

УДК 629.74 : 532.53

В.А. КОВАЛЕВ

Национальный технический университет Украины «КПИ», Киев, Украина

ОСОБЕННОСТИ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ СКОРОСТЕЙ В ОСЕСИММЕТРИЧНЫХ ТЕЧЕНИЯХ С ПЕРЕГОРОДКАМИ

Представлены результаты измерений полей скорости течений вязкой несжимаемой жидкости в ограниченных объемах с радиальными жесткими пристеночными перегородками. Проведен послойный анализ распределения скоростей течений, характерных зон – пристеночной, в спутном следе за перегородкой, в окрестности внутренних кромок перегородок. Установлено влияние геометрии перегородок на структуру циркуляций в сосудах. Определена структура и характер изменения во времени внутренних осесимметричных течений с перегородками, по которым можно количественно установить круговых моментов воздействия на жидкость.

Ключевые слова: вязкая жидкость, стабилизирующие устройства, числа Рейнольдса, радиальные перегородки, силовые влияния

Введение

При движении тел с жидкостью, например, автомобильных и железнодорожных цистерн, судов-танкеров, космических орбитальных модулей и других объектов жидкость способна оказывать сильное влияние на стенки сосудов, вызывая неустойчивость и даже аварийные ситуации на борту. Наиболее эффективными средствами силового воздействия на неконтролируемые течения жидкости с точки зрения массы и габаритов представляются внутренние жесткие перегородки различной геометрии и расположения в резервуарах [1, 2], пример которых приведен на рис. 1.

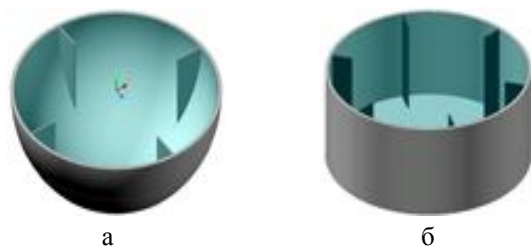


Рис. 1. Внутренние радиальные пристеночные перегородки: а – 4-элементная, б – 6-элементная, в сферическом и цилиндрическом резервуарах

Одним из наиболее перспективных направлений экспериментальных и теоретических исследований гидромеханических явлений при подобных течениях в последнее время является изучение гидродинамических полей в резервуаре и на их базе определение системы силовых влияний на инерционные течения жидкости. Определение картины распределения скоростей и давлений в потоке жидкости позволит уста-

новить величины и направления круговых моментов, которые, в свою очередь, можно ввести в бортовой компьютер и оптимизировать компенсационные мероприятия по стабилизации движения объектов с жидкостью.

1. Постановка задачи исследований

Задачей настоящего исследования является экспериментальное определение влияния внутренних стабилизирующих устройств (ВСУ) в виде жестких радиальных перегородок на течения вязкой несжимаемой жидкости в ограниченных объемах. Определение характера изменения скоростей при инерционном вращении жидкости после резкой остановки оболочки во времени позволяет определить параметры эффективных компенсационных воздействий на возмущения со стороны жидкого топлива в виде круговых моментов, которые реализуются, как правило, посредством включения двигателей системы автоматической стабилизации космического аппарата (КА) [2].

Основными критериями оценки влияния перегородок на течения жидкости представляются известные и специально разработанные числа подобия, например, числа Рейнольдса, Россби, Струхалья 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. С помощью этих параметров, в свою очередь, можно установить особенности их влияния на инерционные течения при различных

числах подобия и распространить результаты физического моделирования течений на реальные конструкции и режимы движения объектов с жидкостью. Основным числом подобия представляется центробежное число Рейнольдса, построенное по величинам начальной угловой скорости резервуара Ω_0 , расстояния до оси вращения R и кинематического коэффициента вязкости жидкости ν

$$Re = \Omega_0 \cdot R_i / \nu.$$

В качестве базовых приняты конструкции радиальных перегородок, примыкающих к внутренним боковым стенкам модельного сосуда (рис.2,а), которые являются штатными устройствами в топливных резервуарах КА [1, 2]. Это позволяет принять за основу результаты измерений окружной компоненты скорости, полученные при моделировании течений на специально разработанных экспериментальных стендах [3, 4] при измерениях полей скоростей и давлений в сравнении с данными измерений других вариантов конструкций.

Модельная отработка рассматриваемых конструкций ВСУ в сферической и цилиндрической моделях сосудов проводилась в диапазоне начальных чисел Рейнольдса $Re_0=700\dots12500$ и чисел Струхала $Sh=0\dots32$. При использовании штатной конструкции ВСУ, изображенной на рис.2,а, наблюдалась исходная картина распределения слоев осесимметричного течения. Зона 1 характеризовала квазитвердую область течения, на которое не распространяется влияние перегородок. Эта зона представляется достаточно устойчивой, в которой в начальные моменты времени профили окружной скорости u зависят линейно от расстояния R_i

$$u = \Omega_0 \cdot R_i.$$

2. Анализ результатов измерений окружной компоненты вектора скорости жидкости

Анализируя результаты измерения поля скоростей можно установить, что для штатной конструкции размеры промежуточной зоны, как правило, составляют $R = 0,73\dots0,8$, она примыкает к внутренним кромкам перегородок и служит некоей переходной областью между зоной 1 и спутным следом за перегородкой (зона 3). В этой области имеет место диффузия внутренней границы спутного следа за перегородкой и распространение циркуляций к оси вращения, инициируемых внутренними кромками перегородок. По ширине зоны 2 можно установить влияние перегородки на квазитвердую зону 1.

Наиболее характерной для осесимметричного течения представляется зона 3, обозначающая спут-

ный след за плоскостью перегородки. Этот слой течения подвергается сильному влиянию со стороны перегородки и от ее размеров и особенностей формирования поля скорости зависит эффективность влияния ВСУ на течение в целом. При этом существенное влияние на течение в зоне 3 оказывает коэффициент проницаемости η , представляющий собой отношение суммарной площади отверстий перфорации $S_{отв}$ и общей площади перегородок S

$$\eta = S_{отв} / S,$$

так как при использовании перфорированных перегородок можно регулировать как ее размеры, так и характер распределения скоростей в пределах этой области. Кроме того, на ширину этой области течения сильно влияет пристеночное заторможенное течение (зона 4).

Динамика геометрии характерных зон во времени течения представлена на рис.3, где в процентном соотношении к радиусу сосуда в начальные моменты времени процесса ($T = 0,42\dots2,57$) ширина зон составляла, например, 1 - 76%, 2 - 3%, 3 - 20%, 4 - 1% соответственно. С возрастанием времени затухания скорости ($T=2,57\dots11,45$) и увеличением толщины пристеночного течения $\delta = 0,098$ в зоне 4, область спутного следа за перегородкой (зона 3) смещается к оси вращения, причем величины скоростей в следе заметно уменьшаются. Эта характеристика инерционного периферийного течения вызвана достаточно сильным влиянием на течение в зоне 3 вязкой диффузии со стороны зоны 4.

Таким образом, как видно из рис.4,б, в основной стадии инерционного течения наблюдается следующее распределение параметров зон: 1 - 66%, 2 - 9%, 3 - 17%, 4 - 8%. В заключительной стадии течения ($T=15\dots27$) имеет место следующее зонное распределение: 1 - 57%, 2 - 23%, 3 - 7%, 4 - 13%. Увеличение времени и распространение влияния вязкости на большую часть зоны 3, приводит к снижению эффективности ее влияния. При этом возрастает влияние переходной зоны 2 на квазитвердую область течения, размеры которой в течение периода затухания скорости также уменьшаются на 30...35%, а габариты зоны 3, а, следовательно, влияние на инерционное течение, уменьшаются почти в 3 раза.

По результатам измерений окружной компоненты скорости в зазоре можно исследовать структуру слоев в сосуде с отстоящими перегородками [3, 4]. Особенности их распределения в начальной стадии ($T=0,42\dots2,57$) осесимметричного течения, приведенные на рис.4, заметно отличаются от случая примыкающей перегородки возникновением второй переходной зоны 2*, структура которой аналогична конфигурации зоны 2: 1 - 68%, 2 - 3%, 3 - 20%, 2* - 9% и 4 - 1%.

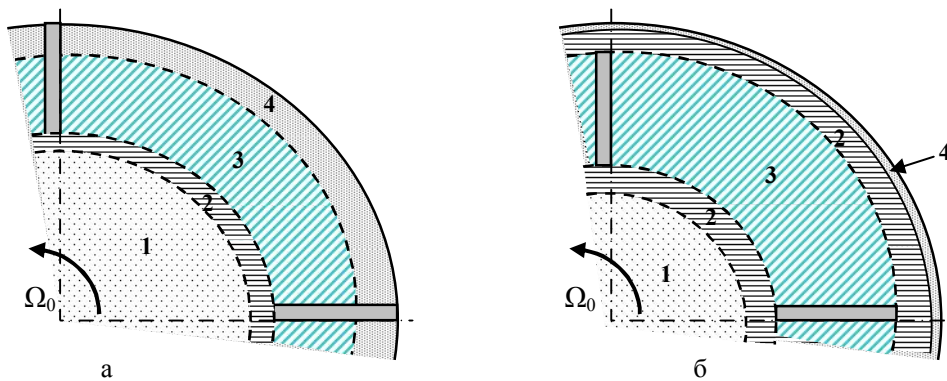


Рис. 2. Характерные зоны течения в цилиндре со сплошными перегородками: а – примыкающими; б – отстоящими: 1 – квазитвердая область; 2 – переходная зона; 3 – спутный

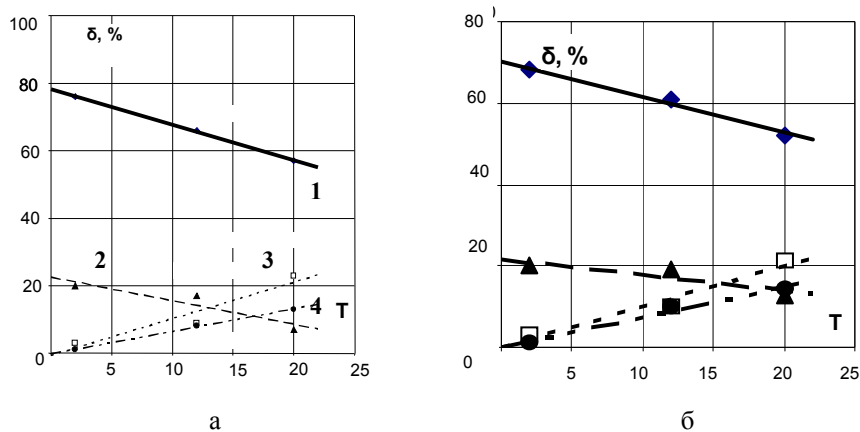


Рис. 3. Динамика послойной структуры течения во времени в сфере со сплошными перегородками при $Re_0=6350$: а – примыкающая; б – отстоящая

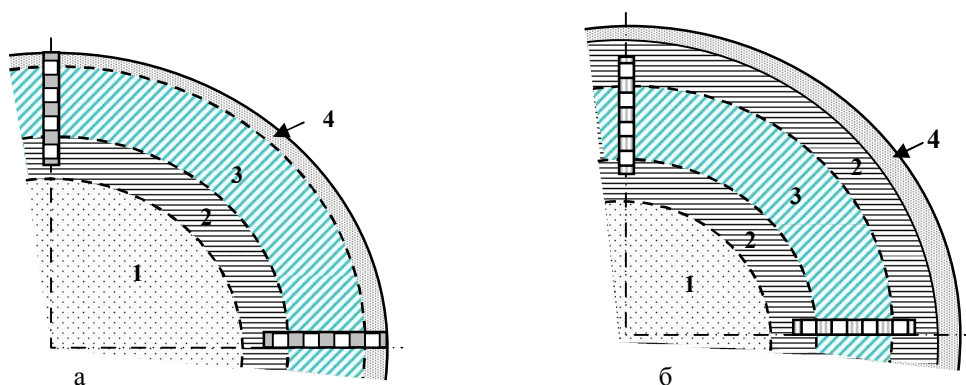


Рис. 4. Характерные зоны течения в цилиндре с перфорированными перегородками: а – примыкающими; б – отстоящими: 1 – квазитвердое ядро; 2 – переходная зона; 3 – вторичные течения за перегородками; 4 – пристеночное течение

Как видно из рис. 4, в период развития пристеночной заторможенной области достаточно быстро ($T = 2,57...11,45$) зона 4 охватывает пространство в зазоре, распространяясь на зону 2*. При этом зона 2

почти не изменяет свои размеры и достаточно слабое влияние на зону 1, где располагается квазитвердое ядро течения. Основные параметры характерных зон будут распределяться следующим образом: 1 – 61%,

2 – 10%, 3 – 19%, 4 – 10%. А в заключительной стадии инерционного течения ($T=15\dots27$) возникает следующее расположение зон:

1 – 52%, 2 – 21%, 3 – 13%, 4 – 14%.

Динамика развития рассматриваемых зон течения представлена на рис. 5 и свидетельствует об уменьшении примерно на 10...12% радиуса квазитвердой области (зона 1), причем характер изменения зон 2 и 3 изменяется немного за исключением отсутствия влияния на зону 3 заторможенного течения в зоне 4. Таким образом, экспериментально установлено, что конструкция ВСУ с отстоящими перегородками более эффективно влияет на формирование и развитие во времени зоны 1 квазитвердой области течения.

В начальной стадии течения, когда велико влияние инерционных свойств жидкости, имеет место следующее процентное распределение: 1 - 77%, 2 – 9%, 3 – 12%, 4 – 2%. При этом размеры переходной зоны 2 значительно больше, чем в случае с непроницаемой примыкающей перегородкой (рис.1), что можно объяснить распространением ее влияния на спутный след за перегородкой.

3. Силовые влияния проницаемых перегородок на течения в ограниченном объеме

Следует отметить, что пристеночное заторможенное течение (зона 4) в начальной стадии не отличается от случая сплошной перегородки, что свидетельствует о слабом влиянии проницаемости в области течения у стенки модельного сосуда. По аналогии с предыдущими случаями, динамика инерционных слоев течения в основной стадии представлена на рис.5 и составляет такую пропорцию: зона 1 – 65%, 2 – 12%, 3 – 15% и 4 – 8%, а в заключительный период, когда градиенты скоростей малы и вязкие свойства течения более выражены, зона 1 составляет 54%, 2 – 21%, 3 – 13% и 4 – 12%. Графическое представление результатов свидетельствует о почти линейном развитии послойной структуры течения.

Анализируя полученные результаты распределения слоев в сосуде с перфорированными перегородками и сравнивая их со случаем сплошных конструкций, можно заключить, что характер развития зон 3 и 4 остается почти одинаковым и изменяется лишь во времени. Как оказалось, достаточно большую роль в распределении скоростей играет переходная зона 2, оказывающая влияние на квазитвердую зону 1.

В результате именно зона 2, увеличиваясь по толщине в 2,2 раза, почти на 40...45% уменьшает размеры зоны 1.

При рассмотрении особенностей обтекания отстоящей проницаемой перегородки, например, в цилиндре, проводилось сравнение с соответствующими данными для сплошной перегородки [3, 4]. Для начальной, основной и заключительной стадий течения имеет место следующее распределение параметров, которые обобщены в графическом виде на рис. 5:

$T = 0,42\dots2,57$ 1 зона – 73%, 2 – 7%, 3 – 11%, 2* - 8% и 4 - 1%;

$T = 2,57\dots11,45$ 1 зона – 62%, 2 – 14%, 3 – 15%, 2* - 3% и 4 – 9%;

$T = 15\dots27$ 1 зона – 49%, 2 – 22%, 3 - 16% и 4 – 13%.

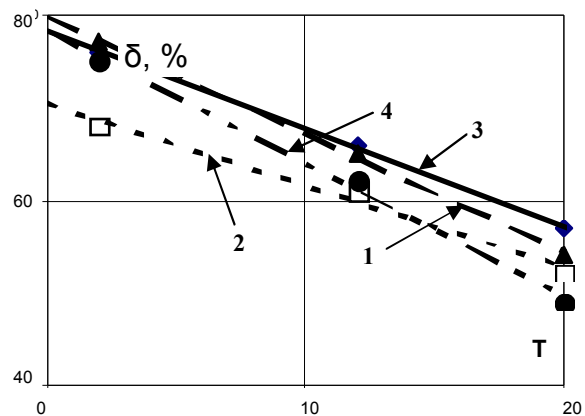


Рис. 5. Сравнение влияния конструкций и расположения радиальных перегородок в потоке на размеры квазитвердой области (зона 1):

- 1 – примыкающая проницаемая; 2 – отстоящая сплошная; 3 – примыкающая сплошная; 4 – отстоящая проницаемая

В данном случае следует отметить достаточно продолжительное существование внешней переходной зоны 2*, поскольку она находится на большом расстоянии от стенок, а значит, пристеночное заторможенное течение слабо влияет на эту зону. Возникающие на кромках проницаемых перегородок вихревые структуры диффундируют как в область спутного следа за перегородкой, так и в сторону стенок модельного сосуда, существенно затухая только в заключительной стадии нестационарного течения.

Что касается структуры квазитвердой области течения, обозначенной зоной 1, следует отметить четко выраженную динамику снижения ее размеров благодаря распространению влияния перегородок, в частности, вихревых структур из зоны 2. В заключительной стадии переходного течения, при значительно более сильном влиянии сил вязкости в инерционном течении, зона 1, где это влияние еще слабое, составляет менее половины расстояния до оси вращения, по сравнению со штатной примыкающей сплошной конструкцией радиальной перегородки.

Выводы

Сравнение полученных данных относительно квазитвердой области течения позволяет сделать вывод о более сильном влиянии на нее проницаемых отстоящих перегородок, у которых характер затухания скорости происходит намного быстрее, чем в отстоящей сплошной конструкции. Изменение коэффициента проницаемости перегородки η 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 η слабо влияет на распределение скорости во всех характерных зонах течения.

Анализ результатов экспериментальных изменений позволил сделать вывод о достаточной сложности картины гидродинамических полей 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 сис-

темы стабилизации космического аппарата для оптимизации компенсационных мероприятий при его орбитальном движении.

Литература

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», Серия «Машиностроение»: сб. науч. тр. – 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», Серия «Машиностроение»: сб. науч. тр. – 2002. – Вып. 42, Т. 1. – С. 107 – 111.

Поступила в редакцию 25.05.2012

Рецензент: д-р техн. наук, проф. О.М. Яхно, Национальный технический университет Украины «Киевский политехнический институт», Киев, Украина.

ОСОБЛИВОСТІ РОЗПОДІЛУ ШВИДКОСТЕЙ У ВІСЕСИМЕТРИЧНИХ ТЕЧІЯХ З ПЕРЕГОРОДКАМИ

В.А. Ковальов

Представлено результати вимірювань полів швидкості течій в'язкої нестисливої рідини в обмежених об'ємах з радіальними жорсткими пристінними перегородками. Проведено пошаровий аналіз розподілу швидкостей течій, характерних зон – пристінної, у супутньому сліді за перегородкою, в околі внутрішніх крайок перегородок. Встановлено вплив геометрії перегородок на структуру циркуляцій у посудинах. Визначено структуру і характер зміни за часом внутрішніх вісесиметричних течій з перегородками, за якими можна кількісно встановити крутні моменти дії на рідину.

Ключові слова: в'язка рідина, стабілізуючі пристрої, число Рейнольдса, радіальні перегородки, силові впливи.

THE VELOCITY DISTRIBUTION FEATURES IN AXISYMMETRIC FLOWS WITH BAFFLES

V.A. Kovalev

The results of measurements are presented speed fields of flows of viscous incompressible fluid in the limited volumes with radial hard nearwall baffles. The layer analysis of distributing of flow speeds is conducted, characteristic areas – nearwall, after the baffle, near the internal edges of baffles. Influence of geometry of baffles is set on the structure of circulations in vessels. A structure and character of time-history is certain internal axisymmetric flows with baffles in which it is possible in number to set circular moments of affecting liquid.

Key words: viscous fluid, stabilizing devices, Reynolds number, radial baffles, dynamic affects.

Ковалев Василий Анатольевич – д-р техн. наук, доц., доц. каф. прикладной гидроаэромеханики и механотроники Национального технического университета Украины «Киевский политехнический институт», Киев, Украина, e-mail: vaskovalev@gmail.com.