

СИЛОВЫЕ ВОЗДЕЙСТВИЯ ВНУТРЕННИХ СТАБИЛИЗИРУЮЩИХ УСТРОЙСТВ НА ИНЕРЦИОННЫЕ ТЕЧЕНИЯ ВЯЗКОЙ ЖИДКОСТИ В ОГРАНИЧЕННЫХ ОБЪЕМАХ

Kovalev V.
National Technical University of Ukraine «Kyiv Polytechnic Institute», Kyiv, Ukraine

DYNAMIC AFFECTS OF INNER STABILIZING DEVICES ON INERTIAL FLOWS OF VISCOUS INCOMPRESSIBLE FLUID IN LIMITED VESSELS

Приведены результаты экспериментальных исследований влияния внутренних перегородок на течения жидкости в топливных резервуарах космических аппаратов. Проводится анализ графических зависимостей сил вязкого трения жидкости и круговых моментов динамического воздействия перегородок на течения, даны рекомендации по рациональному использованию внутренних устройств с точки зрения габаритов, массы и эффективности воздействия на жидкость.

Ключевые слова: инерционные течения жидкости, плоские перегородки, числа Рейнольдса и Россби, круговые моменты вязкого трения жидкости о стенки резервуара.

Введение

При пассивном полете космического аппарата (КА) на околоземной орбите начинают проявляться внешние воздействия двигательной установки или штатных маневров на жидкое топливо в его баках. Жидкость способна передвигаться внутри резервуаров и благодаря вязкому трению и воздействию на внутренние конструкции оказывать существенное влияние на объект в целом, вызывая неустойчивости и даже аварийные ситуации на борту.

Для воздействия на подобные инерционные течения жидкости на стенках топливных резервуаров устанавливаются специальные конструкции в виде кольцевых и радиальных плоских перегородок, которые способны влиять на некоторую часть жидкости, обеспечивая гарантированный запуск двигательной установки КА [1]. Однако, эффективность воздействия перегородок высока только в пристеночных областях резервуаров, где собственно установлены перегородки, тогда как в остальной части сосуда течение остается неконтролируемым и прогнозировать какие-либо силовые воздействия со стороны жидкости весьма трудно.

Проектирование оптимальных по своим гидродинамическим свойствам, массе и габаритам внутренних стабилизирующих устройств (ВСУ) предусматривает экспериментальное исследование распределения скоростей и силовых воздействий жидкости на перегородки, создание на базе результатов измерений эмпирических зависимостей и разработку практических рекомендаций по прогнозированию возможных возмущений со стороны жидкости. Это, в свою очередь, позволяет организовать эффективные компенсационные мероприятия для обеспечения устойчивости и надежности движения объекта с жидкостью [1, 2].

Постановка задачи, экспериментальное оборудование и методы измерений

На кафедре прикладной гидроаэромеханики и механотроники Национального технического университета Украины проводился комплекс экспериментальных и теоретических исследований поведения жидкости в ограниченных объемах с использованием ВСУ различной геометрии. С помощью специально созданных экспериментальных стендов, защищенных авторскими свидетельствами на изобретения [3], моделировали условия поведения жидкого топлива в резервуарах различной геометрии при орбитальном полете КА.

Измерения скоростей и круговых моментов вязкого трения жидкости о стенки сосудов проводились посредством тензо- и термоанемометрических датчиков, а обработка и анализ результатов измерений осуществлялись с помощью вторичной аналоговой и цифровой регистрирующей аппаратуры с последующим представлением результатов в табличном или графическом виде. Методикой проведения экспериментов предусматривался предварительный разгон вращения модельного сосуда с жидкостью до заданной угловой скорости и затем резкое торможение оболочки с одновременным измерением гидродинамических параметров

инерционных осесимметричных течений. В частности, использовались методики одновременного измерения компонент вектора скорости в нескольких контрольных точках течения и исследования характера развития течения во времени [4, 5].

Для количественной оценки результатов измерений и определения диапазона изменения гидродинамических параметров использовались известные и специально разработанные критериальные параметры, например, центробежные числа Рейнольдса, Ньютона, Россби и другие, позволяющие промоделировать трехмерную картину инерционных течений вязкой несжимаемой жидкости и распространить полученные результаты на реальные условия и объекты с жидкостью. Начальное число Рейнольдса Re_0 характеризует исходные условия течения жидкости и построено по величинам начальной угловой скорости оболочки Ω_0 , радиуса сосуда R и кинематического коэффициента вязкости ν

$$Re_0 = \Omega_0 \cdot R^2 / \nu$$

а число Ньютона имеет вид

$$Ne = \frac{F_{mp}}{\rho \cdot u^2 \cdot R_0^2} \quad (1)$$

где F_{mp} – измеренная сила вязкого трения жидкости о стенки резервуара и гидродинамического воздействия на перегородки; u – актуальное значение окружной (азимутальной) компоненты вектора скорости.

Учитывая то обстоятельство, что исследовалась нестационарная задача о течении жидкости в сосуде, в рассмотрение вводилась величина безразмерного времени

$$T = \Omega_0 \cdot t$$

где t – размерное время течения в секундах. В результате измерений получены распределения скоростей и круговых моментов $M_{кр}$ в резервуарах сферической и цилиндрической формы, позволяющие проследить гидродинамические свойства течений и систематизировать данные по силовым влияниям ВСУ на возмущения со стороны жидкости.

Для прецизионного измерения сил трения жидкости о стенки $F_{тр}$ и динамического давления на внутренние перегородки использовалась специальная система измерения, основанная на применении тензометрических датчиков кругового момента и цифровой регистрирующей аппаратуры, позволяющей с достоверностью порядка 93% установить силовые характеристики течения [4]. Измеренные с помощью указанного стенда величины силовых параметров позволяют верифицировать результаты эмпирических расчетов и с учетом критериальных комплексов распространить данные на реальные условия движения и объекты.

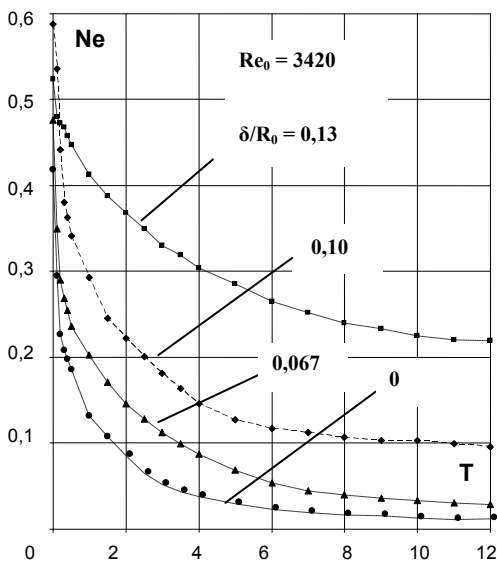


Рис. 1. Зависимость числа Ньютона Ne от времени течения T при различных зазорах между перегородкой и стенкой сферы $Z=0,2$, $Re_0=3420$

заторможенная область течения, смежная с внешней кромкой перегородки. В этом случае затухание скорости происходит вплоть до $T=23,0$, так как в формировании спутного следа вмешиваются более динамичные течения

При моделировании использовались непроницаемые плоские радиальные перегородки, примыкающие к внутренним стенкам резервуара и отстоящие от них с заданным зазором δ , изменяемым в диапазоне $\delta/R_0=0 \dots 0,2$. Дальнейшее увеличение расстояния δ от кромки перегородки до стенки сосуда не приводит к существенным изменениям картины обтекания ВСУ.

Анализ результатов экспериментальных исследований

Наиболее информативной с точки зрения количественной оценки силовых влияний жидкости и характера развития течения представляется зависимость числа Ньютона Ne от времени течения. Для определения характера изменения во времени параметра Ne на рис.1 представлены кривые его затухания от безразмерного времени T при различных зазорах между перегородкой и стенкой сосуда ($Re_0=3420$). Экспоненциальный характер кривых свидетельствует о достаточно быстром (почти на 75%) затухании величин Ne в начальной стадии течения $T=0 \dots 1$ для примыкающей к стенкам перегородки ($\delta/R_0=0$) при ширине перегородки $Z=b/R_0$.

Однако эта зависимость носит более плавный характер для течения с зазором, равным $\delta/R_0=0,13$, когда в пристеночной области сосуда уже сформирована

в пристеночной области течения. Таким образом, в случае течения с зазором силовое влияние жидкости представляется прогнозируемым не только в начальной стадии, но и при больших значениях T .

Рассмотренные зависимости позволяют сделать вывод о том, что для определения кругового момента $M_{кр}$ или суммарной силы вязкого трения $F_{тр}$, наиболее характерны начальная и основная стадии инерционного течения. В этот период достаточно велики не только центробежные силы инерции и градиенты давления, но и силы Кориолиса, взаимодействие которых обуславливает существование нелинейных распределений скорости. Учитывая важную роль пристеночной области в течении с перегородками, на которую распространяется влияние пограничного слоя на стенках сосуда, представлялось целесообразным сопоставить результаты измерений для примыкающих к стенкам перегородок с отстоящими конструкциями.

На рис.2 представлены характерные области течения для примыкающей перегородки шириной $Z=b/R_0=0,2$, где $b=0,3$ м – ширина перегородки, полученные по результатам термоанемометрических измерений в диапазоне начальных чисел Рейнольдса $Re_0=2500...6750$ [4, 5], в начальной ($T=2,53$) и заключительной ($T=17,8$) стадиях течения. Из рис.2,а видно, что при $T=2,53$ длина спутного следа за перегородкой составляет $l=L/b_0=1,45...1,57$ и его ширина равна параметру $Z=0,19$. При возрастании времени течения $T=17,8$ эти величины равны соответственно 0,75 и 0,53, что показано на рис.2,б.

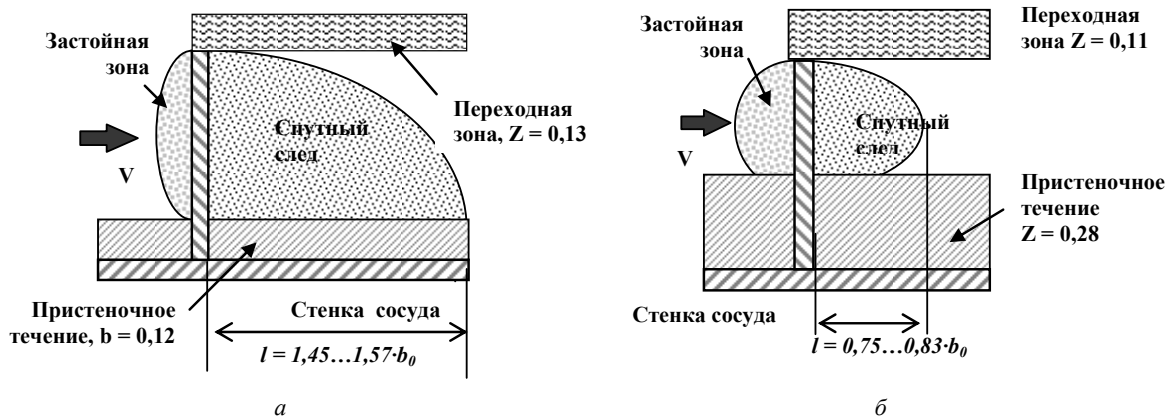


Рис. 2. Структура течения около перегородки, прилегающей к стенке при $Re_0=4270$, $Z=0,2$: а – $T=2,53$; б – $T=17,8$

Как видно из рисунка, возникающая на внутренних краях перегородки переходная область течения, установленная по результатам термоанемометрических измерений, остается достаточно стабильной и ее ширина составляет $Z=0,11...0,13$ в течение всего периода затухания скорости течения. Толщина пристеночной области течения становится равной 0,28, распространяя свое влияние почти на половину ширины примыкающей перегородки ($Z=0,12...0,28$). Таким образом, в инерционном течении с примыкающей перегородкой возникает и существует достаточно долго большая область пристеночного заторможенного течения, не участвующая в распределении азимутальных скоростей течения и не влияющая на структуру циркуляций в спутном следе за перегородкой.

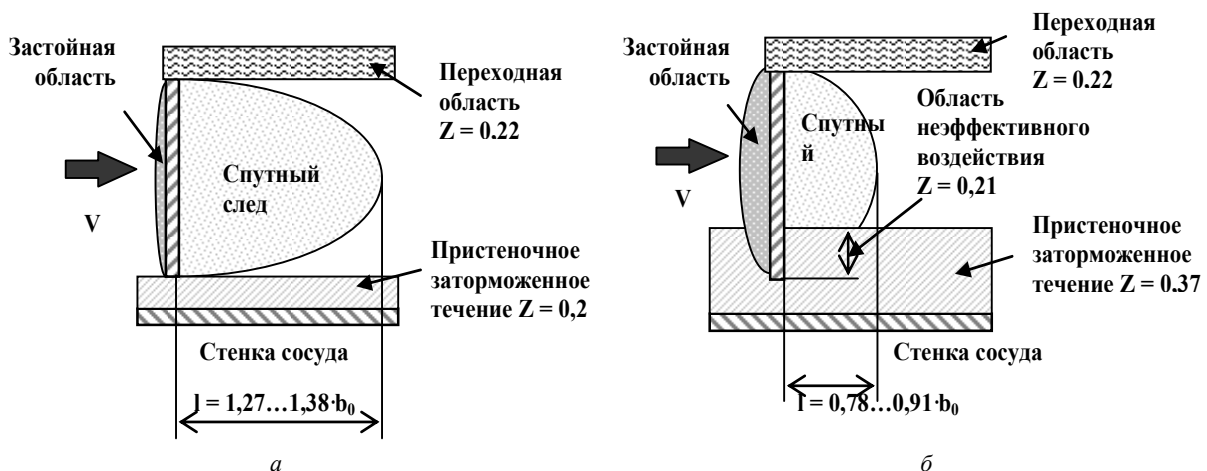


Рис. 3. Структура течения в окрестности перегородки, отстоящей от стенки сосуда с зазором $\delta/R_0=0,13$, $Re_0=4270$: а – $T=2,53$; б – $T=17,8$

Применение в составе ВСУ отстоящих от стенки сосуда перегородок, пример которых приведен на рис.3, позволяет установить новые особенности распределения окружной скорости и структуры циркуляций в спутном следе за перегородкой. В начальной стадии течения в зазоре, толщина которого составляет $\delta/R_0=0,13$, образуется устойчивая пристеночная структура со скоростью $u = \Omega_0 \cdot R_0$, которая достаточно быстро затухает, присоединившись к пристеночному течению. При этом толщина переходной области течения на кромке перегородки остается постоянной ($Z=0,22$) и скорость жидкости в ее пределах затухает пропорционально азимутальной компоненте в экваториальной области сосуда.

Результаты измерений для отстоящей от стенки сосуда перегородки при $Re_0=4270$, приведенные на рис.3, позволяют качественно оценить структуру течения и провести сопоставление их с течением около примыкающей перегородки. Симметричный спутный след при $T=2,53$ и устойчивое течение в зазоре (рис.3,а) сменяется большими (на 20...23%) по длине циркуляциями в следе. Это, в свою очередь, позволяет уточнить величину зазора, уменьшив области неэффективного влияния перегородок (рис.3,б) в случае примыкающей конструкции ВСУ. Таким образом, суммарное воздействие течений на кромках и в зазоре позволяет установить картину распределения скоростей и их влияние на формирование циркуляций в спутном следе. Это позволит количественно определить силовые воздействия перегородок на жидкость и их эволюцию во времени течения.

Как видно из рис. 3,а, длина спутного следа за перегородкой составляет $l=1,27...1,38 \cdot b_0$, что по сравнению с примыкающей конструкцией на 10...12% меньше, тогда как ширина следа остается равной ширине b_0 . В заключительной стадии течения (рис.3,б), при $T=17,8$, наблюдается следующая картина распределения параметров. При почти одинаковой ширине спутного следа его длина почти на 17% меньше из-за влияния течения в зазоре, толщина которого становится равной $Z=0,37$. При этом область слабого влияния течения на спутный след за перегородкой, а, следовательно, область неэффективного воздействия перегородки на течение может достигать $Z=0,21$. Подобные особенности распределения скоростей в инерционном течении следует рассматривать как резерв эффективного компенсационного влияния ВСУ на возмущения со стороны жидкости.

Структуру инерционного течения в случае течения с отстоящими перегородками можно проследить по геометрии профилей азимутальной скорости в различные моменты течения. На рис.4 приведены зависимости скорости от расстояния до оси вращения R в различные моменты времени течения. Сплошными линиями представлены профили скорости при использовании примыкающей конструкции ВСУ, где имеют место две характерные зоны потока: пристеночная заторможенная и динамичная приосевая с седловидными участками кривой. Однако, при использовании отстоящей перегородки на ее внутренних кромках в слоях $R=0,46...0,63$ возникает достаточно интенсивное ускоренное течение, деформирующее распределение скорости в свободной области резервуара, не охваченной перегородками.

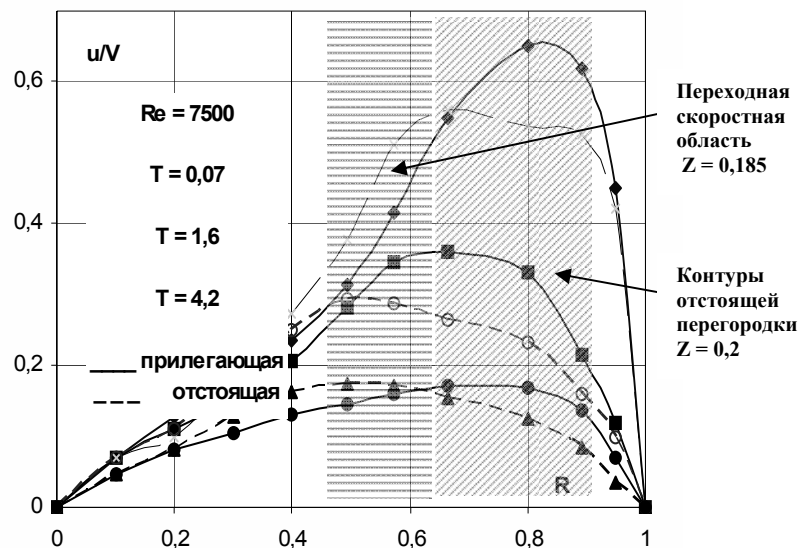


Рис. 4. Профили окружной скорости для прилегающей и отстоящей перегородок в различные моменты времени течения, $Re=7500$

Характер распределения скоростей в переходной области течения во времени позволяет установить большее, чем ожидалось [2], влияние внутренних кромок перегородок на квазитвердую область течения. Анализ кривых на рис.4 позволяет сделать вывод о достаточно сильном влиянии перегородки на распределение азимутальной скорости не только в области спутного следа, но и около ее внутренних кромок, которые инициируют своеобразную переходную зону между перегородкой и квазитвердой областью течения, подобную отрывным течениям при обтекании препятствия [6].

Характер изменения силовых воздействий на перегородки со стороны инерционного течения можно проследить по графической зависимости кругового момента $M_{кр}$ от начального числа Рейнольдса Re_0 . Примеры указанных кривых для различных зазоров отстоящих перегородок приведены на рис.5. Особенности изменения параметра $M_{кр}$ в зависимости от начальных чисел Рейнольдса Re_0 определяется различным наклоном кривых к оси абсцисс и зависит от расстояния перегородки до стенки сосуда δ . При возрастании δ наблюдается уменьшение наклона кривой, режим «насыщения» которой имеет место при больших числах Рейнольдса, порядка $Re=9500...12500$. При течении, например, в сфере имеет место более выраженный нелинейный характер, чем в случае течения в цилиндре, где зависимость $M_{кр}=f(Re_0)$ представляется почти линейной. При этом дальнейшее увеличение параметра Re_0 до 12500 не приводит к возрастанию круговых моментов $M_{кр}$.

Для количественного определения эффективности влияния на величину кругового момента $M_{кр}$ зазора между перегородкой и стенкой сосуда целесообразно провести сравнение результатов измерений параметра $M_{кр}$ с данными для примыкающей конструкции перегородок. На рис.6 приведены кривые зависимости $M_{кр}$ для сплошных перегородок, где для прилегающей конструкции при $Re_0=2500$ при одинаковой ширине перегородки ($Z=0,2$) в начальной стадии $M_{кр}$ превышает значение для отстоящей перегородки, однако его затухание во времени происходит быстрее.

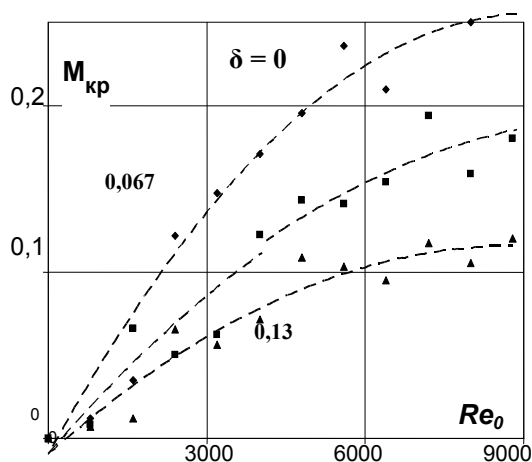


Рис. 5. Зависимость кругового момента $M_{кр}$ от параметра Re_0 при различном расстоянии перегородок от стенки цилиндра

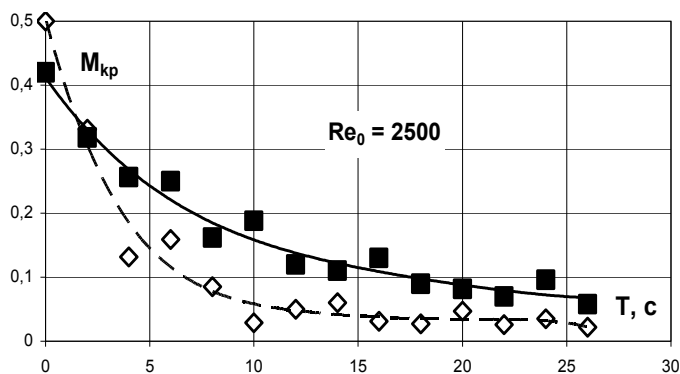


Рис. 6. Зависимость кругового момента $M_{кр}$ от времени T для примыкающей и отстоящей перегородок в сфере

Для создания эмпирической базы результатов экспериментальных исследований графические зависимости для круговых моментов можно выразить в полиномиальном виде для введения данных в бортовой компьютер. Аппроксимация кривых приводит к следующей полиномиальной зависимости

$$M_{кр} = A \cdot T^5 + B \cdot T^4 + C \cdot T^3 + D \cdot T^2 + E \cdot T + H$$

с весьма малыми коэффициентами A и B . Таким образом, для описания кривых вполне применимы полиномы третьего порядка.

В начальной стадии переходного течения, при $T=0...10$, когда влияние инерционных свойств течения велико, наблюдается почти экспоненциальное затухание параметра $M_{кр}$, тогда как при больших значениях времени, $T=10...23$, имеет место линейное изменение

$$M_{кр} = E \cdot T + H \quad (2)$$

что позволяет сделать предположение о том, что перфорирование плоскости перегородки и перемещение перегородки в пределах установленного зазора со стенкой может привести к новому эффекту при распределении параметра $M_{кр}$. Это, в свою очередь, может существенно упростить методы учета влияния жидкости на конструкции содержащих ее сосудов различной конфигурации.

Выводы

Приведенные результаты экспериментальных исследований течений в резервуарах позволяют сделать вывод о существенной зависимости круговых моментов вязкого трения и динамического воздействия жидкости на внутренние конструкции стабилизирующих устройств. Экспоненциальный характер распределения скоростей течения во времени свидетельствует о сильном влиянии жидкости в начальной стадии течения, тогда как при больших значениях времени, значительном уменьшении инерционных свойств жидкости и возрастании вязких свойств воздействие на перегородки снижается.

При использовании отстоящих конструкций перегородок эффект «проскальзывания» жидкости в пристеночной области, снижает круговые моменты течения и дает возможность более точно прогнозировать величины динамических воздействий. Более эффективным средством воздействия на жидкость представляется применение перфорированных конструкций радиальных перегородок, которые будут предметом будущего исследования. Данные о характере изменения круговых моментов можно вводить в бортовой компьютер для оптимизации компенсационных мероприятий космического аппарата для минимизации возмущающих воздействий со стороны жидкости.

Анотація. Наведено результати експериментальних досліджень впливу внутрішніх перегородок на течії рідини в паливних резервуарах космічних апаратів. Проводиться аналіз графічних залежностей сил в'язкого тертя та крутних моментів динамічної дії перегородок на течії, дано рекомендації з раціонального використання внутрішніх пристроїв з точки зору габаритів, маси та ефективності дії на рідину.

Ключові слова: інерційні течії рідини, плоскі перегородки, числа Рейнольдса та Россбі, крутні моменти в'язкого тертя рідини на стінках резервуару.

Abstract. The viscous incompressible flows of liquid fuel reservoirs in space vehicles tanks are investigated. The results of experimental researches of internal flows influence on rigid tank walls are presented. The analysis of graphic dependences of forces of liquid viscous friction and flows dynamic influence circular moments are conducted on flows. The experimental results for velocity profiles helps to design the rational baffles structures and forms the velocity fields which are the basis for inertial torque formulation and helps to calculate the dynamic affects of inertial flows. The practical recommendations of the rational use of internal devices from point of sizes, mass and affecting efficiency liquid are made.

Keywords: fluid inertial flows, flat baffles, Reynolds and Rossbi numbers, viscous torques of fluid flows on rigid tank walls.

1. Колесников К.С. Динамика ракет / К.С.Колесников. - М.: Машиностроение, 1980. - 316 с.
2. Микишев Г.Н. Экспериментальные методы в динамике космического аппарата / Г.Н. Микишев. - М.: Машиностроение, 1978. - 247 с.
3. А.с. 1531001 СССР, МКИ G 01 P 215/02. Способ градуировки датчиков скорости потока жидкости и устройство для его осуществления / В.А.Ковалев, А.Н.Ковальчук и др.(СССР).-№ 4287740/24; Заявлено 21.07.87; Опубл. 23.12.89, Бюл.№ 47.
4. Ковалев В.А. Влияние внутриваковых перегородок на течение жидкого топлива в баках космического аппарата / В.А.Ковалев // Вестник НТУУ «КПИ», Машиностроение, 2006. - № 48. - С.73-79
5. Ковалев В.А. Определение гидродинамического сопротивления стабилизаторов в топливных баках космического летательного аппарата / В.А.Ковалев // Вестник НТУУ «КПИ», Машиностроение, 2002. - вып. 42, т. 1. - С.107-111.
6. Бровченко И.А. Взаимодействие внутренних уединенных волн большой амплитуды с препятствиями / И.А.Бровченко, Н.С.Городецкая, В.С.Мадерич [и др.] // Прикладна гідромеханіка, 2007. – т.9, №1. – С.3-7.

REFERENCES

1. Kolesnikov K.S. Dynamika raket. Moscow: Mashinostroyenie, 1980, 316 p.
2. Mikishev G.N. Experimentalniye metodi v dimamike kosmicheskogo apparata. Moscow: Mashinostroyenie, 1978. 247 p.
3. V.A.Kovalev, A.N.Kovalchuk etc.A.S. 1531001 SSSR, MKI G 01 P 215/02. Sposob graduirovki datchikov skorosti potoka zhidkosti I ustroystvo dlya yego osushestvleniya / (SSSR).- No 4287740/24; 21.07.87; Publ. 23.12.89, Bul. No 47.
4. Kovalev V.A. Journal of Mechanical Engineering of NTUU «KPI», 2006, No. 48, PP.73-79.
5. Kovalev V.A. Journal of Mechanical Engineering of NTUU «KPI», 2002, No 42, v.1, PP.107-111.
6. Brovchenko I.A., N.S.Gorodetskaya, V.S.Maderich [etc]Vzaimodeystvie vnutrennikh uyedinenskikh voln bolsшой amplitude s prepyatstviyam, Prikladna gidromekhanika, 2007. v.9, No. 1. pp.3-7.