

УДК 532.517

ПОЛЕ ПУЛЬСАЦИЙ ПРИСТЕНОЧНОГО ДАВЛЕНИЯ ВНУТРИ И ВБЛИЗИ ОВАЛЬНОЙ ЛУНКИ ПРИ МАЛОЙ СКОРОСТИ ОБТЕКАНИЯ

*А.В.Воскобойник,**Институт гидромеханики НАН Украины, г. Киев*

Введение. Известно, что обтекание тел различной геометрии сжимаемым либо несжимаемым потоком сопровождается аэрогидродинамическим шумом [1, 2]. Источниками шума являются – пограничный слой, формируемый над обтекаемой поверхностью, отрывные области вблизи плохообтекаемых тел или над поверхностями, находящимися под углами атаки к набегающему потоку, струйные потоки. Генерация когерентных вихревых систем и их взаимодействие между собой и обтекаемой поверхностью, которая, возбуждаясь вихревыми структурами, нередко совершает вибрационные колебания, приводит к излучению мощных полей пульсаций давления в окружающую среду [3]. Перемещаясь со скоростью звука пульсации давления формируют акустические волны, являющиеся звуковой компонентой аэрогидродинамического шума. В то же время вихревые структуры, генерирующие пульсации скорости и давления, являющиеся псевдозвуковой составляющей этого шума, переносятся с конвективными скоростями близкими к скорости набегающего потока. Обтекаемые поверхности, вызываемые осцилляциями потока, непосредственно участвуют в генерации аэродинамического шума, в результате чего его интенсивность существенно возрастает. В результате исследования, например, шума турбулентности ограниченных потоков представляет собой более сложную проблему, чем исследования аэрогидродинамического шума свободной турбулентности. Разнообразие масштабов вихревых структур в турбулентном пограничном слое и скоростей их переноса приводит к широкополосному спектру пульсаций скорости и давления. Появление доминирующих вихревых образований, генерируемых тем или иным способом, обуславливает наличие дискретных или тональных пиков в спектральных зависимостях пульсаций давления, измеренных как над обтекаемой поверхностью, так и на ее поверхности.

Одним из источников доминирующих вихревых систем в пограничном слое являются выемки и выступы, так называемые локальные неоднородности обтекаемой поверхности. Формирование вихревых структур с определенными параметрами используется при управлении пограничным слоем с целью снижения сопротивления обтекаемых тел, увеличения тепло и массопереноса, а также снижения уровней аэрогидродинамических шумов и вибраций обтекаемых объектов либо изменения их частотного наполнения. В последние годы широкое применение получили луночные поверхности, которые образуются системами мелких выемок разнообразной формы [4]. Внутри лунок для различных режимов обтекания генерируются когерентные вихревые системы, выбрасываемые, при определенных условиях, в пограничный слой. 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. Генерация вихревых систем и выброс их наружу из обтекаемого углубления приводит к существенным изменениям пульсационных полей скорости и давления, что отражается на характере и параметрах гидродинамического сопротивления луночных поверхностей, аэрогидродинамического шума и вибраций [1, 5]. Влияние большого числа параметров на формирование и развитие источников пульсаций давления, их нестационарность и неоднородность, существенным образом осложняют проведение экспериментальных и численных исследований, обработку и анализ данных. В связи с этим до сих пор остается значительная часть невыясненных проблем в механизмах генерации когерентных вихревых систем в такого класса неоднородностях обтекаемой поверхности, а также в их взаимодействии с самой поверхностью. Остаются открытыми вопросы пространственно-временных характеристик полей пульсаций давления над обтекаемой поверхностью, имеющей систему углублений.

Целью настоящих экспериментальных исследований является изучение особенностей формирования вихревых систем в овальном углублении, расположенном под углом 60° к направлению набегающего потока при малых числах Рейнольдса. Определены интенсивность пульсаций давления и спектральные характеристики поля пульсаций пристеночного давления внутри локальной овальной лунки на пластине и в ее окрестности. Установлена связь между полем пульсаций давления внутри лунки и в ее следе, а также характерными особенностями когерентных вихревых систем и их выбросами.

Экспериментальная установка и методика измерений. Экспериментальные исследования проводились в гидродинамическом канале длиной 16 м, шириной 1 м со свободной поверхностью воды глубиной 0,04 м. Измерительный участок, на дно которого устанавливалась пластина с локальной неоднородностью обтекаемой поверхности, находился посередине канала (рис. 1). Гидравлически гладкая пла-

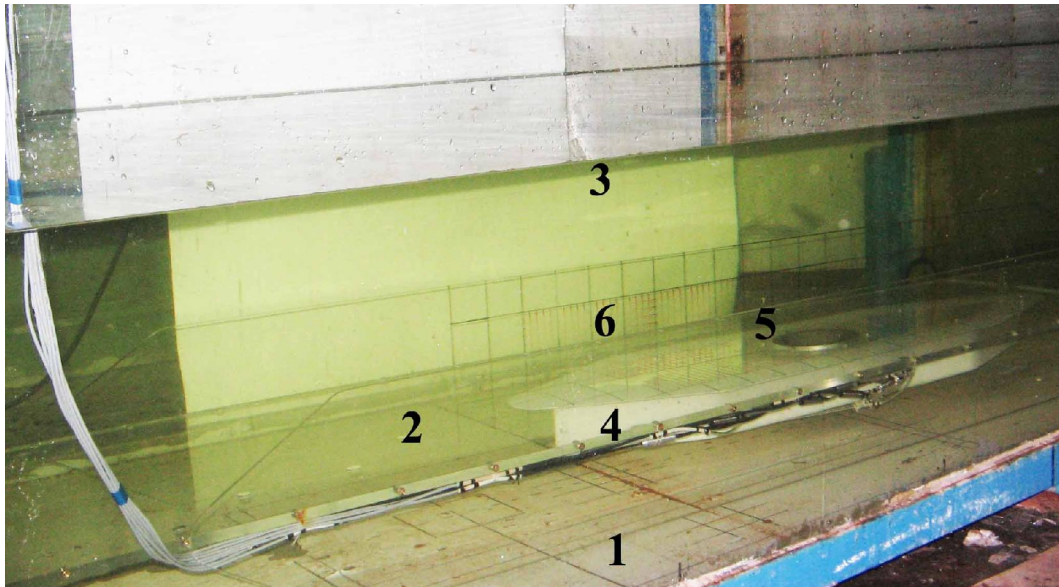


Рис. 1. Расположение пластины с лункой в гидродинамическом канале: 1 – канал; 2 – пластина; 3 – уровень воды; 4 – обтекатель; 5 – лунка; 6 – координатная сетка

стина, изготовленная из полированного органического стекла толщиной 0,01 м, шириной 0,5 м и длиной 2 м, была заострена с передней и с кормовой сторон для обеспечения безотрывного ее обтекания. К боковым сторонам пластины крепились концевые шайбы (органическое стекло толщиной 0,005 м и шириной 0,2 м) [6]. На расстоянии 0,8 м от носка пластины было сделано отверстие, где устанавливался стальной полый стакан, заполненный пластилином, в котором было выдавлено овальное углубление в виде двух сферических лунок объединенных цилиндрической вставкой. Диаметр лунки $d=0,04$ м, ширина и длина цилиндрической вставки по 0,04 м. Таким образом, овальная лунка имеет ширину 0,04 м, длину 0,08 м, а глубину 0,009 м и отношение глубины к ширине $h/d=0,22$ [7]. Крепление стального стакана дало возможность вращать овальное углубление вокруг своей оси с произвольным шагом. Угол расположения овального углубления относительно направления набегающего потока в проведенных исследованиях был фиксированным и, согласно рекомендациям работ [7, 8] по выбору оптимального угла с точки зрения наибольшей теплогидравлической эффективности, составлял 60° . Скорость потока изменялась от 0,03 м/с до 0,1 м/с, а число Рейнольдса, рассчитанное по скорости потока и диаметру лунки $Re_d=dU/v=(1200\dots 4000)$.

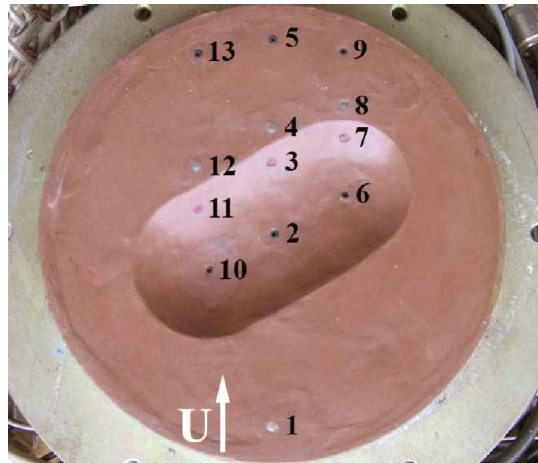


Рис. 2. Овальная лунка, расположенная под углом 60° к направлению потока и расположение датчиков пристеночного давления

Исследование полей пульсаций давления на обтекаемой поверхности овального углубления и пластины проводились с помощью миниатюрных пьезокерамических и пьезорезистивных датчиков пульсаций давления и дифференциальных электронных манометров. Пьезокерамические датчики пульсаций давления мембранного и стержневого типов имели диаметр чувствительной поверхности 0,0015 м и 0,0013 м, соответственно. Датчики устанавливались заподлицо с обтекаемой поверхностью и измеряли, таким образом, пристеночные пульсации давления. Ввиду относительно малых размеров чувствительной поверхности используемых датчиков, появилась возможность регистрировать источники пульсаций пристеночного давления, обладающими пространственными масштабами, превышающими 0,003 м, то есть, длиной волны, которая больше двух диаметров чувствительной поверхности датчиков пульсаций давления. Это согласуется с механизмом пространственного фильтрования источников пульсаций давления чувствительной поверхностью используемых датчиков [9, 10].

Для исследования поля пульсаций пристеночного давления внутри овального углубления и в его ближнем следе применялось 13 датчиков пульсаций давления, схема расположения которых представлена на рис. 2. Координаты нахождения датчиков следующие: датчик № 1 имеет продольную координату

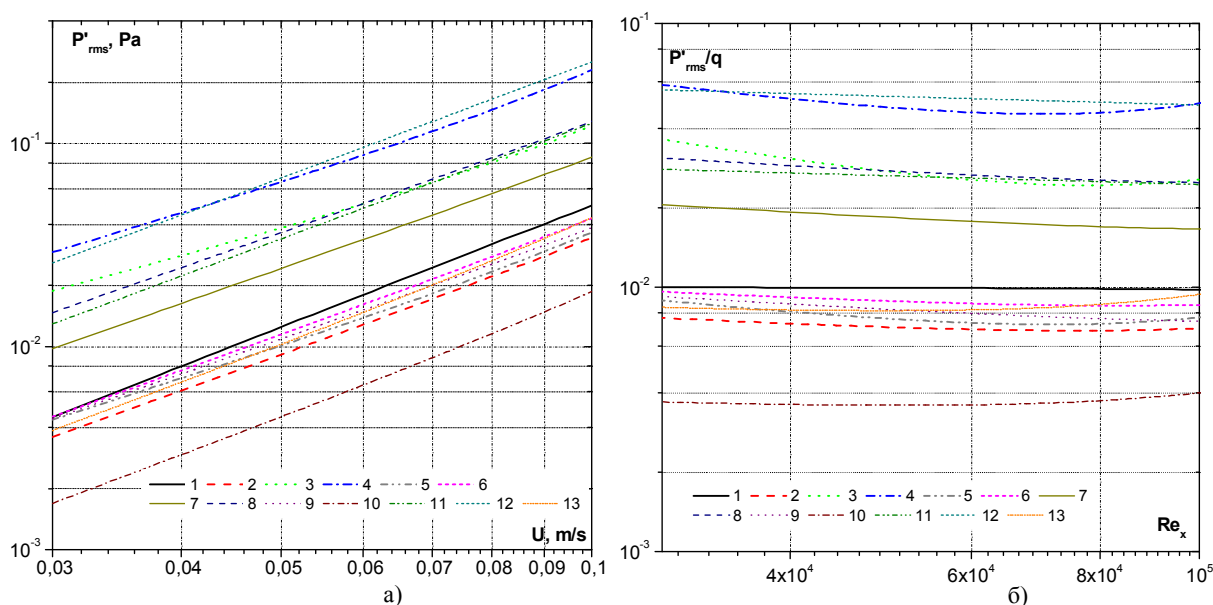


Рис. 3. Средненные значения пульсаций пристеночного давления: а) – среднеквадратичные значения; б) – аэрогидродинамический коэффициент

$x=-0,052$ м (начало координат находится в центре овального углубления на уровне обтекаемой поверхности пластины), вертикальную (соответствующую направлению нормали к обтекаемой поверхности пластины) координату $y=0$ и поперечную или азимутальную координату $z=0$, которые в безразмерном виде соответствуют $(-1,3d; 0; 0)$. Датчик № 2 имеет координаты $x=0$, $y=-0,009$ м и $z=0$ или $(0; -0,225d; 0)$, датчик № 3 – $x=0,015$ м, $y=-0,004$ м и $z=0$ или $(0,4d; -0,1d; 0)$, датчик № 4 – $x=0,028$ м, $y=0$ и $z=0$ или $(0,7d; 0; 0)$, датчик № 5 – $x=0,053$ м, $y=0$ и $z=0$ или $(1,3d; 0; 0)$, датчик № 6 – $x=0,012$ м, $y=-0,009$ м и $z=0,02$ м или $(0,3d; -0,225d; 0,5d)$, датчик № 7 – $x=0,027$ м, $y=-0,004$ м и $z=0,02$ м или $(0,7d; -0,1d; 0,5d)$, датчик № 8 – $x=0,035$ м, $y=0$ и $z=0,02$ м или $(0,9d; 0; 0,5d)$, датчик № 9 – $x=0,051$ м, $y=0$ и $z=0,02$ м или $(1,3d; 0; 0,5d)$, датчик № 10 – $x=-0,01$ м, $y=-0,009$ м и $z=-0,02$ м или $(-0,3d; -0,225d; -0,5d)$, датчик № 11 – $x=0,005$ м, $y=-0,004$ м и $z=-0,02$ м или $(0,1d; -0,1d; -0,5d)$, датчик № 12 – $x=0,016$ м, $y=0$ и $z=-0,02$ м или $(0,4d; 0; -0,5d)$ и датчик № 13 – $x=0,048$ м, $y=0$ и $z=-0,02$ м или $(1,2d; 0; -0,5d)$.

Все датчики, независимо от назначения и конструкции калибровались и тестировались абсолютными и относительными методами. В ходе экспериментальных исследований датчики давлений проверялись с помощью генерации импульса избыточного давления или его гармонической формы в гидродинамическом канале, что служило средством текущего контроля состояния используемых датчиков и их чувствительности. Наряду с этим, проверка датчиков проводилась как перед началом проведения исследований, так и после их окончания.

Погрешность измерений интегральных характеристик поля пульсаций давления не превышала 8% при надежности 0,95 или 2σ . Погрешность измерений спектральных характеристик не превышала 2 дБ в исследуемом диапазоне частот при той же надежности измеряемых результатов.

Результаты измерений. Изменение среднеквадратичных значений пульсаций пристеночного давления в размерном и безразмерном виде представлено в зависимости от скорости обтекания на рис. 3а и в зависимости от числа Рейнольдса на рис. 3б. На этих рисунках нумерация кривых совпадает с номерами датчиков пульсаций давления, которые установлены заподлицо с обтекаемой поверхностью в соответствии с рис. 2. Согласно результатам, приведенным на рис. 3а, среднеквадратичные значения пульсаций пристеночного давления внутри овального углубления и вблизи него пропорциональны квадрату скорости набегающего потока. Наряду с этим максимальные уровни пульсаций давления наблюдаются в месте ударного взаимодействия вихревых структур сдвигового слоя с кормовой стенкой лунки и в ее ближнем следе. Наименее интенсивные пульсации пристеночного давления имеют место в придонной области овального углубления, которые почти на порядок ниже, чем на кормовой стенке лунки. При этом внутри лунки пульсации пристеночного давления существенно ниже, чем в ненарушенном пограничном слое, особенно при малых скоростях ее обтекания. В области ударного взаимодействия сдвигового слоя, сформировавшегося над отверстием овального углубления, уровни пульсаций пристеночного давления растут и в (4...5) раз превышают пульсации пристеночного давления над гладкой пластиной. Наибольшие значения они имеют в средней (цилиндрической) части кормовой стенки овального углубления. В области

ближнего следа углубления интенсивность пульсаций пристеночного давления еще более нарастает и приобретает максимальных значений позади передней сферической части углубления и его цилиндрической части (места расположения датчиков № 12 и № 4). При удалении от овальной лунки среднеквадратичные пульсации пристеночного давления постепенно убывают и приближаются к уровням ненарушенного пограничного слоя.

Для исследуемых низкоскоростных режимов течения пульсации пристеночного давления подчиняются квадратичной зависимости по скорости потока (увеличение показателя степени пропорциональности), что более наглядно проиллюстрировано на рис. 3б, где пульсации давления обезразмеривались скоростным напором ($q = \rho U^2 / 2$). В пограничном слое, ненарушенном наличием локальной неоднородности на обтекаемой поверхности, интенсивность пульсаций пристеночного давления также остается пропорциональной квадрату скорости (см. кривую 1 на рис. 3б). Необходимо отметить, что нормированные пульсации пристеночного давления в ненарушенном пограничном слое перед овальным углублением приблизительно равны 0,01, практически, во всем диапазоне исследуемых чисел Рейнольдса. Это значение, как известно из [11 – 13], соответствует интенсивности пульсаций пристеночного давления, измеренной точечными датчиками, диаметр чувствительной поверхности которых не превышает 19 длин вязкости. В представленных исследованиях диаметр чувствительной поверхности датчиков пульсаций пристеночного давления не превышал 16 длин вязкости и их можно считать точечными, что подтверждают данные на рис. 3б. Следовательно, при обтекании пластины с локальным углублением на малых скоростях наименьшие уровни пульсаций пристеночного давления наблюдаются на дне овального углубления, в его передней части, особенно для малых скоростей потока и чисел Рейнольдса. Наибольшая интенсивность пульсаций пристеночного давления имеет место в ближнем следе углубления в его срединном сечении.

В придонной области овального углубления уровни пульсаций пристеночного давления имеют наибольшие значения в кормовой сферической части лунки (см. для сопоставления кривые 2, 6 и 10 на рис. 3б). Например, для скорости потока порядка 0,1 м/с коэффициент трансформации кинетической энергии потока в энергию турбулентных пульсаций давления, выражаемый отношением $\rho'_{\text{мс}}/q$, на дне кормовой сферической части лунки почти в три раза выше, чем в передней ее сферической части. На кормовой стенке лунки и в ее ближнем следе наблюдается существенная трансформация кинетической энергии потока в энергию пульсаций пристеночного давления, а при удалении от лунки интенсивность пульсаций давления падает и приближается к значениям ненарушенного пограничного слоя. В срединном сечении углубления коэффициент трансформации, измеренный позади лунки, почти в пять раз выше, чем на дне углубления. В сечении, проходящем через переднюю сферическую часть лунки, при малых скоростях обтекания пульсации давления, измеренные датчиком № 12 почти на порядок выше, чем на дне лунки. В сечении, проходящем через кормовую сферическую часть лунки, интенсивность пульсаций пристеночного давления позади лунки только в три раза превышает значения, измеренные на дне лунки.

Как показал анализ интегральных характеристик поля пульсаций пристеночного и полного давления, интенсивность пульсаций давления в пограничном слое и внутри лунки существенно отличаются друг от друга. Такое различие осредненных параметров поля давлений естественно приводит к разному волновому либо частотному наполнению спектральных зависимостей пульсаций пристеночного давления, измеренных на обтекаемой поверхности под ненарушенным пограничным слоем, внутри лунки и ее окрестности. Визуальные исследования показали [6, 7], что внутри лунки в зависимости от ее геометрических параметров и гидродинамических режимов обтекания формируются вихревые структуры различного типа, которые, при определенных условиях, периодически выбрасываются из лунки. Взаимодействие вихревых структур между собой и с обтекаемой поверхностью лунки и пластины приводит к генерации интенсивных пульсаций гидродинамических параметров потока (скорость, давление, касательные напряжения, температура и др.), которые на спектральных зависимостях выражаются в появлении характерных дискретных пиков или тональных подъемов, обусловленных периодическими осцилляциями вихревого потока, нередко резонансными. Особенности распределения интенсивности псевдозвуковых пульсаций пристеночного давления в частотном представлении исследовались посредством использования спектрального анализа экспериментальных данных. Для этого применялся алгоритм быстрого преобразования Фурье с использованием весовых окон и в качестве спектральной характеристики анализа случайных процессов вычислялись спектральные плотности мощности пульсаций пристеночного давления. Нормировка спектральных зависимостей осуществлялась двумя путями, а именно, по скоростному напору набегающего потока, в результате чего интеграл под спектральными кривыми соответствовал коэффициенту трансформации кинетической энергии потока в энергию турбулентных пульсаций давления и по среднеквадратичному значению пульсаций пристеночного давления. Последняя нормировка позволяет площадь под любыми спектральными кривыми приравнять к единице. В первом представлении о поле пульсаций давления можно судить как о распределении интенсивности пульсаций в частотном диапазоне, так и о

трансформации кинетической энергии набегающего потока в энергию пульсаций пристеночного давления. Во втором случае экспериментальные результаты указывают на вклад различных частотных компонент спектра в общую энергию пульсаций пристеночного давления.

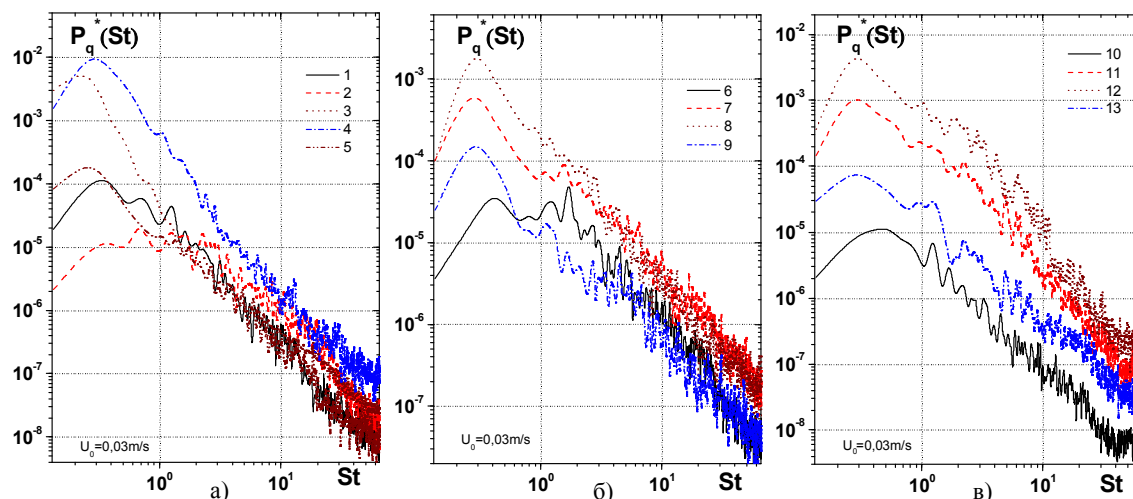


Рис. 4. Спектральные плотности мощности пульсаций пристеночного давления для скорости потока 0,03 м/с нормированные скоростным напором, измеренные в различных продольных сечениях лунки

На рис. 4 представлены спектральные плотности мощности пульсаций пристеночного давления, измеренные на поверхности овальной лунки, расположенной под углом 60° относительно направления потока, для скорости потока 0,03 м/с и $Re_d=1200$. Нормировка данных проводилась по скоростному напору ($q=\rho U^2/2$) и по внешним переменным, а именно, по диаметру овальной лунки и по скорости потока ($P^*_q(St)=P(St)U/dq^2$) в зависимости от числа Струхала ($St=fd/U$). На рис. 4а показаны спектры полученные вдоль срединного продольного сечения овальной лунки ($z/d=0$), на рис. 4б – вдоль ее кормовой по потоку сферической части ($z/d=0,5$), а на рис. 4в – вдоль ее передней по потоку сферической части ($z/d=-0,5$). Номера кривых соответствуют номерам датчиков пульсаций давления, установленных заподлицо с обтекаемой поверхностью, расположение которых показано на рис. 2.

Максимальные уровни пульсаций пристеночного давления в области низких частот имеют место позади овального углубления (в области его ближнего следа для всех продольных сечений, датчик № 4 на рис. 4а, датчик № 8 на рис. 4б, датчик № 12 на рис. 4в), где происходит интенсивное взаимодействие вихревого течения, выбрасываемого из лунки, и пограничного слоя, образуемого над обтекаемой поверхностью пластины. Следовательно, в ближнем следе углубления больший вклад в энергию поля пульсаций давления вносят крупномасштабные вихревые системы. В придонной области лунки уровни пульсаций давления существенно ниже, особенно в области низких частот, что является характерной особенностью вихревого течения внутри лунки для всех трех исследуемых сечений, где были расположены датчики пульсаций давления.

Анализируя результаты, представленные на рис. 4а необходимо отметить, что значения пульсаций давления, измеренные датчиком № 4, являются более высокими, практически, во всем измеряемом частотном диапазоне, кроме области низких частот. Здесь интенсивность пульсаций пристеночного давления выше в области ударного взаимодействия вихревых структур сдвигового слоя с кормовой стенкой овальной лунки (место расположения датчика № 3). Вблизи кормовой стенки лунки низкочастотные пульсации давления, обусловленные действием крупномасштабных вихревых структур, выше почти на два порядка, чем пульсации пристеночного давления в ненарушенном пограничном слое перед овальным углублением (кривые 1, 3 и 4 рис. 4а). Внутри лунки интенсивность пульсаций пристеночного давления убывает, при этом разница между пульсациями давления на дне лунки в ее срединном сечении и вблизи кормовой стенки в низкочастотной области превышает три порядка. Позади углубления пограничный слой постепенно восстанавливается и влияние лунки становится незначительным, что отображается в небольшом разбросе данных на кривых 1 и 5.

В сечении, проходящем вдоль кормовой сферической части овального углубления (рис. 4б), уровни пульсаций пристеночного давления ниже, чем в срединном сечении лунки (рис. 4а). Максимум интенсивности пульсаций пристеночного давления также регистрируется в области кормовой стенки лунки и в ее ближнем следе, превышая почти на два порядка уровни спектральных плотностей мощности пульсаций пристеночного давления в придонной части лунки. Однако в отличие от срединного сечения в ближнем

следе лунки прирост в спектрах давления наблюдается только в области низких частот. С удалением от овального углубления спектры пристеночного давления убывают в области низких частот и возрастают в

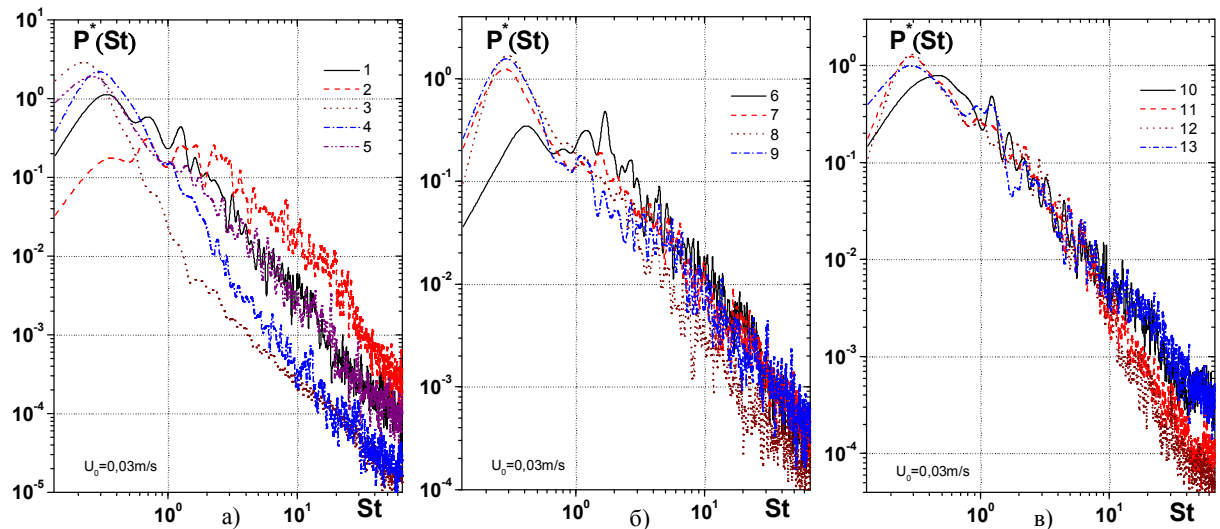


Рис. 5. Спектральные плотности мощности пульсаций пристеночного давления для скорости потока 0,03 м/с нормированные среднеквадратичными значениями пульсаций пристеночного давления, измеренные в различных продольных сечениях лунки

высокочастотном диапазоне относительно области, прилегающей к кормовой стенке. Это указывает на то, что с удалением от овального углубления вихревые структуры, обладающие большим размером, разрушаются, а интенсивность мелкомасштабных вихрей, источников высокочастотных пристеночных пульсаций давления, возрастает.

Изменения спектральных зависимостей пульсаций пристеночного давления вдоль сечения, проходящего через переднюю по потоку сферическую часть овальной лунки, показали существенный разброс спектральных уровней пульсаций пристеночного давления не только в низкочастотной области, а и во всем измеряемом частотном диапазоне (рис. 4в). Подобно предыдущим сечениям здесь наибольшие спектральные уровни регистрируются в ближнем следе лунки, а также в области взаимодействия вихревых структур сдвигового слоя с кормовой стенкой углубления, однако увеличение значений спектральных плотностей наблюдается и в высокочастотном диапазоне. В придонной области лунки уровни пульсаций давления существенно ниже, причем, в отличие от рассмотренных выше сечений (рис. 4а и рис. 4б), разница в два порядка сохраняется как для низкочастотного, так и для высокочастотного диапазона, достигая самого низкого заполнения высокочастотного диапазона для всех спектральных зависимостей пульсаций пристеночного давления, представленных на рис. 4. По мере удаления от лунки интенсивность пульсаций давления растет и стремится к интенсивности, характерной для ненарушенного пограничного слоя.

О вкладе различных частотных компонент пульсаций давления в общую энергию поля пульсаций пристеночного давления, измеренных на поверхности овальной лунки, расположенной под углом 60° относительно направления потока, для скорости потока 0,03 м/с и $Re_d=1200$ можно судить из анализа результатов, представленных на рис. 5. Здесь экспериментальные данные нормированы среднеквадратичными значениями пульсаций пристеночного давления в соответствующих точках измерений. Для этого спектральная плотность мощности пульсаций пристеночного давления, нормированная в виде $P^*(St)=P(St)U/d(p')^2$, представляется, как зависимость от числа Струхала $St=fd/U$. Аналогично результатам представленным на рис. 4, здесь кривые также сгруппированы в три графика по измеряемым продольным сечениям (рис. 5а – вдоль срединного продольного сечения лунки, рис. 5б – вдоль кормового по потоку сечения лунки, рис. 5в – вдоль переднего по потоку сечения лунки), а номера кривых соответствуют номерам датчиков (см. рис. 2).

Согласно анализу кривых на рис. 5а следует отметить, что пульсации давления в области кормовой стенки лунки значительно насыщены низкочастотными компонентами. Здесь интенсивность высокочастотных пульсаций, источниками которых в вихревых или отрывных течениях и внутри пограничного слоя обычно являются мелкомасштабные вихри, более чем на порядок ниже, чем в других измерительных точках. Особенно выделяется область взаимодействия вихревых структур слоя смешения с кормовой стенкой лунки (датчик № 3 рис. 5а) где наблюдаются как наибольший подъем в низкочастотной области спектра, так и минимальное значение спектра в среднечастотной области в среди всех кривых рис. 5. В придонной области лунки вклад высокочастотных компонент растет и становится выше, чем в ненару-

шенном пограничном слое. Позади овального углубления вклад среднечастотных и высокочастотных компонент в общую энергию становится таким же, как в ненарушенном пограничном слое, а в области

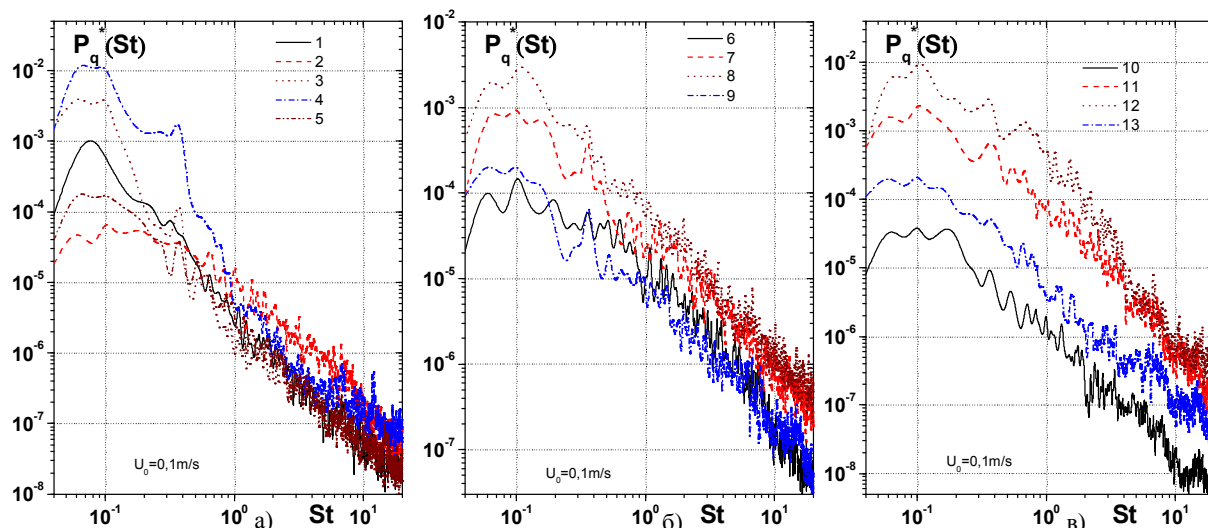


Рис. 6. Спектральные плотности мощности пульсаций пристеночного давления для скорости потока 0,1 м/с нормированные скоростным напором, измеренные в различных продольных сечениях лунки

низких частот наблюдается различие, которое характеризует особенности механизма восстановления пограничного слоя после действия на него крупномасштабных вихревых структур, выбрасываемых из овальной лунки.

Для кривых, представленных на рис. 5б, можно отметить подобную тенденцию, а именно заполнение низкочастотными компонентами спектральных плотностей мощности пульсаций пристеночного давления в области кормовой стенки углубления. Внутри же углубления существенный вклад в энергию пульсаций давления вносят вихревые структуры, генерирующие пульсации в области средних частот, а вклад низкочастотных крупномасштабных вихрей становится незначительным, что особенно хорошо проиллюстрировано характером поведения кривой 6. Наименьшее заполнение спектра высокочастотными компонентами наблюдается в ближнем следе лунки, за кормовым краем (датчик № 8 рис. 5б).

Результаты экспериментальных исследований, представленные на рис. 5в, еще раз подтверждают, что в области, прилегающей к кормовой стенке овального углубления, для скорости набегающего потока 0,03 м/с, наибольший вклад в энергию поля пульсаций давления вносят крупномасштабные когерентные вихревые системы, которые генерируют низкочастотные пульсации поля давления и скорости. Такими вихревыми структурами для данных условий обтекания овальной лунки являются выбрасываемые из нее крупномасштабные вихри, которые формируются внутри лунки, о чем было сказано в работе [6, 7]. В области ударного взаимодействия сдвигового слоя с кормовой стенкой лунки возрастает роль мелкомасштабных вихрей в процессе трансформации энергии набегающего потока в энергию пульсаций пристеночного давления на обтекаемой поверхности лунки. Это обусловлено тем, что структура сдвигового слоя содержит вихревые системы намного меньшего масштаба, а, следовательно, генерирующие высокочастотные пульсации поля скоростей и давлений, чем вихревые системы, формируемые внутри лунки. В придонной области сферической части лунки и позади нее роль высокочастотных компонент также возрастает, из-за наличия процесса каскадного механизма разрушения крупномасштабных вихрей, энергия которых после распада трансформируется в энергию мелкомасштабных вихрей. Однако, в отличие от рассмотренных ранее сечений, в придонной части существенно выросли низкочастотные пульсации пристеночного давления, что обусловлено появлением крупномасштабных вихревых структур внутри передней по потоку сферической части овальной лунки ($z/d = -0,5$).

С увеличением скорости течения до 0,1 м/с ($Re_d = 4000$) обнаружены следующие изменения спектральных характеристик поля пульсаций пристеночного давления (рис. 6). Вдоль срединного сечения лунки максимальные уровни пульсаций давления зарегистрированы в ближнем следе лунки, в непосредственной близости кормового края, что показано на рис. 6а (см. кривую 4). Но в отличие от предыдущего режима обтекания (см. рис. 4а), наибольшая интенсивность пульсаций давления позади лунки наблюдается только в области низких частот, а в высокочастотной области уровни пульсаций давления близки к условиям ненарушенного пограничного слоя. Необходимо отметить, что для скорости потока 0,1 м/с максимум пульсаций пристеночного давления увеличился еще больше по сравнению с режимом более мед-

ленного обтекания лунки. Наряду с этим уменьшилась безразмерная частота этого максимального подъема пульсаций давления, и она соответствует числу Струхала порядка 0,06, что неплохо согласуется с ана-

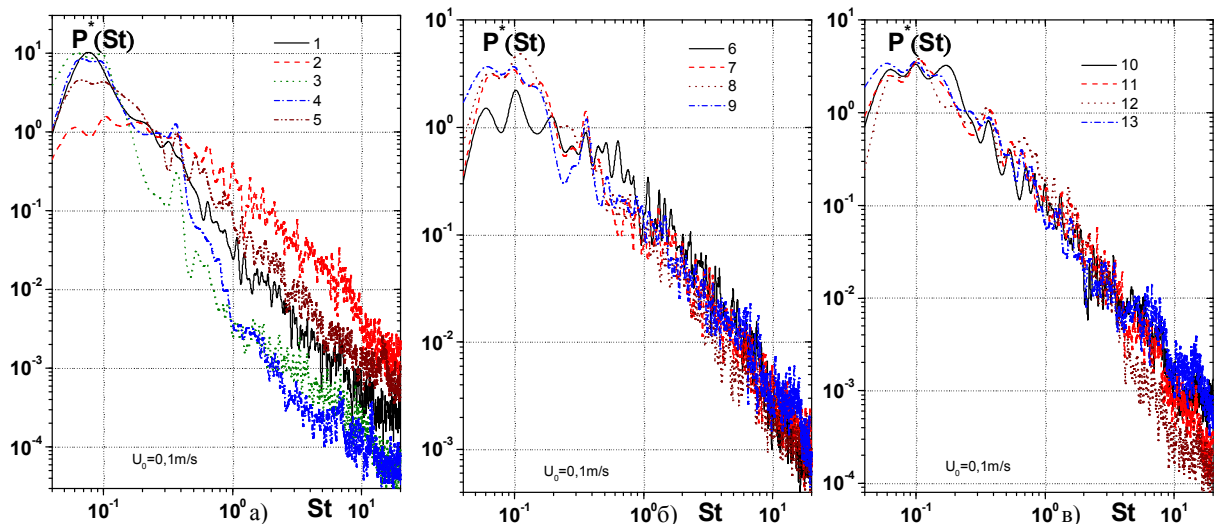


Рис. 7. Спектральные плотности мощности пульсаций пристеночного давления для скорости потока 0,1 м/с нормированные среднеквадратичными значениями пульсаций пристеночного давления, измеренные в различных продольных сечениях лунки

лизом картин визуализации овальной лунки, расположенной под углом 60° к направлению потока, полученными в работе [7]. Для скорости набегающего потока 0,03 м/с максимальный подъем был зафиксирован для $St=0,3$.

В области ударного взаимодействия вихревых структур сдвигового слоя с кормовой стенкой лунки также наблюдаются довольно высокие уровни пульсаций пристеночного давления в области низких частот, которые в четыре раза превышают уровни пульсаций давления на обтекаемой поверхности пластины под ненарушенным пограничным слоем (кривая 3 и 1 на рис. 6а). Минимальные уровни пульсаций давления наблюдаются на дне овального углубления, которые более двух порядков ниже в области низких частот, чем в ближнем следе лунки и более порядка ниже, чем на плоской пластине перед овальным углублением (см. рис. 6а). В области высоких частот пульсации давления на дне лунки являются наиболее интенсивными, указывая на преобладающее действие в придонной области лунки мелкомасштабных вихревых структур. По мере удаления от углубления характер поведения спектральных кривых приближается к тому, который наблюдался в ненарушенном пограничном слое, существенно уменьшившись в области низких частот.

В сечении, проходящем вдоль кормовой сферической части овальной лунки, наибольшая интенсивность пульсаций пристеночного давления также наблюдается позади лунки, сразу же за ее кормовым краем, что показано на рис. 6б с максимумом на частоте $St=0,1$. Однако здесь уровни пульсаций давления имеют большую интенсивность не только в низкочастотной области, а и во всем измеряемом частотном диапазоне. В области взаимодействия вихревых структур слоя смещения с кормовой стенкой углубления (датчик № 7) также наблюдаются повышенные уровни пульсаций давления, которые в высокочастотном диапазоне достигают уровней, измеренных в ближнем следе за лункой (кривая 7 и 8 рис. 6б). С удалением от углубления пульсации пристеночного давления уменьшаются во всем частотном диапазоне почти на порядок, достигая уровня, измеренного в придонной части лунки, кривые 9 и 6. В придонной части лунки выросли низкочастотные пульсации давления, в сравнении с срединным сечением.

В сечении, проходящем вдоль передней сферической части овальной лунки разница спектральных уровней пульсаций пристеночного давления, измеренных в различных точках на обтекаемой поверхности, очень существенна (рис. 6в), как и для скорости потока 0,03 м/с (рис. 4в). При этом спектральная плотность мощности пульсаций пристеночного давления, измеренная в ближнем следе овального углубления более, чем на два порядка превышает спектральные уровни, фиксируемые на дне передней сферической части лунки во всем частотном диапазоне (см. кривые 12 и 10 на рис. 6в) с максимумом на частоте, составляющей $St=0,1$. В зоне взаимодействия сдвигового слоя с кормовой стенкой спектры в низкочастотной области в пять раз ниже, чем в ближнем следе, но с ростом частоты разница уменьшается, достигая совпадения в высокочастотном диапазоне. В придонной области углубления уровни спектральной плотности мощности пульсаций пристеночного давления уменьшаются более чем на два порядка, во всем частотном диапазоне относительно значений, полученных в ближнем следе за лункой. Следует отметить, что на дне лунки спектральные уровни принимают минимальные значения во всех исследуемых сечениях, представленных рис. 6.

О вкладе различных частотных компонент в общую энергию поля пульсаций пристеночного давления можно судить из результатов, представленных на рис. 7, для скорости потока 0,1 м/с и $Re_d=4000$. 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, что проиллюстрировано на рис. 7а. В области высоких частот наибольший вклад в энергию пульсаций давления вносят мелкомасштабные вихри в области дна овальной лунки. В то же время интенсивность высокочастотных пульсаций давления вблизи кормовой стенки незначительна (см. кривую 3 и 4 на рис. 7а), подобно случаю обтекания лунки с меньшей скоростью потока, о чем было отмечено ранее. В кормовом сечении лунки только в придонной области лунки наблюдается уменьшение наполненности спектральной плотности в низкочастотном диапазоне, а в области средних частот – небольшой подъем спектра (рис. 7б). В сечении, проходящем вдоль передней сферической части овальной лунки, установленной под углом 60° к направлению потока, разница спектральных уровней пульсаций пристеночного давления, нормированных среднеквадратичными значениями пульсаций пристеночного давления, измеренных в различных точках на обтекаемой поверхности лунки и за ней, становятся очень близки между собой (рис. 7в).

Выводы. На основании результатов экспериментальных исследований поля пульсаций пристеночного давления внутри и вблизи овальной лунки, расположенной под углом 60° к направлению потока и обтекаемой низкоскоростным течением можно сделать следующие выводы:

1. Обнаружено, что максимальные среднеквадратичные значения пульсаций давления имеют место в области взаимодействия вихревых структур сдвигового слоя с кормовой стенкой лунки и в ее ближнем следе. С удалением от лунки интенсивность пульсаций давления убывает до уровня ненарушенного пограничного слоя. Минимальные значения получены в придонной области углубления. Установлено, что среднеквадратичные значения пульсаций давления внутри овальной лунки и в ее окрестности пропорциональны квадрату скорости набегающего потока.

2. Установлено, что уровни спектральных плотностей мощности пульсаций давления вдоль всей области ближнего следа овальной лунки максимальны в диапазоне низких частот. На дне лунки спектральные уровни пульсаций давления минимальны по всей ее длине. С удалением от углубления спектральные плотности мощности пульсаций давления уменьшаются, приближаясь к значениям ненарушенного пограничного слоя. Пограничный слой постепенно восстанавливается.

3. Показано, что в области взаимодействия вихревых структур сдвигового слоя с кормовой стенкой лунки и в ее ближнем следе наибольший вклад в энергию пульсаций давления вносят низкочастотные пульсации, основным источником которых являются выбрасываемые в пограничный слой из лунки крупномасштабные вихревые структуры. На дне овальной лунки наибольший вклад в общую энергию пульсаций давления вносят высокочастотные осцилляции, генерируемые мелкомасштабными вихрями.

Автор выражает благодарность и искреннюю признательность академику НАН Украины, проф. В. Т. Гринченко, проф. Г. А. Воропаеву, проф. С. А. Исаеву и ст. научн. сотр. В. А. Воскобойнику за активное участие в обсуждении и ценные указания при анализе результатов экспериментальных исследований, а также главному прибористу А. А. Воскобойнику за участие в проведении исследований и обработке данных.

Работа выполнена при финансовой поддержке гранта совместного конкурса НАН Украины – РФФИ 2008 – 2009 гг. (проект № 2-08а, гос. рег. № 0108U003264; № 0109U003389 и проект № 08-08-90400; № 08-01-00059).

РЕЗЮМЕ

Експериментально досліджено поле пульсацій пристінного тиску, яке утворюється вихровими структурами, котрі формуються та розвиваються в овальній лунці при малих швидкостях обтікання. Дослідження проведено у гідродинамічному каналі з використанням групи мініатюрних датчиків пульсацій пристінного тиску, які було встановлено у рівень з обтічною поверхнею овальної лунки та в її околі. Зафіксовані як середньоквадратичні, так і спектральні характеристики поля пульсацій пристінного тиску. Відзначені особливості генерації низькочастотних та високочастотних складових спектральних густин потужності пульсацій пристінного тиску, обумовлених формуванням та розвитком когерентних вихрових систем всередині овальної лунки, розташованої під кутом 60° до напрямку течії.

SUMMARY

Wall pressure fluctuation fields produced by a vortical structures, which are formed and developed in an oval dimple at low stream velocities are experimentally investigated. Researches were conducted in a hydrodynamic channel with

the use of group of miniature sensors of wall pressure fluctuation, which were flush-mounted with the streamlined surface of the oval dimple and its vicinity. As root-mean-square so spectral characteristics of the wall pressure fluctuation are fixed. The features of generation of low-frequency and high-frequency components of power spectral densities of the wall pressure fluctuation, conditioned forming and development of the coherent vortical systems into an oval dimpled, oriented at an angle of 60° to the stream direction are determined.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Смольяков А.В. Шум турбулентных потоков / А.В. Смольяков. – С.-Пб.: ЦНИИ им. Акад. А.И. Крылова, 2005. – 312 с.
2. Blake W.K. Mechanics of flow-induced sound and vibration: in 2 vols / W.K.Blake. – New York: Academic Press, 1986. – 974 p.
3. Воскобойник В.А. Скорости переноса когерентных вихревых структур в турбулентном пограничном слое на цилиндре / В.А.Воскобойник, В.Т.Гринченко, А.П.Макаренков // Акустичний вісник. – 2000. – 3, № 4. – С. 21-29.
4. Исаев С.А. Численное моделирование смерчевого теплообмена при обтекании поверхностей с лунками (состояние и перспективы) / С.А.Исаев, А.И.Леонтьев, Н.В.Корнев // VI Минский Межд. Форум по Теплообмену, ММФ 2008. – Минск, Беларусь. – 2008. – С. 1-9.
5. Халатов А.А. Режимы течения в единичном углублении, имеющем форму сферического сегмента) / А.А.Халатов, Г.В.Коваленко, В.И. Терехов // VI Минский Межд. Форум по Теплообмену, ММФ 2008. – Минск, Беларусь. – 2008. – С. 1-10.
6. Гринченко В.Т. Управление ламинарным пограничным слоем вихрями, генерируемыми овальной лункой / В.Т.Гринченко, Г.А.Воропаев, С.А.Исаев и т.д. // Вісник Донецького Університету, Сер. А: Природничі науки. – 2009. – Вип. 1. – С. 191-198.
7. Воропаев Г.А. Визуализация ламинарного обтекания овального углубления / Г.А.Воропаев, А.В.Воскобойник, В.А.Воскобойник и т.д. // Прикладна гідромеханіка. – 2009. – 11, № 4. – С. 31-46.
8. Исаев С.А. Вихревая интенсификация теплообмена в микроканалах с овальными лунками / С.А.Исаев, Э.Леонарди, В.Тимченко и т.д. // Третья международная конференция "Тепломассообмен и гидродинамика в закрученных потоках". 21-23 октября 2008 г. Москва. – Москва, Россия. – 2008. – С. 1-10.
9. Смольяков А.В. Измерение турбулентных пульсаций / А.В.Смольяков, В.М.Ткаченко. – Л: Энергия, 1980. – 264 с.
10. Vinogradnyi G.P. Spectral and correlation characteristics of the turbulent boundary layer on an extended flexible cylinder / G.P.Vinogradnyi, V.A.Voskoboinick, V.T.Grinchenko and al. // J. Fluid Dynamics. – 1989. – 24, № 5. – P. 695-700
11. Bull M.K. Wall-pressure fluctuations beneath turbulent boundary layers: Some reflections on forty years of research / M.K. Bull // J. Sound Vibr. – 1996. – 190, № 3. – P. 299-315.
12. Schewe G. On the structure and resolution of wall-pressure fluctuations associated with turbulent boundary-layer flow / G.Schewe. – J. Fluid Mech. – 1983. – 134. – P. 311-328.
13. Willmarth W.W. Pressure fluctuations beneath turbulent boundary layers / W.W.Willmarth // Ann. Rev. Fluid Mech. – 1975. – 7. – P. 13-37.

Поступила в редакцию 05.05.2010 г.