

7. Izzard C.F., Bradley I.N. Field Verification of Model Tests on Flow Through Highway Bridges and Culverts, -“Proc. Seventh Hydraulic Conference University of Iowa”, 1957.
8. Shen H.W., Schneider V.R. Karaki S. Local scour around bridge piers. Proc. of the ASCE, Journal of the Hydraulics Division, 1969, Nov., HY 6, pp 1919-1940.

УДК 629.74 : 532.53

В.А.КОВАЛЕВ, канд. техн. наук.

ПОЛИНОМИАЛЬНАЯ АППРОКСИМАЦИЯ ПОЛЕЙ СКОРОСТИ ТЕЧЕНИЙ В ОГРАНИЧЕННЫХ ОБЪЕМАХ

Приведен анализ результатов экспериментальных исследований поведения жидкости в ограниченных объемах при разворотах космического аппарата на орбите Земли. Полученные профили скоростей жидкости в баках аппроксимируются степенными рядами, которые в сочетании с критериальными оценками адекватно представляют картину инерционного течения топлива в баках.

Наведений аналіз результатів експериментальних досліджень поведінки рідини в обмежених об'ємах при розворотах космічного апарата на орбіті Землі. Отримані профілі швидкостей рідини у баках апроксимуються ступеневими рядами, які у сполученні з критериальними оцінками адекватно представляють картину інерційного руху палива у баках.

The results of experimental investigations of liquid flows in spacecraft tanks during its orbital motions are presented. The flow velocity profiles are approximated by power series that in combination with similarity criteria provide the adequate picture of inertial fuel flows in spacecraft tanks.

Создание объектов ракетной и космической техники включает в себя разработку многочисленных узлов и агрегатов, взаимодействующих между собой и обеспечивающих работоспособность и высокую надежность работы объекта в целом. Одной из ключевых систем космического аппарата (КА) является объединенная двигательная установка (ОДУ), включающая в себя реактивные двигатели с соответствующей запорно-регулирующей аппаратурой и топливные баки с компонентами жидкого топлива и окислителя.

При движении КА на различных участках полета на жидкие компоненты топлива действуют внешние силы, обуславливая случайные и неконтролируемые движения жидкости в топливных баках [1,2]. В свою очередь, движущаяся жидкость затем воздействует на стенки баков и внутри-баковые конструкции и может вызвать отклонения КА от штатной траектории полета и нормального режима работы двигателей. Для компенсации таких инерционных воздействий на борту КА и обеспечения стабильности и надежности управления объектом периодически включается система ориентации и стабилизации (СОС) КА, работа которой требует дополнительного расхода топлива, запасы которого на борту

трудновосполнимы. Поэтому задача эффективного управления объектом и снижения затрат топлива представляется весьма актуальной как с точки зрения продолжительности и надежности полета, так и экологии околоземного пространства.

Для повышения эффективности управления КА с учетом влияния жидкого топлива в натуральных условиях требуется создание комплекса экспериментальных стендов и методов моделирования исследуемых внутри-баковых процессов, проведения большого объема экспериментальных и аналитических исследований с учетом известных и специальных критериев подобия. Это позволит распространить полученные при моделировании в лаборатории результаты на большинство типоразмеров объектов и установить величины и направления силовых воздействий со стороны жидкости на конструкции КА. Данные по силовым воздействиям и круговым моментам вводятся в бортовой вычислительный комплекс, что позволяет более рационально построить работу СОС и повысить степень безопасности полета и надежности управления КА, а также сэкономить значительное количество топлива.

Постановка задачи и методика проведения исследований

Для корректного моделирования внутри-баковых гидродинамических процессов на кафедре прикладной гидроаэромеханики и механотроники Национального Технического университета Украины «КПИ» создан комплекс экспериментальных стендов [4, 5], позволяющий максимально приблизить лабораторные условия к натурным за счет применения основных критериев геометрического и гидродинамического подобия.

Исследовались переходные инерционные течения несжимаемой жидкости в баках от твердотельного вращения с оболочкой до полного покоя жидкости. Для этого методиками моделирования предусматривался предварительный разгон сферической емкости с жидкостью до заданной угловой скорости вращения оболочки, а затем резкая остановка емкости с одновременным измерением параметров скорости и круговых моментов вязкого трения жидкости о стенки сосуда. Результаты многоточечных измерений позволили построить нестационарные трехмерные поля скоростей и круговых моментов в сферическом, цилиндрическом и тороидальном сосудах [4, 5].

Критериальные оценки результатов измерений сделаны с помощью специальных безразмерных комплексов – центробежных и мгновенных чисел Рейнольдса (Re_0 и Re_i), числа Россби (Ro), инерционных и вязких чисел Струхала (Sh_Ω и Sh_v), а силовые воздействия - с помощью чисел Ньютона Ne и Эйлера Eu [5]. Полученные обобщенные зависимости позволили получить достаточно полную картину инерционного осесимметричного течения.

Анализ и аппроксимация результатов измерений

Как отмечалось в предыдущих работах [4, 5], построенные по результатам измерений эпюры компонент вектора скорости течения выражают нелинейное распределение окружной скорости по радиусу сосуда (рис.1). В экваториальной области сферического сосуда ($\theta = \pi / 2$) эпюра окружной скорости имеет несколько характерных зон, отражающих специфику осесимметричного инерционного течения в ограниченном объеме. Это почти твердотельное распределение в приосевой области $R = 0 - 0,35$, обозначенное зоной 1 (R – безразмерное расстояние от оси вращения $R = r/R_0$). Седлообразные участки кривых вплоть до максимального значения скорости наблюдаются в диапазоне $R = 0,35 - 0,82$, названном зоной 2. А область с сильным влиянием пристеночного заторможенного течения, которое формируется за счет вязкой диффузии на стенках сосуда ($R = 0,82 - 1,0$), зоной 3.

В начальные моменты переходного процесса ($T \leq 0,42$), когда велики инерционные свойства течения и малы его вязкие параметры, нелинейности распределения окружной компоненты скорости выражены более заметно. Как видно из рисунка, между зонами 2 и 3 существует пиковое значение скорости ($T = 0,42, R = 0,82$), которое характеризует предел распространения вязких свойств течения и соответственно сильно нелинейную область течения. С точки зрения структуры вторичных течений в меридиональных плоскостях именно в этой точке может находиться центр циркуляции, обусловленный неравновесием центробежных сил инерции и радиального градиента давления. С возрастанием времени процесса и уменьшением градиентов окружной скорости интенсивность циркуляции увеличивается, оказывая влияние на эпюру скорости u/V .

Пиковая область кривой, представляющая наибольший интерес с точки зрения динамики развития пристеночной области течения, формирует параболический участок, который сам по себе можно аппроксимировать полиномом второй степени. Однако, с учетом смежных с ним участков кривой, где с одной стороны имеет место пограничный слой на вогнутых стенках, а с другой - почти линейная зависимость квазитвердого ядра течения, порядок аппроксимации значительно возрастает. Поэтому аналитическое описание резких нелинейностей, например, с помощью степенных рядов, сопряжено с определенными трудностями при определении степени полинома.

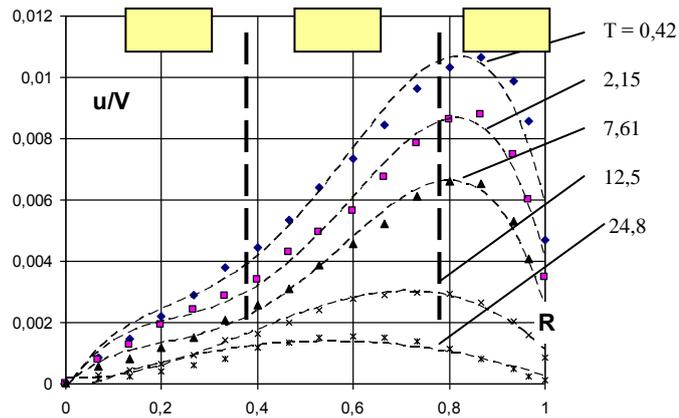


Рис.1 Этюры окружной компоненты скорости u в экваториальной плоскости сферического сосуда при различных значениях времени процесса затухания при $Re_0 = 2350$

Для анализа профилей скорости, приведенных на рис. 1, приняты степенные ряды вида

$$S = \sum_{i=0}^n a_i X^i \quad (1)$$

Полиномиальная форма представления экспериментальных результатов достаточно сложна для определения интервала сходимости ряда и достоверности аппроксимации, однако она наиболее точно описывает нелинейные особенности переходных гидродинамических процессов. В качестве искомой функции можно представить безразмерную окружную компоненту скорости u , полученную в результате прямых термоанемометрических измерений в модельных сферических сосудах [3]

$$u/V = u_i / \Omega_0 \cdot R_0 \quad (2)$$

Эту функцию можно представить центробежным числом Россби, а в качестве переменной ряда принять безразмерный радиус сосуда R_0 . Например, кривую при $T = 0,42$ можно представить полиномом четвертой степени

$$R_0 = u / \Omega_0 \cdot R_0 = a_0 + a_1 \cdot R + a_2 \cdot R^2 + a_3 \cdot R^3 + a_4 \cdot R^4, \quad (3)$$

где a_i – коэффициенты полинома, равные соответственно $a_0 = -0,0003$, $a_1 = 0,1819$, $a_2 = -4,7235$, $a_3 = 64,617$ и $a_4 = -263$.

Определение интервала сходимости по признаку Лейбница для знакопеременных степенных рядов позволило установить радиус сходимости, а также оценить с помощью стандартных компьютерных программ достоверность аппроксимации кривых, которая составляла не менее 0,96.

Весовая оценка коэффициентов полиномов позволяет пренебречь весьма малыми величинами, например, a_0 и a_1 . В результате получим

$$R_0 = R^2(a_2 + a_3 \cdot R + a_4 \cdot R^2). \quad (4)$$

С возрастанием времени процесса затухания скорости ($T = 7,6$), уменьшением влияния инерционных свойств потока и увеличением влияния вязких характеристик вклад коэффициентов в полиноме изменяется. Например, a_4 становится равным $-199,04$, $a_3 = 47,6$, $a_4 = -3,3$, а вклад величин a_0 и a_1 становится еще меньшим, поэтому мы ими также пренебрегаем.

Дальнейшее уменьшение окружной скорости ($T = 12,5$) и возрастание влияния вязкой диффузии за счет возрастания толщины пристеночного заторможенного течения приводит к сглаживанию нелинейностей эпюры скорости и снижает весовые характеристики коэффициентов при больших степенях полинома.

Это позволяет снизить степень полинома и описать кривую, например, полиномом третьей степени

$$R_0 = a_0 + a_1 \cdot R + a_2 \cdot R^2 + a_3 \cdot R^3 \quad (5)$$

где $a_3 = -5,489$, $a_2 = 0,926$, $a_1 = 0,0099$ и $a_0 = 0,0002$, пренебрегая при этом весьма малыми коэффициентами a_1 и a_0 , получим следующее выражение:

$$R_0 = R^2(0,926 - 5,489 \cdot R) \quad (6)$$

При больших значениях времени затухания скорости, близких к максимальным величинам (порядка 350 - 420 секунд), уравнение зависимости безразмерной скорости или приведенного числа Россби будет выглядеть как полином второго порядка

$$R_0 = -0,0004 + 0,042 \cdot R - 0,254 \cdot R^2 \quad (7)$$

или пренебрегая свободным членом уравнения, получим

$$R_0 = 0,254 \cdot R (0,165 - R) \quad (8)$$

Таким образом, с помощью степенных рядов можно аппроксимировать достаточно сложные кривые распределения скорости, проверить их физический смысл и степень достоверности. При этом погрешность аппроксимации может составлять от 2 до 6 %, что свидетельствует о достаточно высокой достоверности полученных результатов. Введение указанных характеристик в уравнения движения жидкости позволяют построить эмпирическую базу

данных по полям скорости во всем диапазоне изменения критериальных зависимостей.

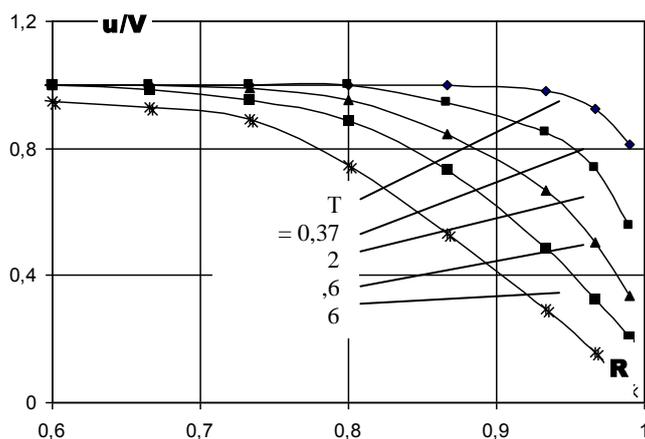


Рис.2 Развитие пристеночного заторможенного течения в сферическом сосуде при начальном числе Рейнольдса $Re_0 = 3560$ при различных значениях времени затухания

При построении трехмерного поля скорости инерционного течения важную роль играет характер развития пристеночного заторможенного течения, в области которого достаточно существенны силы вязкого трения жидкости о стенки сосуда и между соседними слоями. Именно пристеночная область служит средством торможения инерционного течения жидкости и транспортирует суммарный момент инерции движущейся жидкости стенкам сосуда, а значит, всей конструкции КА.

При экспериментальном исследовании полей окружной скорости в пристеночной области сферического сосуда ($\delta = 0,75 - 0,98 \cdot R_0$) важным представлялось проследить характер затухания в сравнении со скоростью в приосевой области квазитвердого вращения жидкости. На рис.2 приведены результаты измерений окружной скорости при различных значениях времени процесса затухания в пристеночной области. Например, кривую при $T = 0,37$, когда формирование пристеночного течения только начинается и вязкая диффузия имеет место в весьма тонком пограничном слое на вогнутой стенке, с достаточно высокой (до 97 %) достоверностью можно аппроксимировать полиномом шестой степени

$$R_0 = b_0 + b_1 \cdot R + b_2 \cdot R^2 + b_3 \cdot R^3 + b_4 \cdot R^4 + b_5 \cdot R^5 + b_6 \cdot R^6, \quad (9)$$

где коэффициенты соответственно равны $b_0 = 0,996$, $b_1 = 3,82$, $b_2 = - 357,8$, $b_3 = 1,18 \cdot 10^4$, $b_4 = - 1,74 \cdot 10^4$, $b_5 = 10^6$, $b_6 = - 3 \cdot 10^6$.

Весовая оценка членов уравнения позволяет пренебречь только двумя первыми слагаемыми, однако, уже при $T = 6,5$ кривую можно характеризовать полиномом 4-й степени

$$Ro = - 1,511 + 127,1 \cdot R - 2319,2 \cdot R^2 + 1,81 \cdot 10^4 R^3 - 5,14 \cdot 10^4 R^4. (10)$$

а при $T = 14,7$ – полином 3-й степени

$$Ro = 2,458 - 57,36 \cdot R + 7,18 \cdot 10^2 R^2 - 2,86 \cdot 10^2 R^3. (11)$$

При больших значениях времени затухания $T > 24,1$, вязкая диффузия становится определяющей и эпюра окружной скорости достаточно корректно описывается квадратным уравнением

$$Ro = - 1,08 + 46,62 \cdot R - 263,4 \cdot R^2 (12)$$

или фактически

$$Ro = - 263,4 \cdot R \cdot (R - 0,18). (13)$$

Таким образом, влияние вязкости жидкости в пристеночной области сосуда способствует сглаживанию сильных нелинейностей кривых эпюр скорости и несколько упрощает аналитическое описание экспериментальных результатов. Как отмечалось в предыдущих работах [4, 5], природа затухания окружной скорости вращающегося течения носит экспоненциальный характер и в большой степени зависит от того, насколько контрольная точка близка к стенкам емкости. Это также свидетельствует о существенно большем вкладе сил вязкого трения на стенках сосуда в распределение скорости во всем пространстве течения.

Выводы

Аппроксимация экспериментальных зависимостей экспоненциальными или степенными рядами позволяет более полно представить природу сложных трехмерных течений в ограниченных объемах. В частности, с помощью такого анализа можно установить области возникновения существенных нелинейностей и характер их развития во времени переходного процесса.

Преобразование данных по скоростям в силовые зависимости позволит определить градиенты и направления воздействия инерционных течений на стенки резервуаров и внутри-баковые конструкции стабилизаторов. Это, в свою очередь, обеспечит достаточно корректную картину распределения круговых моментов воздействия со стороны жидкости на конструкцию КА в целом, параметры которой можно ввести в бортовую ЭВМ.

Наиболее существенным для определения параметров трехмерных нестационарных течений в ограниченных объемах представляется возможность создания на базе полученных экспериментальных результатов полуэмпирических зависимостей компонент скорости в ограниченных объемах при различных значениях времени течения. Это существенно дополнит

результаты исследований осесимметричных потоков и будет способствовать развитию теории замкнутых течений.

Перелік посилань

1. Беляев Н.М., Уваров Е.И. Пневмо-гидравлические системы космических аппаратов. Расчет и проектирование.- М.: Высшая школа, 1988.- 322 с.
2. Богомаз Г.И., Сирота С.А. Колебания жидкости в баках. Методы и результаты экспериментальных исследований.- Днепропетровск: НАН Украины, Ин-т техн. механики.- 2002.- 306 с.
3. Зельдович Я.Б., Мышкис А.Д. Элементы прикладной математики, - М.: Наука, 1967. - 646 с.
4. Ковалев В.А. Экспериментальный стенд для моделирования гидродинамического воздействия жидкости в ограниченных объемах //«Промислова гідроліка і пневматика», Всеукр. науч.-техн. журнал, Винница, 2005, вып.4 (10), стр.68-71.
5. Ковалев В.А. Физическая модель нестационарного инерционного потока жидкости в сферическом сосуде // Вестник Нац. Техн. Ун-та Украины «КПИ», Машиностроение, вып.46, 2005, стр. 119-123.

УДК 628 162.94

А.В.МІШИН, док.техн.наук, **Е.А.ГОЛОВАШ**, **Ю.М.МАСЛАЧКОВ**,
канд.п.наук.

МИНУЛЕ І МАЙБТНЄ ОСТРОВА ТУЗЛА

Розглянута проблема захисту від руйнування морськими хвилями острова тузла, який є штучно відділеним від головної частини кавказької коси Тузла.

Рассмотрена проблема защиты от разрушения морскими волнами острова Тузла, который является искусственно отделенным от головной части кавказской косы Тузла.

The problem of protection from destruction by sea waves of the island of Tuzla, which is artificially separated from the head of the Caucasian Tuzla Spit.

В даний час проходять процеси інтенсивного розмиву острова Тузла, в результаті чого скорочується його площа. Природні процеси, які впливають на зміну обрисів морських берегів на теперішній час досліджені і описані [1], що дозволяє прогнозувати ці зміни, використовуючи дані натурних спостережень, які проводились протягом тривалого періоду, а також історичні відомості щодо конкретної ділянки берега.

Ділянка, що розглядається в статті, розташована на північному сході Чорного моря, для якого є геологічний літопис і карти змін берегової лінії з часів Сарматського моря і дотепер.