

14. Spurk J.H. A theory for the Gas Loss from Ventilated Cavities. // Proceedings of Int. Sci. School High Speed Hydrodynamics: HSH 2002, Chebocary, pp.191-196.

15. Парышев Э. В. 1978 Система нелинейных дифференциальных уравнений с запаздывающим аргументом, описывающих динамику нестационарных осесимметричных каверн // Тр. ЦАГИ им. Н.Е.Жуковского. -1978. -Вып. 1907. -С. 3-16.

16. Schlichting G., 1969, *Theory of the boundary layer* [In Russian], Nauka, Moscow. 742p

УДК 629.784: 532.53

Ковалев В.А., д.т.н., профессор
КПИ им. Игоря Сикорского, г.Киев, Украина

СТРУКТУРА ЦИРКУЛЯЦИОННЫХ ТЕЧЕНИЙ ЖИДКОГО ТОПЛИВА В РЕЗЕРВУАРАХ КОСМИЧЕСКОГО АППАРАТА

Аннотация

В предлагаемом материале представлены результаты экспериментальных и теоретических исследований гидродинамического механизма развития вторичных циркуляционных течений в резервуарах сферической геометрии в приложении к задачам обеспечения устойчивости полета и эффективной управляемости космического объекта на околоземной орбите. Установлено, что вторичные течения, возникающие в меридиональных плоскостях резервуара, имеют форму циркуляций (одной или нескольких) и способны оказывать влияние на распределение компонент вектора скорости – окружной, радиальной и меридиональной.

Построенные по результатам измерений профили скорости дают достаточно полное трехмерное представление о гидродинамическом механизме развития циркуляций и их влиянии на такие силовые параметры как крутящий момент или давление на плоскости радиальных демпфирующих перегородок.

Ключевые слова: космический аппарат, сферический резервуар, измерения скорости, циркуляции, полиномиальная циркуляция.

Введение

Технологическое развитие ведущих стран мира предложило новые глобальные задачи по более широкому освоению космического пространства, не только околоземного, но и дальнего космоса. К перспективным конструкциям космических аппаратов (КА), реализующим поставленные задачи, предъявляются более высокие требования по надежности, управляемости, долговременности полета, а также экологической безопасности.

Одним из широко распространенных видов топлива для КА в настоящее время являются кислород, водород, а также керосин, гептил и другие, при работе двигательных установок (ДУ) КА одним из видов неустойчивости представляется неконтролируемое движение жидкого топлива в резервуарах. Силовые воздействия на конструкцию КА со стороны жидкости, движущейся в баках под влиянием сил инерции, способны существенно влиять на траекторию и характер его полета [1].

Компенсация подобных возмущающих воздействий выполняется специальной системой ориентации и стабилизации (СОС), при работе которой расходуется топливо, запасы которого в полете строго ограничены. Поэтому эффективное и надежное управление КА при рациональном использовании топлива позволит решить сразу несколько технически сложных задач: прогнозировать возможные виды неустойчивостей при полете КА, снизить расход топлива, повысить надежность полета и управляемость КА, а также повысить экологическую безопасность космических полетов.

Постановка задачи и анализ результатов исследований

Для исследования гидродинамических процессов, происходящих в топливных резервуарах КА при различных стадиях полета, требуется создание специальных экспериментальных стендов и методик моделирования условий полета. Это позволяет в лабораторных условиях, с учетом известных и специальных критериев подобия, изучить

особенности движения жидкого топлива и разработать эффективные методы компенсации действий указанных дестабилизирующих факторов.

Для обеспечения рациональной компоновки двигательной установки КА в конструкциях широко применяют сферическую форму резервуара. Сфера и ее модификации (сфероид, чечевица), схематически представленные на рис. 1, позволяют максимально эффективно использовать пространство внутри корпуса КА.

На рис. 2, а приведены результаты измерения окружной компоненты вектора скорости инерционного течения жидкости в модельном сферическом резервуаре диаметром 0,3 метра, где показан экспоненциальный характер затухания скорости во времени переходного процесса, который можно аппроксимировать выражением

$$u = A \cdot e^{-Bt},$$

где коэффициенты пропорциональности А и В изменяются соответственно в пределах $A = 0,0196 - 0,0473$, $B = 0,0173 - 0,0454$.

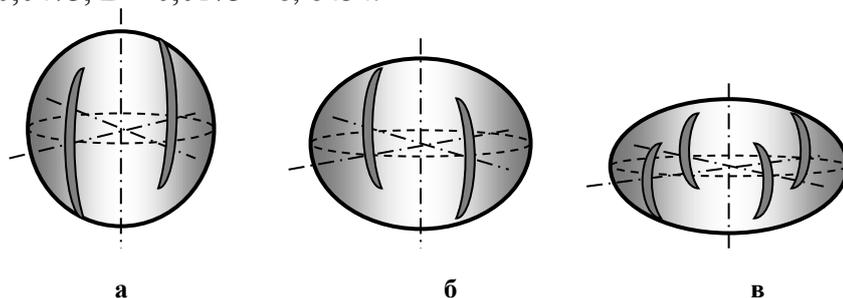


Рис.1 – Варианты исполнения топливных баков КА: а – сфероидальный, б – сферический, в – чечевицеобразный

На рис.2, б представлены профили скорости в зависимости от расстояния до оси вращения модельного бака. Экстремумы кривых при $R = 0,12 - 0,14$ м свидетельствуют о существовании определенной границы взаимодействия пристеночного заторможенного течения, где достаточно сильно выражено влияние вязкости жидкости $R = 0,13 - 0,15$ м, а также квазитвердого течения в области $R = 0 - 0,13$ м, где доминируют инерционные свойства течения.

$$Ro = a_0 + a_1 \cdot R + a_2 \cdot R^2 + a_3 \cdot R^3 + a_4 \cdot R^4,$$

где a_i – коэффициенты пропорциональности, изменяемые в пределах $a_0 = 0,0002...0,0004$, $a_1 = 0,111...0,185$, $a_2 = -3,3...4,97$, $a_3 = 47,7...66,1$, $a_4 = -199...268$. В данном случае, оценивая весовой вклад членов уравнения, величиной a_0 можно пренебречь.

Определение интервала сходимости степенного ряда сводится к применению признака Лейбница для знакопеременных полиномов, который предусматривает уменьшение частичных сумм с возрастанием степени полинома. В данном случае эти величины увеличиваются, что свидетельствует об ограниченности интервала сходимости.

С возрастанием времени переходного процесса полиномиальная оценка эпюр окружной скорости несколько упрощается и сводится к уравнениям третьего и далее – второго порядка

$$Ro = 0,0002 - 0,01 \cdot R + 0,926 \cdot R^2 - 5,49 \cdot R^3$$

и

$$Ro = -0,0004 + 0,042 \cdot R - 0,254 \cdot R^2,$$

причем свободными членами $a_0 = 0,0002$ и $0,0004$ также можно пренебречь из-за их малости. Уменьшение порядка уравнений можно объяснить существенным влиянием вязкой диссипации, которая при больших значениях времени процесса распространяется на преобладающую часть пространства сферического течения, где уже формируются классические ламинарные профили скорости.

Уравнения Навье-Стокса для вращающегося течения можно представить в векторной форме

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

где локальные и конвективные ускорения в левой части уравнения уравниваются слагаемыми в правой части - $\Omega \times (\Omega \times r)$ - центробежными силами инерции, $2\Omega \times u_R$ - силами Кориолиса, присутствующими во вращающихся течениях, $\frac{1}{\rho} \nabla p$ - радиальным градиентом давления, $\nu \nabla^2 u$ - силами вязкого трения.

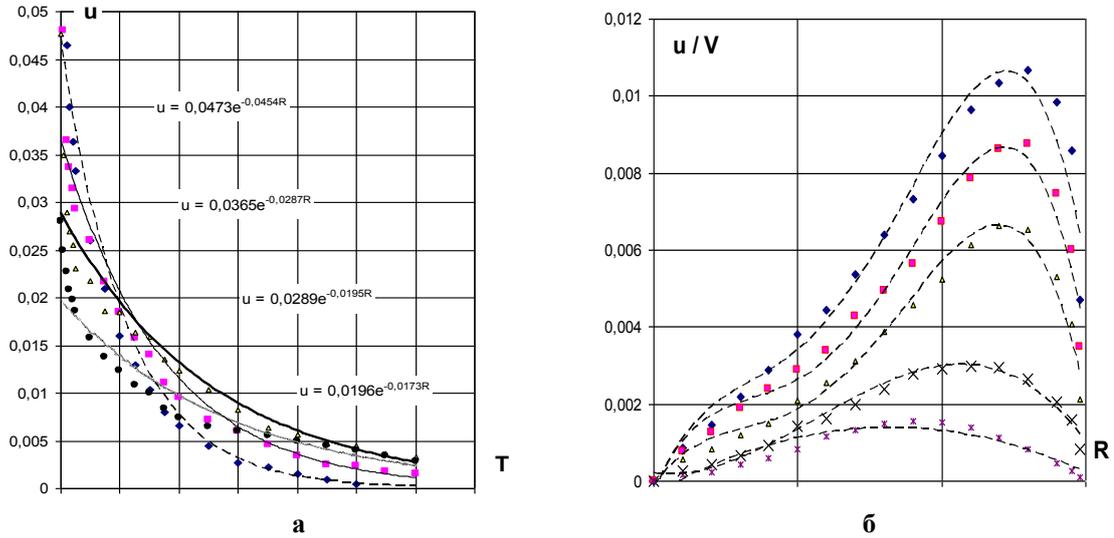


Рис.2 – Результаты измерений окружной компоненты вектора скорости:

- а) в зависимости от времени переходного процесса при различных расстояниях до оси вращения;
- б) профили скорости в экваториальной плоскости сферы при различных значениях времени затухания

Весовой вклад членов уравнения, характеризующих вращательное движение, определяется безразмерными комплексами

Числом Россби $Ro = \frac{F_{инерц}}{F_{кориолис}} = \frac{|u \nabla u|}{2|\Omega \times u|} = \frac{u}{2\Omega R \sin \theta};$

Числом Экмана $\frac{1}{Re} = Ek = \frac{F_{вязкости}}{F_{кориолис}} = \frac{|\nu \nabla^2 u|}{2|\Omega \times u|} = \frac{\nu}{\Omega R^2 \sin \theta}.$

Согласно известным выражениям силы вязкого трения жидкости о стенки пропорциональны $F_{вязкости} \approx \frac{\rho \nu u R^2}{\delta},$

где δ – толщина пограничного слоя (в нашем случае - пристеночного заторможенного течения).

Согласно теоретическим гипотезам Х.Гринспена [2], меридиональные течения в замкнутых объемах могут составлять не только одно-циркуляционные структуры, но и много-циркуляционные. Подобные особенности вторичных течений, характерные структуры которых представлены на рис. 3, были обнаружены экспериментально с помощью системы прецизионных термоанемометрических преобразователей со специальными насадками на чувствительных элементах датчиков.

Причем, возрастание начальных чисел Рейнольдса ($Re = 1600 - 2140$) приводило к дроблению циркуляций – от одной до двух, далее при $Re = 2730 - 3840$ - от трех до четырех,

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.

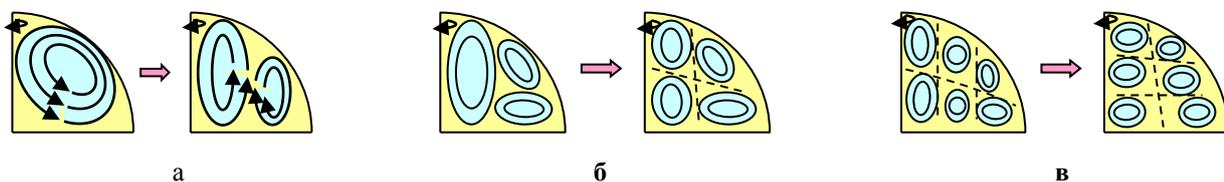


Рис. 3 – Эволюция меридиональных циркуляций в сферическом баке при инерционном вращении жидкости при различных числах Рейнольдса:

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 навколосемній орбіті. Подібні