

УДК 532.53 : 629.784

Ковалев В.А., д.т.н., проф.

НТУУ «Киевский политехнический институт», г.Киев, Украина

СИЛОВЫЕ ВЛИЯНИЯ ИНЕРЦИОННЫХ ТЕЧЕНИЙ ВЯЗКОЙ НЕСЖИМАЕМОЙ ЖИДКОСТИ НА СТЕНКИ ТОРОИДАЛЬНОГО СОСУДА

Kovalev V.

National Technical University of Ukraine «Kiev Polytechnic Institute», Kiev, Ukraine, (vaskov@ukr.net)

POWER INFLUENCE OF INERTIAL VISCOUS FLOWS ON THE TOROIDAL RESERVOIR WALLS

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, пристеночные заторможенные течения, 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.

Учитывая, что при пассивной стадии полета с выключенной двигательной установкой КА не имеет каких-либо точек опоры, он подвержен существенному влиянию со стороны движущейся жидкости. Как показывает опыт эксплуатации подобных КА, в этих ситуациях необходимо учитывать даже незначительные на первый взгляд влияния жидкости на конструкцию объекта, поскольку они способны, например, изменить его ориентацию на Солнце, уменьшая эффективность работы солнечных батарей, затрудняя выполнение программы полета и т.д.

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.

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 дополняют картину течений.

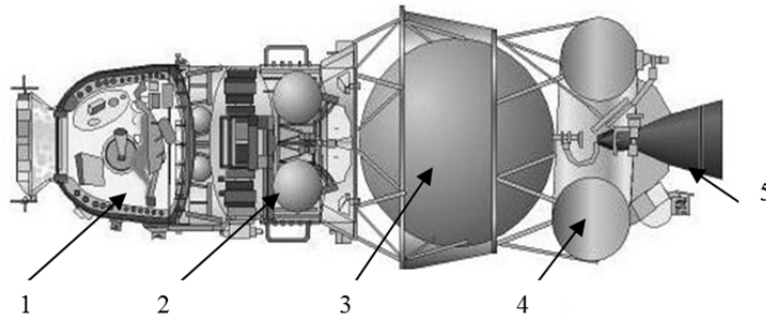


Рис. 1. Структура орбитального модуля 7К-Л1 [2] и пример компоновки топливной системы:
1 – жилой отсек; 2 – тороидальный бак горючего; 3 – сферический бак горючего разгонного блока; 4 – тороидальный бак окислителя разгонного блока; 5 – маршевый двигатель объекта

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.

Целью исследования явилось физическое моделирование замкнутых течений и определение основных гидродинамических параметров в резервуарах и силовых воздействиях на распределение круговых моментов воздействия инерционных течений на стенки.

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 электронную 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]. По этим данным можно установить эмпирические зависимости круговых моментов вязкого трения жидкости о стенки $M_{кр}$, что в свою очередь дает возможность количественно определить направление и величины силовых влияний жидкости на конструкцию объекта с жидкостью.

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.

Таким образом можно представить следующую картину течения в торе. После внезапной остановки вращения оболочки жидкость продолжает движение вдоль кольцевого рукава под действием сил инерции. Согласно условиям прилипания жидкости, на внешних и внутренних стенках тора образуются пограничные слои и пристеночные заторможенные течения, скорость жидкости в которых весьма мала. Центробежные силы инерции, действующие на частицы жидкости, направлены перпендикулярно оси вращения к периферии бака.

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

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

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_{cp}

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

и таким образом величина кругового момента вязкого трения будет составлять

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

На рис.2 представлены зависимости, толщины пристеночного течения δ от безразмерного времени затухания скорости $T = \Omega_0 t$ при различных числах Рейнольдса Re . Представленные результаты позволяют установить логарифмическую зависимость параметра δ/R_0 от времени затухания окружной скорости. Из рисунка 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

$$M_{кр} = \frac{\rho \cdot v \cdot \Omega_0 \cdot R_{np}^4}{0,15 \cdot \ln(T) + 0,083} \quad (5)$$

С другой стороны, построение зависимости $M_{кр}$ от толщины δ пристеночного 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 $M_{кр}$.

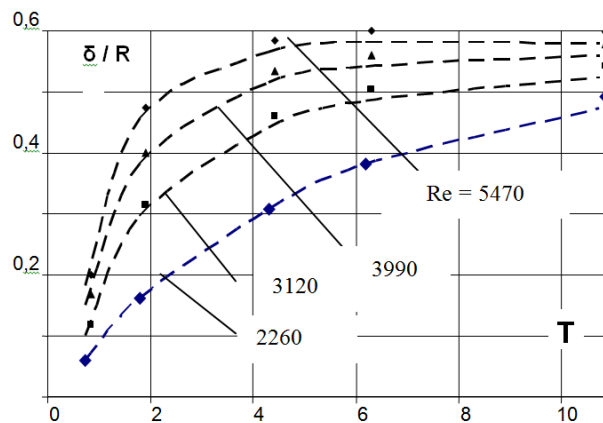


Рис. 2. Зависимость толщины пристеночного течения в торе от времени при различных числах Рейнольдса

Для рассматриваемого нами течения, то есть, модельной жидкости – воды, вязкость которой составляет $\nu = 1 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2/\text{с}$, плотность $\rho = 988 \text{ кг}/\text{м}^3$, начальная угловая скорость $\Omega_0 = 0,528 \text{ 1/с}$, 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, $R_{cp} = 0,10 \text{ м}$ – 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.3

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

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

Из экспериментальных кривых зависимости кругового момента трения от времени затухания вектора скорости инерционного течения видно, что зависимость подобна распределению окружной скорости u и носит экспоненциальный характер

$$M_{кр} = C \cdot e^{-DT} \quad (8)$$

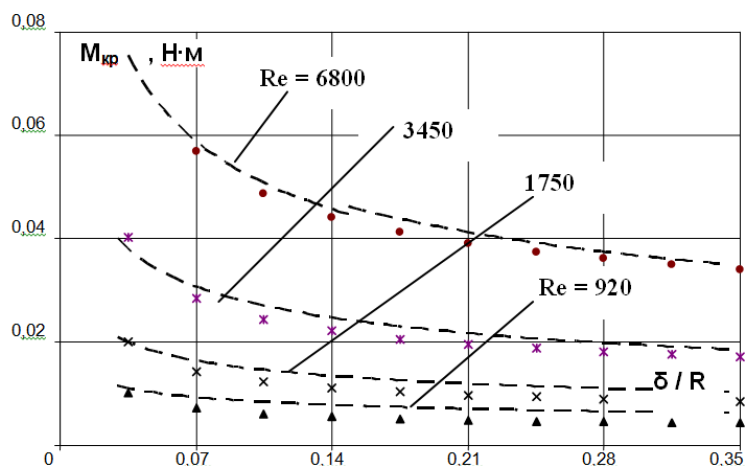


Рис. 3. Зависимость кругового момента вязкого трения жидкости $M_{кр}$ о стенки тора от толщины пристеночного течения при различных числах Рейнольдса

в диапазоне коэффициентов $C = 0,17 \dots 0,0039$, причем показатель степени также остается постоянным $D = -0,045$ при различных значениях начальной угловой скорости Ω_0 . Экспоненциальная тенденция изменения кругового момента $M_{кр}$ сохраняется как на начальной стадии затухания скорости, когда велики инерционные свойства течения, так и в основной стадии, когда возрастает влияние пристеночных слоев жидкости.

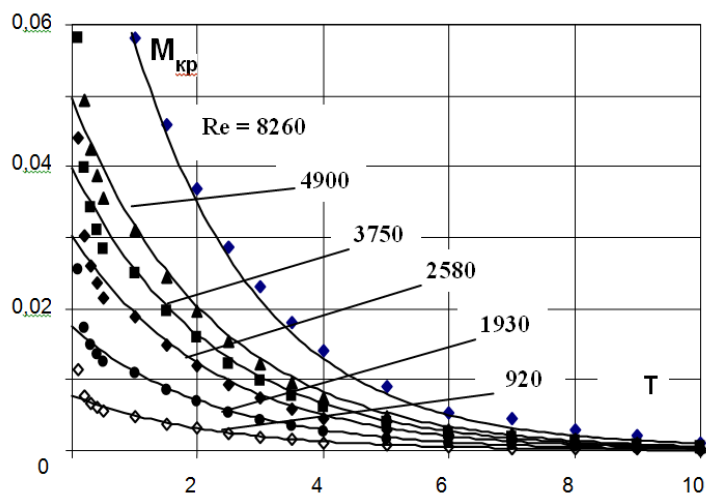


Рис. 4. Характер изменения кругового момента вязкого трения от безразмерного времени T при различных Re

Из приведенных аналитических и графических зависимостей очевидны следующие свойства осесимметричного течения. Экспоненциальная природа затухания окружной скорости течения и круговых моментов вязкого трения $M_{кр}$ привносит существенные коррективы в особенности развития силовых влияний со стороны жидкости на стенки тороидального сосуда. Учитывая геометрические особенности тора и характер движения жидкости в рукаве, затухание скорости происходит намного быстрее, чем, например, в сфере или цилиндре. Это свидетельствует о более существенном влиянии заторможенной массы течения на квазитвердую область течения, которая располагается в окрестности средней линии рукава тора. Это, в свою очередь, определяет характер изменения кругового момента от влияния вязкости жидкости на стенки сосуда.

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 силового влияния на внутренние конструкции стабилизирующих устройств.

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: інерційні течії, в'язка нестислива рідина, тороїдальний резервуар, пристінні загальмовані течії, загасання вектора швидкості, крутні моменти тертя рідини

Abstract. The experimental studies results of the inertial flow structure of a viscous incompressible fluid that rotates in the toroidal tanks with application to the liquid fuel dynamics on the spacecraft board. The dependencies of the structure of the near-wall flow, and graphical expressions for circular moments of the viscous fluid friction against the walls of the vessel are presented. The exponential curves of torque dependences during the time show the nonlinear relationship of inertial flows power influence on the toroidal reservoir walls. The presented experimental results form the base for the future inertial axisymmetric flows numerical modeling by the finite element methods. The paper provides empirical relationships for force impact of the mobile liquid and practical recommendations for the use of experimental measurements results.

Keywords: inertial flows, viscous incompressible fluid, toroidal reservoir, near wall decay flows, fluid vector decay, torque of fluid friction.

Библиографический список использованной литературы

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

References

1. Zhukovsky N.E. Izbrannye sochineniya. Hidrodinamika. Moscow: Gostekhizdat, 1949, tom 2, 656 p.
2. Rabinovich B.I. Neustoychivost zhidkostnykh raket i kosmicheskikh apparatov. Borba s ney. Polyot, 2006, No 10, p.25-33.
3. Kovalev V.A. Hidrodinamichna kartina inertsynogo potoku nestislivoyi ridini u torovomu rezervuari. Visnik Sumskogo derzhavnogo universitetu, seriya "Tekhnichni nauki", 2003, No 12 (58), p.45-49.
4. Kovalev V.A. Hidrodinamichnyy opir vnutrishnyo-bakovikh pristroyiv inertsynomu potokovi ridini u torovomy rezervuari. Visnik Cherkasskogo derzhavnogo tekhnichnogo universitetu, 2004, vip.4, p.167-171.
5. Belyayev Yu.N., Yavorskaya I.M. Tcheniya vyazkoy zhidkosti vo vrashchayushchikhsya sfericheskikh sloyakh. Itogi nauki i tekhniki, Mekhanika zhidkosti i gaza, VINITI. Moscow, 1983, 80 p.
6. Greenspan H. Teoriya vrashchayushchikhsya zhidkostey, Moscow, Gidrometeoizdat, 1975, 304 p.
7. Smith S. The development of vertical layers in a rotating fluid. SIAM, Journal of Applied Mathematics. 1981. vol.40, No1. p.78-89.