

УДК 532.53 : 629.784

Циркуляційні течії рідини у резервуарах з каскадними напрямними апаратами

Ковальов В.А., доктор технічних наук, професор

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

***Анотація:** Вивчення навколоземного простору останнім часом отримало численні практичні застосування. Крім великих географічних, геологічних, метеорологічних та інших наукових досліджень космічні апарати (КА), що виводяться на навколоземну орбіту, дозволяють встановити розгалужені і швидкодіючі телекомунікації та елементи мобільного зв'язку і т.д. У матеріалі наводяться результати моделювання за допомогою методу скінчених елементів замкнутих течій в резервуарах з напрямними апаратами у вигляді радіальних перегородок, наведені поля швидкостей і вторинних течій при їх обтіканні.*

Математичне моделювання замкнутих потоків в резервуарах КА, що застосовується для визначення силових впливів з боку рідкого палива, наприклад, течій в'язкої рідини в обмежених обсягах, ґрунтується, як правило, на використанні повних рівнянь Нав'є-Стокса, виражених у відповідних координатах, наприклад, для течій у сферичних резервуарах застосовуються сферичні координати (R, θ, φ) .

***Ключові слова:** циркуляція, поле швидкості, математичне моделювання, резервуар, течія рідини*

З урахуванням граничних умов прилипання рідини на стінках і нульових швидкостей на осі обертання резервуара [1], а також твердотільного розподілу швидкості у початковий момент течії у всьому просторі посудини можна розглядати нелінійну модель нестационарного розподілу швидкостей, тисків і кругових моментів в'язкого тертя рідини на стінках і динамічного впливу на внутрішні перегородки.

Важливу роль у розподілі поля швидкостей і силових впливів у потоці грають напрямні апарати у вигляді системи жорстких суцільних або проникних перегородок, які сприяють більш точному визначенню силових впливів на стінки та інші внутрішні конструкції резервуару. Крім силових впливів рідини на площини перегородок, що виникають при цьому вихрові і циркуляційні течії на крайках і в супутньому сліді утворюють складну систему вторинних циркуляційних течій з нелінійним розподілом швидкості і полів тиску, які дозволяють більш точно прогнозувати ефективні компенсаційні заходи для демпфірування збурень з боку рухомої рідини. Завданням цього дослідження є імітаційне моделювання впливу напрямних апаратів у вигляді системи жорстких радіальних перегородок, розташованих в характерних точках резервуара на інерційні осесиметричні течії в'язкої нестисливої рідини [2].

Основними критеріями оцінки впливу перегородок на течії рідини представляються відомі та спеціально розроблені числа подібності, наприклад, числа Рейнольдса, Россбі, Струхалія та інші. Визначення за їх допомоги нестационарної картини розподілу швидкостей безпосередньо біля перегородок і у вільному просторі течії дозволяє встановити структуру характерних шарів рідини, що рухається у резервуарах з різними варіантами напрямних апаратів. Ще більший вплив на течії мають каскадні перегородки, розташовані у резервуарі у шаховому порядку, що створюють різнонаправлені вторинні течії.

Завдяки впливу в'язкого тертя між шарами рідини загасання азимутальної швидкості поширюється від стінок до внутрішніх шарів, зменшуючи, таким чином, розміри квазитвердої області. При цьому, як відомо, структура загальмованої області на бічних вертикальних стінках істотно відрізняється від особливостей формування пристінної течії у верхній і донній областях сфери, де мають місце екмановські примежові шари [3].

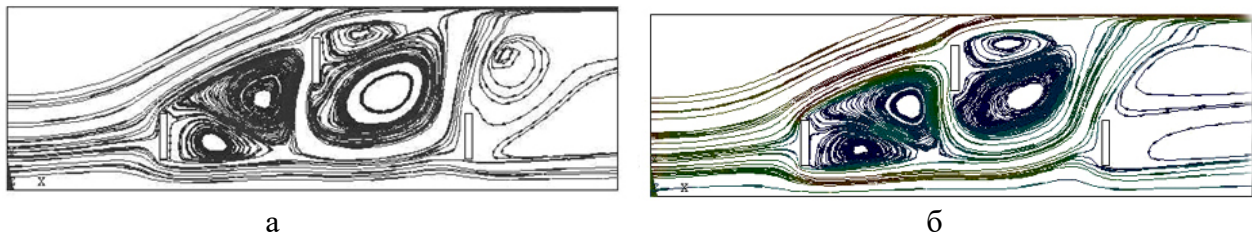


Рис.1. Структура вихорів у каскадних перегородках: а – Re=650; б – Re=810

Розглянемо формування течії поблизу нижньої горизонтальної стінки сфери, властивості якого подібні обертанню рідини близько нерухомого диска [3,4]. Інтегральну оцінку сили в'язкого тертя можна представити у вигляді

$$F_{\text{вяз}} \approx 4/3 \pi \cdot \rho \cdot \Omega_0^2 \cdot R^4. \quad (1)$$

Однак, біля стінки азимутальні швидкості малі і спрямовані до осі обертання радіальний градієнт тиску, який при твердотільному русі рідини і посудини дорівнював відцентровим силам інерції, залишається таким же за величиною і починає переважати над ними, обумовлюючи виникнення радіальної течії, спрямованої всередину резервуару.

$$\frac{\partial p}{\partial r} = \rho \frac{u^2}{r} \quad (2)$$

Враховуючи умову нерозривності течії, що рухається до осі обертання рідкі частинки формують висхідну течію в осьовому напрямку, утворюючи, таким чином, меридіональну циркуляцію [3]. Проведемо аналіз сил, що впливають на формування інерційної осесиметричної течії у сфері. Рівняння Нав'є-Стокса для обертової течії можна представити у векторній формі

$$\frac{\partial u}{\partial t} + u \nabla u = -\frac{1}{\rho} \nabla p - \Omega \times (\Omega \times r) - 2\Omega \times u_R + \nu \nabla^2 u, \quad (3)$$

де локальні та конвективні прискорення у лівій частині рівняння урівноважуються складовими у правій частині - $\Omega \times (\Omega \times r)$ - відцентровими силами інерції, $2\Omega \times u_R$ - силами Коріоліса, $\frac{1}{\rho} \nabla p$ - радіальним градієнтом тиску та $\nu \nabla^2 u$ - силами в'язкого тертя. Доданки, що пов'язані з відцентровою силою, можуть входити до величини уявного радіального градієнта тиску

$$\Omega \times (\Omega \times r) = -\nabla \left(\frac{1}{2} \Omega^2 r^2 \sin^2 \vartheta \right) = -\nabla \left[\frac{1}{2} \Omega^2 (x^2 + y^2) \right]. \quad (4)$$

Таким чином, рівняння (4) можна записати у вигляді

$$\frac{\partial u}{\partial t} + u \nabla u = -\frac{1}{\rho} \nabla p' - 2\Omega \times u_R + \nu \nabla^2 u, \quad (5)$$

де $p' = p - \frac{1}{2} \rho \Omega^2 (x^2 + y^2)$

Згідно з відомими виразами [4] сили в'язкого тертя рідини на стінках пропорційні

$$F_{\text{вязкості}} \approx \frac{\rho \cdot \nu \cdot u \cdot R^2}{\delta}, \quad (6)$$

де δ – товщина пристінної течії.

Наведений характер розподілу сил у течії, що загасає у сфері, обумовлює виникнення циркуляційних течій навіть при малих числах Рейнольдса. Як видно з рис.2, має місце ініційована екманівськими шарами одна циркуляція у масштабі чверті сфери з лініями тока, напрямленими від осі до стінок резервуара в екваторіальній області та до осі – у нижній та верхній пристінних областях [4].

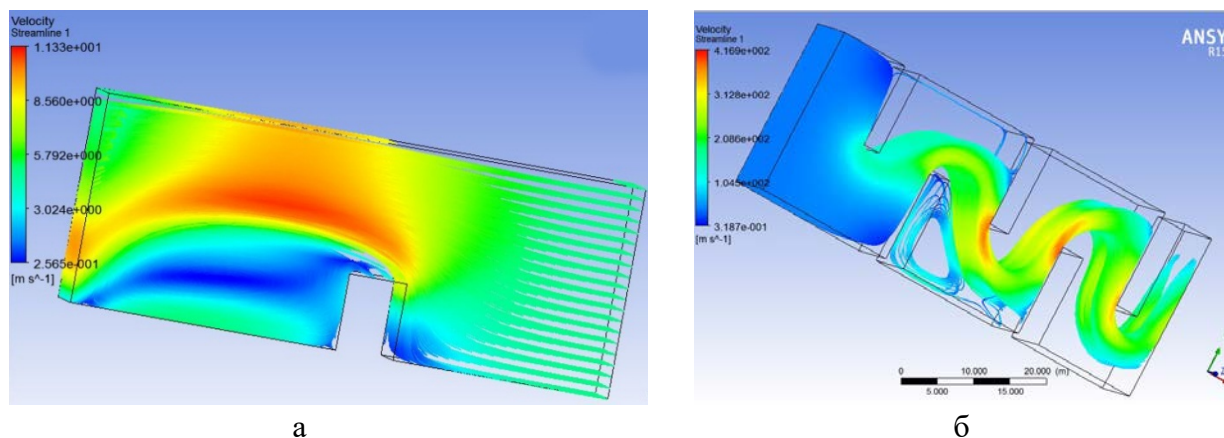


Рис.2. Трьохвимірні зображення обтікання напрямних апаратів: а – одиночного прилеглого, $Re=650$; б – каскадного прилеглого, $Re=810$

Зміна коефіцієнта проникності перегородки η здійснює деякий вплив тільки у початковій стадії інерційного течії, коли великі градієнти азимутальної швидкості у супутньому сліді і біля стінки. У заключній же стадії течії, при великих значеннях часу T процес облітерації отворів перфорації помітно знижує ефект проникності перегородок і параметр η менше впливає на розподіл швидкості у всіх характерних зонах течії.

Аналіз результатів експериментальних вимірювань дозволив зробити висновок про досить високу складність картини розподілу швидкостей при течії в'язкої нестисливої рідини в резервуарах різної геометрії з внутрішніми перегородками. Це, в свою чергу, необхідно враховувати при складанні номограм впливів, яка вводиться до бортового комп'ютера системи стабілізації космічного апарату для оптимізації компенсаційних заходів при його тривалому орбітальному русі.

Список літератури

1. Колесников К.С. Динамика ракет [Текст] / К.С. Колесников. - М.: Машиностроение, 1980. - 316 с.
2. Микишев Г.Н. Экспериментальные методы в динамике космического аппарата [Текст] / Г.Н.Микишев. - М.: Машиностроение, 1978. - 247 с.
3. Ковалев В.А. Влияние внутрибаковых перегородок на течение жидкого топлива в баках космического аппарата [Текст] / В.А.Ковалев // Вестник Нац. техн. ун-та Украины «КПИ», Машиностроение, 2006. - № 48. - С.73-79
4. Ковалев В.А., Определение гидродинамического сопротивления стабилизаторов в топливных баках космического летательного аппарата [Текст] / В.А.Ковалев // Вестник Нац. техн. ун-та Украины «КПИ», Машиностроение, 2002.-вып.42,Т.1.-С.107-111.