ISSN 1028-7507 Акустичний вісник. 2009. Том 12, N 4. С. 10 – 22

УДК 532.517

ХАРАКТЕРИСТИКИ ПУЛЬСАЦИЙ ПСЕВДОЗВУКОВОГО ДАВЛЕНИЯ В ЛУНКЕ ПРИ МАЛЫХ ЧИСЛАХ РЕЙНОЛЬДСА

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

Институт гидромеханики НАН Украины, Киев

Получено 13.08.2009

Представлены результаты экспериментальных исследований полей пульсаций скоростного напора и пристеночного давления, сгенерированных вихревыми структурами, которые формируются внутри полусферического углубления на плоской пластине, обтекаемого течением при малых числах Рейнольдса. Измерения проводились с помощью ансамбля миниатюрных датчиков пульсаций пристеночного давления, установленных заподлицо с обтекаемой поверхностью лунки и в ее окрестности, а также датчиков пульсаций скоростного напора, расположенных внутри лунки над ее поверхностью. Получены среднеквадратичные значения и спектральные плотности мощности исследуемых величин. Показано влияние 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. В спектральных зависимостях пульсаций пристеночного давления и скоростного напора обнаружены тональные составляющие, обусловленные частотой вращения симметричной крупномасштабной вихревой структуры внутри лунки ($\mathrm{St} \approx 0.1$), частотой ее выбросов ($\mathrm{St} \approx 0.05$) и частотой автоколебаний вихревых структур сдвигового слоя ($\mathrm{St} \approx 0.4$).

Наведені результати експериментальних досліджень полів пульсацій швидкісного напору й пристінного тиску, згенерованих вихровими структурами, які формуються всередині напівсферичного заглиблення на плоскій пластині, що обтікається течією при малих числах Рейнольдса. Вимірювання проводились за допомогою ансамблю мініатюрних датчиків пульсацій пристінного тиску, встановлених урівень з обтічною поверхнею лунки та в її околі, а також датчиків пульсацій швидкісного напору, розташованих усередині лунки над її поверхнею. Отримані середньоквадратичні значення й спектральні характеристики досліджуваних величин. Відзначені особливості генерації стійких великомасштабних вихрових структур та їхня взаємодія з примежовим шаром над пластиною. У спектральних залежностях пульсацій швидкісного натиску та пристінного тиску виявлені тональні складові, обумовлені частотою обертання симетричної великомасштабної вихрової структури усередині лунки ($\mathrm{St} \approx 0.1$), частотою її викидів ($\mathrm{St} \approx 0.05$) та частотою автоколивань вихрових структур зсувного шару ($\mathrm{St} \approx 0.4$).

The paper deals with presenting of results of experimental studying of the velocity head and wall pressure fluctuations generated by vortical structures forming in a hemispherical cavity on the flat plate streamlined by the flow at low Reynolds numbers. The measurements were conducted by the group of miniature sensors of wall pressure fluctuations flush-mounted with the streamlined surface of the dimple and in its vicinity, as well as by sensors of velocity head fluctuations situated within the dimple above its surface. The root-mean-square values and power spectral densities of the investigated fields have been obtained. The effect of the hemispheric dimple on the integral and spectral characteristics of the pseudosound pressure fluctuations field has been shown. The specific features of generation of steady large-scale vortical structures and their interaction with the boundary layer above the plate have been pointed out. The tonal components conditioned by the rotation frequency of the symmetric large-scale vortical structure in the dimple ($\mathrm{St} \approx 0.1$), its break-up frequency ($\mathrm{St} \approx 0.05$) and frequency of self-induced vibrations of the vortical structures in shear layer ($\mathrm{St} \approx 0.4$) have been found in spectra of the velocity head and wall pressure fluctuations.

ВВЕДЕНИЕ

В последние годы одним из перспективных способов управления пограничным слоем с целью уменьшения сопротивления обтекаемых тел, увеличения тепло- и массопереноса, а также снижения уровней аэрогидродинамических шумов и вибраций стало придание обтекаемой поверхности особых свойств, в том числе, создание луночных поверхностей или поверхностей с системами углублений [1 – 3]. Нанесение на поверхность лунок или выемок различной формы, размеров и конфигураций изменяет структуру пограничного слоя, насыщая его вихревыми структурами и струйными течениями, которые зарождаются внутри углублений. Формирование вихревых структур внутри лунок, их выброс наружу и взаимодействие с вихревыми системами пограничного слоя и с обтекаемой поверхностью генерируют интенсивные осцилляции в самом потоке и на ограничивающих его поверхностях. Осцилляции полей скоростей, давлений, завихренности, температуры и касательных напряжений в значительной степени зависят от геометрических параметров лунок, расположения их на обтекаемой поверхности, гидродинамических и теплофизических характеристик потока и жидкости.

Как показывают теоретические и экспериментальные исследования, в глубоких сферических лунках для различных режимов течения формируются симметричные и асимметричные вихри [4 – 6]. При определенных условиях они перио-

 © А. А. Воскобойник, А. В. Воскобойник, В. А. Воскобойник, 2009

дически выбрасываются из лунки в пограничный слой, кардинальным образом меняя его структуру. В свою очередь, эти изменения приводят к изменению генерируемого пограничным слоем гидродинамического шума, в котором появляются тональные составляющие. Их наличие обусловлено излучением псевдозвука (а для больших скоростей потока, еще и звука) вихревыми структурами и резонансными явлениями гидродинамической и гидроакустической природы, которые возникают внутри лунки при взаимодействии набегающего потока с обтекаемой поверхностью углубления [7 – 9].

Цель данного экспериментального исследования состоит в изучении особенностей формирования вихревых систем в полусферическом углублении на пластине, обтекаемом низкоскоростным потоком при малых числах Рейнольдса. Исследованы интенсивность псевдозвуковых пульсаций давления, а также спектральные характеристики поля пульсаций скоростного напора и пристеночного давления внутри углубления и вблизи него. Установлена связь между характеристиками поля пульсаций давления, пульсациями скоростного напора и особенностями формирования и эволюции генерируемых когерентных вихревых систем.

1. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ УСТАНОВКА И МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЙ

Эксперименты проводились в гидродинамическом канале длиной 16 м и шириной 1 м со свободной поверхностью воды глубиной 0.04 м. Измерительный участок, на дно которого устанавливалась пластина с локальной неоднородностью обтекаемой поверхности, находился посредине канала (рис. 1). Гидравлически гладкая пластина, изготовленная из полированного органического стекла толщиной 0.01 м, шириной 0.5 м и длиной 2 м, имела острые переднюю и кормовую кромки для обеспечения безотрывного ее обтекания. К боковым сторонам пластины крепились вертикальные концевые шайбы из органического стекла длиной 2 м, шириной 0.2 м и толщиной 0.005 м. На расстоянии 0.8 м от носка пластины было сделано полусферическое отверстие диаметром $d = 0.1$ м. К нижней части пластины крепился лист с масштабной сеткой и пенопластовый обтекатель. Скорость потока U изменялась от 0.06 до 0.15 м/с, а число Рейнольдса, рассчитанное по диаметру лунки и по скорости набегающего потока $\mathrm{Re}_d = dU/\nu$, где ν – кинематическая вязкость жидкости, составляло от 6000 до 15000. Число Рейнольдса по длине пластины до места установки полусферической лунки было $\mathrm{Re}_x = (5 \ldots 12) \cdot 10^4$.

Исследование поля пульсаций давления над обтекаемой поверхностью пластины с полусферическим углублением проводились с помощью миниатюрных пьезокерамических датчиков пульсаций давления мембранного и стержневого типов, имеющих диаметр чувствительной поверхности 0.0015 и 0.0013 м соответственно. Датчики пульсаций пристеночного давления устанавливались заподлицо с обтекаемой поверхностью, а датчики пульсаций скоростного напора посредством соответствующих державок вводились в исследуемую область. В экспериментах на каждой державке располагался корреляционный блок из двух датчиков пульсаций скоростного напора, приемные поверхности которых находилась вблизи друг от друга и были направлены навстречу набегающему потоку. Это позволяло регистрировать пульсации скоростного напора или динамического давления. Малый размер чувствительной поверхности используемых датчиков позволил фиксировать источники псевдозвуковых пульсаций пристеночного давления и скоростного напора с пространственными масштабами, превышающими 0.003 м (т. е. с длиной волны, превышающей два диаметра чувствительной поверхности датчиков).

Исследование поля пульсаций пристеночного давления внутри лунки и в ее ближнем следе осуществлялось восемью датчиками пульсаций давления, схема расположения которых представлена на рис. 2, а координаты (в размерном и безразмерном виде) представлены в таблице. При этом использовалась правосторонняя декартова система координат, начало которой располагалось на плоскости измерительной пластины в центре полусферы. Положительное направление продольной оси (x) совпадало с направлением потока, а вертикальная ось (y) была направлена по нормали от поверхности пластины.

Все датчики, независимо от назначения и конструкции, 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 посредством пистонфонов фирмы Брюль и Къер, в которых генерировалось давление заданной амплитуды и частоты. Относительные методы калибровки реализовывались с помощью создания в ближнем и дальнем поле перепада гидродинамического и акустического давлении различной интенсивности и частотного наполнения, вплоть до белого и розового шумов. Калибруемые датчики сопоставлялись с эталонными гидрофонами и микрофонами фирмы Брюль и Къер. При

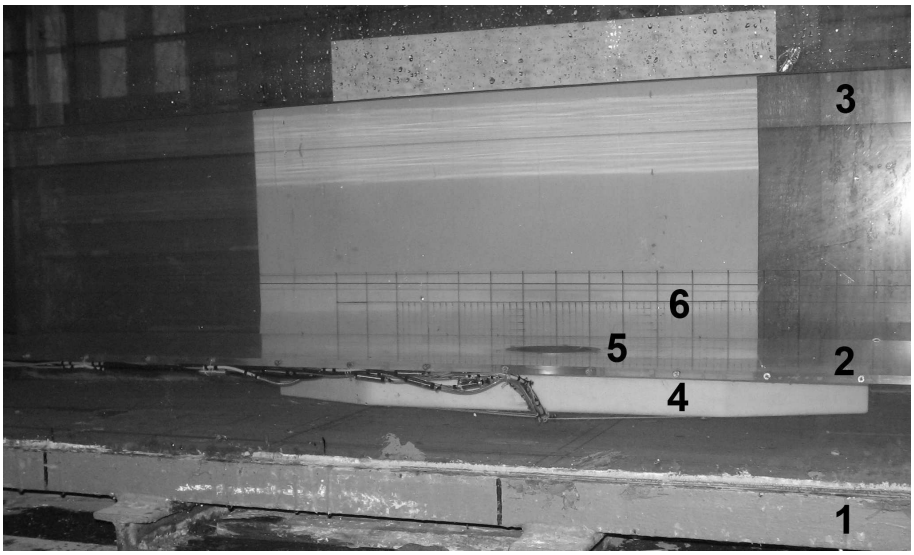

Рис. 1. Расположение исследуемой пластины с полусферической лункой в гидродинамическом канале:
1 – канал; *2* – пластина; *3* – уровень воды; *4* – обтекатель; *5* – лунка; *6* – координатная сетка

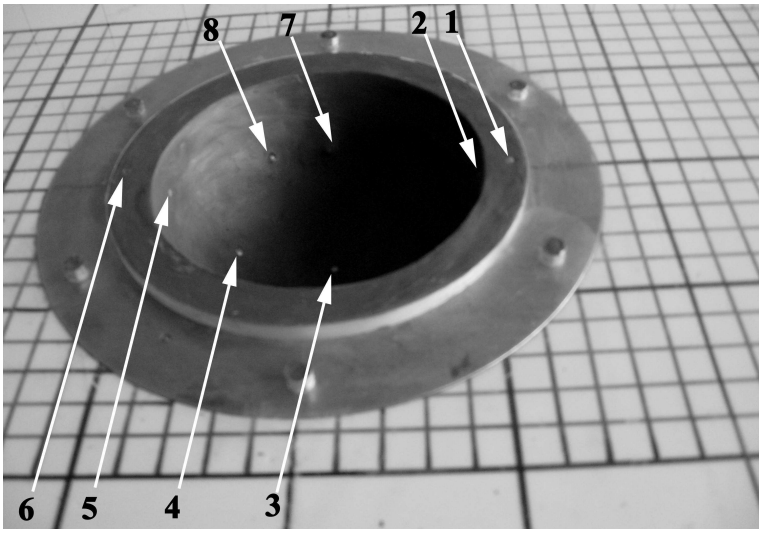

Рис. 2. Схема расположения датчиков пульсаций пристеночного давления внутри и вблизи лунки

Таблица. Координаты датчиков пульсаций пристеночного давления

N	x, м	y, м	z, м	x/d	y/d	z/d
1	−0.058	0	0	−0.58	0	0
2	−0.049	−0.005	0	−0.49	−0.05	0
3	0	−0.050	0	0	−0.5	0
4	0.030	−0.036	0	0.3	−0.36	0
5	0.048	−0.008	0	0.48	−0.08	0
6	0.058	0	0	0.58	0	0
7	0	−0.025	0.038	0	−0.25	0.38
8	0.018	−0.025	0.035	0.18	−0.25	0.35

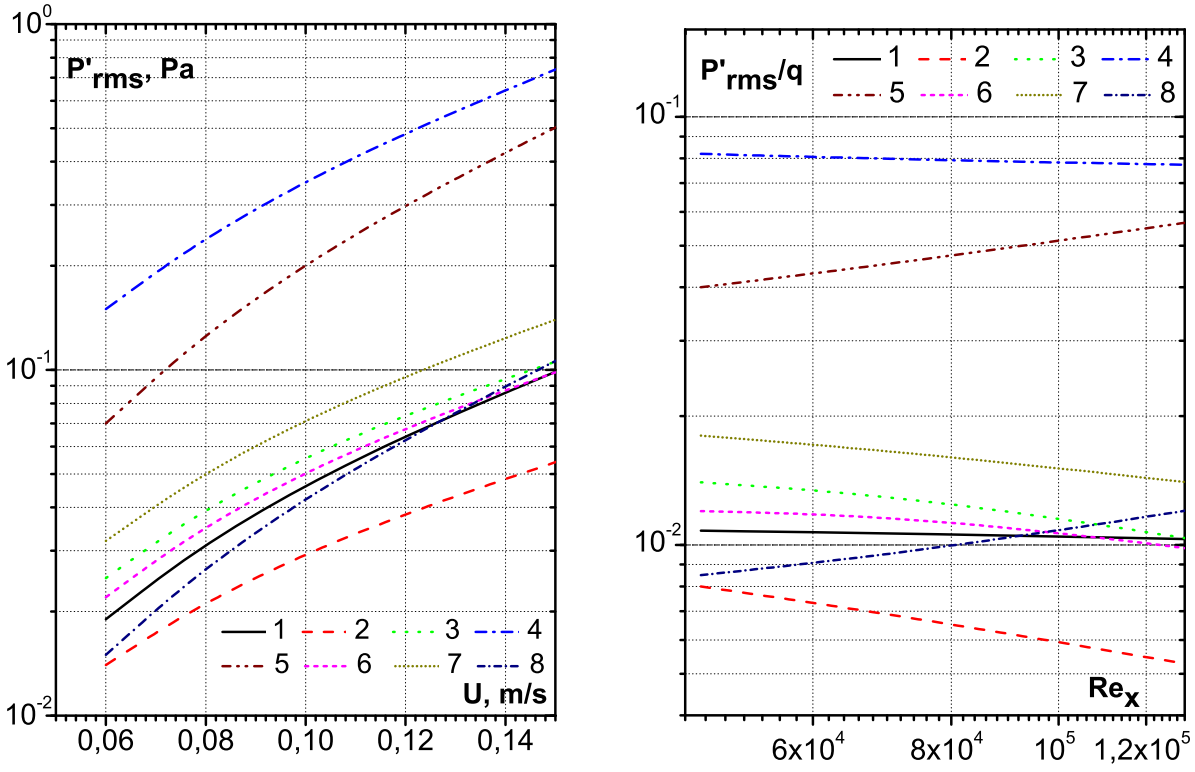

Рис. 3. Осредненные значения пульсаций пристеночного давления на обтекаемой поверхности лунки и в ее окрестности:
а – среднеквадратичные значения в размерном виде; *б* – нормированные скоростным напором

этом определялись области линейной зависимости амплитуды калибруемого сигнала и области резонансных частот тестируемых датчиков. Кроме того, датчики пульсаций давления испытывались на вибростендах фирмы Брюль и Къер для определения их виброчувствительности в трех взаимно перпендикулярных плоскостях. Эта характеристика использовалась при анализе данных и учете влияния вибрации на показания используемых датчиков и их виброкомпенсации.

В ходе экспериментальных исследований датчики давлений периодически поверялись посредством генерации в гидродинамическом канале импульса избыточного давления или его гармонической моды, что служило средством текущего контроля состояния используемых датчиков и их чувствительности. Наряду с этим, тестирование датчиков проводилось перед началом проведения исследований и после их окончания.

В результате погрешность измерений интегральных характеристик поля пульсаций давления не превышала 12 %, а пульсаций скоростного напора – 10 % при надежности 0.95 или 2σ. Погрешность измерений спектральных характеристик составляла до 2 дБ в исследуемом диапазоне частот при той же надежности результатов.

2. ИНТЕГРАЛЬНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ПСЕВДОЗВУКОВЫХ ПУЛЬСАЦИЙ ДАВЛЕНИЯ

Изменения среднеквадратичных значений пульсаций пристеночного давления, измеренные на обтекаемой поверхности полусферической лунки и в ее окрестности, в зависимости от скорости потока представлены на рис. 3, *а*. Здесь номера кривых соответствуют номерам датчиков пульсаций давления, которые установлены заподлицо с обтекаемой поверхностью лунки и пластины вблизи лунки (см. рис. 2). Как видно из графика, с увеличением скорости обтекания интенсивность пульсаций пристеночного давления монотонно нарастает. Наибольшие их уровни наблюдаются на кормовой стенке, с которой взаимодействуют вихревые структуры сдвигового слоя. Кроме того, как показали визуальный контроль [10, 11] и численное моделирование обтекания полусферической лунки [12, 13], над срединной частью кормовой стен-

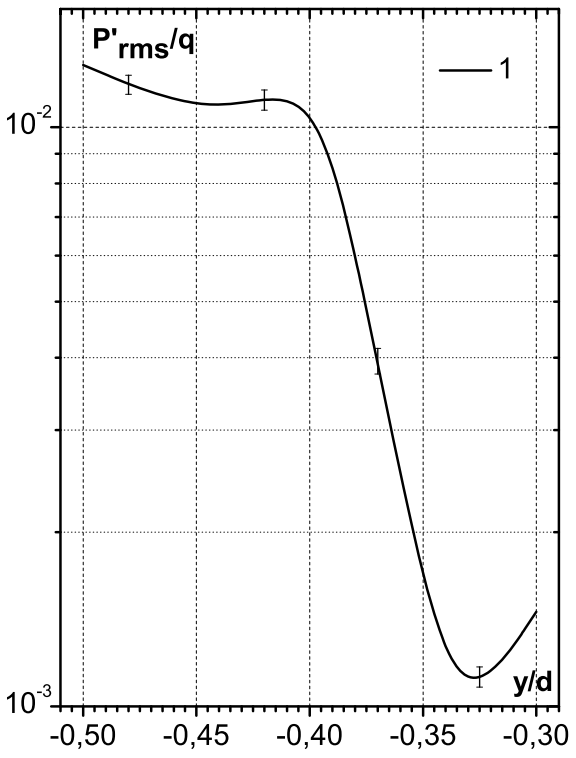

Рис. 4. Интенсивность пульсаций скоростного напора в придонной области поусферической лунки, обтекаемой потоком со скоростью $U = 0.1$ м/с

ки лунки происходит выброс симметричных вихревых структур наружу. Это также значительно увеличивает пульсационную энергию вихревого потока над кормовой поверхностью лунки, что приводит к росту интенсивности пульсаций пристеночного давления, зарегистрированных в измерительных точках 4 и 5 (см. кривые *4* и *5* на рис. 3, *а*). Наименьшие уровни наблюдаются на передней стенке полусферической лунки, причем разница интенсивности пульсаций давления на кормовой и передней стенках лунки превышает 20 дБ (ср. кривые *2* и *4*). Перед углублением и в его ближнем следе интенсивность пульсаций давления приблизительно одинакова (ср. кривые *1* и *6*). На боковой поверхности лунки, где располагаются источники симметричных вихревых структур (кривая *8*), при увеличении скорости обтекания значения интегрального параметра $\sqrt{\overline{(p')^2}}$ нарастают с самым высоким темпом [2, 10, 12].

Нормированные скоростным или динамическим напором $q = \rho U^2/2$ (ρ – плотность жидкости) среднеквадратичные значения пульсаций пристеночного давления в виде $p'_{\rm rms}/q$ в зависимости от числа Рейнольдса, рассчитанного по скорости набегающего потока и по длине пластины до места установки полусферической лунки, показаны на рис. 3, *б*. Такая нормировка позволяет оценить степень трансформации кинетической энергии потока в энергию поля пульсаций пристеночного давления в исследуемых областях обтекаемой поверхности лунки и ее окрестности. Необходимо отметить, что для низкоскоростного обтекания пластины с углублением среднеквадратичные значения пульсаций давления перед лункой и позади нее пропорциональны квадрату скорости или скоростному напору. На передней стенке лунки интенсивность пульсаций давления пропорциональна скорости набегающего потока в степени, меньшей 2, а в верхней части кормовой стенки лунки и на ее боковой поверхности – с большим показателем степени (см., например, кривые *5* и *8*).

Распределение по глубине придонной части лунки среднеквадратичных значений пульсаций скоростного напора, нормированных скоростным напором набегающего потока, представлено на рис. 4 для скорости потока 0.1 м/с. Здесь наряду со значениями акусто-гидродинамического коэффициента приведены доверительные интервалы измерений пульсаций давления с надежностью 0.95. Измерения пульсаций скоростного напора проводились по нормали от дна полусферической лунки к ее центру. Максимальные уровни пульсаций наблюдаются на поверхности лунки ($y/d = -0.50$) и в области расположения периферии квазиустойчивого крупномасштабного вихря ($y/d \approx -(0.40 \ldots 0.42)$). Наименьшие уровни пульсаций имеют место в области, где располагается ядро крупномасштабного вихря ($y/d \approx -(0.32 \ldots 0.33)$). При этом интенсивность пульсаций скоростного напора в пристеночной области и на периферии вихря почти на порядок превышает значения, измеренные в области его ядра.

3. СПЕКТРАЛЬНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ПОЛЯ ПУЛЬСАЦИЙ ДАВЛЕНИЯ

Как показал анализ интегральных характеристик поля пульсаций пристеночного давления и скоростного напора, интенсивность пульсаций давления в пограничном слое и внутри лунки существенно отличаются друг от друга. Такое различие осредненных параметров поля давлений естественно приводит и к разному волновому либо частотному наполнению спектральных зависимостей пульсаций пристеночного давления и скоростного напора, измеренных вблизи обтекаемой по-

верхности под ненарушенным пограничным слоем, внутри лунки и в ее окрестности. Визуальные исследования показали, что внутри лунки в зависимости от ее геометрии и гидродинамических режимов обтекания могут формироваться вихревые структуры различных типов, которые при определенных условиях периодически выбрасываются наружу. Взаимодействие указанных вихревых структур с обтекаемой поверхностью лунки и пластины за ней приводит к генерации интенсивных пульсаций гидродинамических параметров потока (скорости, давления, касательных напряжений, температуры и др.). На соответствующих спектральных зависимостях это выражается в появлении характерных дискретных пиков и тональных подъемов, обусловленных периодическими осцилляциями вихревого потока (нередко, резонансными) [1, 3 – 5, 9, 10].

Спектральные плотности мощности пульсаций пристеночного давления, нормированных скоростным напором, в зависимости от числа Струхаля $\mathrm{St} = fd/U$ ($P_q^*(\mathrm{St}) = P(\mathrm{St})U/(dq^2)$) для скорости течения 0.1 м/с показаны на рис. 5. Здесь и на последующих графиках номера кривых соответствуют номерам датчиков пульсаций пристеночного давления, установленных заподлицо с обтекаемой поверхностью полусферической лунки и в ее окрестности (см. рис. 2 и таблицу). Так, кривая *1* относится к измерениям на поверхности пластины перед лункой, кривая *2* – на передней по потоку стенке лунки, кривая *3* – на дне лунки в ее центре, кривая *4* – на кормовой стенке в придонной ее части, кривая *5* – на кормовой стенке вблизи ее края, кривая *6* – на поверхности пластины за лункой (в ближнем следе лунки). Напомним, что все перечисленные измерительные точки находились в срединном сечении полусферической лунки вдоль направления потока. Последние две кривые – *7* и *8* – соответствуют измерениям на боковой поверхности лунки в ее срединной по глубине части.

Видно, что перед углублением спектр пульсаций давления имеет характер, типичный для пристеночных пульсаций давления пограничного слоя над плоской поверхностью [14, 15]. Здесь в области низких частот наблюдается убывание с уменьшением числа Струхаля (и частоты). Эта часть спектра формируется под действием преимущественно крупномасштабных структур, которые преобладают во внешней области пограничного слоя. При этом, согласно теореме Крейчнана – Филлипса, для несжимаемых пограничных слоев в пренебрежении действием сил вязкости спектральные уровни в области низких частот и волновых чисел пропорциональны квадрату частоты (волнового числа) и в пределе стремятся к нулевому значению.

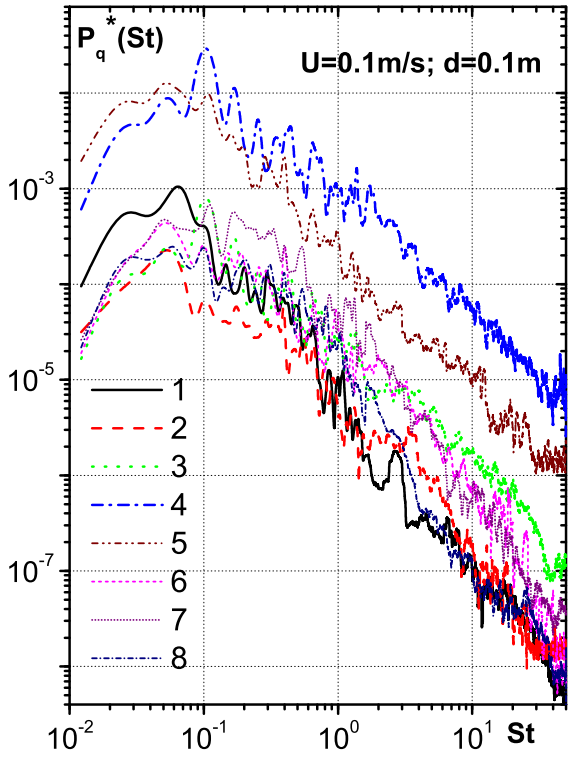

Рис. 5. Спектральные плотности мощности пульсаций пристеночного давления, нормированные скоростным напором

В полосе частот, для которых число Струхаля равно (0.06 . . . 0.07), наблюдается конвективный максимум (гребень) спектральных уровней [16], обусловленный конвективным переносом вихревых структур в пограничном слое. В области безразмерных частот (0.1 . . . 1) спектральные уровни обратно пропорциональны частоте. Это указывает на то, что пульсации давления здесь генерируются, главным образом, вихревыми структурами, присущими логарифмической области пограничного слоя. Следует отметить, что в соответствии с наблюдениями Брэдшоу эта область спектра не зависит от типа масштабирования (по внутренним или внешним переменным) и носит название инерционной или универсальной области. С ростом частоты спектральные зависимости убывают с более высоким темпом и в диапазоне порядка (1 . . . 30) они пропорциональны частоте в степени (−1.5 . . . − 2). Эти компоненты генерируются в основном пристеночными мелкомасштабными вихрями, на которые существенное влияние оказывают силы вязкости. Следует отметить,

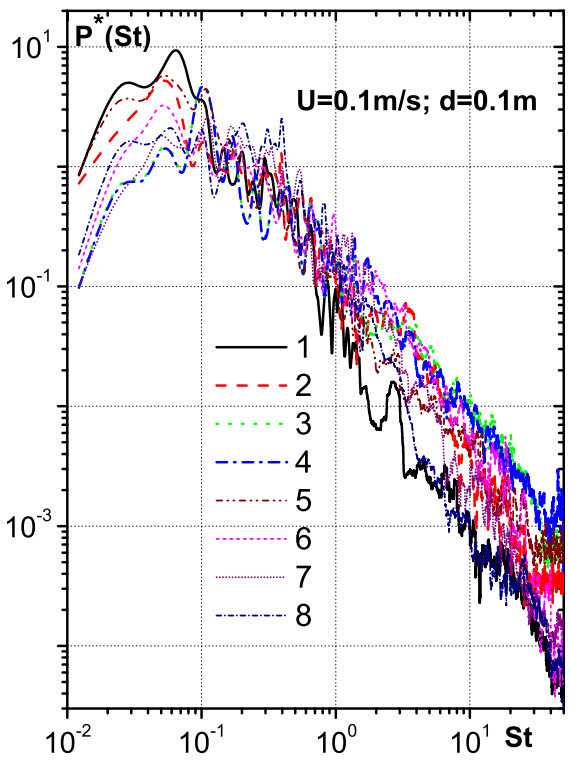

Рис. 6. Спектральные плотности мощности пульсаций пристеночного давления, нормированные квадратом осредненных значений пульсаций давления

что для условий развитого турбулентного потока ($\mathrm{Re}_x > (10^7 \ldots 10^8)$) указанный показатель может принимать значения -5 и даже -7 [17, 18].

На передней стенке лунки ниже области отрыва пограничного слоя с передней кромки значительно уменьшается интенсивность низкочастотных составляющих спектра – в 5 . . . 6 раз по сравнению с уровнями пульсаций давления, например, в области конвективного гребня (ср. кривые *1* и *2* на рис. 5). Следовательно, крупномасштабные вихревые структуры пограничного слоя при его отрыве с передней кромки лунки не оказывают значительного влияния на пульсации пристеночного давления, регистрируемые на передней стенке лунки. В то же время, интенсивность низкочастотных источников пульсаций давления, формируемых внутри лунки, значительно ниже, чем в пограничном слое (или они находятся далеко от передней стенки лунки и успевают существенно затухнуть). Доминирующим источником низкочастотных пульсаций пристеночного давления на передней стенке лунки является выбрасываемая из лунки крупномасштабная вихревая система, которая порождает низкочастотные колебания жидкости внутри лунки ($\mathrm{St} \approx 0.05$). Интенсивности же высокочастотных пульсаций на передней стенке лунки и в пограничном слое перед ней в целом сопоставимы. По всей видимости, столь значительные уровни высокочастотных составляющих обусловлены не действием мелкомасштабных вихрей пограничного слоя на поле пульсаций давления на передней стенке лунки, а формированием мощных высокочастотных источников давления именно внутри лунки. С нашей точки зрения, таковыми вблизи передней стенки лунки могут быть мелкомасштабные вихри, генерируемые в месте отрыва пограничного слоя, или вихревые структуры пограничного слоя внутри самой лунки, формируемого в результате циркуляционного течения внутри лунки и достигающего наибольшей толщины и интенсивности именно на ее передней стенке.

На дне лунки спектральные уровни растут, особенно на высоких частотах (ср. кривые *1*, *2* и *3*). При этом узкополосный подъем спектра, обусловленный частотой вращения крупномасштабной вихревой структуры внутри лунки, находится на безразмерной частоте порядка 0.1. Инерционная область спектра также расширяется в область более высоких частот. Интенсивность пульсаций давления, обусловленная действием мелкомасштабных вихрей на дне лунки, почти на порядок превышает высокочастотные пульсации в пограничном слое и на передней стенке лунки. Столь высокие уровни высокочастотных компонент спектра обусловлены, очевидно, конвекцией мелкомасштабных вихрей вдоль кормовой и боковых стенок лунки и разрушением крупномасштабных вихревых образований в месте взаимодействия сдвигового слоя с кормовой стенкой лунки.

На кормовой стенке лунки пульсации давления значительно увеличиваются, что обусловлено интенсивным взаимодействием вихревых структур сдвигового слоя со стенкой, а также выбросом симметричных крупномасштабных вихрей над ней. Наиболее отчетливо это наблюдалось в визуальных исследованиях [19, 20]. При этом рост спектральных компонент пульсаций давления регистрируется во всем исследуемом частотном диапазоне. В придонной части кормовой стенки больший прирост энергии пульсаций давления наблюдается в более высокочастотной области спектра (кривая *4*), а вблизи кромки кормовой стенки превалируют низкочастотные пульсации (кривая *5*). В спектральных зависимостях появляются тональные составляющие, отвечающие частоте вращения крупномасштабного вихря, его частоте выброса и частоте автоколебаний вихревых структур сдвигового слоя, взаимодействующих с кормовой стенкой. Наряду с основными гармони-

ками этих осцилляций, наблюдаются субгармоники и гармоники высших порядков, генерируемые вследствие нелинейного взаимодействия вихревых структур между собой и с обтекаемой поверхностью лунки. Большинство дискретных подъемов сосредоточено в полосе безразмерных частот, отвечающих числам Струхаля $\mathrm{St} \leq 2$.

В ближнем следе полусферической лунки интенсивность пульсаций давления уменьшается, поскольку при такой ее форме выбрасываемые наружу вихревые структуры устремляются под большим углом, почти перпендикулярно направлению потока, внутрь пограничного слоя (угол между кормовой поверхностью лунки с пластиной составляет 90°). В результате этого непосредственно за лункой в области расположения датчика пульсаций пристеночного давления 6 начинает формироваться новый пограничный слой над поверхностью пластины. Таким образом, в ближнем следе лунки пульсационная составляющая кинетической энергии значительно ниже, чем, например, на кормовой стенке пластины. Это проявляется в различии уровней пульсаций давления в этих областях исследуемой обтекаемой поверхности (ср. кривые *4–6* на рис. 5). Наряду с этим, на поверхности пластины в ближнем следе лунки наиболее интенсивные пульсации давления обнаружены на частоте выброса крупномасштабной вихревой структуры из лунки ($\mathrm{St} \approx 0.05$) и частоте ударного взаимодействия вихревых структур сдвигового слоя с кормовой поверхностью лунки ($\mathrm{St} \approx 0.4$).

На боковой стенке лунки энергия пульсаций давления также ниже, чем на кормовой. Здесь наибольшие уровни наблюдаются на частоте вращения крупномасштабной вихревой структуры, а также на частоте ее выброса. В области высоких частот спектры близки друг к другу (ср. кривые *3* и *7*, а также *2* и *8*). Следует отметить, что для средних частот спектр, соответствующий датчику 7, находящемуся вблизи места зарождения симметричного крупномасштабного вихря, имеет более высокие уровни, чем для других измерительных точек на поверхности лунки, за исключением ее кормовой стенки [20, 21],

Чтобы выяснить особенности наполнения спектральных зависимостей различными частотными компонентами, при статистической обработке результатов исследований используют нормировку спектров квадратами их осредненных значений. Для этого нормированная спектральная плотность мощности пульсаций пристеночного давления $P^* = P(\mathrm{St})U/(d\,\overline{(p')^2}\,)$ представляется как зависимость от числа Струхаля St. Это позволяет площадь под любой спектральной кривой приравнять к единице, а по изменению спектральных зависимостей судить о вкладе различных частотных компонент спектра в общую энергию пульсаций пристеночного давления. Так, для скорости течения 0.1 м/с спектральные плотности мощности пульсаций пристеночного давления внутри лунки, нормированные среднеквадратичными значениями, насыщаются высокочастотными компонентами относительно ненарушенного пограничного слоя. Это – следствие формирования вихревых структур внутри углубления и взаимодействия их с обтекаемой поверхностью, особенно в придонной области лунки (рис. 6).

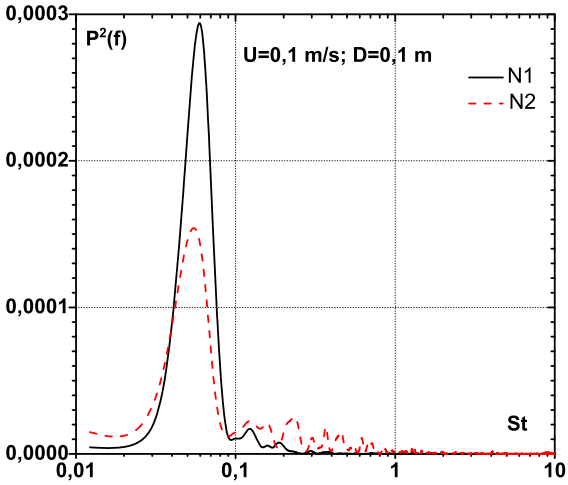

Рис. 7. Спектральные плотности мощности пульсаций скоростного напора

Рис. 8. Расположение датчиков пульсаций скоростного напора над обтекаемой поверхностью углубления

За передней кромкой полусферической лунки спектры растут в области высоких частот (см.

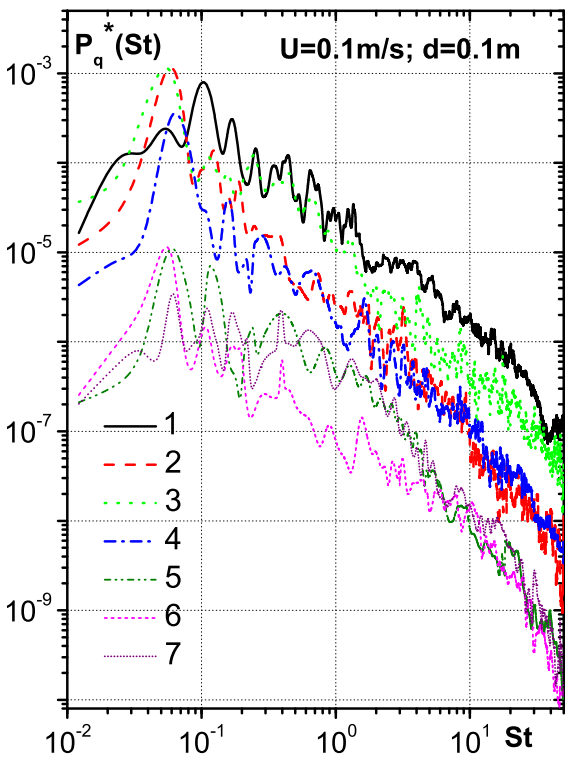

Рис. 9. Спектральные плотности мощности пульсаций скоростного напора и пристеночного давления, нормированные скоростным напором

кривую *2*). При этом вклад низкочастотных компонент несколько уменьшается по сравнению со спектром пульсаций скорости в пограничном слое перед лункой (ср. кривые *1* и *2*). В придонной области лунки перераспределение энергии из низкочастотной области в высокочастотную проявляется еще в большей степени. При этом максимум спектральных уровней на дне лунки (кривая *3*) наблюдается на частоте вращения крупномасштабной вихревой системы ($\mathrm{St}\approx 0.1$), формирующейся внутри лунки в процессе взаимодействия набегающего потока с этой неоднородностью поверхности. За лункой наблюдается рост пульсаций давления на частоте, отвечающей числу Струхаля 0.05, и обусловленной выбросом крупномасштабных вихревых систем из лунки. Здесь сохраняется интенсивность спектральных уровней, измеренных на различных участках обтекаемой поверхности лунки. На боковой поверхности лунки пульсации давления растут на частотах, близких к частоте вращения крупномасштабного вихря, частоте его выброса и частоте взаимодействия вихревых систем сдвигового слоя с кормовой стенкой лунки. Наряду с этим, на боковых стенках вклад высокочастотных компонент в энергию пульсаций пристеночного давления уменьшается (см. кривые *7* и *8*).

Зависимости спектральных плотностей мощности пульсаций скоростного напора над обтекаемой поверхностью полусферической лунки показаны на рис. 7 для скорости набегающего потока 0.1 м/с. Датчики пульсаций динамического давления или скоростного напора находились над датчиком пульсаций пристеночного давления 3, как показано на рис. 8. В ходе экспериментов расстояние между парой датчиков пульсаций скоростного напора и датчиком пульсаций пристеночного давления 3 изменялось по направлению нормали к обтекаемой поверхности лунки. Датчик пульсаций скоростного напора 1 находился ближе к обтекаемой поверхности лунки и к передней ее стенке, чем датчик 2. Расстояния между этими датчиками составляли $l_x = 3.5$ мм и $l_y = 5$ мм. Приемные отверстия датчиков пульсаций скоростного напора диаметром 0.5 мм были направлены навстречу набегающему потоку вдоль продольной координаты и измеряли пульсации скоростного напора или динамического давления вблизи дна полусферического углубления (см. рис. 8).

На рис. 9 показаны спектральные плотности мощности пульсаций скоростного напора и пристеночного давления, измеренные по вертикальной оси лунки перпендикулярно к ее дну и нормированные скоростным напором. Здесь кривая *1* соответствует пульсациям пристеночного давления, измеренным на дне лунки посредством датчика 3 (см. рис. 2) с координатами $x=0$, $y=-0.5d$, $z=0$. Кривая *2* соответствует спектральным плотностям мощности пульсаций полного давления, измеренным над дном лунки для поперечной координаты $y/d=-0.45$. Кривая *3* получена для пульсаций скоростного напора, измеренных датчиком, расположенным от дна лунки на удалении $y/d=-0.40$, кривая *4* – $y/d=-0.38$, кривая *5* – $y/d=-0.35$; кривая *6* – $y/d=-0.33$ и, наконец, кривая *7* – $y=-0.3d$ (для всех $x=0$ и $z=0$).

На дне лунки поле пульсаций пристеночного давления насыщено высокочастотными осцилляциями, обусловленными действием мелкомасштабных вихрей, которые в основном формируют пристеночную область внутреннего пограничного слоя над обтекаемой поверхностью полусферической лунки. Максимальная интенсивность пульсаций давления на дне наблюдается на частоте вращения крупномасштабного вихря, генерируемого внутри циркуляционной области течения в лунке. Число Струхаля, рассчитанное по частоте вращения вихря, для скорости потока 0.1 м/с составляет $\mathrm{St}\approx 0.1$ (см. экстремум кривой *1* на рис. 9).

Во внешней части пограничного слоя внутри лунки интенсивность пульсаций скоростного напора спадает, в первую очередь, за счет убывания энергии мелкомасштабных высокочастотных вихрей. При этом значительно возрастают спектральные уровни пульсаций скоростного напора, которые обусловлены частотой выброса крупномасштабной вихревой структуры из лунки ($\mathrm{St}\approx 0.05$), см. кривую *2*. При удалении от обтекаемой поверхности лунки интенсивность пульсаций скоростного напора растет, главным образом, за счет увеличения энергии мелкомасштабных вихрей (кривая *3*), которые формируют периферийную область крупномасштабного вихря. Максимум спектра сохраняется на частоте выброса квазиустойчивого крупномасштабного вихря, причем увеличивается мощность пульсаций скоростного напора на частотной компоненте, отвечающей частоте его вращения.

С перемещением внутрь крупномасштабного вихря энергия пульсаций давления убывает во всем исследуемом частотном диапазоне, достигая минимума внутри его ядра (кривая *6*). Здесь наряду с частотами вращения и выброса вихря появляется тональная составляющая спектра, обусловленная влиянием автоколебательного процесса вихреобразования в сдвиговом слое ($\mathrm{St}\approx 0.4$). С удалением от ядра вихря и приближением к сдвиговому слою она проявляется все сильнее (кривая *7*). Здесь интенсивности пульсаций скоростного напора на частотах вращения и выброса крупномасштабного вихря, а также на частоте автоколебаний вихревых структур сдвигового слоя становятся примерно равными по величине. При этом, по сравнению с областью ядра вихря, растут спектральные уровни в области средних частот ($0.2<\mathrm{St}<5$), см. кривые *6* и *7*.

Спектральные плотности мощности пульсаций скоростного напора и пристеночного давления, нормированные среднеквадратичными значениями, показаны на рис. 10. Здесь номера кривых те же, что и на рис. 9. Следует отметить, что, по сравнению с полем пульсаций пристеночного давления, измеренного на дне полусферической лунки, внутри крупномасштабного вихря превалируют низкочастотные компоненты спектра. Во внешней области пограничного слоя, формируемого над обтекаемой поверхностью лунки, наблюдаются очень интенсивные осцилляции на частоте выброса крупномасштабной вихревой структуры. В то же время, здесь имеют место самые низкие уровни высокочастотных компонент спектра, генерируемых мелкомасштабными вихрями. На внешней границе крупномасштабного вихря, прилегающей к придонной области лунки, увеличивается вклад высокочастотных компонент спектра в общую энергию пульсаций скоростного напора (кривая *3*). С приближением к ядру квазиустойчивого крупномасштабного вихря, которое располагается в пределах $x=0$, $y=-(0.32\ldots0.33)d$, $z=0$, увеличивается интенсивность среднечастотных и высокочастотных пульсаций скоростного напора. Наряду с этим, наблюдаются тональные подъемы спектров на частотах вращения ($\mathrm{St}\approx 0.1$) и выброса ($\mathrm{St}\approx 0.05$) крупномасштабного вихря. В области, прилегающей к сдвиговому слою, возрастают пульсации давления на частоте автоколебаний вихревых структур, формирующих сдвиговый слой ($\mathrm{St}\approx 0.4$). Здесь же наблюдается минимальный вклад низкочастотных компонент в общую энергию пульсаций давления (кривая *7*).

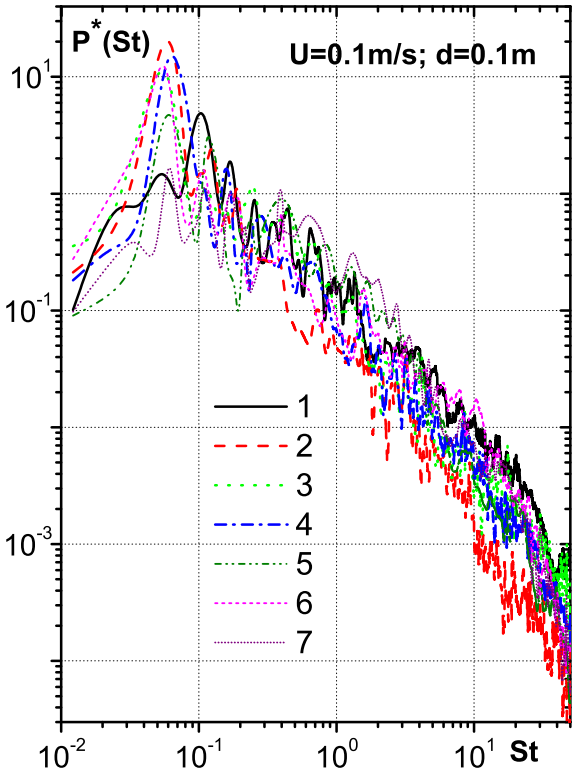

Рис. 10. Спектральные плотности мощности пульсаций скоростного напора и пристеночного давления, нормированные квадратом осредненных значений пульсаций давления

4. ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ И АНАЛИЗ ДАННЫХ

Экспериментальные исследования, проведенные в аэродинамической трубе и гидродинамическом канале с полусферической лункой на обтекае-

мой пластине с помощью визуализации потока и инструментальных измерений полей скоростей и пульсаций пристеночного давления [9, 10, 20], а также численное моделирование обтекания единичной сферической лунки на плоской поверхности с помощью модели крупных вихрей и решения осредненных по Рейнольдсу нестационарных уравнений Навье – Стокса [2, 13] позволили определить особенности формирования и эволюции вихревого течения внутри лунки для различных режимов обтекания и его гидродинамические характеристики. Так, при ламинарном режиме обтекания внутри лунки формируется циркуляционное течение, которое не выбрасывается наружу в пограничный слой, а ведет себя как автономное внутреннее вихревое течение. В основном потоке над лункой скорость увеличивается, а давление понижается, пограничный слой над обтекаемой поверхностью за лункой утолщается. Внутри лунки формируются две циркуляционные зоны по бокам от продольной плоскости симметрии, между которыми практически не происходит обмен жидкостью. Нормальные завихренности в них имеют разные знаки. Трехмерные траектории меченных частиц выявляют в лунке вихревое течение, качественно напоминающее вихревой жгут с сильно искривленной осью вращения вдоль размаха лунки. В центральной части ось выпучивается вверх, образуя петлю, и доходит до верхнего среза лунки, по бокам она заглубляется симметрично в обе стороны. Таким образом, в центральной части два участка вихревого жгута (стороны петли) расположены практически под прямым углом к поверхности пластины. Это приводит к возникновению торнадообразных вихрей при неустойчивости (разрыве) жгутообразного вихря в лунке.

Генерация симметричного крупномасштабного вихря внутри лунки, обтекаемой потоком с малым числом Рейнольдса, обуславливает появление характерных изменений в поле пульсаций давления и скорости как внутри лунки, так и в ее окрестности. Интенсивность пульсаций пристеночного давления с увеличением скорости растет и максимальные уровни наблюдаются на кормовой стенке, где происходит ударное взаимодействие вихревых структур, а также выброс симметричных когерентных крупномасштабных вихревых систем. Наименьшие уровни пульсаций пристеночного давления имеют место на передней стенке лунки (для низкоскоростного обтекания – на 20 дБ ниже, чем на кормовой). Интегральные характеристики поля пульсаций пристеночного давления перед полусферической лункой и в ее ближнем следе сопоставимы, их среднеквадратичные значения пропорциональны квадрату скорости. На передней стенке лунки степенной показатель пропорциональности меньше 2, а на кормовой и боковых стенках (в области фокусов симметричного вихря) – превышает 2. Наибольшие среднеквадратичные значения пульсаций скоростного напора наблюдаются в периферийной области квазиустойчивого крупномасштабного вихря, формируемого в лунке, а наименьшие – в его ядре. Интенсивность пульсаций скоростного напора на периферии вихря и на дне лунки на порядок (на 20 дБ) превышает соответствующую величину в ядре симметричного вихря.

Наибольшие уровни спектральных составляющих плотности мощности пристеночных пульсаций давления наблюдаются на кормовой стенке лунки. В области низких частот они более, чем на порядок, превышают значения для пульсаций давления пограничного слоя, формируемого перед полусферическим углублением. На высоких частотах это различие составляет уже два порядка. Минимальные значения спектральных составляющих пульсаций пристеночного давления в области низких частот обнаружены на передней стенке лунки – здесь они почти на два порядка ниже, чем на кормовой стенке. Внутри полусферического углубления спектральные плотности мощности пульсаций пристеночного давления, нормированные среднеквадратичными значениями, насыщаются высокочастотными компонентами относительно ненарушенного пограничного слоя (особенно в придонной области).

Вследствие генерации когерентных вихревых систем внутри лунки, их взаимодействия между собой и обтекаемой поверхностью, а также в результате выбросов вихревых структур из углубления в спектральных зависимостях появляются тональные составляющие. В различных частях углубления и его окрестности превалируют частота выбросов крупномасштабных вихрей ($\mathrm{St} \approx 0.05$), частота их вращения ($\mathrm{St} \approx 0.1$) и частота автоколебаний сдвигового слоя, обусловленная взаимодействием вихревых структур сдвигового слоя с кормовой стенкой ($\mathrm{St} \approx 0.4$). Этот вывод коррелирует с результатами исследования полей пульсаций скорости в окрестности полусферической лунки [10, 20]. Так, в спектральных зависимостях пульсаций продольной и поперечной скорости, измеренных для более высокого числа Рейнольдса $\mathrm{Re}_x = 5.2 \cdot 10^5$, внутри лунки дискретные подъемы наблюдались в следующих диапазонах безразмерной частоты $\omega = \omega\delta/U$ ($\omega = 2\pi f$ – круговая частота; δ – толщина пограничного слоя перед углублением):

1) $0.002 < \omega^* \leqslant 0.004$;

2) $0.04 < \omega^* < 0.06$;

3) $0.09 < \omega^* < 0.15$;

4) $0.6 < \omega^* < 0.9$.

Это соответствует частоте вращения крупномасштабного вихря ($0.09 < \omega^* < 0.15$), а также частоте автоколебаний, возникающих при ударном взаимодействии вихревых структур слоя смешения с кормовой стенкой углубления ($0.6 < \omega^* < 0.9$) и создающих вторую моду Розитэ для самосохраняющихся колебаний, отвечающих гидроакустическому резонансу. Частота выбросов вихревых систем из углубления порождает дискретный подъем при $0.002 < \omega^* < 0.004$. Трехмерность полусферической лунки в области отрыва пограничного слоя приводит к появлению следовой моды колебания вихревого движения в лунке, которой отвечает дискретный пик при $0.04 < \omega^* < 0.06$. Следовая мода осцилляций вихревого движения внутри полусферического углубления и поблизости него обусловлена гидродинамическим резонансом. На кормовой стенке полусферической лунки наряду с этими осцилляциями в спектрах пульсаций давления наблюдаются субгармоники и гармоники высших порядков, генерируемые вследствие нелинейного взаимодействия вихревых структур между собой и с обтекаемой поверхностью.

По сравнению с полем пульсаций пристеночного давления, измеренного на дне полусферической лунки, внутри крупномасштабного вихря превалируют низкочастотные компоненты спектра пульсаций скоростного напора. Во внешней области внутреннего пограничного слоя, который формируется над обтекаемой поверхностью лунки, наблюдаются очень интенсивные осцилляции на частоте выброса крупномасштабной вихревой структуры наружу. В то же время, здесь имеют место самые низкие уровни высокочастотных компонент спектра, генерируемых мелкомасштабными вихрями. На внешней границе крупномасштабного вихря, прилегающей к придонной области лунки, увеличивается вклад высокочастотных компонент спектра в общую энергию пульсаций скоростного напора. С приближением к ядру квазиустойчивого крупномасштабного вихря наблюдается минимум пульсаций скоростного напора при одновременном увеличении интенсивности среднечастотных и высокочастотных составляющих. Наряду с этим, наблюдаются тональные подъемы спектров на частотах вращения и выброса крупномасштабного вихря. В области, прилегающей к сдвиговому слою, увеличиваются пульсации давления на частоте автоколебаний вихревых структур, формирующих сдвиговый слой.

ВЫВОДЫ

1. Максимальные уровни интенсивности пульсаций пристеночного давления наблюдаются на кормовой стенке, где они почти на порядок превышают среднеквадратичные значения пульсаций давления на передней стенке лунки. Максимальные среднеквадратичные значения пульсаций скоростного напора выявлены в периферийной области квазиустойчивого крупномасштабного вихря, формируемого в лунке, а минимальные – в его ядре.

2. Обнаружено, что наибольшие уровни спектральных составляющих плотности мощности пристеночных пульсаций давления имеют место на кормовой стенке лунки. В области низких частот они более, чем на порядок, превышают спектральные уровни пульсаций давления пограничного слоя, формируемого перед полусферическим углублением, а на высоких частотах – на два порядка. В различных частях углубления и его окрестности превалируют частота выбросов крупномасштабных вихрей ($\mathrm{St} \approx 0.05$), частота их вращения ($\mathrm{St} \approx 0.1$) и частота автоколебаний сдвигового слоя, обусловленная взаимодействием вихревых структур сдвигового слоя с кормовой стенкой ($\mathrm{St} \approx 0.4$).

3. Установлено, что внутри симметричного крупномасштабного вихря, генерируемого внутри лунки, преобладают низкочастотные компоненты спектра пульсаций скоростного напора по сравнению с полем пульсаций пристеночного давления, измеренного на ее дне. На внешней границе крупномасштабного вихря, прилегающей к придонной области лунки, увеличивается вклад высокочастотных компонент спектра в общую энергию пульсаций скоростного напора. С приближением к ядру квазиустойчивого крупномасштабного вихря наблюдаются минимальные уровни пульсаций скоростного напора с одновременным увеличением интенсивности среднечастотных и высокочастотных составляющих.

БЛАГОДАРНОСТИ

Авторы выражают 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.

Работа выполнена при финансовой поддержке по гранту Совместного конкурса НАН Украины – РФФИ 2008–2009 г. (проект N 2-08а, гос. рег. N 0108U003264; N 0109U003389 и проект N 08-08-90400; N 08-01-00059).

1. *Кикнадзе Г. И., Гачечиладзе И. А., Алексеев В. В.* Самоорганизация смерчеобразных струй в потоках вязких сплошных сред и интенсификация тепломассообмена, сопровождающая это явление.– М.: Изд-во Моск. энергет. ун-та, 2005.– 83 с.
2. *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.
3. *Халатов А. А.* Теплообмен и гидродинамика около поверхностных углублений (лунок).– К.: ИТТФ НАНУ, 2005.– 76 с.
4. *Управление* обтеканием тел с вихревыми ячейками в приложении к летательным аппаратам интегральной компоновки (численное и физическое моделирование) / Под ред. А. В. Ермишина и С. А. Исаева.– М. – СПб: б/изд, 2001.– 360 с.
5. *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.
6. *Афанасьев В. Н., Леонтьев А. И., Чудновский Я. П.* Теплогидравлическая эффективность перспективных способов интенсификации теплоотдачи в каналах теплообменного оборудования.– М.: МГТУ, 1990.– 118 с.
7. *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.
8. *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. Pack.– 2007.– **127**, N 1.– P. 63–70.
9. *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.
10. *Воскобойник А. В., Воскобойник В. А.* Источники резонансных мод осцилляций внутри обтекаемой полусферической лунки // Акуст. вісн.– 2007.– **10**, N 4.– С. 36–46.
11. *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.
12. *Isaev S. A., Leont'ev A. I., Baranov P. A., Pyshnyi I. A.* Numerical analysis of the influence of the depth of a spherical hole on a plane wall on turbulent heat transfer // J. Eng. Phys. Thermophys.– 2003.– **676**, N 1.– P. 61–69.
13. *Turnow J., Kornev N., Isaev S., Hassel E.* Vortex jet mechanism of heat transfer enhancement in a channel with spherical and oval dimples // Proc. Int. Conf. on Jets, Wakes and Separated Flows, ICJWSF-2008.– Berlin, Germany.– 2008.– P. 1–11.
14. *Смольяков А. В.* Шум турбулентных потоков.– СПб: ЦНИИ им. акад. А. И. Крылова, 2005.– 312 с.
15. *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.
16. *Blake W. K.* Mechanics of flow-induced sound and vibration: in 2 vols.– New York: Academic Press, 1986.– 974 p.
17. *Ткаченко В. М., Смольяков А. В., Колышницын В. А., Маршов В. П.* Частотно-волновой спектр турбулентных давлений: Способы измерения и результаты // Акуст. ж.– 2008.– **54**, N 1.– С. 127–132.
18. *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.
19. *Турик В. Н., Бабенко В. В., Воскобойник В. А., Воскобойник А. В.* Вихревое движение в полусферической лунке на поверхности обтекаемой пластины // Вісник НТУУ "КПІ", Сер. Машинобудування.– 2006.– **48**.– С. 79–85.
20. *Воскобійник А. В., Воскобійник В. А.* Напівсферичне заглиблення – генератор вихорів на пласкій обтічній поверхні // Пробл. водопостач., водовідвед. гідравл.– 2007.– **8**.– С. 151–161.
21. *Bres G. A., Colonius T.* Three-dimensional instabilities in compressible flow over open cavities // J. Fluid Mech.– 2008.– **599**.– P. 309–339.