

3. Вывод

Сопоставление результатов численного исследования с результатами экспериментальных данных [1] и

теоретического расчета свидетельствуют о достаточно хорошей сходимости, что говорит о возможности использования данного метода расчета для дальнейших исследований.

Литература

1. Шлихтинг Г. Теория пограничного слоя / Г.Шлихтинг – М.: «Наука», 1969. – 742с.
2. Лойцянский Л.Г. Ламинарный пограничный слой / Л.Г. Лойцянский – М.: Наука, 1962. – 478с.
3. Menter F.R. Two-equation eddy viscosity turbulence models for engineering applications// AIAA J.- 1994. - 32, №11. - P.1299-1310.

Наведені основні поняття, основи фізичних явищ в замкнутих осесиметричних течіях, а також результати теоретичних та експериментальних досліджень поведінки в'язкої нестисненої рідини у сферичних резервуарах. Проводиться аналіз актуальних швидкостей течій і сил, що діють в течіях

Ключові слова: осесиметричні течії, циркуляційні структури, швидкості рідини

Приведены основные понятия, основы физических явлений в замкнутых осесимметричных течениях, результаты теоретических и экспериментальных исследований поведения вязкой несжимаемой жидкости в сферических сосудах. Проводится анализ актуальных скоростей течений и действующих в течениях сил

Ключевые слова: осесимметричные течения, циркуляционные структуры, скорости течения

The concepts, the basis of the physical phenomena in axisymmetrical flows and results of theoretical and experimental researches of viscid incompressible fluid, are resulted in the spherical tanks. The analysis of actual flow velocities and forces which acts in flows are presented

Keywords: axisymmetric flows, circulation structures, flow velocities

УДК 532.53

ФИЗИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ИНЕРЦИОННЫХ ТЕЧЕНИЙ В ЗАМКНУТЫХ ОБЛАСТЯХ ПОДВИЖНЫХ ОБЪЕКТОВ

О.М. Яхно

Доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой

Кафедра прикладной гидроаэромеханики и механотроники

Национальный технический университет Украины «Киевский политехнический институт» пр. Победы, 37, г. Киев, Украина, 03056

Контактный тел.: (044) 406-86-44, (050) 351-69-67

E-mail: vaskov@ukr.net

В.Д. Акиншин

Доктор физико-математических наук, профессор, главный научный сотрудник

Академия пожарной безопасности имени Героев Чернобыля Министерства по чрезвычайным ситуациям Украины

ул. Оноприенко, 8, г. Черкассы, Украина, 18034
Контактный тел.: (0472) 55-09-49, 067-316-15-08

1. Введение

Интенсивное развитие транспортной техники и объемов перевозок в последние годы обуславливает необходимость исследований динамики объектов, содержащих большие количества жидкости. Например, самолет, автомобильная и железнодорожная цистерны, судно-танкер, а также объекты ракетной и космической техники, являются классическими телами,

содержащими емкости с жидкостью. Как известно, в последнее время участились аварийные ситуации, связанные с подобными телами, содержащими большие количества жидкого продукта, например, разливы нефти при катастрофах танкеров у берегов некоторых государств, утечки жидкого фосфора при опрокидывании железнодорожных цистерн и другие. Возникающие при этом чрезвычайные ситуации, сопровождающиеся, как правило, воспламенением вытекших из

емкостей продуктов (рис. 1), требуют немедленного реагирования со стороны соответствующих пожарных, экологических и медицинских организаций.

Однако, многих аварийных ситуаций, связанных с транспортированием жидких продуктов, можно было бы избежать, получив точные количественные оценки динамических воздействий со стороны жидкости на стенки емкостей и внутренние конструкции стабилизирующих устройств, которые, как правило, применяются во многих подвижных объектах. Подобные характеристики можно распространить на большинство несущих тел, например, на танкеры со сферическими конфигурациями нефтяных танков (рис. 2).



Рис. 1. Действия пожарного подразделения по тушению пожара при аварии железнодорожного состава с цистернами, заполненными жидким фосфором

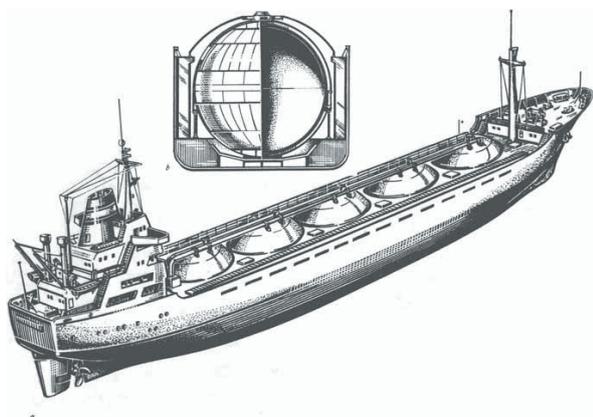


Рис. 2. Конструкция наливного судна со сферическими танками для транспортировки сжиженных газов емкостью до 5000 м³

2. Постановка задачи исследования течений в замкнутых областях

Изучению поведения жидкости в замкнутых областях посвящены экспериментальные и теоретические исследования [1,2], где построены физические и математические модели отдельных видов движения жидкости, например, продольных или поперечных колебаний, что позволяет сделать вывод о существенной нелинейности гидродинамических явлений в подвижных объектах с жидкостью. В действительности

же, движение жидкости в реальных условиях гораздо сложнее, так как многие виды движений жидкости могут накладываться друг на друга и оказывать взаимное влияние. Следует отметить, что наиболее характерные особенности рассматриваемых процессов, полученные при физическом моделировании на экспериментальных стендах, позволяют несколько упростить и приблизить к натурным условиям математические модели течений.

Одним из распространенных видов движения жидкости представляется инерционное вращение вокруг одной из осей симметрии резервуара [2], формирующее момент вязкого трения жидкости на стенки и динамическое давление на его внутренние конструкции стабилизирующих устройств. Теоретическому и экспериментальному исследованию такого движения в сферическом сосуде посвящена предлагаемая работа.

Теоретическое решение такой комплексной задачи, сочетающей с одной стороны аспекты внешнего течения с обтеканием препятствия, а с другой – внутреннего течения с криволинейными границами, весьма затруднительно. Это требует постановки корректных граничных и начальных условий, а также дополнительных условий замыкания уравнений движения, поэтому физическое моделирование оправдано еще и с той точки зрения, что позволит физически более полно представить характер и особенности такого течения. В результате, могут быть скорректированы или упрощены граничные условия, что в результате упростит теоретическое исследование.

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

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

где ρ – плотность жидкости, Ω_0 – угловая скорость сосуда, R – радиус сферического сосуда.

Однако, около стенки градиенты скорости малы и направленный к оси вращения радиальный градиент давления, который при твердотельном движении жидкости и сосуда может равняться 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] в задаче о вращении жидкости около неподвижного диска. Проведем анализ сил, влияющих на формирование инерционного осесимметричного течения в сфере. Уравнения движения вязкой несжимаемой жидкости в форме 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 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

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

Таким образом, уравнение (4) можно записать в виде

$$\frac{\partial u}{\partial t} + u \nabla u = -\frac{1}{\rho} \nabla p - 2 \cdot \Omega \times u_R + \nu \nabla^2 u \quad (5)$$

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

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

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

где δ - толщина пристеночного течения. Таким образом, круговые возмущающие моменты со стороны движущейся жидкости, равные произведению силы на радиус внутренней поверхности сферы, можно выразить таким образом

$$M_{\text{кр}} = F_{\text{вяз}} R \approx \frac{\rho \cdot \nu \cdot u \cdot R^3}{\delta} \quad (7)$$

где ν - кинематический коэффициент вязкости жидкости, δ - толщина пристеночного течения, u - измеренная составляющая вектора скорости течения жидкости.

3. Анализ результатов экспериментов

Эксперименты проводились на кафедре прикладной гидроаэромеханики и мехатроники Национального Технического Университета Украины "Киевский политехнический институт" с помощью гидродинамического стенда типа "центрифуга" с возможностью резкого старта, торможения и плавного регулирования частоты вращения в диапазоне угловых скоростей $\Omega = 0 \dots 25,1$ 1/с (0...4 об/с). Для испытаний использовалась модель сферы диаметром $d = 0,3$ м, изготовленная из гладкого и прозрачного органического стекла толщиной 6 мм.

Это позволяет допустить, что модель является жесткой и деформациями из-за влияния центробежных сил инерции, действующих в жидкости, можно пренебречь.

На рис. 3 представлены профили скорости основного потока u в зависимости от безразмерного радиуса цилиндра R . По неравномерно затухающим участкам кривых можно достаточно точно установить наличие пристеночных заторможенных течений, на которые значительное влияние оказывает пограничный слой на стенках емкости. Однако, деформации эпюр скорости сглаживаются уже при $T = 5,5$ и профиль скорости становится параболическим. Учитывая то, что в инерционном потоке при наличии стабилизатора к силам вязкого трения между слоями жидкости присоединяются силы реакции перегородок на динамическое влияние потока, можно сделать вывод о своеобразном наложении особенностей обтекания перегородок на классическую задачу об осесимметричных внутренних течениях.

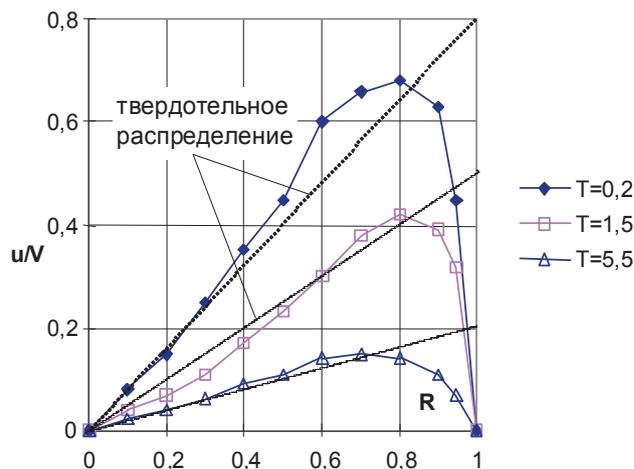


Рис. 3. Профили окружной компоненты вектора скорости при инерционном течении жидкости в сфере после резкой остановки ее вращения

Полученные экспериментальные результаты могут служить эмпирическим определением величин моментов вязкого трения жидкости о стенки и динамического давления инерционного потока на внутренние стабилизаторы в виде наборов радиальных и кольцевых перегородок. При этом важную роль играет толщина пристеночного заторможенного течения, которую можно установить в результате исследования в тонких сферических слоях, по эмпирически установленным величинам коэффициентов гидродинамического сопротивления C_m , например, для тонкого ламинарного слоя

$$C_m = 8 \cdot \pi (1 + \beta) \cdot Re^{-1} / 3\beta$$

где $\beta = (R_2 - R_1) / R_1$; R_1, R_2 - радиусы соответственно внутренней и внешней сферических поверхностей. При развитии такого течения во времени поверхность внутренней сферы ограничивает развитие вторичных течений в радиальном направлении, при этом влияние вязкости на распределение радиальной и меридиональной составляющих скоростей достаточно велико.

В случае инерционного движения жидкости в сфере сдвиговые пристеночные заторможенные слои течения, кроме продвижения в меридиональной пло-

скости, могут распространяться и в радиальном направлении. Это вполне согласуется с теорией Х.Гринспена [1], где утверждается, что во многих задачах вязкость жидкости важна только в определенных тонких слоях, и то это служит основанием для математических приближений, которые упрощают уравнения движения. Вязкость вынуждает поле скорости в жидкости подчиняться условию непротекания на твердой стенке. Деформация поля скорости происходит внутри очень тонкого вязкого слоя и может приводить к изменениям характеристик потока, сравнимым с их абсолютными значениями скоростей.

ким, то угловой момент кольцевой области течения, которое перемещается внутрь области для замещения жидкости, проникающей в экмановский слой, сохраняется и кольцевая область должна приобретать большую угловую скорость. Меридиональная составляющая скорости, обусловленная пристеночным течением, имеет порядок $Re^{-1/2}$ и разные знаки на двух границах. Ее вертикальный градиент также имеет порядок $Re^{-1/2}$. Следовательно, относительная меридиональная завихренность может только увеличиваться за безразмерное время, приблизительно равно $Re^{1/2}$.

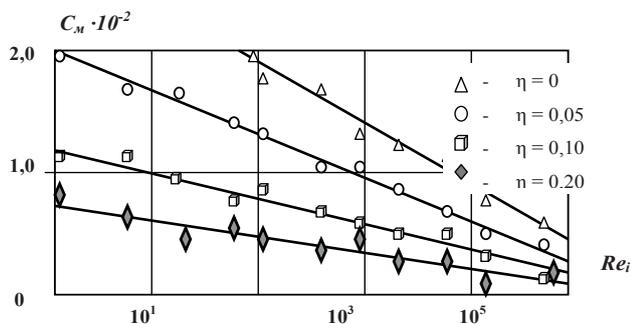


Рис. 4. Зависимость коэффициента гидродинамического сопротивления C_m от актуального числа Рейнольдса при различных степенях перфорирования сегментной перегородки ВБС

Так как внутреннее течение вне пристеночных заторможенных течений является практически невяз-

4. Выводы

По результатам экспериментальных и аналитических исследований можно сделать вывод о том, что инерционные течения вязкой несжимаемой жидкости оказывают существенное влияние на стенки содержащих ее сосудов и могут являться источником неустойчивости объекта с жидкостью в период криволинейного движения, например, при резких поворотах несущего тела. Это приводит к аварийным ситуациям, которые можно предотвратить с помощью установки специальных конструкций внутренних стабилизирующих устройств с перфорированными плоскостями. Кроме того, при соблюдении скоростного режима движения объектов с жидкими грузами следует учитывать дестабилизирующее действие центробежных сил инерции на криволинейных траекториях.

Литература

1. Гринспен, Х. Теория вращающихся жидкостей [Текст] / Х. Гринспен. - М.: Гидрометеиздат, 1975. - 304 с.
2. Nakabayashi, K. Friction moment of flow between two concentric spheres, one of which rotates [Текст] / K.Nakabayashi // Transactions of the ASME, ser.1. - 1978. - vol.100, № 1. - p.97-106.
3. Шлихтинг, Г. Теория пограничного слоя [Текст] / Г.Шлихтинг. - М.: Наука, 1974. - 711 с.
4. Яхно О.М. Особенности циркуляционных течений жидкого топлива в баках космического аппарата / В.Ковалев, О.Яхно // Hydraulics & Pneumatics, Wroclaw, Poland, Сб. трудов конференции. – 2009. - С. 296-302.