

УДК 532.517

ПУЛЬСАЦИИ ПРИСТЕНОЧНОГО ДАВЛЕНИЯ В НИЗКОСКОРОСТНОМ ПОТОКЕ ВБЛИЗИ ОВАЛЬНОГО УГЛУБЛЕНИЯ

В. А. ВОСКОВОЙНИК

Институт гидромеханики НАН Украины, Киев

Отримано 07.03.2009

В статье представлены результаты экспериментальных исследований поля пульсаций пристеночного давления, генерируемого вихревыми структурами, которые формируются внутри овального углубления на плоской пластине при малых скоростях потока и $Re_d = (1200 \dots 4000)$. Измерения проводились в гидродинамическом канале с помощью ансамбля миниатюрных датчиков пульсаций пристеночного давления, установленных заподлицо с обтекаемой поверхностью овальной лунки, ориентированной под углом 60° к направлению потока, и в ее окрестности. Получены среднеквадратичные значения пульсаций пристеночного давления и их спектральные плотности мощности. Показано влияние овальной лунки на интегральные и спектральные характеристики поля пульсаций псевдозвукового давления. Отмечены особенности генерации устойчивых крупномасштабных вихревых структур и их взаимодействия с пограничным слоем над пластиной.

У статті наведено результати експериментальних досліджень поля пульсацій пристінного тиску, які генеруються вихровими структурами, що формуються усередині овального заглиблення на плоскій пластині при малих швидкостях потоку та $Re_d = (1200 \dots 4000)$. Вимірювання проводились у гідродинамічному каналі за допомогою ансамблю мініатюрних датчиків пульсацій пристінного тиску, які встановлено врівень з обтічною поверхнею овальної лунки, орієнтованої під кутом 60° до напрямку потоку, та в її околі. Отримані середньоквадратичні значення пульсацій пристінного тиску та їхні спектральні характеристики поля. Відзначені особливості генерації стійких великомасштабних вихрових структур і їх взаємодія з прилеглим шаром над пластиною.

The paper presents the results of the experimental study of the fluctuation field of wall pressure generated by vortical structures formed inside the oval dimple on a flat plate at low stream velocities and $Re_d = (1200 \dots 4000)$. The measurements were conducted in a hydrodynamic channel by a group of miniature sensors of wall pressure fluctuations. These sensors were flush-mounted with the streamlined surface of the oval dimple oriented at an angle of 60° to the stream direction and in its vicinity. The root-mean-square values of the wall pressure fluctuations and their power spectral densities have been obtained. The influence of the oval dimple on the integral and spectral characteristics of fluctuation field of pseudosound pressure has been shown. Peculiarities of generation of the stable large-scale vortical structures and their interaction with the boundary layer above the plate have been pointed out.

ВВЕДЕНИЕ

В отрывном потоке над плохо обтекаемыми телами различной геометрии и в следе за ними формируется сложное нестационарное движение жидкости с интенсивными временными пульсациями скорости и давления [1–3], энергия которых частично может излучаться в окружающую среду в виде звуковых волн. Интенсивность генерации звука существенно зависит от скорости потока и свойств (геометрических и деформационных) поверхности обтекаемого тела. Поэтому исследовать турбулентный шум ограниченных потоков гораздо сложнее, чем аэродинамический шум свободной турбулентности [4–6]. При этом разнообразие масштабов вихревых структур в турбулентном пограничном слое и скоростей их переноса приводит к возникновению широкополосного спектра пульсаций скорости и давления [7, 8]. Появление доминирующих вихревых образований, генериру-

емых тем или иным способом, обуславливает наличие дискретных составляющих в спектральных зависимостях звуковых и псевдозвуковых пульсаций давления, измеренных на обтекаемой поверхности и над ней [9–11].

Формирование вихревых структур с определенными параметрами зачастую используется при управлении пограничным слоем для снижения сопротивления обтекаемых тел, увеличения тепло- и массопереноса, а также снижения уровней или изменения частотного наполнения аэрогидродинамических шумов и вибраций обтекаемых объектов [12–14]. Одним из факторов, способствующих возникновению интенсивных когерентных вихревых систем в пограничном слое, являются локальные неоднородности на обтекаемой поверхности – выемки и выступы. В последние годы для этого широко применяются луночные поверхности, на которых в определенном порядке размещены мелкие выемки разной формы [15, 16].

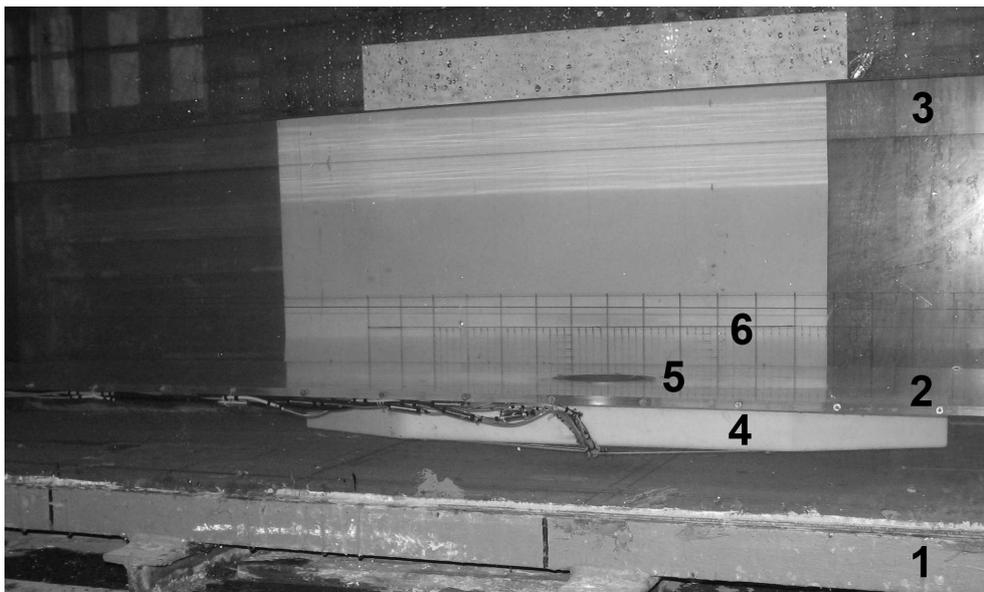


Рис. 1. Расположение исследуемой пластины с овальной лункой в гидродинамическом канале:
1 – канал; 2 – пластина; 3 – уровень воды; 4 – обтекатель; 5 – лунка; 6 – координатная сетка

В зависимости от геометрических размеров лунок, их формы и состояния кромок, а также от чисел Рейнольдса и Маха изменяются места формирования вихревых структур, их масштаб, интенсивность и вид. Экспериментальные и численные исследования вихревого течения над поверхностями с одиночными и групповыми углублениями показали, что в симметричных выемках формируются неустойчивые вихревые системы, совершающие бифуркационное движение и выбрасывающиеся поочередно из различных частей над кормовой стенкой лунки. Так, на поверхности, обрабатываемой ансамблем сферических лунок, при определенных режимах их обтекания реализуется так называемая картина чередующихся или играющих вихрей [15, 17, 18]. Такое вихревое движение над обтекаемой поверхностью существенно изменяет пограничный слой, приводя к интенсификации процессов тепло- и массопереноса над облуженными поверхностями. В исследованиях [19, 20] с целью упорядочивания вихревых структур и управления пограничным слоем предлагалось использовать асимметричные лунки, в которых при определенных геометрических параметрах удастся организовать устойчивые когерентные вихревые системы в пограничном слое позади луночных рельефов.

Генерация вихревых систем и их выброс наружу из обтекаемого углубления приводит к существенным изменениям пульсационных полей скорости

и давления, что отражается на характере аэрогидродинамического шума [2, 14, 21, 22]. Многофакторность источников псевдозвуковых пульсаций, их нестационарность и неоднородность существенно осложняют проведение экспериментальных и численных исследований, обработку и анализ данных. Остаются открытыми вопросы установления пространственно-временных корреляций и взаимных спектральных характеристик полей пульсаций давления над обтекаемой поверхностью, имеющей систему выемок (лунок).

Целью данного экспериментального исследования было изучение особенностей формирования вихревых систем в овальном углублении на пластине, расположенном под углом 60° к направлению набегающего низкоскоростного потока, при малых докритических числах Рейнольдса. Исследованы интенсивность псевдозвуковых пульсаций давления и спектральные характеристики поля пульсаций пристеночного давления внутри углубления и вблизи него. Установлена связь между характеристиками поля пульсаций давления внутри лунки и в ее следе, а также особенностями генерируемых когерентных вихревых систем.

1. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ УСТАНОВКА И МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЙ

Экспериментальные исследования проводились в гидродинамическом канале со свободной поверх-

ностью воды, имеющем длину 16 м, ширину 1 м и глубину 0.04 м. Измерительный участок, на дно которого устанавливалась пластина с локальной неоднородностью обтекаемой поверхности, находился посередине канала (рис. 1). Гидравлически гладкая пластина из полированного органического стекла толщиной 0.01 м, шириной 0.5 м и длиной 2 м имела острые кромки с фронтальной и с кормовой сторон для обеспечения ее безотрывного обтекания. К боковым сторонам пластины крепились вертикальные шайбы из органического стекла толщиной 0.005 м и шириной 0.2 м. На расстоянии 0.8 м от носка пластины было сделано отверстие, где устанавливался заполненный пластилином стальной стакан, в котором было выдвинуто овальное углубление в виде двух сферических лунок, объединенных цилиндрической вставкой (рис. 2). Длина цилиндрической вставки равнялась диаметру лунки $d=0.04$ м. Таким образом, овальная лунка имела ширину 0.04 м, длину 0.08 м и глубину $h=0.009$ м (отношение глубины к ширине составляло $h/d=0.22$). К нижней части пластины в месте расположения стакана с овальным углублением крепился лист с масштабной сеткой и пенопластовый обтекатель. Крепление стального стакана давало возможность вращать овальное углубление вокруг своей оси с произвольным шагом. Угол расположения овального углубления α относительно направления набегающего потока в проведенных исследованиях был фиксированным и составлял 60° . Скорость потока изменялась от 0.03 до 0.1 м/с. Числа Рейнольдса Re_d , рассчитанные по диаметру (ширине) лунки и по скорости набегающего потока, изменялись от 1200 до 4000, а по длине пластины до места установки овальной лунки Re_x изменялась от 24000 до 80000.

Исследование полей пульсаций давления на обтекаемой поверхности овального углубления и пластины проводились с помощью миниатюрных пьезокерамических и пьезорезистивных датчиков пульсаций давления, а также дифференциальных электронных манометров. При этом использовались пьезокерамические датчики пульсаций давления мембранного и стержневого типов, имеющие диаметр чувствительной поверхности 0.0015 и 0.0013 м соответственно. Малый размер их чувствительной поверхности позволил регистрировать источники псевдозвуковых пульсаций пристеночного давления с пространственными масштабами, превышающими 0.003 м (т. е. с длиной волны, больше двух диаметров). Это согласуется с общепринятыми представлениями о механизме пространственного фильтрования источников пульсаций давления чувствительной поверх-

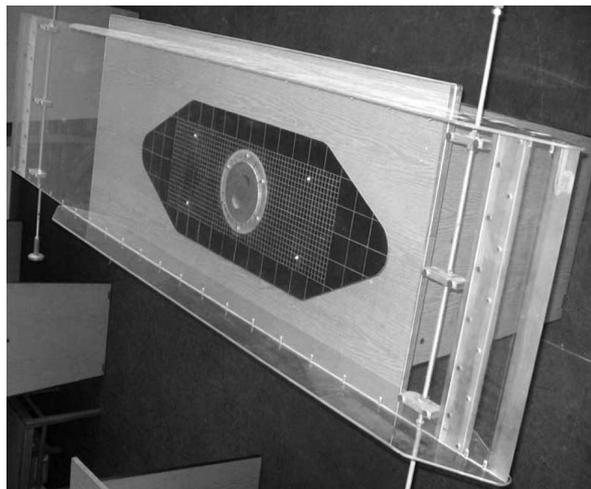


Рис. 2. Измерительная плоская пластина с овальным углублением в виде сферических сегментов, соединенных цилиндрической вставкой

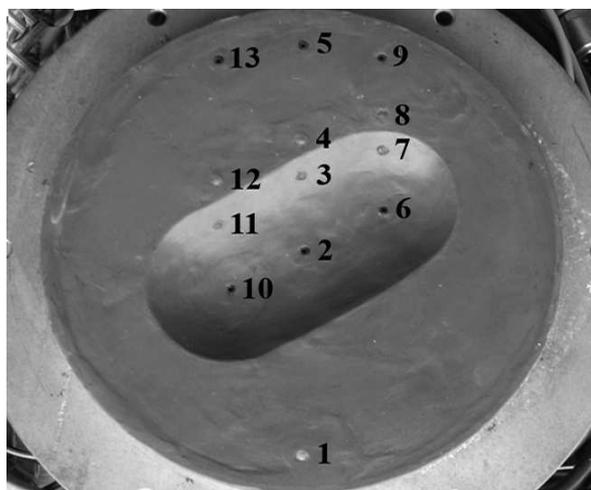


Рис. 3. Овальная лунка, установленная под углом 60° к направлению потока, и местоположение датчиков пульсаций пристеночного давления

ностью датчиков [1, 2, 23, 24].

Для исследования поля пульсаций пристеночного давления внутри овального углубления и в его ближнем поле были использованы 13 датчиков пульсаций давления, схема расположения которых представлена на рис. 3. Датчики имели следующие координаты (см. таблицу). Начало координат находилось в центре овального углубления заодно с поверхностью обтекаемой пластины, оси x – продольная, y – соответствует нормали к обтекаемой поверхности пластины, z – поперечная или азимутальная. Отметим, что заодно с обтекаемой поверхностью были установлены пьезокера-

Таблица. Координаты датчиков

N	$x, \text{ м}$	$y, \text{ м}$	$z, \text{ м}$	x/d	y/d	z/d
1	-0.052	0	0	-1.3	0	0
2	0	-0.009	0	0	-0.225	0
3	0.015	-0.004	0	0.4	-0.1	0
4	0.028	0	0	0.7	0	0
5	0.053	0	0	1.3	0	0
6	0.012	-0.009	0.02	0.3	-0.225	0.5
7	0.027	-0.004	0.02	0.7	-0.1	0.5
8	0.035	0	0.02	0.9	0	0.5
9	0.051	0	0.02	1.3	0	0.5
10	-0.01	-0.009	-0.02	-0.3	-0.225	-0.5
11	0.005	-0.004	-0.02	0.1	-0.1	-0.5
12	0.016	0	-0.02	0.4	0	-0.5
13	0.048	0	-0.02	1.2	0	-0.5

мические датчики пульсаций давления мембранного (NN 1, 4, 8 и 12) и стержневого (NN 3, 7 и 11) типов. Пьезорезистивные датчики давлений дифференциального типа (NN 2, 5, 6, 9, 10 и 13), имеющие относительно большие размеры, устанавливались под обтекаемой поверхностью и сообщались с набегающим потоком посредством капиллярных трубок диаметром 0.0008 м и длиной 0.007 м.

Все датчики калибровались и тестировались абсолютными и относительными методами. Датчики пульсаций давления калибровались на специально созданном стенде, который импульсным способом создавал перепад давления известного уровня, а также с помощью пистонфонов фирмы Брюль и Кьер, в которых генерировалось давление заданной амплитуды и частоты. Относительные методы калибровки реализовывались с помощью создания в ближнем и дальнем поле гидродинамических и акустических давлений различной интенсивности и частотного заполнения, вплоть до белого и розового шумов. Калибруемые датчики сопоставлялись с эталонными гидрофонами и микрофонами фирмы Брюль и Кьер. При этом определялись области линейности амплитуды калибруемого сигнала и области резонансных частот датчиков. Кроме того, для датчиков пульсаций давления на вибростендах фирмы Брюль и Кьер определялась виброчувствительность в трех взаимно перпендикулярных плоскостях, которая использовалась при анализе данных и учете влияния вибрации на показания датчиков и их виброкомпенсации. Пьезорезистивные датчики полного давления калибровались на специально созданных стендах гидростатическим давлением с точностью до

0.1 мм водяного столба (1 Па). В ходе экспериментов средством текущего контроля состояния датчиков давлений и их чувствительности служила генерация импульса избыточного давления или его гармонической формы в гидродинамическом канале. Наряду с этим, тестирование датчиков проводилось как перед началом проведения исследований, так и после их окончания.

В результате погрешность измерений интегральных характеристик поля пульсаций давления не превышала 8 % при доверительном интервале 0.95 (2σ). Погрешность измерений спектральных характеристик составляла до 2 дБ в исследуемом диапазоне частот при том же доверительном интервале.

2. ИНТЕГРАЛЬНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ПСЕВДОЗВУКОВЫХ ПУЛЬСАЦИЙ ДАВЛЕНИЯ

Изменение среднеквадратичных значений пульсаций пристеночного давления представлено в зависимости от скорости обтекания на рис. 4, а и в зависимости от числа Рейнольдса – на рис. 4, б. Здесь и далее, если не оговорено противное, нумерация кривых совпадает с номерами датчиков пульсаций давления. Согласно рис. 4, а, среднеквадратичные значения пульсаций пристеночного давления внутри овального углубления и вблизи него пропорциональны квадрату скорости набегающего потока. При этом максимальные уровни пульсаций наблюдаются в месте ударного взаимодействия сдвигового слоя с кормовой стенкой лунки и в ее ближнем следе, а наименее интенсивные –

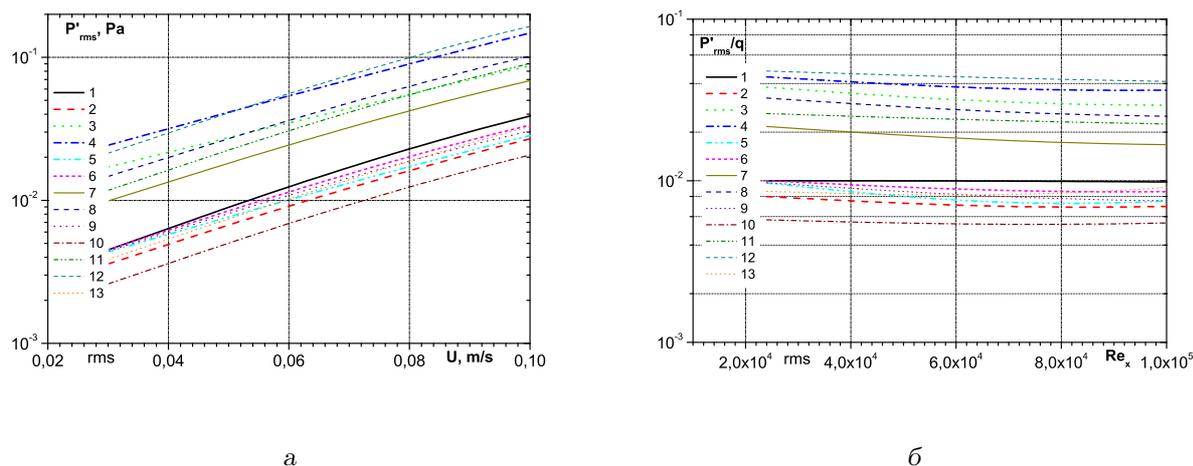


Рис. 4. Осредненные значения измеренных пульсаций пристеночного давления: а – среднеквадратичные значения; б – аэрогидродинамический коэффициент

в придонной области овального углубления (они почти на порядок ниже, чем на кормовой стенке). При этом внутри лунки пульсации пристеночного давления существенно ниже, чем в ненарушенном пограничном слое, особенно при малых скоростях обтекания. В области ударного взаимодействия сдвигового слоя, сформировавшегося над отверстием овального углубления, уровни пульсаций давления растут и в три-четыре раза превышают пульсации над гладкой пластиной. Наибольших значений они достигают в средней (цилиндрической) части кормовой стенки овального углубления. В ближнем следе углубления интенсивность пульсаций давления повышается и достигает максимума за передней сферической и цилиндрической частями углубления (датчики NN 12 и 4). При удалении от лунки среднеквадратичные пульсации давления постепенно убывают и приближаются к уровням ненарушенного пограничного слоя.

Для исследуемого низкоскоростного режима течения пульсации пристеночного давления подчиняются квадратичной зависимости по скорости потока с увеличением показателя степени пропорциональности. Это наглядно иллюстрируется рис. 4, б, на котором пульсации давления обезмеривались скоростным напором $q = \rho U^2 / 2$. В пограничном слое, ненарушенном наличием локальной неоднородности на обтекаемой поверхности, интенсивность пульсаций давления остается пропорциональной квадрату скорости (кривая 1 на рис. 4, б). Следует отметить, что нормированные пульсации давления в пограничном слое перед овальным углублением равны ≈ 0.01 практически

во всем диапазоне исследуемых чисел Рейнольдса. Как известно из [4, 25, 26], это значение соответствует интенсивности пульсаций давления, измеренной точечными датчиками, диаметр чувствительной поверхности которых не превышает 19 длин вязкости $d^+ = du_\tau / \nu$. В наших исследованиях диаметр чувствительной поверхности датчиков пульсаций давления был не более 16 длин вязкости (их можно считать точечными).

Таким образом, для режима обтекания пластины с локальным углублением, соответствующего докритическим числам Рейнольдса, наименьшие уровни пульсаций давления наблюдаются на дне овального углубления в его передней части. Наибольшая интенсивность пульсаций давления обнаружена в ближнем следе углубления в его среднем сечении.

Внутри овального углубления наибольшие уровни пульсаций пристеночного давления наблюдаются в кормовой сферической части углубления (см. кривые 2, 6 и 10 на рис. 4, б). Например, для скорости потока порядка 0.1 м/с акустико-гидродинамический коэффициент (коэффициент трансформации кинетической энергии потока в энергию турбулентных пульсаций давления), выражаемый отношением P'_{rms}/q , на дне кормовой сферической части лунки в три раза выше, чем в ее передней сферической части. На кормовой стенке лунки и в ее ближнем следе наблюдается существенная трансформация кинетической энергии потока в энергию пульсаций пристеночного давления. При удалении от лунки интенсивность пульсаций давления падает и приближается к значениям в ненарушенном погра-

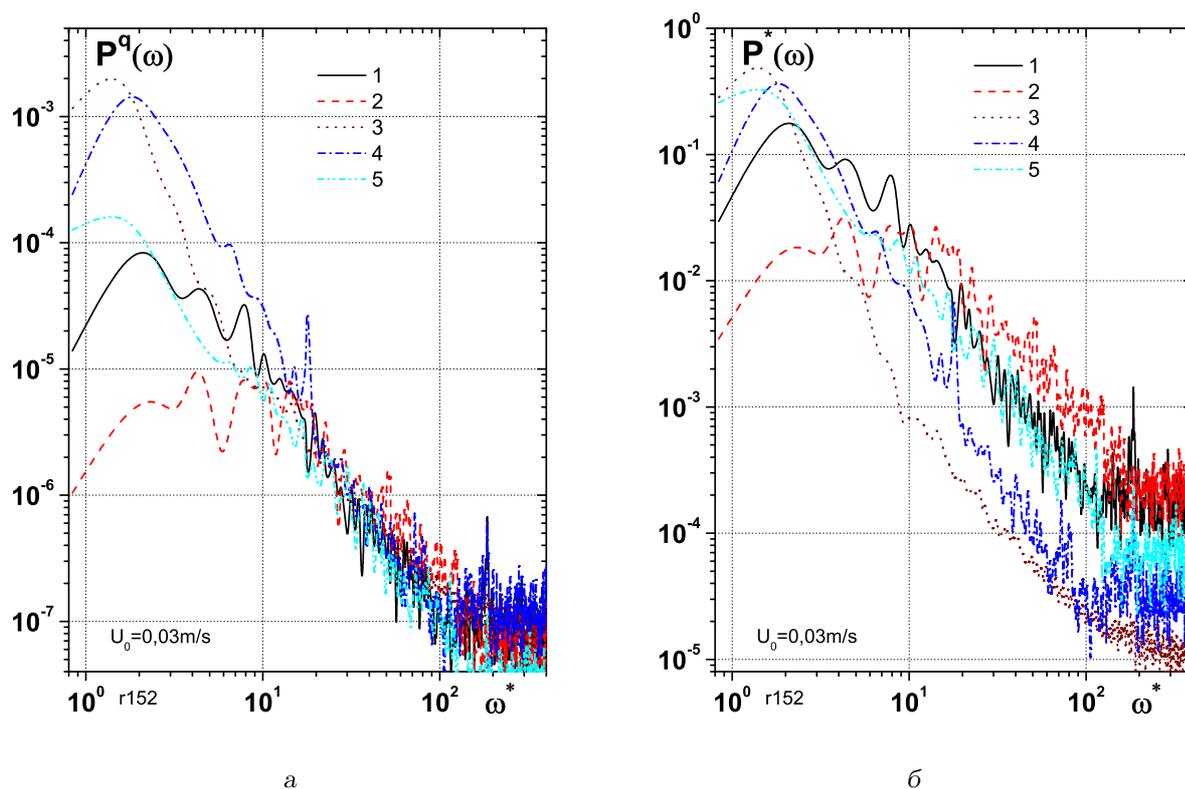


Рис. 5. Спектральные плотности мощности пульсаций пристеночного давления, измеренные вдоль срединного сечения овального углубления для скорости потока 0.03 м/с, нормированные:
а – скоростным напором; б – среднеквадратичными значениями пульсаций пристеночного давления

ничном слое. В срединном сечении углубления акустико-гидродинамический коэффициент, измеренный позади лунки, в пять раз выше, чем на дне углубления. В сечении, проходящем через переднюю сферическую часть лунки, при низкоскоростном обтекании пульсации давления (датчик N 12) на порядок выше, чем на дне лунки (датчик N 10). Наконец, в сечении, проходящем через кормовую сферическую часть лунки, интенсивность пульсаций пристеночного давления позади лунки только в три раза превышает значения, измеренные на дне лунки (датчик N 6).

3. СПЕКТРАЛЬНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ПОЛЯ ПУЛЬСАЦИЙ ПРИСТЕНОЧНОГО ДАВЛЕНИЯ

Особенности частотного распределения интенсивности псевдозвуковых пульсаций пристеночного давления, обусловленные механизмом взаимодействия вихревых структур и струйных течений с обтекаемой поверхностью, исследовались посредством анализа их спектральной плотности мощ-

ности. Для этого применялся алгоритм быстрого преобразования Фурье с использованием весовых окон Хэннинга. Нормировка спектральных зависимостей осуществлялась двумя способами – по скоростному напору набегающего потока (в результате чего интеграл под спектральными кривыми соответствовал акустико-гидродинамическому коэффициенту) и по среднеквадратичному значению пульсаций (тогда площадь под спектральными кривыми равна единице). В первом случае можно судить как о распределении интенсивности пульсаций в частотном диапазоне, так и о трансформации кинетической энергии набегающего потока в энергию пульсаций давления. Во втором случае экспериментальные результаты указывают на вклад частотных компонент поля пульсаций давления в энергию пульсаций давления, выражаемую среднеквадратичным значением.

На рис. 5, а представлены спектральные плотности мощности пульсаций давления, измеренные вдоль срединного сечения овальной лунки для скорости потока 0.03 м/с. Нормировка данных проводилась по скоростному напору и по внешним

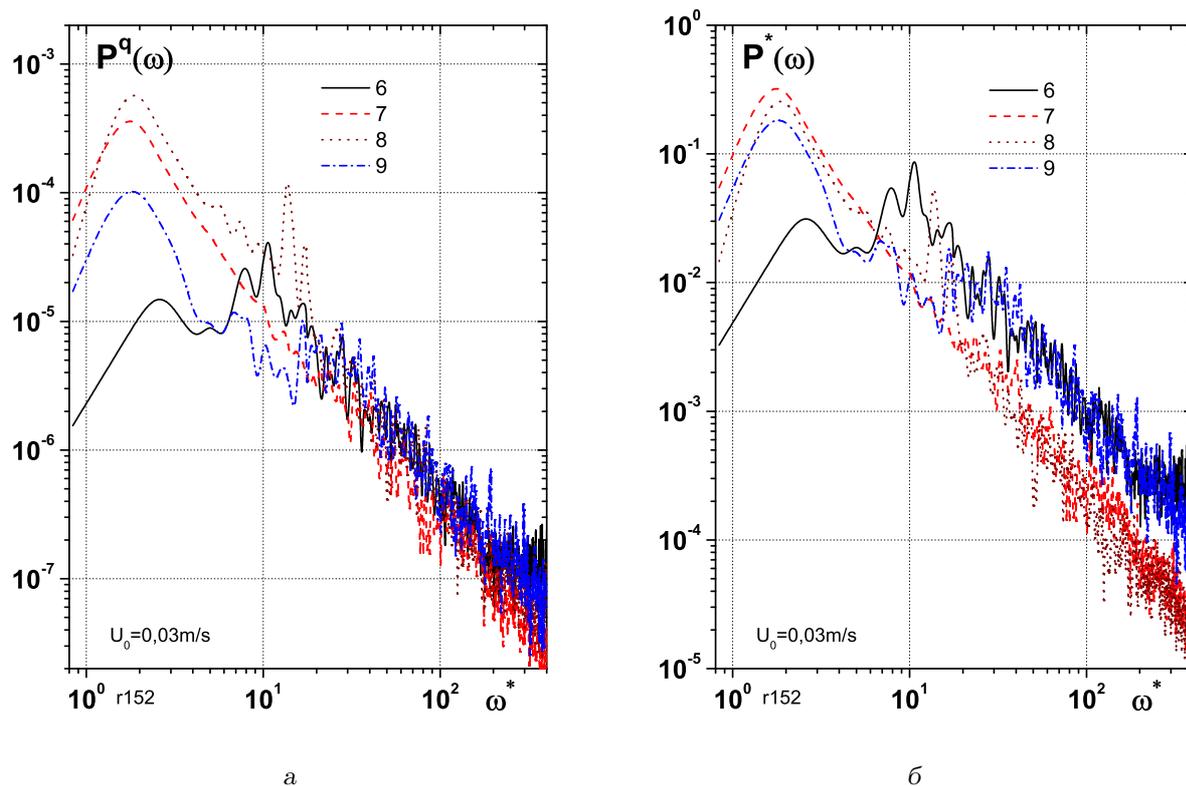


Рис. 6. Спектральные плотности мощности пульсаций пристеночного давления, измеренные вдоль кормовой сферической части овальной лунки для скорости потока 0.03 м/с, нормированные:
а – скоростным напором; б – среднеквадратичными значениями пульсаций пристеночного давления

переменным, по диаметру овальной лунки и скорости потока – $p^q(\omega) = p^2(\omega)U/q^2d$. Частота обезразмеривалась как $\omega^* = 2\pi fd/U$. Максимальные уровни пульсаций пристеночного давления получены за овальным углублением в области ближнего следа. Это объясняется интенсивным взаимодействием выбрасываемого из лунки вихревого течения и пограничного слоя пластины. При этом уровни пульсаций давления, измеренные датчиком N 4, оказываются более высокими во всем диапазоне, кроме области низких частот, где более интенсивные пульсации давления наблюдаются в области взаимодействия сдвигового слоя с кормовой стенкой овальной лунки (датчик N 3). Следует отметить, что вблизи кормовой стенки лунки низкочастотные пульсации давления, обусловленные действием крупномасштабных вихревых структур, почти на порядок выше, чем в ненарушенном пограничном слое перед овальным углублением (ср. кривые 1, 3 и 4). Внутри лунки интенсивность пульсаций давления убывает, особенно на низких частотах. При этом разница между пульсациями давления в срединном сечении дна лунки и

вблизи кормовой стенки достигает 40 дБ. За углублением пограничный слой постепенно восстанавливается и его влияние становится незначительным (ср. кривые 1 и 5).

О вкладе различных частотных компонент пульсаций давления в общую энергию поля пульсаций пристеночного давления можно судить из рис. 5, б, для которого экспериментальные данные нормированы среднеквадратичными значениями пульсаций давления в соответствующих точках измерений. Так, пульсации давления в области кормовой стенки лунки насыщены низкочастотными компонентами, а интенсивность высокочастотных пульсаций, источниками которых являются мелкомасштабные вихри, на несколько порядков ниже. В придонной области лунки (датчик N 2) вклад высокочастотных компонент возрастает и становится несколько выше, чем в ненарушенном пограничном слое. За овальным углублением в его срединном сечении вклад среднечастотных компонент в общую энергию становится таким же, как в ненарушенном пограничном слое. На низких и высоких частотах наблюдаются различия, хара-

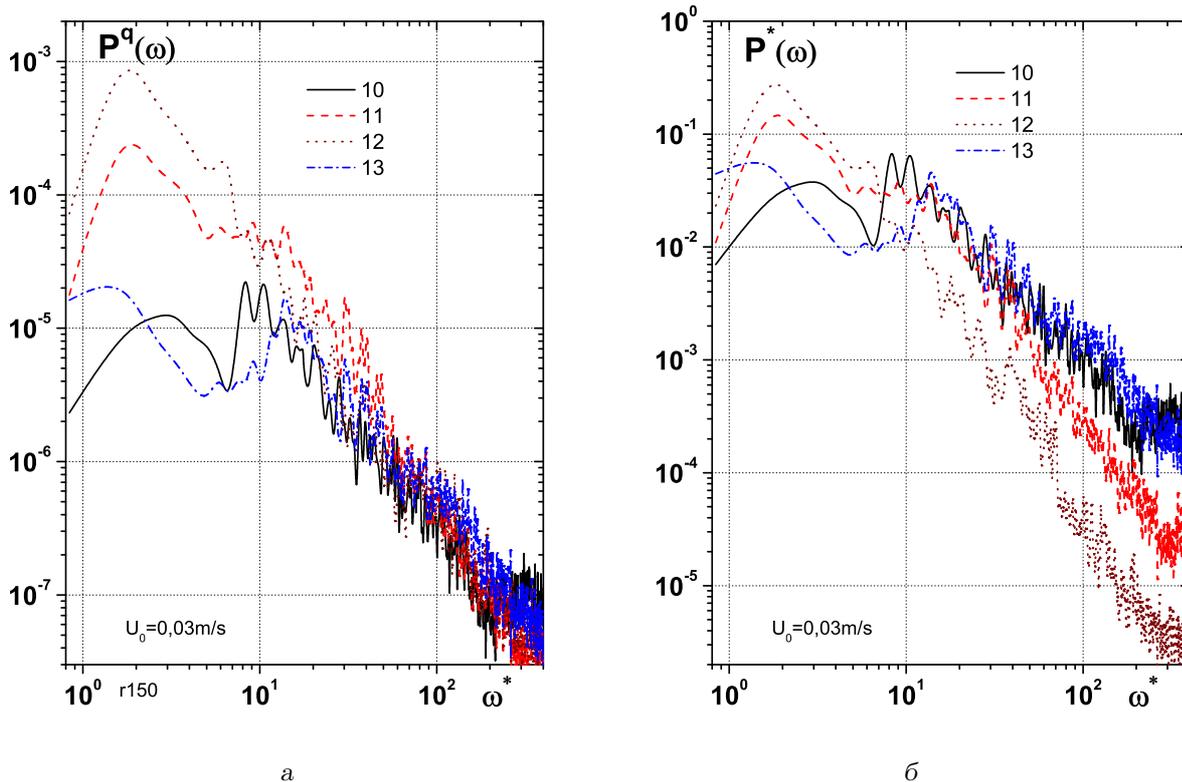


Рис. 7. Спектральные плотности мощности пульсаций пристеночного давления, измеренные вдоль передней сферической части овальной лунки для скорости потока 0.03 м/с, нормированные:
а – скоростным напором; б – среднеквадратичными значениями пульсаций пристеночного давления

ктеризующие особенности механизма восстановления пограничного слоя после воздействия на него вихревых структур, выбрасываемых из овальной лунки для данного режима обтекания.

Спектральные характеристики пульсаций давления вдоль кормовой сферической части овального углубления ($z/d=0.5$) для низкоскоростного режима обтекания ($Re_d=1200$) показаны на рис. 6, а. Необходимо отметить, что здесь уровни пульсаций давления почти на порядок ниже, чем в срединном сечении лунки. Кроме того, максимум интенсивности пульсаций пристеночного давления выявлен в области кормовой стенки и в ближнем следе лунки. В отличие от срединного сечения, различия в спектрах давления наблюдаются только на низких частотах. В придонной части лунки (датчик N 6) низкочастотные уровни спектральных плотностей мощности пульсаций давления на два порядка ниже, чем вблизи кормовой стенки. С удалением от кормовой стенки овального углубления вклады низких частот убывают, а высоких – возрастают. Это указывает на то, что с удалением от углубления вихревые структуры, обладаю-

щие большим размером, разрушаются, а интенсивность высокочастотных мелкомасштабных вихрей – источников пульсаций давления – растет. Такое поведение обусловлено действием каскадного механизма в пограничном слое, в соответствии с которым с удалением от источника выбрасываемых наружу крупномасштабных когерентных вихревых систем при их разрушении происходит передача энергии к мелким вихрям.

Нормированные среднеквадратичными значениями пульсаций давления спектральные плотности мощности, измеренные вдоль продольного сечения кормовой сферической части овального углубления, представлены на рис. 6, б. В области кормовой стенки углубления пульсации пристеночного давления в большей степени насыщены низкочастотными компонентами. Внутри углубления и за ним существенный вклад в энергию пульсаций давления вносят высокочастотные мелкомасштабные вихревые структуры, а доля низкочастотных крупномасштабных вихрей становится незначительной (см. кривую 6 – измерения на дне кормовой сферической части лунки).

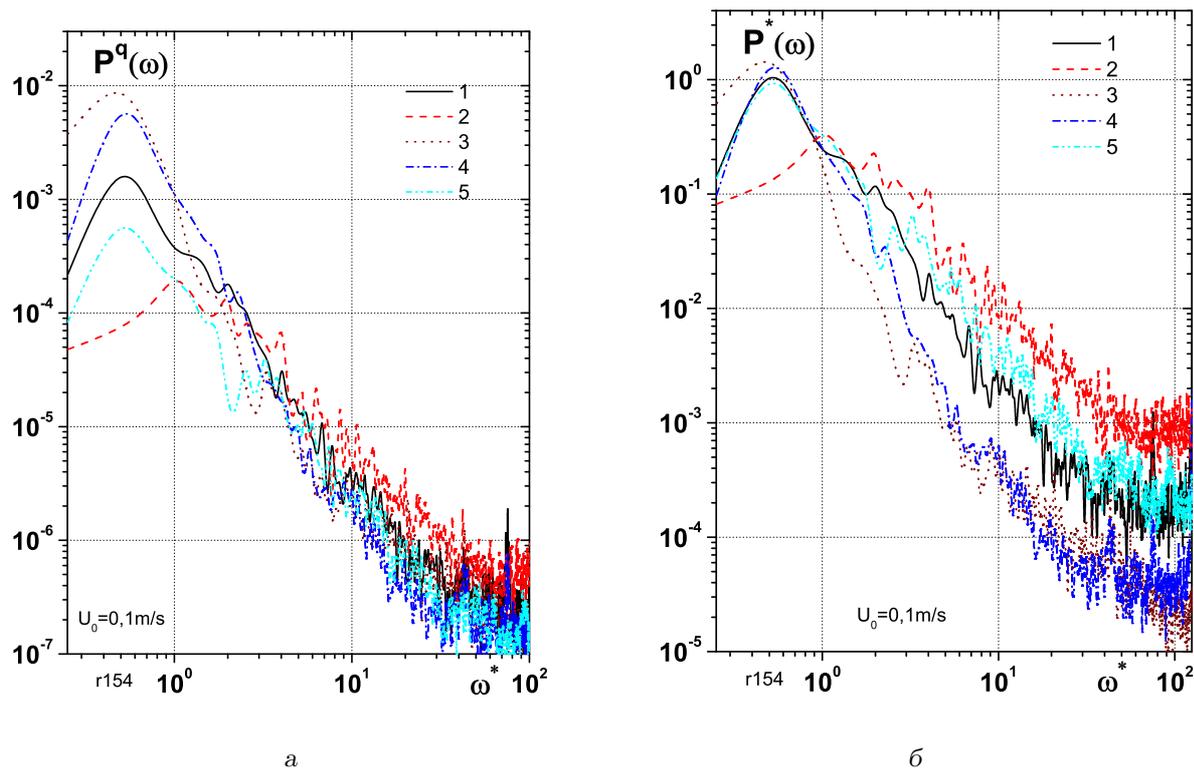


Рис. 8. Спектральные плотности мощности пульсаций пристеночного давления, измеренные вдоль срединного сечения овального углубления для скорости потока 0.1 м/с, нормированные: а – скоростным напором; б – среднеквадратичными значениями пульсаций пристеночного давления

Изменения спектров пульсаций пристеночного давления вдоль сечения, проходящего через переднюю по потоку сферическую часть овальной лунки и имеющего поперечную координату $z/d = -0.5$, для скорости потока 0.03 м/с показаны на рис. 7, а. Как и в предыдущих случаях, наибольшие спектральные уровни обнаружены у кормовой стенки лунки. Максимальная интенсивность, зафиксированная датчиком N 12, близка к интенсивности пульсаций давления, измеренной в ближнем следе в срединном сечении лунки (ср. рис. 5, а и рис. 7, а). В области ударного взаимодействия сдвигового слоя с кормовой стенкой лунки спектральные уровни пульсаций пристеночного давления понижаются на низких и повышаются на высоких частотах (ср. кривые 11 и 12 на рис. 7, а). Следовательно, в ближнем следе углубления больший вклад в энергию поля пульсаций давления вносят крупномасштабные вихревые системы. На кормовой же стенке преобладают генерирующие высокочастотные пульсации мелкомасштабные вихри, которые интенсивно формируются при столкновении слоя смещения с кормовой стенкой. В придонной области лунки низкочастотные уров-

ни пульсаций давления существенно ниже, что характерно для вихревого течения внутри лунки во всех трех исследуемых ее сечениях. По мере удаления от углубления интенсивность пульсаций давления возрастает и стремится к значению, характерному для ненарушенного пограничного слоя.

Представленные на рис. 7, б результаты еще раз подтверждают, что в зоне, прилегающей к кормовой стенке овального углубления, при низкоскоростном режиме обтекания наибольший вклад в энергию поля пульсаций давления вносят крупномасштабные когерентные вихревые системы, генерирующие низкочастотные пульсации поля давлений и скоростей. В данном случае – это крупномасштабные вихри, формируемые внутри лунки и периодически выбрасываемые из нее. В области ударного взаимодействия сдвигового слоя с кормовой стенкой возрастает роль мелкомасштабных вихрей, поскольку структура сдвигового слоя содержит вихревые системы меньшего масштаба, чем вихревые системы, формируемые внутри углубления. В придонной области сферической части лунки и за ней роль высокочастотных компонент возрастает вследствие каскадного разрушения кру-

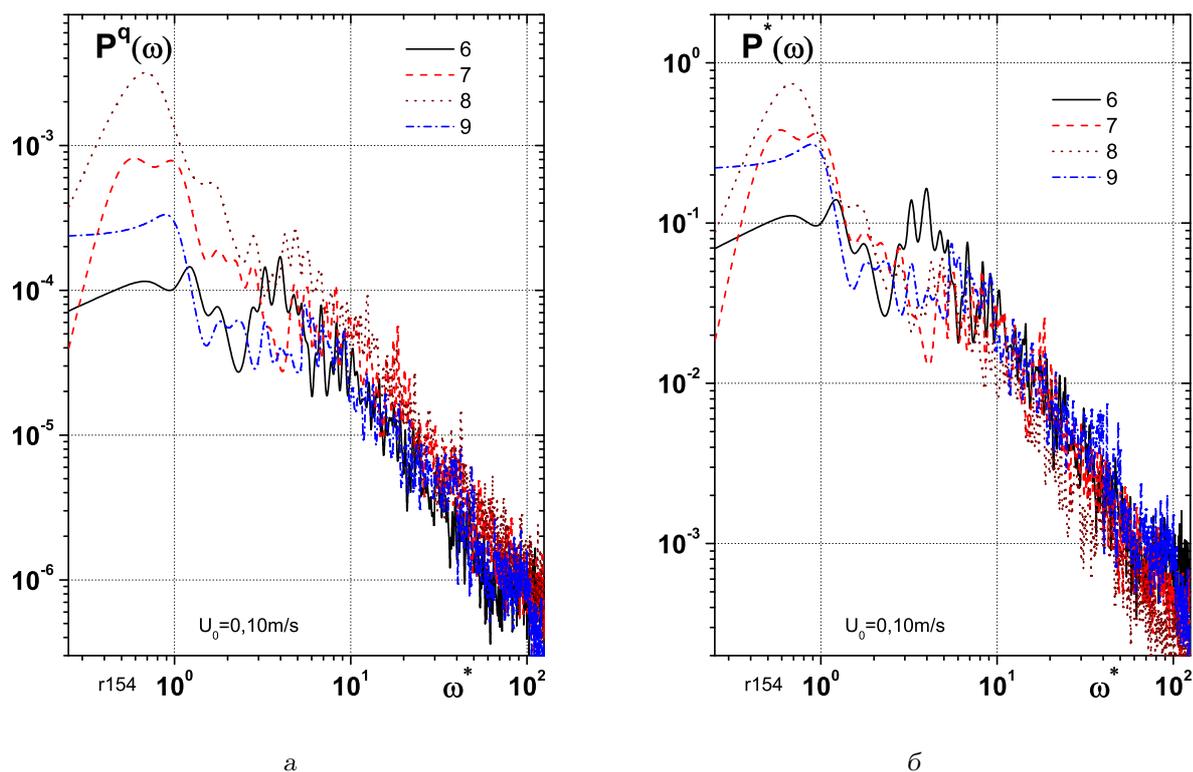


Рис. 9. Спектральные плотности мощности пульсаций пристеночного давления, измеренные вдоль кормовой сферической части овальной лунки для скорости потока 0.1 м/с, нормированные: а – скоростным напором; б – среднеквадратичными значениями пульсаций пристеночного давления

пномасштабных вихрей, энергией которых подпитываются мелкомасштабные вихри.

С увеличением скорости течения до 0.1 м/с максимальные вдоль срединного сечения лунки уровни пульсаций давления зарегистрированы в ближнем следе в непосредственной близости к кормовому краю (кривая 4 на рис. 8, а). В отличие от режима более медленного обтекания, наибольшая интенсивность пульсаций давления за лункой наблюдается теперь лишь на низких частотах, а в высокочастотной области они близки к значениям для ненарушенного пограничного слоя. Необходимо отметить, что для скорости потока 0.1 м/с уровень максимума пульсаций давления увеличился почти в пять раз по сравнению со скоростью 0.03 м/с. Наряду с этим уменьшилась частота ω^* , на которой этот максимум наблюдается – она стала близка к 0.55, что соответствует числу Струхала $St = fd/U \approx 0.09$. В области взаимодействия сдвигового слоя с кормовой стенкой лунки также наблюдается почти пятикратное повышение низкочастотных пульсаций давления по сравнению с поверхностью пластины под ненарушенным пограничным слоем (см. кривые 3 и 1).

При наименьшей из исследуемых скоростей потока, минимальные уровни пульсаций давления наблюдаются на дне овальной углубления. В области низких частот они почти на два порядка ниже, чем в ближнем следе лунки, и на порядок ниже, чем на плоской пластине перед углублением (см. рис. 8, а). В то же время, высокочастотные пульсации давления на дне лунки оказались самыми интенсивными. По мере удаления от кормовой кромки углубления поведение спектральных кривых вновь приближается к картине, наблюдавшейся в ненарушенном пограничном слое.

Для исследуемого режима обтекания вклад низкочастотных компонент в общую энергию поля пульсаций пристеночного давления остается практически неизменным вдоль срединного сечения лунки за исключением ее придонной области (см. рис. 8, б). На высоких же частотах наибольшее влияние оказывают мелкомасштабные вихри на дне овальной лунки, а интенсивность высокочастотных пульсаций давления вблизи кормовой стенки значительно ниже (ср. кривые 3 и 4 на рис. 8, б).

В сечении, проходящем вдоль кормовой сфери-

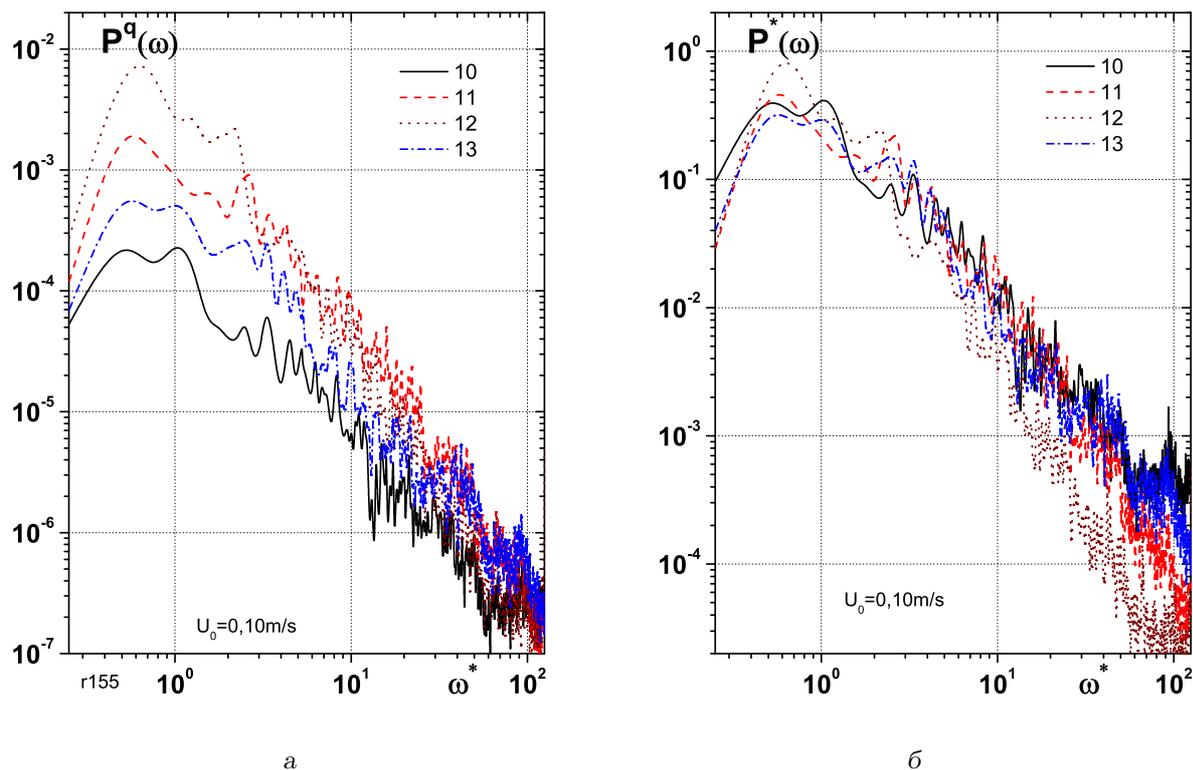


Рис. 10. Спектральные плотности мощности пульсаций пристеночного давления, измеренные вдоль передней сферической части овальной лунки для скорости потока 0.1 м/с, нормированные:
 а – скоростным напором; б – среднеквадратичными значениями пульсаций пристеночного давления

ческой части овальной лунки, наибольшая интенсивность пульсаций давления также наблюдается за углублением (рис. 9, а). При этом рост спектральных уровней, нормированных скоростным напором, происходит в области низких частот. Минимальные их значения зарегистрированы в придонной области лунки (кривая б на рис. 9, б) в диапазоне частот $0.03 \leq \omega^* \leq 1.2$.

В сечении, проходящем вдоль передней сферической части лунки, выявлено существенное отличие спектральных уровней пульсаций давления в разных точках обтекаемой поверхности (рис. 10, а). При этом их значения в ближнем следе овального углубления более, чем на порядок превышают величины, фиксируемые на дне передней сферической части лунки (ср. кривые 12 и 10 на рис. 10, а). В зоне взаимодействия сдвигового слоя с кормовой стенкой низкочастотные составляющие спектров оказались несколько ниже, чем в ближнем следе. На удалении, превышающем диаметр углубления, интенсивность пульсаций давления убывает во всем исследуемом частотном диапазоне. Вклад различных частотных компо-

нент в общую энергию пульсаций давления вдоль выбранного сечения практически одинаков для всех измерительных точек, кроме области ближнего следа. Здесь, как показано на рис. 10, б, наиболее выражены низкочастотные составляющие, обусловленные действием крупномасштабных вихрей на обтекаемую поверхность.

ВЫВОДЫ

Анализ результатов экспериментальных исследований поля пульсаций пристеночного давления внутри овального углубления на плоской поверхности, расположенного под углом 60° к направлению набегающего низкоскоростного потока, и вблизи него дал возможность сделать следующие выводы.

1. Среднеквадратичные значения пульсаций давления внутри овального углубления и вблизи него пропорциональны квадрату скорости набегающего потока. Максимальная их интенсивность наблюдается в области взаимодействия сдвигового слоя с кормовой

стенкой овальной лунки и в ее ближнем следе. Наиболее слабые пульсации пристеночного давления имеют место в придонной области овального углубления – они в пять–семь раз ниже, чем на кормовой стенке лунки. В срединном сечении овального углубления на кормовой стенке и сразу же позади нее уровни пульсаций давления в три–четыре раза превышают значения для ненарушенного пограничного слоя на поверхности пластины. По мере удаления от лунки среднеквадратичные значения пульсаций давления постепенно убывают до уровней, измеренных в ненарушенном пограничном слое. Акустико-гидродинамический коэффициент на дне кормовой сферической части лунки оказался на 6 дБ выше, чем в передней ее сферической части.

2. В срединном сечении овального углубления самые высокие спектральные уровни пульсаций пристеночного давления фиксируются в ближнем следе углубления (позади его кормовой стенки). Выброс вихревых структур из лунки генерирует интенсивные низкочастотные пульсации давления позади нее. В непосредственной близости к кормовой стенке низкочастотные спектральные уровни более чем на порядок превышают значения, зарегистрированные в условиях ненарушенного пограничного слоя. Минимальные уровни спектральных составляющих пульсаций давления наблюдаются на дне овального углубления (особенно в области низких частот). Здесь псевдозвуковые пульсации, генерируемые вихревыми структурами, почти на 40 дБ ниже, чем в ближнем следе лунки, и на 20 дБ, – чем в ненарушенном пограничном слое. Установлено, что в придонной области овальной лунки наибольший вклад в общую энергию пульсаций давления вносят высокочастотные компоненты, генерируемые мелкомасштабными вихрями, которые формируются вблизи дна. В области взаимодействия сдвигового слоя с кормовой стенкой лунки и в ее ближнем следе наиболее энергоемкими становятся низкочастотные крупномасштабные пульсации, основным источником которых являются вихревые структуры, выбрасываемые из углубления в пограничный слой.
3. В кормовой сферической части овальной лунки, где визуализация низкоскоростного потока показывает интенсивный выброс вихрей [27, 28], спектральные уровни пульсаций

пристеночного давления практически во всем исследуемом частотном диапазоне оказались почти на (15...20) дБ ниже, чем в срединном сечении. Наибольшая же интенсивность пульсаций давления наблюдается в ближнем следе овальной лунки (особенно на низких частотах). Наименьшее насыщение вихревого потока крупномасштабными низкочастотными когерентными вихревыми структурами обнаружено в придонной области лунки, где спектральные уровни для низких частот почти на 30 дБ ниже, чем вблизи кормовой стенки. На высоких частотах интенсивность пульсаций пристеночного давления практически одинакова вдоль всего сечения, проходящего через кормовую сферическую часть овальной лунки.

4. В сечении, проходящем через переднюю сферическую часть овальной лунки, спектральные уровни пульсаций давления значительно отличаются друг от друга, как на низких, так и на высоких частотах. Так, в ближнем следе овального углубления они на 30 дБ превышают уровни, измеренные на дне лунки. Здесь основной вклад в энергию поля пульсаций давления вносят крупномасштабные низкочастотные вихревые системы. На кормовой стенке и на дне передней сферической части лунки преобладают мелкомасштабные вихри, генерирующие высокочастотные псевдозвуковые пульсации давления.
5. Установлено, что уровни спектральных плотностей мощности пульсаций давления вдоль всей области ближнего следа овального углубления максимальны в диапазоне низких частот. На дне лунки спектральные уровни пульсаций давления минимальны по всей ее длине. С удалением от углубления пограничный слой постепенно восстанавливается, о чем свидетельствует поведение спектров пульсаций пристеночного давления.

БЛАГОДАРНОСТИ

Автор выражает благодарность и искреннюю признательность академику НАН Украины, проф. В. Т. Гринченко, проф. Г. А. Воропаеву и проф. С. А. Исаеву за активное участие в обсуждении и анализе результатов исследований, а также канд. техн. наук А. В. Воскобойнику и главному прибористу А. А. Воскобойнику за участие в проведении экспериментальных исследований и обработке данных. Работа выполнена при финансовой

поддержке по гранту совместного конкурса НАН Украины – РФФИ 2008–2009 гг. (проект N 2-08a, гос. рег. N 0108U003264; N 0109U003389 и проект N 08-08-90400; N 08-01-00059).

- Петровский В. С. Гидродинамические проблемы турбулентного шума. – Л.: Судостроение, 1966. – 252 с.
- Смоляков А. В. Шум турбулентных потоков. – С.-Пб.: ЦНИИ им. акад. А. И. Крылова, 2005. – 312 с.
- Blake W. K. Mechanics of flow-induced sound and vibration: in 2 vols. – New York: Academic Press, 1986. – 974 p.
- Bull M. K. Wall-pressure fluctuations beneath turbulent boundary layers: Some reflections on forty years of research // J. Sound Vib. – 1996. – **190**, N 3. – P. 299–315.
- Смоляков А. В. Шум турбулентного пограничного слоя на гладкой и шероховатой пластине при малых числах Маха // Акуст. ж. – 2001. – **47**, N 2. – С. 264–272.
- Dowling A. P. Underwater flow noise // Theor. Comput. Fluid Dyn. – 1998. – **10**. – P. 135–153.
- Robinson S. K. Coherent motions in the turbulent boundary layer // Ann. Rev. Fluid Mech. – 1991. – **23**. – P. 601–630.
- Воскобойник В. А., Гринченко В. Т., Макаренков А. П. Скорости переноса когерентных вихревых структур в турбулентном пограничном слое на цилиндре // Акуст. вісн. – 2000. – **3**, N 4. – С. 21–29.
- Farabee T. M., Casarella M. J. Spectral features of wall pressure fluctuations beneath turbulent boundary layers // Phys. Fluids. – 1991. – **3**, N 12. – P. 2410–2420.
- Voskoboinick V. A., Makarenkov A. P. Spectral characteristics of the hydrodynamical noise in a longitudinal flow around a flexible cylinder // Int. J. Fluid Mech. – 2004. – **31**, N 1. – P. 87–100.
- 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 // Акуст. вісн. – 2008. – **11**, N 3. – С. 34–58.
- Кикнадзе Г. И., Гачечиладзе И. А., Алексеев В. В. Самоорганизация смерчеобразных струй в потоках вязких сплошных сред и интенсификация теплообмена, сопровождающая это явление. – М.: Изд-во Моск. энергет. ун-та, 2005. – 83 с.
- Кикнадзе Г. И., Гачечиладзе И. А., Олейников В. Г., Городков А. Ю. Самоорганизация смерчеобразных струй в потоках сплошной среды и технологии, сопровождающие это явление // Третья межд. конф. «Тепломассообмен и гидродинамика в закрученных потоках». – Москва, Россия. – 2008. – С. 1–3.
- Халатов А. А., Коваленко Г. В., Терехов В. И. Режимы течения в единичном углублении, имеющем форму сферического сегмента // VI минский межд. форум по теплообмену, ММФ 2008. – Минск, Беларусь. – 2008. – С. 1–10.
- Исаев С. А., Леонтьев А. И., Корнев Н. В. Численное моделирование смерчевого теплообмена при обтекании поверхностей с лунками (состояние и перспективы) // VI минский межд. форум по теплообмену, ММФ 2008. – Минск, Беларусь. – 2008. – С. 1–9.
- Wei X. J., Joshi Y. K., Ligrani P. M. Numerical simulation of laminar flow and heat transfer inside a microchannel with one dimpled surface // J. Electron. Packag. – 2007. – **127**, N 1. – P. 63–70.
- Халатов А. А. Теплообмен и гидродинамика около поверхностных углублений (лунок). – Киев: ИТТФ НАНУ, 2005. – 76 с.
- Kiknadze G., Gachechiladze I., Oleinikov V. Tornado-like technology of heat and mass transfer intensification at lagging increase of hydraulic losses (Review of experimental results and intensification mechanisms). – Moscow: Basert Co. Ltd, 1994–1995. – 102 p.
- Исаев С. А., Леонтьев А. И., Баранов П. А., Метов Х. Т., Усачов А. Е. Численный анализ влияния вязкости на вихревую динамику при ламинарном отрывном обтекании лунки на плоскости с учетом ее асимметрии // Инж.-физ. ж. – 2001. – **74**, N 2. – С. 62–67.
- Исаев С. А., Леонтьев А. И., Митяков А. В., Пышный И. А., Усачов А. Е. Интенсификация смерчевого турбулентного теплообмена в асимметричных лунках на плоской стенке // Инж.-физ. ж. – 2003. – **76**, N 2. – С. 31–34.
- Воскобойник А. В., Воскобойник В. А. Источники резонансных мод осцилляций внутри обтекаемой полусферической лунки // Акуст. вісн. – 2007. – **10**, N 4. – С. 36–46.
- Voropayev G. A., Voskoboinick V. A., Rozumnyuk N. V., Voskoboinick A. V. Vortical flow features in a hemispherical cavity on a flat plate // Pap. Sixth Int. Sympos. on Turbulence and Shear Flow Phenomena, TSFP-6: Vol. 3. – Seoul, Korea. – 2009. – P. 563–568.
- Смоляков А. В., Ткаченко В. М. Измерение турбулентных пульсаций. – Л.: Энергия, 1980. – 264 с.
- Vinogradnyi G. P., Voskoboinick V. A., Grinchenko V. T., Makarenkov A. P. Spectral and correlation characteristics of the turbulent boundary layer on an extended flexible cylinder // J. Fluid Dyn. – 1989. – **24**, N 5. – P. 695–700.
- Schewe G. On the structure and resolution of wall-pressure fluctuations associated with turbulent boundary-layer flow // J. Fluid Mech. – 1983. – **134**. – P. 311–328.
- Willmarth W. W. Pressure fluctuations beneath turbulent boundary layers // Ann. Rev. Fluid Mech. – 1975. – **7**. – P. 13–37.
- Воропаев Г. А., Воскобойник А. В., Воскобойник В. А., Исаев С. А. Визуализация ламинарного обтекания овального углубления // Прикл. гідромех. – 2009. – **11**, N 4. – С. 31–46.
- Гринченко В. Т., Воропаев Г. А., Исаев С. А., Воскобойник В. А., Воскобойник А. А., Воскобойник А. В. Управление ламинарным пограничным слоем вихрями, генерируемыми овальной лункой // Вісн. Донецьк. ун-ту, Сер. А: Природничі науки. – 2009. – Вип. 1. – С. 191–198.