

ВЗАИМНЫЕ КОРРЕЛЯЦИОННЫЕ И СПЕКТРАЛЬНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ПУЛЬСАЦИЙ СКОРОСТИ И ДАВЛЕНИЯ В ПОЛУСФЕРИЧЕСКОМ УГЛУБЛЕНИИ

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

Институт гидромеханики НАН Украины, Киев, Украина

The results of experimental researches of forming of vortical flow are presented into a hemispherical cavity, located on a flat surface, for the laminar and turbulent flow regimes. The hot-wire measurements of mean value and fluctuations of streamwise and crosswise velocity profiles show the existence of regions of acceleration and deceleration of the vortex flow, zones of the reverse and circulating flows inside the three-dimensional cavity. Three-dimensional unsteady vortex flow is formed inside dimple, which is pseudosound source of the hydrodynamic noise. The discrete high-quality peaks in four frequency ranges are found in the spectra of velocity and wall-pressure fluctuations. They correspond to rotating frequency of vortex systems inside the cavity; their separation frequency; wake mode frequency of oscillations of cavity vortical motion, caused by a hydrodynamic resonance, and self-oscillation frequency inside the cavity, that forms the first and second Rossiter shear layer mode of self-sustained oscillations. Space-time correlations of velocity and wall-pressure fluctuations are presented inside hemispherical cavity and about it.

ВВЕДЕНИЕ

Как показывают результаты численных и экспериментальных исследований вихревое движение в локальном углублении, расположенном на обтекаемой поверхности, является крайне сложным по своей структуре, неоднородным в пространстве и нестационарным во времени [1-3]. В зависимости от геометрических параметров углубления и режимов его обтекания внутри отверстия углубления формируется циркуляционное течение, генерируются крупномасштабные когерентные вихревые структуры и мелкомасштабные вихри, которые взаимодействуют как друг с другом, так и с обтекаемой поверхностью. При достаточно высоких скоростях потока с передней кромки углубления отрывается пограничный слой, формируя сдвиговый слой, часть которого в результате действия сил вязкости и инерции сворачивается в вихревые структуры и, взаимодействуя с внутренним вихревым движением углубления, интенсифицирует турбулентность набегающего потока. Ударное взаимодействие сдвигового слоя с кормовой стенкой углубления порождает мощные пульсации скорости и давления, инициирует осцилляции потока, как внутри лунки, так и в ее окрестности, порождая резонансные колебания внутри отверстия углубления. Выброс вихревых систем наружу из обтекаемого углубления и их взаимодействие с набегающим потоком образует интенсивные поля пульсаций векторных и скалярных переменных течения.

Вихревые системы, формируемые в результате взаимодействия течения с локальной неоднородностью обтекаемой поверхности в виде одиночного углубления или ансамбля лунок, излучают тональный и широкополосный гидродинамический шум, являясь псевдозвуковыми источниками. Интенсивность псевдозвука, который генерируется внутри и вблизи обтекаемого углубления, зависит от динамических и кинематических параметров набегающего потока и от формы и размера самого углубления. Пульсации скорости и давления, обусловленные переносом псевдозвуковых источников в пространстве и во времени, коррелируют между собой и степень их корреляции в значительной мере зависит от удаления от источников пульсаций (вихревых структур) и их интенсивности. Одним из методов изучения структуры вихревого потока и



Рис. 1

его особенностей является статистический взаимный корреляционный и спектральный анализ, который применяется для полей случайных переменных в виде пульсаций скоростей и давлений, измеренных соответствующими датчиками, обладающими необходимой пространственной и временной разрешающей способностью [4, 5].

Целью настоящих экспериментальных исследований явилось изучение пространственно-временных характеристик вихревых структур, формируемых внутри полусферического углубления и в его окрестности, а также псевдозвуковых источников гидродинамического шума. Для этого используются статистические методы, в частности взаимные корреляционные и спектральные характеристики.

1. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ УСТАНОВКА

Экспериментальные исследования проводились в гидродинамическом канале длиной 16 м, шириной 1 м и глубиной 0.8 м. Глубина потока воды была порядка 0,4 м, а его скорость изменялась от 0.03 м/с до 0.4 м/с. Исследуемая пластина с полусферическим углублением устанавливалась на дно измерительного участка гидродинамического канала и располагалась на расстоянии 0.1 м от дна лотка параллельно его поверхности. Гидравлически гладкая пластина, изготовленная из полированного органического стекла толщиной 0,01 м, шириной 0,5 м и длиной 2 м, была заострена с одной (фронтальной) и с другой (кормовой) стороны для обеспечения безотрывного ее обтекания. На расстоянии 1 м от носка пластины было сделано одиночное отверстие полусферической формы диаметром 0.1 м. Заподлицо с обтекаемой поверхностью полусферической лунки и на пластине вблизи углубления устанавливались 8 миниатюрных датчиков пульсаций пристеночного давления (рис. 1а). Пьезокерамические датчики мембранного типа имели диаметр чувствительной поверхности $1.6 \cdot 10^{-3}$ м. Наряду с датчиками пульсаций пристеночного давления в экспериментальных исследованиях использовались пленочные термоанемометры фирмы Диза. На рис. 1б показано расположение одно и двухкомпонентных пленочных термоанемометров над пластиной позади полусферического углубления и датчиков пульсаций давления, смонтированных заподлицо с обтекаемой поверхностью пластины и углубления. Термоанемометры посредством соответствующих державок и координатных приспособлений вводились внутрь пограничного слоя и в вихревой поток углубления для измерения поля скоростей.

Электрические сигналы датчиков пульсаций пристеночного давления и пленочных термоанемометров усиливались, фильтровались, измерялись и регистрировались соответствующей аппаратурой. Измеренные аналоговые сигналы подавались на многоканальные аналогово-цифровые преобразователи, встроенные в персональный

компьютер, где регистрировались, а затем обрабатывались по стандартным и специально разработанным программам и методикам. Перед проведением исследований, в ходе измерений и после окончания исследовательских работ все средства измерений, датчики и преобразователи тестировались и поверялись по соответствующим программам и методикам, абсолютным и относительным методами. Калибровочные и поверочные кривые и зависимости использовались для определения чувствительностей датчиков и коэффициентов преобразования физических величин в электрические сигналы измерительными трактами.

Погрешность измерений осредненных и интегральных величин не превышала 10 % (доверительный интервал 95 %). Погрешность измерений спектральных и корреляционных зависимостей полей пульсаций скорости и давления составляла не более 2 дБ в диапазоне частот от 0 Гц до 12.5 кГц.

2. РЕЗУЛЬТАТЫ ИЗМЕРЕНИЙ

Общими закономерностями интегральных результатов, полученных для полусферической лунки, являются: во-первых, наличие чередующихся областей увеличения и уменьшения средних значений продольной скорости над лункой, обусловленное влиянием лунки на пограничный слой; во-вторых, нарастание средней и пульсационной скорости при приближении слоя смещения к кормовой стенке лунки; в-третьих, существование в придонной области лунки возвратного течения, которое зарождается в зоне ударного взаимодействия слоя смещения и кормовой стенки лунки.

Спектральная плотность мощности пульсаций продольной скорости, пульсаций пристеночного давления и волновой спектр в пограничном слое на пластине перед углублением качественно имеют вид подобный общепринятым спектральным представлениям поля скоростей и давлений над плоской поверхностью. Но в области низких частот частотный спектр пульсаций скорости и давления над пластиной в непосредственной близости углубления имеет несколько более высокие уровни, указывая на то, что вблизи углубления пограничный слой в большей степени насыщается крупномасштабными низкочастотными вихревыми системами. С удалением вглубь лунки вдоль ее передней стенки происходит перераспределение энергии спектральных составляющих пульсаций продольной скорости и давления из высокочастотной области в низкочастотную область. В спектрах появляются явно выраженные экстремумы спектральных уровней для кривых, соответствующих местоположениям вихревых систем в углублении. В центральной части углубления наблюдается более высокочастотное наполнение спектров с отчетливым проявлением пульсационной энергии вихревых систем в инерционной области частот.

Датчики пульсаций пристеночного давления, установленные в области ударного взаимодействия вихревых структур сдвигового слоя с кормовой стенкой углубления отчетливо регистрируют резонансные пульсации давления (дискретные пики на спектральных зависимостях), соответствующие первой и второй модам Розитэ. Кроме того, поле пульсаций пристеночного давления в области кормовой стенки насыщено периодическими колебаниями, которые отвечают следовой моде осцилляций вихревого течения, присущего внутренней структуре потока в углублении. При увеличении скорости обтекания деформированной плоской поверхности спектральные уровни резонансных колебаний, отвечающие следовой и сдвиговой модам осцилляций уменьшаются. Наряду с этим в спектральных зависимостях пульсаций пристеночного давления, особенно в придонной области полусферического углубления, все более

отчетливо проявляется трехмерная мода осцилляций, которой присуще значение числа Струхала порядка 0.025, что согласуется с результатами работ [2, 3, 5].

Пространственно-временные корреляционные характеристики полей пульсаций давления и скоростей экспериментально исследовались группой датчиков, которые образовывали корреляционные блоки и располагались как внутри углубления, так и заподлицо с обтекаемой поверхностью пластины и полусферической лунки. В ходе экспериментальных исследований измерялись автокорреляционные функции пульсаций скоростей и давлений, позволяющие определить развитие во времени коррелированного сигнала, воспринимаемого датчиками. Взаимная корреляция между парами одноименных и отличных друг от друга по конструкции и измеряемым параметрам датчиков позволила получить характерные особенности пространственно-временного развития вихревого движения внутри углубления и вблизи него. Прохождение вихревых структур мимо измерительных датчиков позволило оценить их степень коррелированности, направление перемещения, скорость переноса и время их жизни. Кроме того, проведение корреляционного и спектрального анализов дало возможность оценить масштабы когерентных вихревых структур, направление и частоту их вращения.

На рис. 2 приведен пример взаимной корреляции между парами датчиков пульсаций пристеночного давления для различных скоростей обтекания пластины с полусферическим углублением. Кривая 1 получена для пары датчиков № 3 и № 4 и режима обтекания $U_\infty=0.1$ м/с, $Re_x=8 \cdot 10^4$ и $Re_d=1 \cdot 10^4$; кривая 2 получена для той же пары датчиков, но для режима обтекания $U_\infty=0.35$ м/с, $Re_x=2.8 \cdot 10^5$ и $Re_d=3.5 \cdot 10^4$, а кривая 3 – для пары датчиков № 2 и № 4 и последнего режима обтекания пластины с полусферическим углублением.

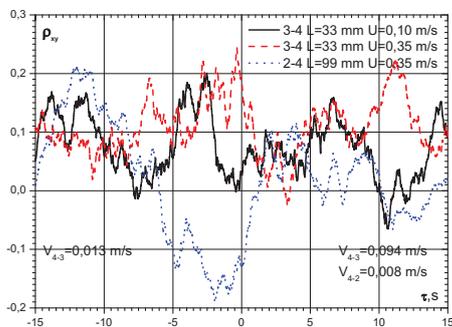


Рис. 2

Расстояние между датчиками пульсаций пристеночного давления вдоль поверхности углубления составляло: $L_{3-4}=33$ мм для датчиков № 3 и № 4 и $L_{2-4}=99$ мм для датчиков № 2 и № 4. Увеличение скорости обтекания пластины с локальным углублением приводит к росту коррелированности пульсаций пристеночного давления, зарегистрированных на дне углубления и его кормовой стенке. При этом максимум взаимной корреляции смещается в область малых временных интервалов, что указывает на более высокую скорость переноса давления образующих источников коррелированных сигналов. Кроме того, максимумы взаимной корреляции между этой парой датчиков пристеночного давления наблюдаются для отрицательного времени задержки. Следовательно, наибольший коррелированный сигнал поступал от датчика № 4 к датчику № 3. Зная расстояние между парой датчиков и время задержки, когда регистрируется максимум взаимной корреляции, а также направление распространения этого коррелированного сигнала определяется групповая скорость переноса давления образующих вихревых систем, в соответствии с рекомендациями [4, 5]. В приведенных экспериментальных результатах групповая скорость переноса источников пульсаций пристеночного давления на поверхности полусферической лунки равна $V_{cg4-3} \approx 0.13U_\infty$ для скорости обтекания 0.1 м/с и $V_{cg4-3} \approx 0.27U_\infty$ для скорости обтекания 0.35 м/с.

Коэффициент взаимной корреляции между датчиком пульсаций давления, находящимся под областью отрыва пограничного слоя, и датчиком, расположенным на

кормовой стенке углубления имеет как положительное, так и отрицательное значение. При этом значения коэффициентов корреляции и антикорреляции (отрицательное значение коэффициента взаимной корреляции) приблизительно одинаковы и их максимумы располагаются в области отрицательных времен задержки (см., кривую 3 на рис. 2а). Групповая скорость переноса синфазного коррелированного сигнала между датчиками № 4 и № 2 очень мала и составляет всего $0.02U_\infty$, а групповая конвективная скорость противофазного коррелированного сигнала равна $0.14U_\infty$. Следует напомнить, что расчет выше приведенных групповых конвективных скоростей производился по расстоянию между парами датчиков пульсаций пристеночного давления вдоль окружности полусферического углубления.

Характерный пример поведения коэффициента взаимной корреляции пульсаций скорости и пристеночного давления представлен на рис. 3. Следует отметить, что на этом рисунке наряду с взаимной корреляцией между датчиками пульсаций скорости

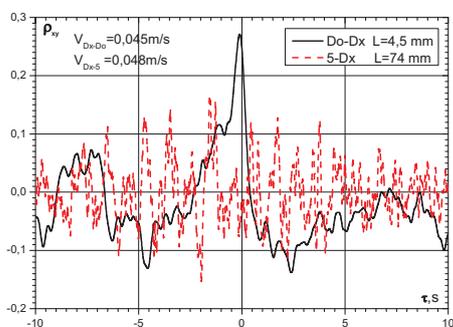


Рис. 3

приведены кривые коэффициента взаимной корреляции между парами датчиков пульсаций скорости и пульсаций пристеночного давления.

Пространственно-временные корреляции пульсаций скоростей и давлений получены для скорости обтекания пластины с локальным углублением $U_\infty=0.1$ м/с и чисел Рейнольдса $Re_x=8 \cdot 10^4$ и $Re_d=1 \cdot 10^4$. Пара пленочных термоанемометров в этих измерениях находилась над отверстием углубления в верхней части сдвигового слоя и ближе к передней стенке лунки.

Двухкомпонентный датчик размещался ближе к плоскости обтекаемой пластины, а однокомпонентный (измеряет продольную координату скорости) датчик находился над первым. Координатами местоположения термоанемометров в соответствии с рис. 1б в данных измерениях были $l_{xDx}=-22$ мм; $l_{yDx}=5$ мм и $l_{zDx}=0$ (двухкомпонентный датчик) и $l_{xD0}=-22$ мм; $l_{yD0}=9.5$ мм и $l_{zD0}=0$ (однокомпонентный датчик). Взаимная корреляция между продольными компонентами пульсаций скорости представлена кривой 1. Кривая 2 отображает зависимость коэффициента взаимной корреляции между пульсациями пристеночного давления, измеренными датчиком пульсаций давления № 5, и пульсациями продольной скорости, измеренными двухкомпонентным датчиком D_x . Корреляция между продольными компонентами скорости выше, чем между пульсациями давления и скорости. Скорость переноса коррелированного сигнала между двумя датчиками скорости несколько ниже, чем между датчиком пульсаций скорости и датчиком пульсаций пристеночного давления. Направление движения коррелированных сигналов следующее: от нижнего датчика скорости к верхнему и от датчика скорости к датчику пульсаций давления, находящемуся в верхней части кормовой стенки полусферической лунки.

Коррелированность пульсаций скорости над обтекаемой поверхностью углубления и пульсаций пристеночного давления на его поверхности дает возможность оценить взаимосвязь между полями скоростей и давлений в исследуемом вихревом движении. Расположение датчиков пульсаций скорости внутри сдвигового слоя, формируемого при обтекании полусферического углубления, и датчиков пульсаций пристеночного давления на кормовой стенке углубления показывает, что вихревые структуры сдвигового слоя переносятся со скоростью порядка 0.48 скорости набегающего потока. Это значение

конвективной скорости неплохо согласуется с общепринятым значением скорости переноса вихревых структур в сдвиговом слое над отверстием углубления [1, 2, 4]. Как показывают результаты исследований и подтверждают опубликованные данные теоретических и экспериментальных работ вихревое течение внутри углублений и поблизости их являются в большой степени неустойчивыми процессами. Эта неустойчивость проявляется в нестационарности физических явлений, происходящих в таких течениях, а также неоднородности их в пространстве.

ВЫВОДЫ

Установлено, что вблизи углубления пограничный слой в большей степени насыщается крупномасштабными низкочастотными вихревыми системами. С удалением вглубь лунки вдоль ее передней стенки происходит перераспределение энергии спектральных составляющих пульсаций продольной скорости и давления из высокочастотной области в низкочастотную область. В спектрах появляются явно выраженные экстремумы спектральных уровней, которые соответствуют первой и второй сдвиговым модам, следовой моде и низкочастотной модулирующей трехмерной моде осцилляций. В центральной части углубления наблюдается более высокочастотное наполнение спектров с отчетливым проявлением пульсационной энергии вихревых систем в инерционной области частот.

Обнаружено, что корреляция между продольными компонентами скорости выше, чем между пульсациями давления и скорости. Увеличение скорости обтекания пластины с локальным углублением приводит к росту коррелированности пульсаций пристеночного давления, зарегистрированных на дне углубления и его кормовой стенке. Максимум взаимной корреляции смещается в область малых временных интервалов, что указывает на более высокую скорость переноса давления образующих источников коррелированных сигналов. Групповая скорость переноса источников пульсаций пристеночного давления на поверхности полусферической лунки равна $V_{cg4-3} \approx 0.13U_\infty$ для скорости обтекания 0.1 м/с и $V_{cg4-3} \approx 0.27U_\infty$ для скорости обтекания 0.35 м/с.

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. Халатов А. А. Теплообмен и гидродинамика около поверхностных углублений (лунок). – К.: ИТТФ НАН Украины, 2005. – 76 с.
4. 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.
5. Воскобойник А. В., Воскобойник В. А. Источники резонансных мод осцилляций внутри обтекаемой полусферической лунки // Акустичний вісник.– 2007.– 10, № 4.– С. 36–46.