

Ковалев В.А., д.т.н., профессор
КПИ им. Игоря Сикорского, г.Киев, Украина (vaskov@ukr.net)

КРУГОВЫЕ МОМЕНТЫ ВОЗДЕЙСТВИЯ ЖИДКОСТИ НА СТЕНКИ ТОРОИДАЛЬНОГО РЕЗЕРВУАРА

***Аннотация.** Приведены результаты экспериментальных исследований структуры инерционных течений вязкой несжимаемой жидкости при ее вращении в тороидальных резервуарах, имеющие приложение к динамике жидкого топлива на борту космического аппарата. Представлены зависимости структуры пристеночного течения, а также графические выражения для круговых моментов вязкого трения жидкости о стенки сосуда. Приводятся эмпирические зависимости для силовых воздействий со стороны подвижной жидкости и практические рекомендации для использования результатов экспериментальных измерений.*

***Ключевые слова:** инерционные течения, вязкая несжимаемая жидкость, тороидальный резервуар, затухание вектора скорости, круговые моменты трения жидкости*

Введение. При движении космического аппарата (КА) на орбите планеты программой полета предусматриваются различные ориентационные, сепарационные и другие штатные маневры. Они могут включать в себя ускорения, торможения, угловые перемещения и вращение с определенной угловой скоростью вокруг одной или нескольких осей. При этом жидкое топливо, содержащееся в резервуарах КА и составляющее до 80% массы всего объекта, может двигаться под действием сил инерции, вызывая неустойчивости и даже аварийные ситуации на борту.

Для выравнивания траектории и восстановления штатного режима движения КА системой автоматической стабилизации производятся специальные развороты объекта с обеспечением противовращения жидкости, призванные компенсировать возмущения со стороны жидкости. Это приводит к дополнительному расходу рабочего тела и необходимости дальнейшей дозаправки орбитального модуля. Поэтому организация рационального управления объектом с учетом инерционных воздействий со стороны жидкости и экономия рабочего тела на орбите представляется весьма актуальной научной и технической проблемой.

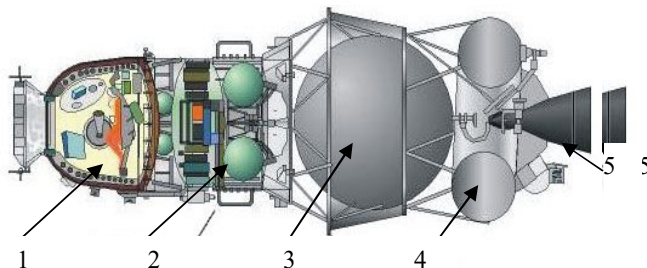


Рис. 1 - Структура орбитального модуля 7К-Л1 [2] и пример компоновки топливной системы: 1 – жилой отсек; 2 – тороидальный бак горючего; 3 – сферический бак горючего разгонного блока; 4 – тороидальный бак окислителя разгонного блока; 5 – маршевый двигатель объекта

Исследования поведения тела, содержащего емкость с жидкостью, восходят к работам Неймана, Стокса, Жуковского и в XIX веке представляли чисто теоретический интерес [1]. Однако, с развитием транспортной техники, перевозок больших объемов жидкостей и совершенствованием объектов ракетной и космической техники подобные задачи приобрели еще большую актуальность. Предлагаемые в настоящей статье результаты экспериментальных исследований относятся к изучению поведения вязкой

жидкости в сосудах тороидальной геометрии и имеют приложение к задачам динамики КА.

Одним из распространенных типов топливных резервуаров на борту КА являются тороидальные [2], поскольку благодаря их геометрии можно эффективно использовать пространство внутри корпуса объекта, а кроме того они удобны для размещения запорно-регулирующей аппаратуры (рис.1). Несмотря на то, что они могут содержать сравнительно небольшие количества жидкого топлива (до 1,5 тонн), исследования поведения жидкости в резервуарах подобной геометрии представляются достаточно актуальными. Отсутствие в настоящее время каких-либо данных о течениях вязкой жидкости в тороидальных сосудах позволяет надеяться, что полученные в рамках настоящей работы результаты измерений существенно дополнят картину течений.

Постановка задачи исследований, измерительная и регистрирующая аппаратура

В лаборатории гидродинамики кафедры прикладной гидроаэромеханики и механотроники Национального технического университета Украины «Киевский политехнический институт» выполнен комплекс экспериментальных и теоретических исследований по моделированию поведения жидкости в ограниченных объемах различной геометрии, имеющих место в реальных условиях полета КА. Экспериментальная база исследований включала в себя оригинальные конструкции стендов, защищенных авторскими свидетельствами на изобретения, а также специальные методики измерения, регистрации и анализа гидродинамических параметров движущейся жидкости.

Методика проведения экспериментальных измерений предусматривала предварительный разгон тора, целиком заполненного модельной жидкостью, например, водопроводной водой и расположенного соосно с поворотным столом стенда, до заданной угловой скорости и затем резкое торможение оболочки с одновременным включением датчиков скорости. Датчики скорости выполнены на базе термоанемометрических преобразователей, подключенных в полумостовую схему вторичной регистрирующей аппаратуры [3, 4].

Результаты экспериментальных измерений полей азимутальной (окружной) скорости систематизировались по расстояниям контрольных точек до оси вращения тора и по времени затухания скорости, позволяя таким образом построить профили скорости и зависимости их изменения во времени течения. Для распространения указанных результатов моделирования течений на реальные условия и объекты использовали критериальные параметры в виде чисел Рейнольдса, Струхала и Россби, построенные в соответствии с особенностями геометрии сосуда и инерционного течения [5, 6].

Анализ результатов исследований и построение эмпирических характеристик инерционных течений

При выполнении маневров КА, например, ориентационных или сепарационных разворотов, жидкое топливо в торе может двигаться по замкнутой круговой траектории как вдоль оси рукава, так и по спирали вокруг оси рукава, инициируя таким образом циркуляционное течение в меридиональных плоскостях.

Согласно предположениям о замкнутых течениях жидкости формирование инерционных течений в торе, благодаря его геометрии, может существенно отличаться от осесимметричных течений сосудах другой геометрии, например, в сфере или цилиндре. Основным отличием подобных течений является смещение их оси симметрии за пределы «рукава», поэтому центробежные силы инерции, действующие на частицы жидкости, превышают силы Кориолиса, что в результате может привести к перераспределению компонент вектора скорости и силовых воздействий течений на конструкцию КА.

Круговой момент вязкого трения $M_{кр}$ равен произведению суммарной силы вязкого трения жидкости о стенки $F_{вяз}$ на приведенное расстояние от оси вращения тора R . Из известных аналитических зависимостей для определения силовых параметров [7] можно представить

$$F_{вяз} \approx \frac{\rho \cdot v \cdot u_i \cdot R^2}{\delta_1 + \delta_2} = \frac{\rho \cdot v \cdot \Omega_0 R_{np}^3}{\delta_1 + \delta_2},$$

(1)

где δ_1 и δ_2 – соответственно толщины пристеночных течений около внутренней и внешней стенок тора, которые определялись с помощью термоанемометрических измерений.

Приведенный радиус R_{np} определяется отношением суммарной площади внутренней поверхности тора $S_{тор}$ к радиусу кривизны средней оси рукава тора $R_{ср}$

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

и таким образом величина кругового момента вязкого трения будет составлять

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

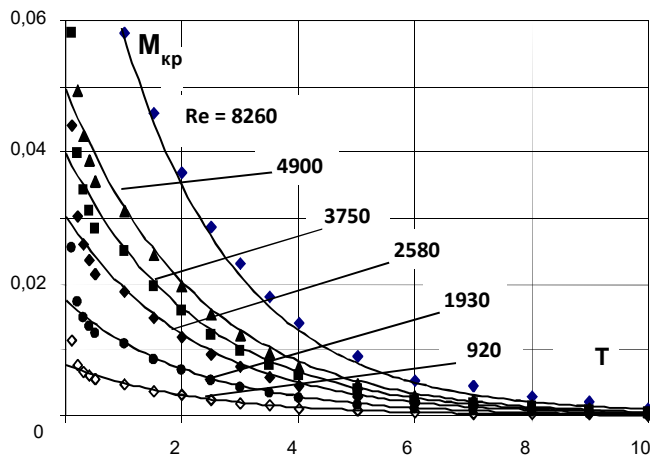


Рис. 2 - Характер изменения кругового момента вязкого трения от безразмерного времени T при различных Re

Представленные результаты позволяют установить логарифмическую зависимость параметра δ/R_0 от времени затухания окружной скорости. Из рисунка 2 видна зависимость толщины δ от времени затухания

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

которую можно ввести соответственно в выражение (3) для кругового момента. Причем с возрастанием времени затухания инерционного течения кривые толщины $\delta=f(T)$ асимптотически стремятся к симметричному ламинарному профилю скорости, с максимумом, расположенным на продольной оси рукава.

Подставляя численные значения параметров в уравнение (4), и предполагая, что приведенный радиус R_{np} есть величина постоянная, не зависящая от критериальных оценок, например, Рейнольдса или Россби, получим эмпирическую зависимость кругового момента $M_{кр}$ от толщины δ при различных начальных угловых скоростях тора Ω_0

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

С другой стороны, построение зависимости $M_{кр}$ от толщины δ пристенного течения означает, что с увеличением массы жидкости, движущейся с малой скоростью, суммарная величина $M_{кр}$ должна уменьшаться. При этом уменьшение общего объема квазитвердой

области течения, где даже при больших значениях времени T велики силы инерции течения, также снижает влияние движущейся массы жидкости на величину кругового момента $M_{кр}$.

Для рассматриваемого нами течения, то есть, модельной жидкости – воды, вязкость которой составляет $\nu=1 \cdot 10^{-6}$ м²/с, плотность $\rho=988$ кг/м³, начальная угловая скорость $\Omega_0=0,528$ 1/с, и приведенный радиус составляет

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

где $S_{вн}=4 \cdot \pi^2(R_1 - R_2)^2$ – площадь внутренней поверхности тора, $R_{cp}=0,10$ м – расстояние до оси вращения тора.

Экспериментальные исследования характера затухания кругового момента $M_{кр}$ во времени переходного течения в торе позволили построить графическую зависимость, приведенную на рис.2

$$M_{кр} = A \cdot \delta^{-BT} \quad (7)$$

где коэффициент A уменьшается в пределах 1,35...0,17, а коэффициент $B= - 0,36$ остается постоянным в течение всего рассматриваемого времени затухания. Поскольку, согласно результатам экспериментальных измерений, толщина пристенного заторможенного течения является функцией безразмерного времени T , то фактически следует проанализировать характер изменения $M_{кр}$ от времени.

Выводы. Полученные результаты экспериментальных исследований и эмпирические зависимости круговых моментов вязкого трения жидкости о стенки сосуда тороидальной геометрии позволили впервые установить особенности поведения инерционного течения вязкой несжимаемой жидкости в пределах «рукава», заключающиеся в формировании слабой циркуляции в меридиональной плоскости, почти не влияющей на распределение окружной скорости. Это, в свою очередь, свидетельствует о преобладающем влиянии вязкого трения вдоль оси «рукава» и соответствующей ориентации круговых моментов вязкого трения.

Полученную таким образом базу данных по силовым влияниям жидкости на конструкцию объекта можно ввести в бортовой компьютер для оптимизации работы системы ориентации и стабилизации КА. Это позволит прогнозировать возможные возмущения со стороны жидкого топлива, повысить эффективность компенсации этих возмущений, повысить надежность управления объектом и увеличить продолжительность полета космического аппарата. В перспективе предполагается проведение численного моделирования осесимметричных течений вязкой несжимаемой жидкости в тороидальном резервуаре с применением радиальных и кольцевых жестких перегородок, и их влияния на внутренние конструкции стабилизирующих устройств.

Литература

1. Жуковский, Н.Е. (1949) *Избранные сочинения*. Гидродинамика. - М.: Гостехиздат. - том 2. - 656 с.
2. Рабинович, Б.И. (2006) *Неустойчивость жидкостных ракет и космических аппаратов*. Борьба с ней // Полет. - № 10. - С.25-33.
3. Ковальов, В.А. (2003) «Гідродинамічна картина інерційного потоку нестисливої рідини у торовому резервуарі». - Вісник Сумського державного університету, серія «Технічні науки». – № 12 (58) . – С.45-49.
4. Ковальов, В.А. (2004) «Гідродинамічний опір внутрішньо-бакових пристроїв інерційному потокові рідини у торовому резервуарі» - Вісник Черкаського державного технічного університету. – 2004. – вип.4. – С.167-171.
5. Беляев, Ю.Н., Яворская, И.М. (1983) *Течения вязкой жидкости во вращающихся сферических слоях и их устойчивость*. - Итоги науки и техники, Механика жидкости и газа, ВИНТИ. - М. – 80 с.
6. Гринспен, Х. (1975) *Теория вращающихся жидкостей*. - М.: Гидрометеиздат. - 304 с.
7. Smith, S. (1981) «The development of vertical layers in a rotating fluid» - SIAM, Journal of Applied Mathematics. - vol.40, № 1. - p.78-89.