

УДК 532.53 : 629.784

В.А.Ковальов, доктор технічних наук, професор

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

Структура інерційних течій рідини у тороїдальних резервуарах рухомого об'єкта

Анотація: Наведено результати експериментальних досліджень структури інерційних течій в'язкої нестисливої рідини при її обертанні у тороїдальних резервуарах, які мають застосування при динаміці рідкого палива на борту космічного апарата. Представлено залежності структури пристінної течії, а також графічні вирази для крутних моментів в'язкого тертя рідини на стінках посудини. Приводяться емпіричні залежності для силових впливів з боку рухомої рідини та практичні рекомендації для використання результатів експериментальних вимірювань.

Ключові слова: космічний апарат, тороїдальний резервуар, вектор швидкості рідини, розподіл швидкостей і тисків у потоці

Під час руху космічного апарату (КА) на орбіті планети програмою польоту як правило, передбачаються різні орієнтаційні, сепараційні та інші штатні маневри. Вони можуть включати в себе прискорення, гальмування, кутові переміщення і обертання з певною кутовою швидкістю навколо однієї або декількох осей. При цьому рідке паливо, що міститься в резервуарах КА і становить до 80% маси всього об'єкта, може рухатися під дією сил інерції, викликаючи нестійкості і навіть аварійні ситуації на борту.

З огляду на те, що при пасивній стадії польоту з вимкненою рушійною установкою КА не має будь-яких точок опори, він схильний до суттєвого впливу з боку рухомої рідини. Як показує досвід експлуатації подібних КА, в цих ситуаціях необхідно враховувати навіть незначні впливи рідини на конструкцію об'єкта, оскільки вони здатні, наприклад, змінити його орієнтацію на Сонце, зменшуючи ефективність роботи сонячних батарей, ускладнюючи виконання програми польоту і т.д.

Для вирівнювання траєкторії і відновлення штатного режиму руху КА системою автоматичної стабілізації здійснюються спеціальні розвороти об'єкта із забезпеченням протиобертання рідини для компенсації збурень з боку рідини. Це призводить до додаткової витрати робочого тіла і необхідності подальшої дозаправки орбітального модуля.

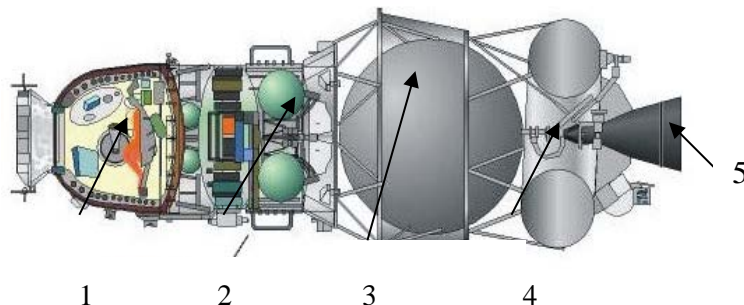


Рис.1. Структура орбітального модуля 7К-Л1 [2] і приклад компонування паливної системи: 1 - житловий відсік; 2 - тороїдальний бак пального; 3 - сферичний бак пального розгінного блоку; 4 - тороїдальний бак окислювача розгінного блоку; 5 - маршовий двигун об'єкта

Одним з поширених типів паливних резервуарів на борту КА є тороїдальні [2], оскільки завдяки їх геометрії можна ефективно використовувати простір усередині корпусу об'єкта, а крім того вони зручні для розміщення запірно-регулюючої апаратури (рис.1). Незважаючи на те, що вони можуть містити порівняно невеликі кількості рідкого палива (до 1,5 тонн), дослідження поведінки рідини в резервуарах подібної геометрії представляються досить актуальними. Відсутність в даний час будь-яких даних про течії в'язкої рідини в тороїдальних посудинах дозволяє сподіватися, що отримані в рамках цієї роботи результати вимірювань істотно доповнять картину течій.

Результати експериментальних вимірювань полів азимутальної швидкості систематизувалися по відстаням контрольних точок до осі обертання тора і за часом загасання швидкості, дозволяючи таким чином побудувати профілі швидкості і залежності їх зміни за часом течії. Для поширення зазначених результатів моделювання течій на реальні умови і об'єкти використовували критеріальні параметри у вигляді чисел Рейнольдса, Струхалія і Россбі.

Відповідно до припущень про замкнутих течіях рідини формування інерційних течій в торі, завдяки його геометрії, може істотно відрізнитися від осесиметричних течій посудинах іншої геометрії, наприклад, в сфері або циліндрі. Основною відмінністю подібних течій є зміщення їх осі симетрії за межі «рукава», тому відцентрові сили інерції, що діють на рідину, перевищують сили Коріоліса, що в результаті може привести до перерозподілу компонент вектора швидкості і силових впливів течій на конструкцію КА.

Таким чином можна уявити таку картину перебігу в торі. Після раптової зупинки обертання оболонки рідина продовжує рух уздовж кільцевого рукава під дією сил інерції. Згідно з умовами прилипання рідини, на зовнішніх і внутрішніх стінках тора утворюються примежові шари і пристінкові загальмовані течії, швидкість рідини в яких дуже мала. Відцентрові сили інерції, що діють на частинки рідини, спрямовані перпендикулярно осі обертання до периферії бака.

Круговий момент в'язкого тертя $M_{кр}$ дорівнює добутку сумарної сили в'язкого тертя рідини на стінках $F_{вяз}$ на наведену відстань від осі обертання тора R . З відомих аналітичних залежностей для визначення силових параметрів [3] можна уявити

$$F_{vis} \approx \frac{\rho \cdot v \cdot u_i \cdot R^2}{\delta_1 + \delta_2} = \frac{\rho \cdot v \cdot \Omega_0 R_{np}^3}{\delta_1 + \delta_2}, \quad (1)$$

де δ_1 і δ_2 – відповідно товщини пристінних течій поблизу внутрішньої і зовнішньої стінок тора, які визначалися за допомогою термоанемометричних вимірювань.

Наведений радіус R_{np} визначається відношенням сумарної площі внутрішньої поверхні тора $S_{тор}$ до радіусу кривизни середньої осі рукава тора $R_{ср}$

$$R_{np} = S_{тор} / R_{ср} \quad (2)$$

і таким чином величина кругового моменту в'язкого тертя буде складати

$$M_{круз} = F_{вяз} \cdot R_{np} \approx \frac{\rho \cdot v \cdot \Omega_0 \cdot R_{np}^4}{\delta_1 + \delta_2}. \quad (3)$$

На рис.2 представлені залежності товщини пристінної течії δ від безрозмірного часу загасання швидкості $T = \Omega_0 t$ при різних числах Рейнольдса Re . Представлені результати дозволяють встановити логарифмічну залежність параметра δ/R_0 від часу загасання окружної швидкості. З рисунка видно залежність товщини δ від часу загасання

$$\delta = 0,15 \cdot \ln(T) + 0,083, \quad (4)$$

яку можна ввести відповідно до виразу для кругового моменту (3). Причому зі зростанням часу загасання інерційної течії криві товщини $\delta=f(T)$ асимптотично прагнуть до симетричного ламінарного профілю швидкості, з максимумом, розташованим на поздовжній осі рукава.

Підставляючи чисельні значення параметрів до рівняння (4), і припускаючи, що наведений радіус R_{np} є величина постійна, яка не залежить від критеріальних оцінок, наприклад, Рейнольдса або Россбі, отримаємо емпіричну залежність кругового моменту $M_{кр}$ від товщини δ при різних початкових кутових швидкостях тора Ω_0

$$M_{кр} = \frac{\rho \cdot \nu \cdot \Omega_0 \cdot R_{np}^4}{0,15 \cdot \ln(T) + 0,084} \quad (5)$$

З іншого боку, побудова залежності $M_{кр}$ від товщини δ пристінної течії означає, що зі збільшенням маси рідини, що рухається з малою швидкістю, сумарна величина $M_{кр}$ має зменшуватися. При цьому зменшення загального об'єму квазітвердої області течії, де навіть при великих значеннях часу T великі сили інерції течії, також знижує вплив рухомої маси рідини на величину кругового моменту $M_{кр}$.

Для розглянутої нами течії модельної рідини - води, в'язкість якої становить $\nu = 1 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2/\text{с}$, щільність $\rho = 988 \text{ кг}/\text{м}^3$, початкова кутова швидкість $\Omega_0 = 0,528 \text{ 1}/\text{с}$, і приведений радіус становить

$$R_{np} = S_{вн} / R_{ср}, \quad (6)$$

де $S_{вн} = 4 \cdot \pi^2 (R_1 - R_2)^2$ - площа внутрішньої поверхні тора, $R_{ср} = 0,10 \text{ м}$ - відстань до осі обертання тора.

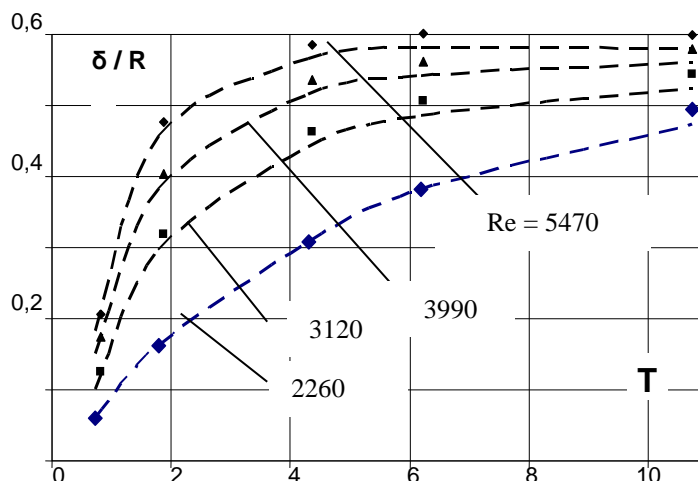


Рис.2. Залежність товщини пристінної течії в торі від часу при різних числах Рейнольдса

З наведених аналітичних і графічних залежностей очевидні наступні властивості осесиметричної течії. Експоненціальна природа загасання окружної швидкості течії і кругових моментів в'язкого тертя $M_{кр}$ привносить суттєві корективи в особливості розвитку силових впливів з боку рідини на стінки тороїдальної посудини. З огляду на геометричні особливості тора і характер руху рідини в рукаві, загасання швидкості відбувається набагато швидше, ніж, наприклад, в сфері або циліндрі. Це свідчить про більш суттєвий вплив загальмованої маси течії на квазітверду область течії, яка розташовується біля середньої лінії рукава тора. Це, в свою чергу, визначає характер зміни кругового моменту від впливу в'язкості рідини на стінки посудини.

Список використаних джерел

1. Рабинович Б.И. Неустойчивость жидкостных ракет и космических аппаратов. Борьба с ней / Б.И.Рабинович // Полет. - 2006. - № 10. - С.25-33.
2. Ковальов В.А. Гідродинамічна картина інерційного потоку нестисливої рідини у торовому резервуарі / В.А.Ковальов // Вісник Сумського державного університету, серія "Технічні науки". - 2003. - № 12 (58) . - С.45-49.

3. Ковальов В.А. Гідродинамічний опір внутрішньо-бакових пристроїв інерційному потокові рідини у торовому резервуарі / В.А.Ковальов // Вісник Черкаського державного технічного університету. – 2004. – вип.4. – С.167-171.
4. Гринспен Х. Теорія вращающихся жидкостей / Х.Гринспен. - М.: Гидрометеиздат, 1975. - 304 с.