

при $Re = 4500 - 5180$ пяти- шести циркуляционные и т.д. Интересной особенностью подобных формирований является то, что при снижении мгновенных чисел Рейнольдса интервалы существования циркуляций смещаются в сторону уменьшения чисел Рейнольдса. Например, переход от 3-х циркуляционной структуры к 2-х циркуляционной происходил при $Re = 1520 - 2040$, то есть, $\Delta Re = 80 - 100$.

В работе Xinjun C. [3] при численном исследовании течений в цилиндре установлено важное свойство миграции циркуляций в меридиональной плоскости.

На наш взгляд, важной особенностью вторичного циркуляционного течения в сфере является его способность заметно влиять на трехмерное распределение окружной компоненты вектора скорости, деформируя профили скорости и переориентируя векторы круговых моментов вязкого трения жидкости о стенки топливных баков КА. Точное определение правильного направления силового компенсационного воздействия со стороны СОС КА позволяет уменьшить продолжительность и повысить эффективность ее работы, уточнить величины и точное направление круговых компенсационных моментов.

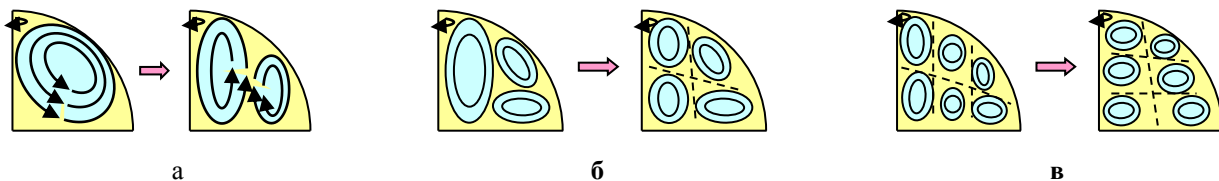


Рис. 3 – Эволюция меридиональных циркуляций в сферическом баке при инерционном вращении жидкости при различных числах Рейнольдса:

а) $Re = 1600 - 2140$ б) $Re = 2730 - 3840$ в) $Re = 4500 - 5180$

Выводы

Результаты измерений компонент вектора скорости свидетельствуют об экспоненциальном характере затухания полей скорости и сильно нелинейных особенностях распределения скорости по радиусу резервуара. Это обусловлено достаточно сильным влиянием вторичных циркуляционных структур, которые способны дробиться и переориентировать в пространстве резервуара силовые воздействия со стороны жидкости.

Для повышения надежности управления КА и более рационального использования топлива на борту данные по круговым моментам и силам вводятся в бортовой компьютер КА и учитываются при выполнении штатных маневров на орбите.

Список литературных источников

1. Беляев Н.М., Белик Н.П., Уваров Е.И. Реактивные системы управления космическими летательными аппаратами - М.: Машиностроение, 1979, 289 с.
2. Гринспен Х. Теория вращающихся жидкостей - М.: Гидрометеиздат, 1975.- 304 с.
3. Xinjun C. A Numerical Study of the Recirculation Zones During Spin-Up and Spin-Down for Confined Rotating Flows // J. Theoret. Comput. Fluid Dynamics, 2003, v.1, p.p. 31–49.

УДК 629.74: 532.53

Ковальов В.А., д.т.н., професор

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

ПРЕЦЕСІЯ ОСЕСИМЕТРИЧНОЇ ТЕЧІЇ РІДКОГО ПАЛИВА У СФЕРИЧНОМУ РЕЗЕРВУАРІ

Анотація Пропонований матеріал відноситься до теоретичних та експериментальних досліджень гідродинамічного механізму розвитку внутрішніх течій у паливних резервуарах космічних об'єктів, які здатні впливати на розподіл силових параметрів упродовж програмного польоту на навколосезній орбіті. Подібні

течії можуть спричинювати суттєві нестійкості роботи рушійної установки, значно збільшуючи витрату палива на борту через необхідність виконувати компенсаційні маневри.

Моделювання подібних течій у лабораторних умовах має на увазі вимірювання компонент вектора швидкості, крутних моментів в'язкого тертя потоку на стінках резервуару та побудову трьохмірної картини їх розподілу за часом. У поданій роботі за результатами вимірювань у всьому просторі модельного резервуару встановлено ефект відхилення (прецесію) вісі симетрії потоку від початкового вертикального положення, що має впливати на деяку переорієнтацію силових впливів рідини на конструкцію об'єкта.

Ключові слова: космічний об'єкт, паливний резервуар, компоненти вектора швидкості, прецесія вісі симетрії обертального потоку.

Вступ. Освоєння космічного простору в останні роки пов'язане з розширенням кола технологічних, наукових і практичних застосувань – глобалізацією телекомунікацій та телефонного зв'язку, геологічними та метеорологічними задачами тощо. Крім того, великий практичний інтерес представляють тривалі польоти космічних апаратів (КА) до маловивчених планет, які потребують створення надійних, економічних і добре керованих об'єктів.

Як відомо, дуже поширеним і енергетично ефективним у більшості конструкцій КА є рідке паливо, яке може займати до 80 % маси усього об'єкта [1]. На відміну від твердопаливних двигунних установок, у яких процес горіння, як правило, не контролюється, рідинними ракетними двигунами (РРД) керувати більш просто, завдяки регулюванню витрати рідини у камерах згорання. Для підвищення ефективності горіння рідкого палива (керосин, рідкий водень, гідрозин, диметилгідрозин тощо) воно перемішується у певних пропорціях з рідким окислювачем (рідкий кисень, окиси азоту і т.і.)

Неконтрольований рух рідких компонентів у межах паливних баків часто представляється джерелом сильних нестійкостей, котрі можуть спричинювати значні відхилення КА від заданої програми польоту та, як наслідок, нештатні та навіть аварійні ситуації на борту. Для компенсації таких впливів застосовують двигуни системи орієнтації та стабілізації (СОС), які компенсують небажані впливи рідини на конструкцію КА та потребують додаткової витрати рідкого палива, запаси якого на борту важко відновити [1].

Для підвищення ефективності дії на внутрішньо-бакові течії палива необхідно вивчити основні сили, що діють на нього на кожній стадії польоту КА (старт, активна фаза, пасивний рух, штатні маневри тощо). Дослідження гідродинамічних особливостей течій, що при цьому виникають, дозволить встановити картину їх розвитку та впливу на стінки баків і конструкцію КА у цілому. Це, у свою чергу, допоможе визначити основні закономірності замкнених потоків рідкого палива та створити засоби і методи ефективної дії на небажані внутрішньо-бакові течії, заощадити паливо на борту КА [2].

Таким чином, представлені у поданій роботі результати досліджень є актуальними з точки зору підвищення ефективності керування, надійності польоту та екологічної безпеки КА.

Постановка задачі досліджень

Численні дослідження поведінки рідкого палива у частково заповнених баках за його коливань [1] дозволили визначити силові впливи та інерційні кругові моменти з боку рідини і створити бази даних для бортового обчислювального комплексу КА. Одним з поширених видів руху рідкого палива на борту КА при активному і пасивному польоті є його обертання навколо вісі симетрії баку. Причинами його утворення та розвитку можуть бути орієнтаційні та сепараційні розвороти КА, режими переходу на іншу орбіту польоту, штатні прискорення тощо.

На кафедрі створено комплекс лабораторних гідродинамічних стендів, захищених авторськими свідоцтвами і патентами на винаходи. За їх допомоги проведено експериментальні дослідження з моделювання поведінки рідкого палива у резервуарах КА. Розроблено безрозмірні критеріальні комплекси для забезпечення адекватності фізичних моделей натурним аналогам та режимам польоту КА навколоземною орбітою.

Результати досліджень свідчать про значну нелінійність розподілу швидкостей і кругових моментів у замкнених осесиметричних течіях у баках сферичної та циліндричної форми. Крім того, встановлено деякі особливості трьохмірного розподілу швидкостей основного потоку та циркуляційних течій, що впливають на гідродинамічний механізм течій.

Методика проведення експерименту та особливості вимірювання параметрів

Течії «спін-даун» вважаються сильно нелінійними через геометрію резервуара та нерівновагу діючих на частки рідини відцентрових сил інерції, коріолісових сил і радіального градієнту тиску. Взаємодія вказаних сил є причиною утворення циркуляційних і вихрових когерентних структур у меридіональних площинах баку.

На рис. 1 показано орієнтацію чутливих елементів датчиків швидкості, котра враховувала властивості осесиметричності замкненого потоку та передбачала вимірювання швидкостей як у екваторіальній, так і у меридіональних площинах сферичного резервуара. У горизонтальній площині (рис. 1, а) термоанемометричні датчики розташовувалися таким чином, щоб на електронний сигнал не накладався вихровий спутний слід від датчика, що встановлено попереду. Потім за трьохмірною комбінацією електронних сигналів складалася картина розподілу швидкостей по всій площині вимірювань.

Для конструкцій тензометричних датчиків, у яких чутливий елемент виконано у вигляді плоского диску (рис.2), задача орієнтації у потоці розв'язувалася більш просто. Площина диску розташовувалася перпендикулярно, наприклад, вектору швидкості основного потоку u , тобто, круговій складовій швидкості. Таким чином, співставлення за орієнтацією та за часом сигналів від датчиків достатньо коректно демонструвало просторову картину розподілу нестационарного поля швидкості.

З умови симетричності замкненої течії відносно екваторіальної площини вимірювання проводилися у верхній напівсфері та дозволили встановити деякі закономірності розвитку інерційної нестационарної течії.

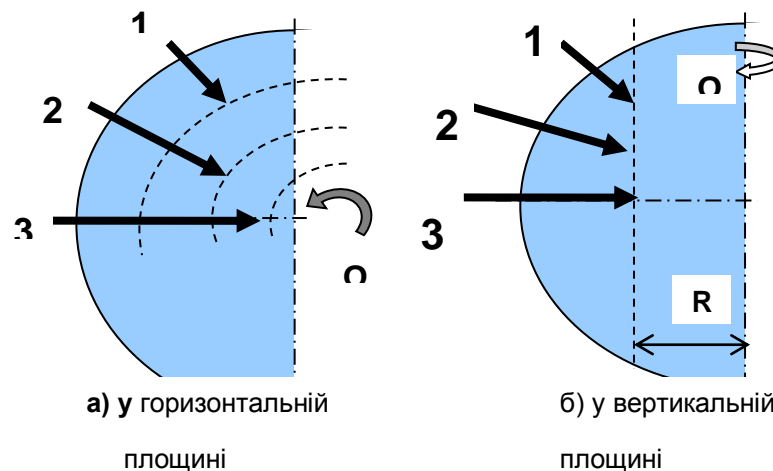


Рис. 1 – Розташування датчиків швидкості в модельній ємності

Аналіз результатів експериментальних досліджень

Результати досліджень течій у сферичній ємності наводилися раніше (наприклад, роботи [3]) та дозволили зробити висновок про суттєву нелінійність розподілу складових швидкості та кругових моментів в'язкого тертя на стінках судини.

Згідно до аналітичної гіпотези Х.Грінспена [1], складна структура силових впливів у сферичному потоці може бути причиною деякого відхилення його вісі симетрії від вертикалі, назване ефектом прецесії. Для малих градієнтів швидкості кут прецесії може бути невеликим (порядку 1...2 градусів), тому його впливом на картину розподілу та вектори швидкості можна знехтувати.

Однак, за великих кутових швидкостей, наприклад, у сферичних гідродинамічних гіроскопах, кути прецесії можуть складати до 3...5 градусів [2, 4]. Це, у свою чергу, може привести до появи неконтрольованого відхилення вісі обертання гіроскопа і, як наслідок, створення неправильного вихідного сигналу до системи орієнтації та стабілізації КА.

За результатами вимірювань компонент вектора швидкості інерційної осесиметричної течії у сферичній судині у діапазоні початкових відцентрових чисел Рейнольдса $Re_0 = 1650...12500$, побудованих на величинах початкової кутової швидкості обертання резервуара, її радіуса та в'язкості модельної рідини, встановлено деякі закономірності розвитку, що підтверджують аналітичні гіпотези Х.Грінспена відносно прецесії осесиметричної течії. Як зазначалося, розрахунок впливу в'язкості представляє певні труднощі, але не є визначальним. Перша із зазначених циркуляційних структур – одновихрова – викликає особливий інтерес, тому що вона представляє тверде обертання навколо вісі, що відрізняється від вісі обертання самої сферичної оболонки. Це, безумовно, нетривіальна нев'язка структура у координатній системі, пов'язаній з обертовою сферою, що названа «спіноверовою модою».

З практичної точки зору, це найбільш легко збуджувана циркуляційна конструкція, тому що для її збудження вистачає слабкої імпульсивної зміни у напрямку вісі обертання сфери, що обертається разом з рідиною як тверде тіло. Отже, прецесію можна розглядати як послідовність нескінченно малих змін такого типу, і цілком ймовірно, що ця конфігурація виграє ключову роль. За вимірювань компонент швидкості у приосьовій області сфери датчиками з орієнтованими насадками спостерігалися ненульові значення швидкості у напрямку обертання. На рис. 2 наведені узагальнені епюри кругової компоненти швидкості, які характеризують концентровану неосесиметричність розподілу швидкості.

Приблизний нуль кривої швидкості за меридіонального кута $\theta = 30^\circ$ розташований на відстані 4 мм від вісі, а за $\theta = 60^\circ$ – 7,5 мм. При перерахуванні лінійних відхилень на кутові, це представляється кутами відповідно 0,5...2,0 градусів (див. таблицю 1).

Збільшення початкових кутових швидкостей обертання до 7,5 1/с, і як наслідок, початкових чисел Рейнольдса до 30 000 дозволило встановити неєдиність характеру розвитку інерційної течії з точки зору формування вторинних циркуляційних структур. Турбулізація течії та утворення багатовихрових вторинних течій (5 – 7 – 10 структур) суттєво змінює картину розподілу швидкостей вторинних течій v і w та не дозволяє з достатньо високою ймовірністю визначити властивості явища прецесії.

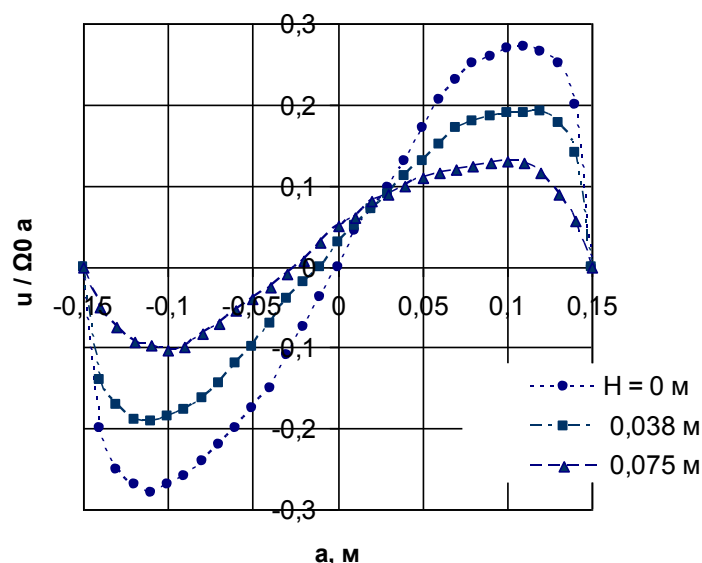
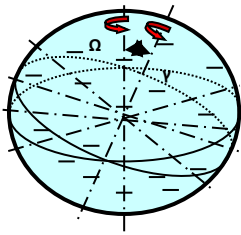


Рис.2 – Лінійні відхилення епюр окружної швидкості у різних площинах сфери



Таблиця 1. Кути прецесії сферичної течії

Re_0	1650	2200	5600	8600	9500	12500
γ , град	0	0	0,5	1,0	2,0	2,5

Висновки

Дослідження осесиметричних течій у сферичному резервуарі щодо їх інерційних властивостей за допомогою тензо- і термоанемометричних перетворювачів швидкості вимагали тонкої орієнтації їх чутливих елементів у потоці і визначення впливу кожної конкретної складової швидкості потоку, з чим цілком коректно впоралися оригінальні конструкції насадок на чутливі елементи датчиків.

Виявлений завдяки вимірюванням полів швидкості у діапазоні чисел Рейнольдса $Re = 1650 \dots 12500$ перерозподіл силових інерційних впливів з боку рідини дозволив скоректувати трьохмірну картину течії, визначити відхилення (до 2,5 градусів) векторів кругових моментів в'язкого тертя рідини на стінках паливного баку КА. Програмування цих даних у бортовому обчислювальному комплексі КА забезпечить більш точні компенсаційні дії системи орієнтації та стабілізації на траєкторію та характер польоту КА. Це, у свою чергу, дозволить заощадити запаси рідкого пального на борту об'єкта і збільшити його надійність і керованість у цілому.

Список використаних джерел

1. Микишев Г.Н., Рабинович Б.И. Динамика тонкостенных конструкций с отсеками, содержащими жидкость.- М.: Машиностроение, 1971.- 564 с.
2. Ковалев В.А. Влияние момента трения вязкой жидкости на стенки содержащей ее сфероидальной емкости // Вісник Східноукр. Держ. Ун-ту, 1999, № 4 (20), стр.222...228.
3. Ковальов В.А. Особливості нестационарного розподілу швидкості в'язкої нестисненої рідини при обертанні сферичної ємності // Наукові Вісті Нац. Техн. Ун-ту України «КПІ», 2000, вип.3, стр.47...51.

УДК 532

Лукьянов П.В., канд. физ.-мат. наук, с. н. с. Макаренко Р.А., канд. техн. наук, доцент
Национальный авиационный университет, Киев, Украина

ОСОБЕННОСТИ ТЕЧЕНИЯ ЖИДКОСТИ, ВЫЗВАННОГО СТАЦИОНАРНЫМ ВРАЩЕНИЕМ ДИСКА В ЗАМКНУТОЙ ОБЛАСТИ

Представлены результаты численного расчета течения несжимаемой жидкости в цилиндрической замкнутой области, вызванное источником циркуляции на дне. Источником циркуляции служит вращающийся диск радиуса, меньшего радиуса основания. Целью исследований была апробация существующих моделей компактных вихревых течений путем сравнения их с численным экспериментом. Результаты численного эксперимента указали качественное совпадение модели компактного компенсированного вихря с радиальными распределениями поля азимутальной скорости. Кроме того, численный эксперимент подтвердил наличие, хотя и незначительной, так называемой зигзагообразной неустойчивости, которая сводится к искривлению оси вращения вихря при взаимодействии с твердой поверхностью – неподвижной границей напротив вращающегося диска. Таким образом, при построении моделей трехмерных течений, как стационарных, так и нестационарных, оправдано использование модели компактного компенсированного вихря в качестве «пробного» решения, на основании которого можно строить уже полную трехмерную нелинейную модель.

Ключевые слова: компактный компенсированный вихрь, вращающийся диск, течение в замкнутой области