

## **ПРОТИВОФАЗНЫЕ КОЛЕБАНИЯ ПСЕВДОЗВУКОВЫХ ПУЛЬСАЦИЙ ПРИСТЕНОЧНОГО ДАВЛЕНИЯ НА КОРМОВОЙ СТЕНКЕ ГЛУБОКОЙ СФЕРИЧЕСКОЙ ЛУНКИ**

**В. А. ВОСКОБОЙНИК, А. В. ВОСКОБОЙНИК**

*Институт гидромеханики НАН Украины, Киев, Украина*

The results of experimental researches of the field of wall-pressure fluctuations which is formed at the turbulent flow inside the deep spherical dimple are presented. The visual features of vortex flow are demonstrated and the regimes at which symmetric and asymmetric large-scale vortices are generated inside the spherical dimple are indicated. The research results of the wall-pressure fluctuation field inside the dimple are measured by the miniature piezoceramic and piezoresistive sensors and it is found out the antiphased oscillations of the pressure field in the places of forming and break up of the vortex systems outside from the dimple. The coherent asymmetric inclined vortices are formed inside the dimple at the turbulent flow and the vortices are quasiperiodic switched from one part of the dimple in other. It's discovered that break up angle of the asymmetric large-scale vortices outside the dimple is increased with growth of Reynolds number.

### **ВВЕДЕНИЕ**

Известно, что интенсивные пульсации пристеночного давления могут приводить к генерации значительного гидродинамического шума и вибраций. Ситуация усложняется и становится серьезной если пульсации давления имеют частоты и волновые числа, соответствующие резонансным модам колебаний конструкций и оборудования. Глубокие выемки и углубления на обтекаемой поверхности являются источниками интенсивных пульсаций скоростей и давлений, которые гидроакустическими приемниками воспринимаются как гидродинамический шум. Этот шум, имея акустическую и псевдозвуковую природу, обуславливает не только высокую акустическую нагрузку на окружающую среду, но и вызывает значительные вибрации обтекаемой поверхности. Отрывные течения в углублениях характеризуются сложным процессом с обратной связью. Конвективные неустойчивости, зарождаясь при отрыве пограничного слоя с передней стенки лунки, растут, насыщая сдвиговый слой, а затем сталкиваются с кормовой стенкой углубления. Петля обратной связи замыкается в соответствие с процессом восприимчивости, в результате чего энергия возмущений трансформируется в волну неустойчивости на передней отрывной кромке лунки [1, 2]. Как результат, генерируются мощные частотные тоны внутри лунки и ее окрестности. Изучение и учет полей пульсаций давления и виброакустических характеристик обтекаемых поверхностей имеет большое значение на стадии проектирования и эксплуатации объектов, движущихся в сжимаемой и несжимаемой жидкости.

Сдвиговый слой формирует разделительную линию тока, которая отделяет внутреннее течение в углублении от внешнего течения и заканчивается в застойной точке на кормовой стенке углубления, которая совершает осциллирующее движение, как в пространстве, так и во времени. Высокое давление перед кормовой стенкой углубления и низкое давление позади его передней стенки образуют обратное течение внутри углубления. Оно формирует внутреннее циркуляционное течение в углублении, конфигурация которого зависит от режима течения и от глубины углубления, как



Рис. 1

функція його довжини і ширини. Вихреві структури різних масштабів, генерувані всередині углублень на обтекаємій поверхні, представляють собою не хаотичну групу вихрей, а самоорганізовані вихреві структури, які взаємно координують своє поведіння. Низькочастотні крупномасштабні когерентні вихреві системи, формуються всередині лунки з циркуляційного течення, і мелкомасштабні вихри, образувані всередині сдвигового шару і в місці його взаємодії з кормовою стінкою лунки, викидаються з лунки, приводячи до широкого спектру гідродинамічного шуму з інтенсивними тональними компонентами. Вихреве поведіння течення всередині відкритого углублення залежить в першу чергу від відношення його ширини до глибини, форми углублення і режиму його обтекання. Установлено, що в глибоких сферических углубленнях ( $h/d > 0.2$ , де  $h$  – глибина, а  $d$  – діаметр лунки) при малих швидкостях течення формуються симетричні крупномасштабні вихреві структури, а при високих швидкостях течення (турбулентний режим) всередині лунки генеруються асиметричні вихри, викидавані над кормовою стінкою лунки під кутом (45...65) градусів відносно напрямку потоку.

Ціль нинішніх досліджень – експериментально вивчити особливості формування і розвитку крупномасштабних вихревих структур всередині глибокої сферическої лунки на плоскій поверхні, яка обтекається турбулентним потоком. Визначити поле пульсацій пристіночного тиску, яке генерується псевдозвуковими джерелами, в якості яких виступають вихреві структури.

## 1. ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНА УСТАНОВКА І МЕТОДИКА ДОСЛІДЖЕНЬ

Експериментальні дослідження проводились в вузькому гідродинамічному каналі, що представляє собою плексигласовий канал довжиною близько 1.2 м, шириною 0.2 м і глибиною 0.015 м, фотографія якого представлена на рис. 1а. На дні гідродинамічного каналу зроблено отвір кругового перерізу, куди встановлювався диск діаметром 0.18 м, в центрі якого розташовувалася сферическа лунка діаметром 0.046 м, глибиною 0.012 м і, відповідно, углубленням 0.26. Центр лунки знаходився на відстані порядку 0.6 м від конфузора в осевому перерізі каналу. Всередині і поблизу

сферической лунки были сделаны миниатюрные отверстия диаметром 0.0006 м, через которые подавались красящие вещества при проведении визуальных исследований особенностей формирования вихревого течения внутри лунки. Через эти же отверстия проводились измерения перепада статического давления, возникающего при обтекании плоской поверхности с локальным углублением. Исследования статического давления проводились посредством миниатюрных пьезорезистивных датчиков, у которых на кварцевой мембране методом микроэлектронной техники напылялись электронные элементы, сопротивление которых изменялось под действием приложенных механических напряжений к кварцевой мембране. Такие датчики наряду с повышенным пространственным разрешением (диаметр приемного отверстия около 0.0008 м) обладали невысоким быстродействием (до 200 Гц), что позволяло регистрировать наряду со статистическим давлением его низкочастотные пульсации. Заподлицо с обтекаемой поверхностью лунки и в ее окрестности устанавливались миниатюрные датчики пульсаций пристеночного давления, расположение которых показано на рис. 1б. В исследованиях использовались пьезокерамические датчики пульсаций давления мембранного и стержневого типов. Диаметр чувствительной поверхности датчиков не превышал 0.0016 м, что позволяло регистрировать источники пульсаций пристеночного давления, чья длина волны была более, чем 0.003 м. Датчик № 1 располагался перед сферическим углублением на поверхности стенки канала и регистрировал пульсации пристеночного давления в пограничном слое, не нарушенном углублением. Внутри лунки датчики устанавливались на расстоянии 0.01 м друг от друга, а датчик № 3 располагался в центре лунки на ее дне. Позади сферической лунки датчики находились на удалении 0.015 м друг от друга и первый по потоку ряд датчиков (ближнее поле лунки) находился на расстоянии 0.015 м от кормовой кромки лунки.

В соответствии с разработанной программой исследований структуры вихревого течения внутри сферического углубления и в его окрестности сначала были проведены визуальные исследования. Результаты этих исследований, проведенные для среднерасходной скорости в канале от 0.43 м/с до 1.3 м/с, позволили определить области формирования вихревых структур, оценить их геометрические параметры, направление движения и скорости переноса. Затем в характерных местах развития вихревого течения были спланированы и проведены инструментальные исследования полей пристеночных давлений, изготовлены и установлены узлы крепления датчиков и контрольно измерительной аппаратуры, что дало возможность получить кинематические и динамические характеристики вихревого течения, источников псевдозвукового давления внутри лунки и в ее окрестности.

Инструментальные исследования проводились ансамблем датчиков, которые посредством предварительных усилителей и, по необходимости (малый сигнал), с использованием малошумных усилителей мощности, электрически соединялись с тридцати двухканальным аналогово-цифровым преобразователем, который в виде монтажной платы был установлен в системный блок персонального компьютера. В исследованиях использовался преобразователь фирмы National Instruments, оснащенный пакетом прикладных программ математического моделирования для решения задач технических вычислений MatLab 9.0.

Погрешность измерений интегральных характеристик поля пульсаций пристеночного давления составляла не более 4 %, корреляционных результатов - не более 6 %, а спектральных характеристик – не более 2 дБ в диапазоне частот до 250 Гц с доверительным интервалом 0.95 или  $2\sigma$ .

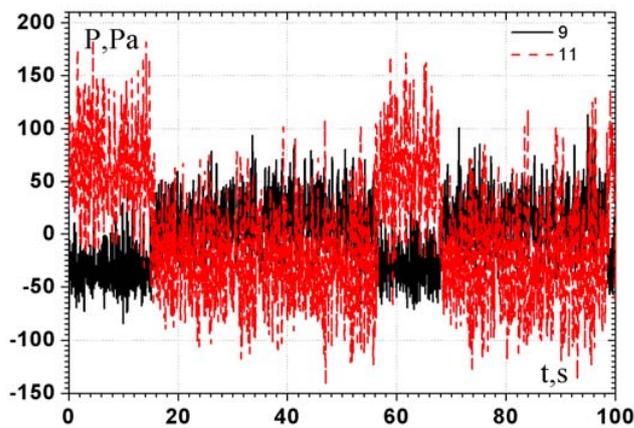


Рис. 2

## 2. РЕЗУЛЬТАТЫ ИЗМЕРЕНИЙ

Подача красящих веществ через отверстия на обтекаемой поверхности сферической лунки и в ее окрестности для различных скоростей течения показала, что перемещение краски внутри лунки и за ней существенным образом зависит от режима течения. Так, для среднерасходной скорости потока в канале  $U=0.43$  м/с, которой отвечает число Рейнольдса, рассчитанное по скорости потока и диаметру лунки,  $Re_d=Ud/\nu=20000$ , перемещение

красящего вещества вдоль лунки и в следе за ней наблюдается симметричным относительно направления потока.

Когда скорость потока в канале составляла 0.86 м/с ( $Re_d=40000$ ) характер перемещения красящего вещества существенно изменился. Во-первых, нарушилась его симметрия относительно направления потока. Во-вторых, выброс чернил из лунки и их вращение внутри лунки стало периодически, а точнее квазипериодически, переключаться из одной части лунки в другую. При этом красящее вещество, поступающее из отверстий на дне лунки и на ее кормовой стенке, перемещается в ту же сторону лунки, над которой наблюдается и выброс чернил из лунки. В то же время из отверстия на передней стенке лунки красящее вещество перемещается в противоположную сторону и это перемещение незначительное. Нахождение красящих веществ в одном из наблюдаемых положений прослеживается в течение около (30...40) с, а затем происходит переключение картины течения на противоположную сторону лунки. Выброс чернил из лунки наблюдается под углом порядка  $\pm 45^\circ$  относительно направления потока.

При среднерасходной скорости течения в канале порядка 1.3 м/с ( $Re_d=60000$ ) перемещение красящих веществ внутри лунки и позади нее качественно похоже предыдущему режиму течения. Но появились и некоторые отличия, выброс красящего вещества наружу из лунки наблюдается под большим углом (порядка  $\pm 60^\circ$ ) к направлению потока. Переключение происходит с большей частотой и чернила в одной из частей лунок для данного режима течения находятся до 30 с.

Следовательно, переключение вихревого течения из одной стороны лунки в противоположную наблюдается для турбулентного течения в канале ( $Re_d \geq 40000$ ). Поэтому исследования поля давлений внутри лунки для переключательного режима течения были проведены для скорости потока 0.86 м/с. Для  $Re_d=40000$  изменения во времени поля пульсаций пристеночного давления, измеренные на боковых сторонах кормовой стенки датчиками № 9 и № 11, показаны на рис. 2. Здесь отчетливо видно, что поля давлений в различных частях кормовой стенки имеют противофазный характер. При этом амплитуда пульсаций давления, измеренная в местоположении датчика № 11, несколько выше, чем на противоположной стороне кормовой стенки. Такие изменения поля давлений обусловлены действием набегающего потока на кормовую стенку лунки, особенностями формирования и развития вихревых структур, которые генерируются внутри лунки, а также их выбросом наружу из сферической лунки углублением 0.26. При ударном взаимодействии вихревых структур сдвигового слоя, который возникает при

отрыве пограничного слоя с передней кромки сферического углубления, с кормовой стенкой образуются интенсивные мелкомасштабные вихри, устремляющиеся внутрь лунки и выбрасываемые наружу из нее. Наряду с этим внутри лунки возникает циркуляционное течение, формирующее крупномасштабную квазиустойчивую вихревую систему. Эта вихревая система, как указывалось, в зависимости от режима обтекания углубления, его формы и геометрических размеров принимает симметричную и асимметричную форму. Так, как показывают многочисленные экспериментальные исследования и численное моделирование вихревого течения, для турбулентного режима обтекания сферической лунки достаточно большого углубления в ней формируется асимметричная вихревая система [1-3]. Эти квазиустойчивые крупномасштабные вихри зарождаются в придонной области лунки ближе к ее передней части. При достижении определенных размеров они выбрасываются наружу из лунки над противоположной боковой кормовой стенкой, формируя наклонную относительно направления течения вихревую систему. Выброс вихревых систем происходит почти периодически, но при достаточно высоких числах Рейнольдса наблюдается существенная хаотизация этого процесса. При проществе ряда выбросов с одной стороны лунки происходит переброс или переключение вихревой структуры на противоположную сторону и начинают формироваться новые наклонные вихревые системы, которые выбрасываются над противоположными боковыми частями кормовой стенки лунки. Как показывают визуальные и инструментальные экспериментальные исследования, а также расчеты, выброс вихревых систем происходит под углом порядка  $\pm(45...60)^\circ$  относительно срединного сечения лунки то с одной, то с другой его стороны. В результате на одной из боковых сторон кормовой стенки лунки, там, где происходит ударное взаимодействие вихревых структур слоя смещения с последней, наблюдаются повышенные уровни пульсаций пристеночного давления. На поверхности противоположной боковой части кормовой стенки лунки, над которой происходит выброс крупномасштабных вихревых структур, уровни пульсаций пристеночного давления несколько ниже, что и показано на рис. 2. Чередувание повышенных и пониженных уровней пульсаций давления показывает, что внутри лунки происходит переключение асимметричных вихревых структур из одной части углубления в противоположную часть. Следует отметить, что процесс переключения носит квазипериодический характер и время нахождения асимметричных вихревых структур в одном из наклонных направлений почти в два раза больше, чем в противоположном. По всей видимости, на такое неравновесное состояние вихревого течения значительное влияние оказывают особенности формирования и эволюции вихревых структур внутри лунки (например, следовая мода колебательного движения вихревых структур, когда происходит выброс очень крупной вихревой системы из лунки, приводящий к существенной перестройке вихревого течения), а также крупномасштабные неустойчивости в набегающем потоке и в пограничном слое, который формируется перед сферическим углублением.

Значения коэффициента пространственно-временной корреляции, измеренные вдоль кормовой стенки сферической лунки, для турбулентного течения, которому отвечает число Рейнольдса  $Re_d=40000$ , представлены на рис. 3. Результаты, показанные на рис. 3а, получены посредством пьезорезистивных датчиков, а данные рис. 3б измерены с помощью пьезокерамических датчиков, обладающих повышенным быстродействием. Оба комплекса измерений показывают, что между датчиками пульсаций давления, которые находятся на противоположных сторонах кормовой стенки относительно ее срединного сечения, наблюдаются противофазные колебания. Этим колебаниям отвечает коэффициент взаимной корреляции, имеющий большие отрицательные значения

( $\rho_{1-2}(\xi, \tau) < -0.5$ ). Столь высокие значения коэффициента корреляции указывает на то, что в осциллирующем вихревом движении вблизи кормовой стенки лунки преобладают коррелированные сигналы, источниками которых являются крупномасштабные

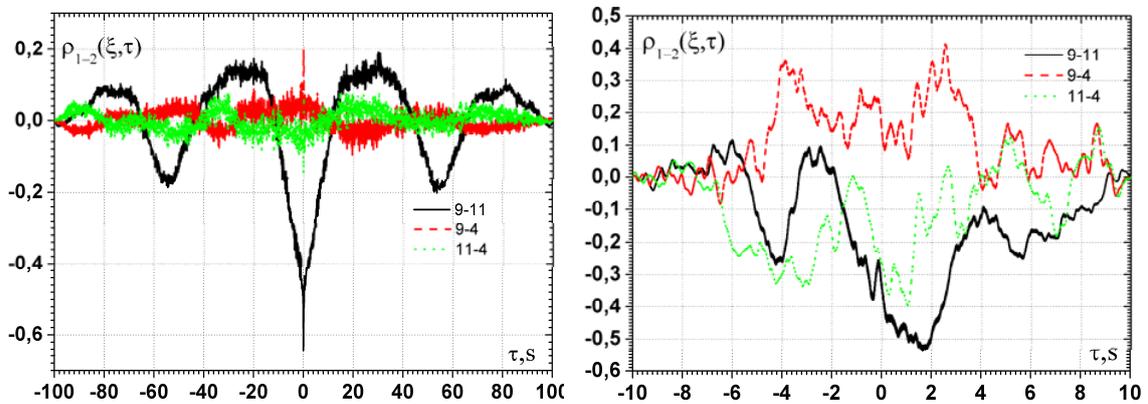


Рис. 3

наклонные вихревые системы. Такие вихревые системы генерируют пониженные пульсации давления на кормовой стенке, где происходит выброс крупномасштабного вихря, и повышенные давления там, где наблюдается ударное взаимодействие вихревых структур слоя смещения с кормовой стенкой, что отмечалось при анализе временных зависимостей изменения пульсаций давления.

## ВЫВОДЫ

1. Установлено, что при турбулентном обтекании глубокой сферической лунки внутри нее формируются крупномасштабные асимметричные вихревые структуры, источник которых находится на передней стенке лунки несколько сбоку от срединного сечения лунки, а сток располагается на противоположной боковой стороне кормовой стенки лунки, то есть вихрь имеет наклонное положение и пересекает срединное сечение лунки. Совершая колебательное движение, асимметричный вихрь периодически выбрасывается над кормовой стенкой под углом, который растет с увеличением скорости турбулентного течения. Для  $Re_d=40000$  угол выброса вихря равен около  $\pm 45^\circ$ , а для  $Re_d=60000$  этот угол уже составляет почти  $\pm 60^\circ$ . Находясь в наклонном положении порядка (30...40) с, асимметричный вихрь переключается в противоположную боковую часть лунки и уже в течение, приблизительно, такого же времени, но нередко и меньшего, выбрасывается над противоположной боковой стороной кормовой стенки лунки.

2. Обнаружено, что при переключении вихревого течения из одной стороны лунки в другую поле пульсаций пристеночного давления совершает противофазные колебания в половинках лунки, разделенных продольной осевой плоскостью, что подтверждается измерениями датчиками давления, расположенными на боковых сторонах передней и кормовой стенок полусферической лунки. При этом функции пространственно-временной корреляции между парами датчиков, установленными на противоположных боковых стенках, показывают высокие уровни антикорреляции.

**ЛИТЕРАТУРА**

1. Управление обтеканием тел с вихревыми ячейками в приложении к летательным аппаратам интегральной компоновки // Под ред. А. В. Ермишина, С. А. Исаева. – М.: СПб., 2001. – 360 с.
2. Гортышов Ю.Ф., Попов И.А., Олимпиев В. В., Щелчков А.В., Каськов С.И. Теплогидравлическая эффективность перспективных способов интенсификации теплоотдачи в каналах теплообменного оборудования. – Казань: Центр инновационных технологий, 2009. – 531 с.
3. Воропаев Г.А., Воскобойник А. В., Воскобойник В. А., Гринченко В.Т., Исаев С.А., Розумнюк Н.В. Источники псевдозвуковых пульсаций давления при обтекании сферической лунки // Акустичний вісник.– 2008.– 11, № 3.– С. 27–49.