

УДК 532.53 : 629.784

Ковалев В.А., д.т.н.

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

ОПТИМИЗАЦИЯ СИЛОВЫХ ВОЗДЕЙСТВИЙ ПЕРЕГОРОДОК НА ИНЕРЦИОННЫЕ ТЕЧЕНИЯ ЖИДКОСТИ В РЕЗЕРВУАРАХ ПОДВИЖНЫХ ОБЪЕКТОВ

Kovalev V.

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

THE POWER INFLUENCE OPTIMIZATION OF INNER BAFFLES ON INERTIAL LIQUID FLOWS IN MOVING BODIES TANKS

Приведены результаты численного моделирования внутренних течений жидкого топлива в резервуарах с перегородками космического аппарата, движущегося по земной орбите. Представлена структура течений в окрестности перегородок – пристеночная область, спутный след, около кромок перегородок и т.д. Проводится оценка структуры и характера развития циркуляционных течений в диапазоне чисел Рейнольдса 700-12500, позволяющая построить гидродинамическую картину осесимметричного циркуляционного течения.

Анализ результатов численного моделирования позволяет установить характерные области инерционных течений, структуру циркуляций в меридиональных плоскостях и особенности их влияния на поле скорости основного потока, которая определяет величины силовых воздействий на стенки сосуда и внутренние перегородки.

Ключевые слова: инерционные течения, вязкая несжимаемая жидкость, радиальные перегородки, пристеночные заторможенные течения, затухание вектора скорости, круговые моменты трения жидкости.

Введение

При полете космического аппарата (КА) на орбите Земли с выключенной двигательной установкой (ДУ) (пассивная стадия) на его конструкцию действуют силовые воздействия от инерционных течений жидкого топлива в баках. Они способны вызвать неустойчивости движения КА и отклонения его от штатной траектории, а также могут быть причиной аварийных ситуаций на борту. Для компенсации подобных возмущений со стороны жидкости, коррекции ориентации объекта и стабилизации траектории его полета проводятся периодические включения ДУ, что приводит к дополнительному расходу топлива.

Для повышения эффективности воздействия на неконтролируемые внутренние течения жидкости в топливных баках используют стабилизирующие устройства в виде кольцевых и радиальных пристеночных перегородок, которые, в свою очередь, обладают достаточно большой массой и габаритами, уменьшая таким образом полезную нагрузку КА. Уменьшение массы и области влияния перегородок приводит к резкому снижению меры воздействия на жидкость и необходимости более частого включения ДУ, поэтому возникает задача повышения эффективности влияния перегородок на течения жидкого топлива с одновременным снижением их массы, которую можно решить методами моделирования течений в лабораторных условиях и исследования гидродинамической картины течений в баках с перегородками.

Известны многочисленные исследования подобных внутренних течений для сосудов, частично заполненных жидкостью с кольцевыми или радиальными перегородками, расположенными на стенках цилиндрической баков под уровнем жидкости [1, 2]. В указанных работах определялись резонансные плескания жидкости и силовые воздействия на стенки баков и сами перегородки, даны практические рекомендации относительно средств и методов компенсации подобных возмущений со стороны жидкости. Однако, гидродинамические явления в целиком заполненных резервуарах, имеющие приложения к другим задачам движения объектов с жидкостью, исследованы недостаточно широко.

Тем не менее, в условиях длительного полета КА, с большим количеством жидкости, а также другие подобные воздействия со стороны жидкости должны учитываться при разработке системы автоматической стабилизации КА. Поэтому представляется весьма актуальным исследование осесимметричных течений вязкой несжимаемой жидкости в ограниченных объемах с использованием внутренних стабилизирующих устройств (ВСУ) и оптимизация их конструкций для повышения эффективности гидродинамического воздействия на течения [3, 4].

Постановка задачі і методи численного моделювання течій

Исследование подобных замкнутых течений, как правило, связано с постановкой и проведением достаточно сложного физического эксперимента с помощью специальных стендов типа «центрифуга», электронного измерительного и регистрирующего оборудования, позволяющего установить гидродинамические поля, например, скорости и давлений во всем пространстве сосуда. Анализ результатов измерений позволяет достаточно точно установить картину течения и основные силовые характеристики движущейся в сосуде жидкости.

Однако, большая сложность, продолжительность настройки оборудования и стоимость подобных экспериментальных исследований приводит к необходимости математического моделирования течений и использования для этого современных пакетов прикладных программ, позволяющих приближенно, с различной степенью точности найти решения нелинейных уравнений движения жидкости. Поэтому наиболее целесообразными представляются разработка математических моделей течений и верификация результатов численных расчетов данными экспериментальных измерений.

Целью исследования явилось физическое моделирование замкнутых течений и определение основных гидродинамических параметров силового влияния внутренних перегородок в резервуарах и круговых моментов воздействия инерционных течений на перегородки.

Постановка задачи численного моделирования предусматривала использование полных уравнений движения вязкой несжимаемой жидкости Навье-Стокса с соответствующими граничными условиями равенства нулю компонент вектора скорости на стенках и на оси вращения модельного сосуда. Кроме того, для сопоставления гидродинамических картин течения проводились вычисления для стационарной задачи течения и нестационарной, когда компоненты вектора скорости жидкости затухают до нуля, начиная от твердотельного распределения скорости.

Физические особенности развития течения заключаются в следующем. При резкой остановке вращения оболочки прилегающая к стенкам вязкая жидкость из условия прилипания также останавливается, образуя тонкий вязкий пристеночный слой. При этом находящаяся ближе к оси вращения жидкость в начальной стадии течения составляет квазитвердую область течения, движущуюся с прежней угловой скоростью, равной Ω_0 .

Благодаря влиянию вязкого трения между слоями жидкости затухание азимутальной скорости распространяется от стенок к внутренним слоям, уменьшая, таким образом, размеры квазитвердой области. При этом, как известно, структура заторможенной области на боковых вертикальных стенках существенно отличается от особенностей формирования пристеночного течения в верхней и донной областях сферы, где имеют место экмановские пограничные слои [2].

Рассмотрим формирование течения вблизи нижней горизонтальной стенки сферы, свойства которого подобны вращению жидкости около неподвижного диска. Интегральную оценку силы вязкого трения можно представить в виде

$$F_{\text{вяз}} \approx 4/3 \pi \cdot \rho \cdot \Omega_0^2 \cdot R^4. \quad (1)$$

Однако, около стенки азимутальные скорости малы и направленный к оси вращения радиальный градиент давления, который при твердотельном движении жидкости и сосуда был равен центробежным силам инерции, остается таким же по величине и начинает преобладать над ними, обуславливая возникновение радиального течения направленного внутрь сферы

$$\frac{\partial p}{\partial r} = \rho \frac{u^2}{r}. \quad (2)$$

Учитывая условие неразрывности течения, движущиеся к оси вращения жидкие частицы формируют восходящее течение в осевом направлении, образуя, таким образом, меридиональное течение, подобное рассмотренному в задаче о вращении жидкости около неподвижного диска.

Проведем анализ сил, влияющих на формирование инерционного осесимметричного течения в сфере. Уравнения Навье-Стокса для вращающегося течения можно представить в векторной форме

$$\frac{\partial u}{\partial t} + u \nabla u = -\frac{1}{\rho} \nabla p - \Omega \times (\Omega \times r) - 2\Omega \times u_R + \nu \nabla^2 u, \quad (3)$$

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, $\frac{1}{\rho} \nabla p$ - радиальным

градиентом давления и $\nu \nabla^2 u$ - силами вязкого трения.

Слагаемые, связанные с центробежной силой, могут входить в величину мнимого радиального градиента давления

$$\Omega \times (\Omega \times r) = -\nabla \left(\frac{1}{2} \Omega^2 r^2 \sin^2 \vartheta \right) = -\nabla \left[\frac{1}{2} \Omega^2 (x^2 + y^2) \right]. \quad (4)$$

Таким образом, уравнение (4) можно записать в виде

$$\frac{\partial u}{\partial t} + u \nabla u = -\frac{1}{\rho} \nabla p' - 2\Omega \times u_R + \nu \nabla^2 u, \quad (5)$$

где $p' = p - \frac{1}{2} \rho \Omega^2 (x^2 + y^2)$

Согласно известным выражениям [2] силы вязкого трения жидкости о стенки пропорциональны

$$F_{\text{вязкости}} \approx \frac{\rho \cdot \nu \cdot u \cdot R^2}{\delta}, \quad (6)$$

где δ – толщина пристеночного течения.

Приведенный характер распределения сил в затухающем течении в сфере, обуславливает возникновение циркуляционных течений даже при малых числах Рейнольдса. Как показано на рис.1, имеет место инициированная экмановскими слоями одна циркуляция в масштабе четверти сферы с линиями тока, направленными от оси к стенкам сосуда в экваториальной области и к оси – в нижней и верхней пристеночных областях [2, 3, 5].

Для малых величин угловой скорости течения, соответствующих числам Рейнольдса порядка 700...2500 центробежные силы инерции и кориолисовы силы представляются достаточно малыми, поэтому тестовые расчеты на конечно-элементной схеме более целесообразно проводить для двумерных задач с бесконечным радиусом кривизны поверхности стенки сосуда. Во-первых, это сократит продолжительность расчетов и позволит разбить пространство на сетку с произвольным количеством конечных элементов. Во-вторых, это обеспечит определение качественной гидродинамической картины течения и распределения основных кинематических и силовых параметров течения.

Анализ результатов расчетов и структура течения около перегородки

В рамках подхода к численному моделированию течений в сосудах с перегородками предусматривается в первую очередь определение диапазонов изменения критериальных параметров, то есть, чисел Рейнольдса, Россби и т.д. Для обеспечения необходимой степени достоверности численных результатов расчеты повторялись при неизменных входных величинах в безразмерном виде при различных числах Рейнольдса, $Re=700-12500$.

Как известно, уменьшение размеров спутного следа приводит к снижению лобового сопротивления перегородки. В качестве базовой принята перегородка шириной $b=0,2 \cdot R$, примыкающая к стенкам сосуда [5]. При более детальной оценке структуры спутного следа за примыкающей перегородкой, схематическое изображение которой приведено на рис.1, определялись характерные размеры циркуляционных областей: за перегородкой длина l и ширина b_1 , а также ширина области влияния внутренней кромки перегородки b_2 на свободное пространство течения [7].

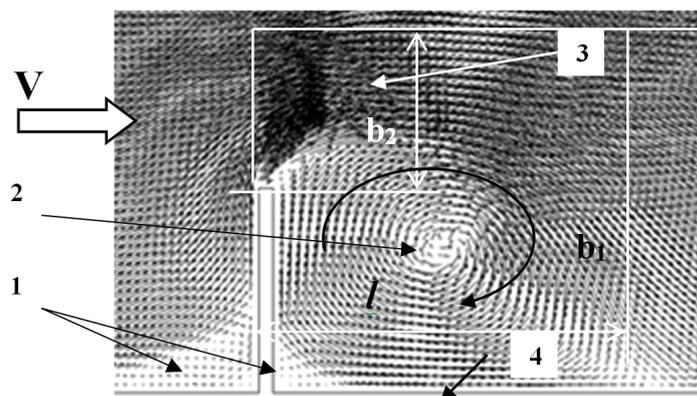


Рис.1. Структура течения в окрестности примыкающей сплошной перегородки (ширина $b_0/R_0=0,2$) при $Re=920$: 1–застойные зоны; 2–циркуляция; 3–область влияния кромки перегородки на квазитвердое течение; 4–стенка сосуда

Установлено, что при малых скоростях течения ($Re=670-1020$) длина спутного следа может составлять $1,4-1,92 \cdot b$, а его ширина – $1,1-1,18 \cdot b$. При этом ширина области влияния перегородки на неохваченное ею пространство, составляет $b_2=0,35-0,57 \cdot b$. Увеличение чисел Рейнольдса $Re=1020-1720$ приводит к возрастанию длины следа, $b=2,5-3,1$, тогда как его ширина увеличивается незначительно, на 5-8%. Для ширины области влияния b_2 характерны следующие соотношения $b_2=0,31-0,43 \cdot b$, что свидетельствует о стабилизации влияния перегородки на течение в целом.

При моделировании течений с учетом осевой симметрии задачи необходима проверка корректности граничных и начальных условий рассматриваемой модели на основе уравнений Навье-Стокса. Для этого рассматривались тестовые задачи обтекания перегородок в емкостях с бесконечно большим радиусом кривизны поверхности, результаты расчета которых приведены на рис.2 [7, 8].

Например, при обтекании 6-элементной (рис.2,а) и 8-элементной конструкций ВСУ (рис.2,б), где перегородки расположены на расстояниях $l=l_0/R_0=0,73\dots 1,0$, размеры спутного следа за первой перегородкой значительно превышают расстояние, на котором вторая перегородка отстоит от первой

$$l_1 = l + \Delta l = 1,25\dots 1,42 \cdot l_0,$$

поэтому она может воспринимать лишь часть динамического давления потока. Таким образом, эффективность каскада перегородок снижается, и для повышения ее эффективности влияния перегородку следует перенести за пределы спутного следа. Расстояние между перегородками следует установить равным l_1 , которое при данных числах Рейнольдса соразмерно циркуляции в спутном следе.

Для 8-элементной конструкции ВСУ (рис.2,б) картина обтекания становится еще более нерациональной, так как в окрестности перегородок образуется устойчивое заторможенное течение со скоростями порядка $0,01-0,025 \cdot \bar{u}_i$, которое оказывает весьма слабое воздействие на другие области течения. Перегородка инициирует возрастание скоростей около внутренней кромки, которые достаточно быстро затухают ($\Delta T=2,9\dots 3,7$), не оказывая заметного влияния на квазитвердую область течения.

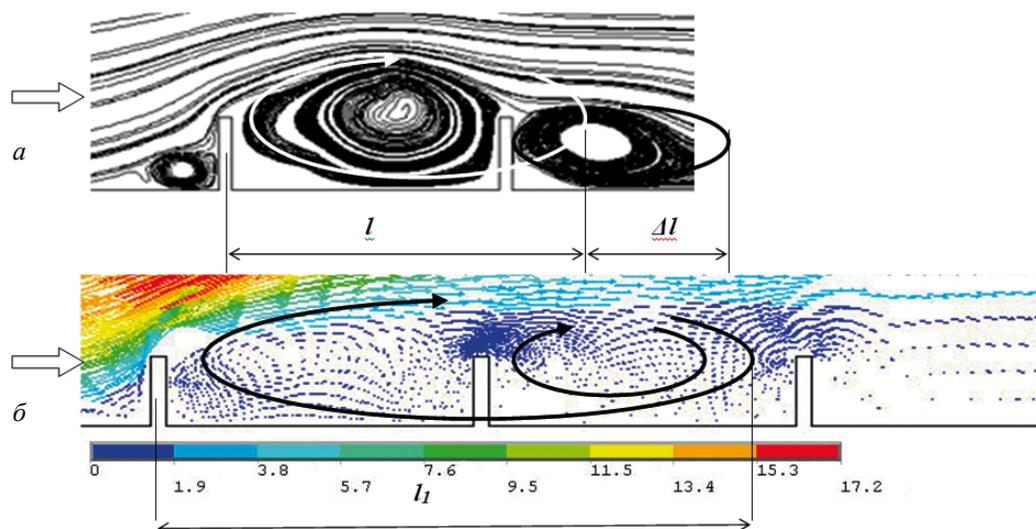


Рис.2. Контурные изображения циркуляций в спутном следе за сплошными примыкающими перегородками при $Re_\theta=920$: а – 6-элементное ВСУ; б – 8-элементное ВСУ

Для отстоящих от стенок конструкций перегородок имеет место следующая картина течения, представленная на рис.3. Размеры спутного следа становятся меньше по сравнению со случаем примыкающих перегородок, благодаря влиянию течения в зазоре между перегородкой и стенкой сосуда. Однако, вторая перегородка в 6-элементной конструкции ВСУ, расположенная на расстоянии $0,98 \cdot R_0$, формирует циркуляцию с меньшими по сравнению с первой скоростями (порядка 2-3 мм/с), свидетельствуя о слабом ее влиянии на течение (рис.3,а). Размеры циркуляции за первой перегородкой очевидно превышают расстояние до следующей перегородки $\Delta l=0,8-1,1 \cdot R_0$, что свидетельствует о недостаточно рациональном расположении системы перегородок в резервуаре.

При использовании 4-элементной конструкции, результаты расчета которой приведены на рис.3,б, наблюдается выравнивание размеров циркуляций и расстояний между элементами ВСУ, поэтому с точки зрения формирования циркуляций конструкция представляется более эффективной. Кроме того, ее влияние на квазитвердую область течения становится более существенным, увеличивая скорости течения около кромки перегородки на 12-17%, что свидетельствует о соответствующем уменьшении пространства течения, не охваченного перегородками [7].

Скорости в зазорах между внешней кромкой и стенкой сосуда возрастают (рис.3,б), циркуляции в спутном следе за перегородкой деформируются в сторону квазитвердой области течения, внося таким образом свой вклад в распределение окружной компоненты скорости в свободном пространстве течения. В свою

очередь, влияние указанного зазора на зависимость круговых моментов динамического влияния жидкости на плоскости перегородок представляется также существенной, поскольку в начальные моменты времени течения наблюдается эффект «проскальзывания» жидкости в пристеночной области, что снижает пиковые силовые воздействия на перегородки [8].

Профиль радиальной скорости $v_r/\Omega_0 \cdot R_0$ плавно изменяется по всему пространству сферы, включая преобладающую часть средней зоны ($R=0,6...0,9$), за исключением пристеночной области ($R=0,9...1,0$), где вслед за сглаженным экстремумом скорости наблюдается резкое уменьшение кривой до нуля. Это свидетельствует о развитии в начальные моменты течения в радиальном направлении от оси вращения сосуда, вызванном притоком жидкости из приосевой области.

В период $T=0,4...5,5$ происходит формирование меридиональной циркуляции: в пристеночной области – от экватора к верхней и нижней областям сферы, а в приосевой – от них к центру сосуда. Интенсивность изменения радиальной скорости зависит от величины азимутальной компоненты скорости u и определяет характер распределения меридиональной циркуляции. При этом максимальные значения безразмерного параметра v/u , который выражает относительное изменение радиальной и азимутальной скоростей течения, имеют место в тот период времени, когда уменьшение окружной скорости происходит медленнее, чем затухание радиальной компоненты.

Слабая по сравнению с азимутальной скоростью экспоненциальность затухания радиальной компоненты v во времени T вызывает некоторые отклонения взаимного распределения составляющих v и u . Таким образом, в рассмотренном диапазоне чисел Рейнольдса структура течения существенно зависит от ширины перегородок, количества и их расположения относительно стенок сосуда. Это позволяет варьировать влиянием перегородок на инерционное течение и таким образом точно определить величины компенсационных воздействий на возмущения со стороны жидкости.

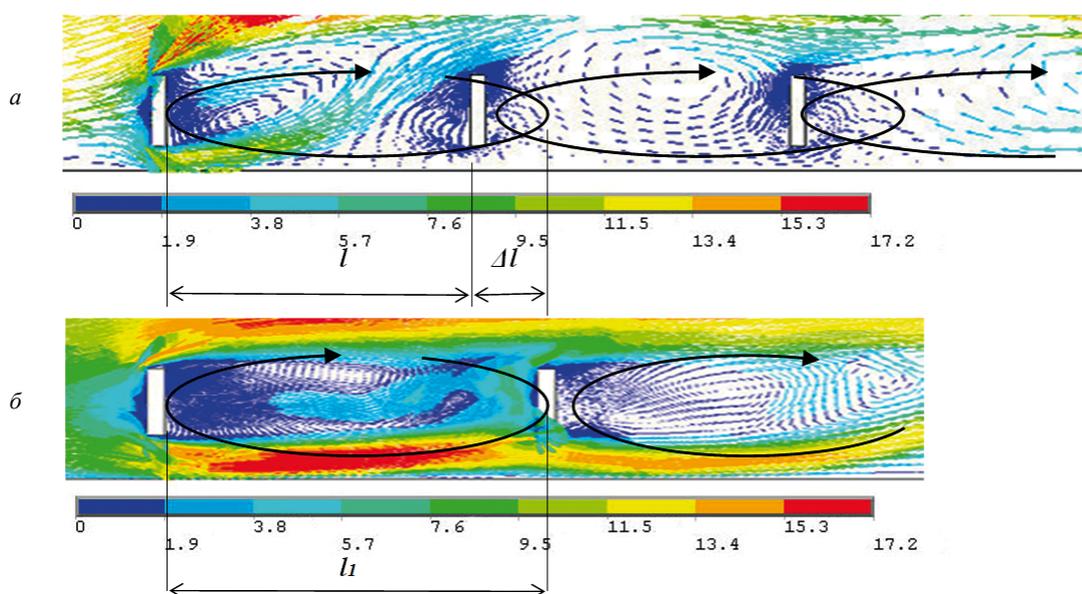


Рис.3. Результаты численного расчета скоростей в спутном следе за сплошными отстоящими перегородками при $Re_0=1720$: а – 6-элементное ВСУ; б – 4-элементное ВСУ

На рис.3 приведены контурные изображения профилей скоростей в зазоре между внешней кромкой перегородки и стенкой сферы при различных величинах зазора $\Delta=0,03...0,17$. Установлено возрастание азимутальных скоростей в зазоре, а также деформации профилей скорости в направлении от стенки, что позволяет определить влияние течения в зазоре на структуру следа за перегородкой. При $Re_0=870...1020$, влияние зазора становится заметным уже при $b=0,1$, при котором наблюдается существенное уменьшение, почти на 25%, длины области разрежения. Дальнейшее возрастание параметра b приводит к возникновению устойчивого пристеночного течения (рис.3,б), в то время как размеры спутного следа уменьшаются до $l=0,2...0,3$.

Развитие во времени течения в зазоре свидетельствует о слабом влиянии вязкой диффузии на градиенты скорости в этой области на протяжении периода течения $T=0...7,8$, и величина зазора $b=0,13...0,17$ представляется чрезмерно большой. Поэтому при численном моделировании принимались зазоры порядка $b=0,03...0,1$. При оценке размеров циркуляций за отстоящей перегородкой целесообразно проследить за

влиянием на спутный след деформированного профиля азимутальной скорости u , результаты расчета которой представлены на рис.3. Из контурного изображения распределения скорости видно возрастание скорости и одновременное изменение (до 22%) длины спутного следа от величины $l_1=1,2\dots1,3$ до $1,5\dots1,75$. Это свидетельствует о возрастании влияния пристеночного течения на структуру и размеры циркуляции за перегородкой.

Таким образом, течение в зазоре, ограничивает размеры спутного следа, однако, увеличение чисел Рейнольдса $Re_0=1070\dots1120$ заметного влияния на размеры спутного следа не оказывает. Ширина свободной области, на которую распространяется влияние отстоящей сплошной перегородки, в диапазоне $Re_0=1070\dots1920$ остается достаточно устойчивой и составляет $b_2=0,44\dots0,75 \cdot b_0$. Результаты численных расчетов с достоверностью порядка 92 % подтверждают данные термоанемометрических измерений в окрестности перегородок, результаты которых приведены в Разделе 6.

Дальнейшее увеличение ширины перегородок ($b > 0,2 \cdot R$) приводит к возрастанию их суммарной массы, что противоречит нашим задачам, а увеличение зазора между перегородками и стенкой сосуда ($\delta > 0,15 \cdot R$) представляется нецелесообразным из-за возникновения устойчивого и продолжительного по времени пристеночного течения, слабо влияющего на структуру спутного следа за перегородкой и снижающего суммарный круговой момент воздействия на течение [7].

Выводы

Анализ полученных в рамках настоящего исследования результатов позволил установить следующее. В диапазоне центробежных чисел Рейнольдса порядка 700-12500 в резервуарах космического объекта сферической геометрии могут существовать ламинарные инерционные осесимметричные течения жидкого топлива, с наличием устойчивых циркуляционных структур, которые создают возмущения и динамические нагрузки на стенки и внутренние устройства. Определение гидродинамических полей в подобных течениях позволяет установить структуру течений в характерных областях в окрестности перегородок – в спутном следе, пристеночной области и на кромках перегородки.

На основе полученных результатов, особенностей распределения циркуляций и структуры течения в характерных областях резервуара с перегородками можно установить минимальное количество перегородок, их ширину и расположение около стенок для эффективного воздействия на течения жидкости. По характеру формирования спутного следа и течения на кромках перегородок можно установить влияние перегородок на квазитвердое течение в области, не охваченной перегородками и таким образом более точно определить характер влияния перегородок на течение в целом.

С помощью известных эмпирических зависимостей и аналитических выражений [7], полученные результаты можно преобразовать в зависимости круговых моментов от различных критериальных параметров и ввести их в бортовой компьютер для оптимизации программы полета КА с учетом компенсационных мероприятий по демпфированию возмущений со стороны жидкого топлива.

Анотація

Наведено результати чисельного моделювання внутрішніх течій рідкого палива в резервуарах з перегородками космічного апарату, що рухається земною орбітою. Представлена структура течій біля перегородок - пристінна область, спутний слід, біля крайок перегородок і т.і. Проводиться оцінка структури і характеру розвитку циркуляційних течій в діапазоні чисел Рейнольдса 700-12500, що дозволяє побудувати гідродинамічну картину вісесиметричної циркуляційної течії.

Аналіз результатів чисельного моделювання дозволяє встановити характерні області інерційних течій, структуру циркуляцій у меридіональних площинах і особливості їх впливу на поле швидкості основного потоку, яка визначає величини силових впливів на стінки посудини і внутрішні перегородки.

Ключові слова: інерційні течії, в'язка нестислива рідина, радіальні перегородки, пристінні загальмовані течії, загасання вектора швидкості, кругові моменти тертя рідини

Abstract

The results of numerical simulation of internal flows of liquid fuel in the tanks with baffles of the spacecraft moving in the Earth's orbit. The flow structure in the vicinity of walls - the parietal region, wakes around the edges of walls, etc. An evaluation of the structure and nature of the circulating currents in the range of Reynolds numbers 700-12500, allowing to build a picture of an axially symmetric hydrodynamic circulation flow.

Analysis of the numerical simulation results allows to set specific field of inertial flows, the structure of circulation in the meridional plane and especially their impact on the main stream velocity, which determines the value of a force on the vessel walls and interior partitions.

Keywords: inertial flow, viscous incompressible fluid, radial baffles, inhibited the nearwall flow, the decay of the velocity vector, fluid friction torques

Бібліографічний список використаної літератури

1. *Микишев Г.Н.* Динамика тонкостенных конструкций с отсеками, содержащими жидкость / Г.Н.Микишев., Б.И.Рабинович. - М.: Машиностроение, 1971. - 564 с.
2. *Гринспен Х.* Теория вращающихся жидкостей / Х.Гринспен. - М.: Гидрометеиздат, 1975. - 304 с.
3. *Dodge F.* The new dynamic behavior of liquids in moving containers / F.T.Dodge. - Southwest Res. Institute, Texas, U.S.A. - 2000. - 202 p.
4. *Бровченко И.А.* Взаимодействие внутренних уединенных волн большой амплитуды с препятствиями / И.А.Бровченко, Н.С.Городецкая, В.С. Мадерич [та ін.] // Прикладна гідромеханіка, 2007. – Т.9, №1. – С.3-7.
5. *Бужинский В. А.* О колебаниях жидкости в топливных баках с демпфирующими перегородками / В.А.Бужинский // Космонавтика и ракетостроение. - 2007. - № 1. - С.110-120.
6. *Cho J.* Dynamic analysis of baffled fuel-storage tanks using the ALE finite element method / J.Cho, S.Lee // International Journal for Numerical Methods of Fluids. - 2003. - vol. 41. - p.185-208.
7. *Ковалев В.А.* Структура течений вязкой несжимаемой жидкости в окрестности внутри-баковых перегородок / В.А.Ковалев // «Прогресивна техніка і технології – 2011», Труды XII міжнародної науково-технічної конференції, Севастополь. – 2011. – С.85.
8. *Ковалев В.А.* Эффективность перемешивания топлива в баках космического аппарата внутрибаковыми перегородками / В.А.Ковалев // Промислова гідравліка і пневматика. – 2009. – №1 (23). – С.48-51.

References

1. *Mikishev G.N.* Dynamika tonkostennikh konstruksiy s otknikami, sodержashchimi zhidkost. Moskva: Mashinostroyeniye, 1971, 564 p.
2. *Grinspen Kh.* Teoriya vrashchayushchihzha zhidkostey. Moskva: Gidrometeoizdat. 1975, 304 p.
3. *Dodge F.* The new dynamic behavior of liquids in moving containers. Southwest Res. Institute, Texas, U.S.A., 2000, 202 p.
4. *Brovchenko I.A.* Vzaimodeystviye vnutrennizh uyedinennikh voln bolshoy amplitude s prepyatstviyami, Prikladnaya gidromekhanika, 2007, T.9, №1, p.3-7.
5. *Buzhinskiy V.A.* O kolebaniyakh zhidkosti v toplivnikh bakakh s dempfiyuyushchimi peregorodkami, Kosmonavtika I raketostroyeniye, 2007, № 1, p.110-120.
6. *Cho J., Lee S.* Dynamic analysis of baffled fuel-storage tanks using the ALE finite element method. International Journal for Numerical Methods of Fluids. 2003. vol. 41. p.185-208.
7. *Kovalev V.A.* Structura techeniy vyazkoy neczhimayemoy zhidkosti v okrestnosti vnutri-bakovikh peregorodok, «Progressivna tehnika I tehnologiyi–2011», Trudi XII mizhnarodnoyi koferenciyi, Sevastopol, 2011, p.85.
8. *Kovalev V.A.* Effectivnost peremeshvaniya topliva v bakakh kosmicheskogo apparata vnutribakovimi peregorodkami, Promislova gidravlika I pnevmatika, 2009, no.1 (23), p.48-51.

Подана до редакції 19.09.2013