*, “Visualization research on the influence of an ultrasonic degassing on the operation of a hydraulic gear pump”, in *Proc MATEC Web of Conferences 211, 03005 (2018), VETOMAC XIV*. doi: <https://doi.org/10.1051/matec-conf/201821103005>

- [5] V. Kovalev, "Circulations evolution in inertial flows of incompressible fluid in spherical tanks", *Mech. Adv. Technol.*, No. 3(81), pp. 75–81, 2017. <https://doi.org/10.20535/2521-1943.2017.81.116575>
- [6] V. Kovalev, "The Configuration of Circulating Unsteady Flows in the Spacecraft Spherical Tank", in *Proc International Scientific-Technical Conference on Hydraulic and Pneumatic Drives and Control*, 2020, pp. 377–385. https://doi.org/10.1007/978-3-030-59509-8_34
- [7] V. Kovalev, "Vliyaniye napravlyayushchikh apparatov na pristennyye techeniya neszhimaemoy zhidkosti v ogranichennykh ob'ektmakh", in *Proc KhKh11 Mizhnarodna nauk. tekhn.konferentsiya "Gidroaeromekhanika v inzheneranii praktitsi"*, Cherkasi, 2017, pp. 38–39.
- [8] K. Nakabayashi, "Friction moment of flow between two concentric spheres, one of which rotates", *Transactions of the ASME, ser. I*, 100, No. 1, pp. 97–106, 1978. <https://doi.org/10.1115/1.3448622>

Physical model of fluid flows in spacecraft tanks

V. Kovalev, V. Kalyuzhny, V. Gornostay

Abstract. The results of an experimental study of liquid fuel flows in the tanks of a spacecraft during its rotation are presented. The analysis of structure and character of flows development on time is carried out, variants of graphic dependences approximation are offered. Graphical diagrams are presented, according to which it is convenient to present a three-dimensional nonlinear picture of non-stationary axisymmetric flow in a spherical reservoir, as well as methods of influencing flows with the help of internal baffles. Estimation of the obtained experimental data probability testifies to the rather high quality of the measurement results and the constructed picture of the currents in the spherical tank with internal baffles.

Keywords: spherical reservoir, circulating currents, spacecraft, velocity field, velocity decay time.

Физическая модель течений жидкости в резервуарах космического аппарата

В. Ковалев, В. Калужный, В. Горностай

Аннотация. Приведены результаты экспериментального исследования течений жидкого топлива в резервуарах космического аппарата при его вращении. Проводится анализ структуры и характера развития течений по времени, предлагаются варианты аппроксимации графических зависимостей. Представлены графические зависимости, по которым удобно представить трехмерную нелинейную картину нестационарной осесимметричной течения в сферическом резервуаре, а также способы воздействия на течения с помощью внутренних направляющих аппаратов. Оценка достоверности полученных экспериментальных данных свидетельствует о достаточно высоком качестве результатов измерений и построенной картине течений в сферическом резервуаре с внутренними перегородками.

Ключевые слова: сферический резервуар, циркуляционные течения, космический аппарат, поле скорости, время затухания скорости.