

УДК 532.53 : 629.784

## МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕЧЕНИЙ ЖИДКОСТИ В ЗАМКНУТЫХ ОБЪЕМАХ С ДЕМПФИРУЮЩИМИ ПЕРЕГОРОДКАМИ

**Ковалев В.А.**

КПИ им. Игоря Сикорского, г. Киев, Украина

***Аннотация:** Изучение околоземного пространства в последнее время получило многочисленные практические приложения. Кроме обширных географических, геологических, метеорологических и других научных исследований космические аппараты (КА), выводимые на околоземную орбиту, позволяют установить разветвленные и быстродействующие телекоммуникации и элементы мобильной связи и т.д. В материале приводятся результаты моделирования с помощью метода конечных элементов замкнутых течений в ограниченных объемах с демпфирующими перегородками, приведены поля скоростей и вторичных течений при обтекании перегородок.*

***Ключевые слова:** демпфирующие перегородки, метод конечных элементов, математическое моделирование, замкнутый объем*

Математическое моделирование замкнутых потоков в резервуарах КА, применяемое для определения силовых воздействий со стороны жидкого топлива, например, течений вязкой жидкости в ограниченных объемах, основывается, как правило, на использовании полных уравнений Навье-Стокса, выраженных в соответствующих координатах, например, для течений в сферических резервуарах применяются сферические координаты  $(R, \theta, \varphi)$ . С учетом граничных условий прилипания жидкости на стенках и нулевых скоростей на оси вращения резервуара [1], а также твердотельного распределения скорости в начальный момент времени течения во всем пространстве сосуда можно рассматривать нелинейную модель нестационарного распределения скоростей, давлений и круговых моментов вязкого трения жидкости о стенки и динамического воздействия на внутренние перегородки.

Важную роль в распределении поля скоростей и силовых влияний в потоке играют направляющие аппараты в виде системы жестких сплошных или проницаемых перегородок, которые способствуют более точному определению силовых воздействий на стенки и другие внутренние конструкции резервуара.

Кроме силовых влияний жидкости на плоскости перегородок, возникающие при этом вихревые и циркуляционные течения на кромках и в спутном следе образуют сложную систему вторичных течений с нелинейным распределением скорости и полей давлений, которые позволяют более точно прогнозировать эффективные компенсационные мероприятия для демпфирования возмущений со стороны жидкости.

Задачей настоящего исследования является имитационное моделирование влияния направляющих аппаратов в виде системы жестких радиальных перегородок, расположенных в характерных точках резервуара на инерционные осесимметричные течения вязкой несжимаемой жидкости [2].

Основными критериями оценки влияния перегородок на течения жидкости представляются известные и специально разработанные числа подобия, например, числа Рейнольдса, Россби, Струхала и другие. Определение с их помощью нестационарной картины распределения скоростей непосредственно около перегородок и в свободном пространстве течения позволяет установить структуру характерных слоев движущейся жидкости в баках с различными вариантами перегородок.

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 [3].

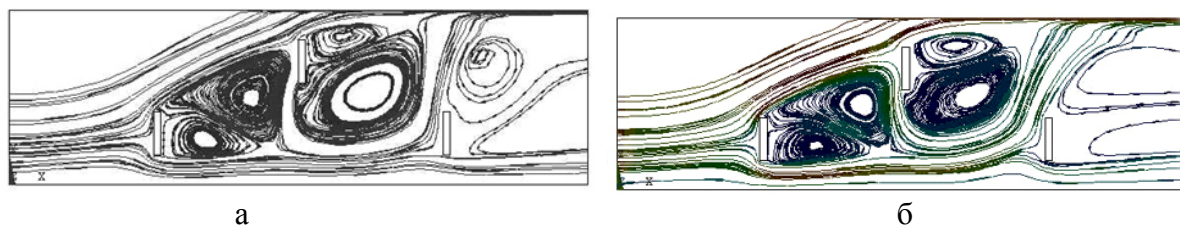


Рис.1. Структура вихрей в каскадных перегородках: а – Re=650; б – Re=810

Рассмотрим формирование течения вблизи нижней горизонтальной стенки сферы, свойства которого подобны вращению жидкости около неподвижного диска [162, 203] и приведены в Разделе 1 на рис.1.9,б. Интегральную оценку силы вязкого трения можно представить в виде

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

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 Г.Шлихтингом [3].

Проведем анализ сил, влияющих на формирование инерционного осесимметричного течения в сфере. Уравнения Навье-Стокса для вращающе-гося 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 уравновешиваются 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 (3.18) 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 [4] силы вязкого трения жидкости о стенки пропорциональны

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

где  $\delta$  – толщина пристенного течения.

Приведенный характер распределения сил в затухающем течении в сфере, обуславливает возникновение циркуляционных течений даже при малых числах Рейнольдса. Как показано на рис.2, имеет место иницированная 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 пристенных областях [4].

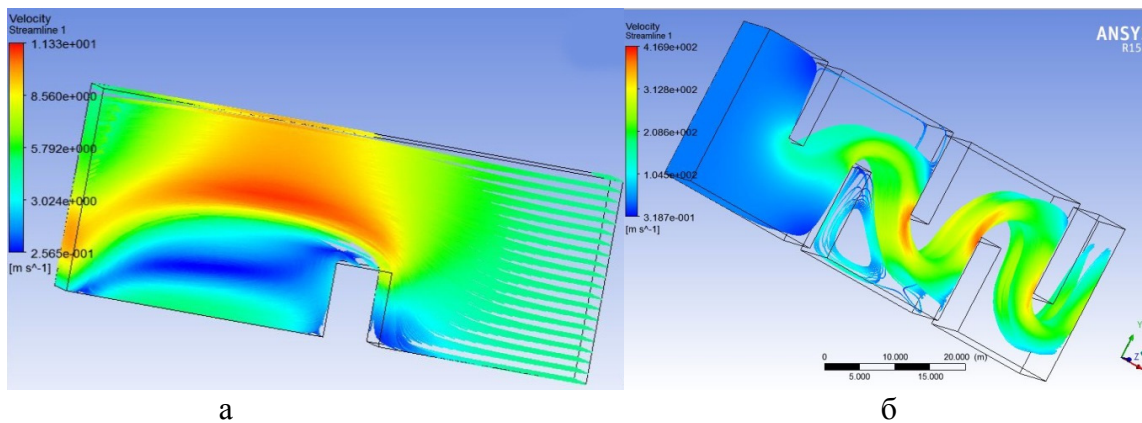


Рис.2. Трехмерные изображения обтекания перегородок: а – одиночной прилегающей,  $Re=650$ ; б – каскадной прилегающей,  $Re=810$

Изменение коэффициента проницаемости перегородки  $\eta$  оказывает некоторое влияние только в начальной стадии инерционного течения, когда велики градиенты окружной скорости в спутном следе и около стенки. В заключительной же стадии течения, при больших значениях времени  $T$  процесс облитерации отверстий перфорации заметно снижает эффект проницаемости перегородок и параметр  $\eta$  слабо влияет на распределение скорости во всех характерных зонах течения.

Анализ результатов экспериментальных измерений позволил сделать вывод о достаточной сложности картины распределения скоростей при течении вязкой несжимаемой жидкости в ограниченных объемах различной геометрии с внутренними перегородками. Это, в свою очередь, необходимо учитывать при составлении номограммы силовых воздействий, которая вводится в бортовой компьютер системы стабилизации космического аппарата для оптимизации компенсационных мероприятий при его орбитальном движении.

#### Список литературы:

1. Колесников К.С. Динамика ракет [Текст] / К.С. Колесников. - М.: Машиностроение, 1980. - 316 с.
2. Микишев Г.Н. Экспериментальные методы в динамике космического аппарата [Текст] / Г.Н.Микишев. - М.: Машиностроение, 1978. - 247 с.
3. Ковалев В.А. Влияние внутрибаковых перегородок на течение жидкого топлива в баках космического аппарата [Текст] / В.А.Ковалев // Вестник Нац. техн. ун-та Украины «КПИ», Машиностроение, 2006. - № 48. - С.73-79
4. Ковалев В.А., Определение гидродинамического сопротивления стабилизаторов в топливных баках космического летательного аппарата [Текст] / В.А.Ковалев // Вестник Нац. техн. ун-та Украины «КПИ», Машиностроение, 2002.-вып.42,Т.1.-С.107-111.