

## ГЕНЕРАЦІЯ ПСЕВДОЗВУКА ВИХРЕВИМИ СТРУКТУРАМИ В ПОПЕРЕЧНО ОБТЕКАЕМОЙ ОВАЛЬНОЙ ЛУНКЕ

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

*Інститут гідромеханіки НАН України, Київ, Україна*

The research results of the pseudosound wall-pressure fluctuation field are led inside and near-by the transversal streamlined oval dimple which is situated on a hydraulically smooth flat surface. It is set that intensity of the wall-pressure fluctuation field on a aft wall of the dimple almost on an order higher, than on a front wall of the dimple and with the velocity increase exceeding increases. Discrete constituents appear in the wall-pressure spectra. They answer characteristic frequencies of low-frequency oscillations of vortical flow inside dimple, frequencies of break-up vortical structures outside from the dimple, frequencies of rotation of circulation flow inside the dimple, generating large-scale coherent vortical structures, and frequencies, answering shear modes of a self-excited oscillations of the vortical structures of the shear layer.

### ВВЕДЕНИЕ

Углубления технологического или случайного характера на обтекаемой поверхности широко встречаются в различных конструкциях и устройствах, которые либо обтекаются потоком, либо сами движутся в потоках сжимаемых или несжимаемых жидкостей. При определенных режимах течения, которые в большинстве случаев на практике являются турбулентными, внутри углублений или лунок формируется вихревое течение с выбросом вихревых систем наружу из углубления [1-3]. Сложное вихревое течение внутри лунок, являющееся нестационарным во времени и неоднородным в пространстве, генерирует интенсивные поля пульсаций скорости и давления как над обтекаемыми поверхностями, так и на самих поверхностях. В результате в гидродинамическом шуме турбулентного пограничного слоя появляются тональные составляющие, обусловленные особенностями вихревого течения внутри углублений, а также выбросом вихревых структур во внешнее течение [4, 5]. В гидроакустических устройствах и антеннах наличие углублений на обтекаемой поверхности приводит к росту гидродинамических помех, а также обуславливает повышенные уровни вибрации обтекаемых объектов. В связи с этим становятся актуальными исследования по изучению особенностей вихреобразования внутри углублений, а также полей пульсаций скорости и давления, которые генерируются вихревыми структурами.

Цель экспериментальных исследований – определение пространственно-временных характеристик поля пульсаций пристеночного давления, имеющего псевдозвуковую природу, обусловленного действием вихревых структур, которое генерируется внутри и вблизи поперечно обтекаемой овальной лунки, расположенной на гидравлически гладкой плоской поверхности.

### ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ УСТАНОВКА И МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЙ

Экспериментальные исследования вихревого течения внутри поперечно обтекаемой овальной лунки, расположенной на плоской пластине, проводились в гидродинамическом лотке длиной 16 м, шириной 1 м и глубиной 0.8 м. Для проведения визуальных исследований боковые стенки гидродинамического лотка сделаны

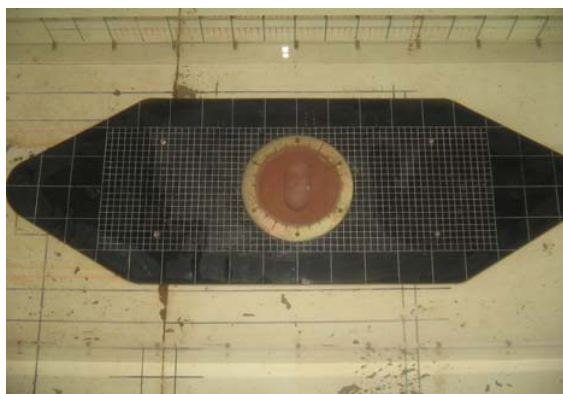


Рис. 1 Поперечно обтекаемая овальная лунка на плоской пластине

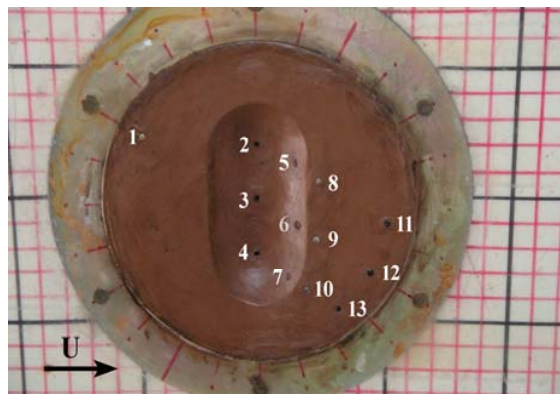


Рис. 2 Датчики пульсаций пристеночного давления внутри и вблизи лунки

стеклянными. Вода в лоток подавалась через успокоительную камеру насосами. Из успокоительной камеры поток воды проходил конфузторный отсек и, через хонейкомбы и турбулизирующие сетки, поступал на вход гидродинамического лотка.

Измерительный участок, оборудованный аппаратурой и средствами регистрации характеристик набегающего потока, координатными приспособлениями, располагался на расстоянии 8.0 м от входной части лотка. Координатное устройство позволяло перемещать датчики в продольном направлении с шагом  $10^{-4}$  м, в азимутальном –  $5 \cdot 10^{-5}$  м и в вертикальном –  $10^{-5}$  м.

Перед проведением исследований гидродинамических характеристик течений были выполнены виброакустические измерения шумов и вибраций лотка и выявлено влияние их на измеряемые параметры. Для этого в поток воды гидродинамического лотка помещались гидрофоны типа 8103 фирмы Брюль и Кьер, на державки датчиков и к стенкам лотка крепились виброакселерометры типа 4393 фирмы Брюль и Кьер. Измерения также проводились при нулевой скорости течения, то есть, когда лоток был только заполнен водой. Анализ гидроакустических и вибрационных помех с помощью комплекса аппаратуры фирмы Брюль и Кьер позволил определить источники помех и провести мероприятия по их устранению. В частности, были уменьшены шумы слива воды, которые создавали помехи акустической и вибрационной природы. В результате этого удалось снизить помехи на (20...30) дБ. Постоянно проводился контроль температуры воздуха и воды, атмосферного давления, а датчики давления периодически проверялись.

В гидродинамическом лотке использовалась гидравлически гладкая пластина из полированного органического стекла толщиной 0.01 м, шириной 0.5 м и длиной 2.2 м, которая была заострена с фронтальной и кормовой сторон для ее безотрывного обтекания. На боковых сторонах пластины располагались концевые шайбы (органическое стекло толщиной 0.005 м и шириной 0.2 м). Пластина с овальной лункой была установлена в измерительном участке гидродинамического лотка на высоте 0.1 м от дна лотка, параллельно его поверхности. На расстоянии  $x=0.8$  м от носка пластины была сделана овальная лунка (рис. 1). Лунка представляла собой два сферических сегмента диаметром  $d=0.04$  м, соединенные цилиндрической вставкой того же диаметра, длиной 0.04 м и глубиной  $h=0.009$  м (углубление  $h/d \approx 0.22$ ). К нижней части пластины, в месте расположения углубления, крепился лист с масштабной сеткой и пенопластовый обтекатель. Предусмотрена возможность вращения овальной лунки вокруг ее

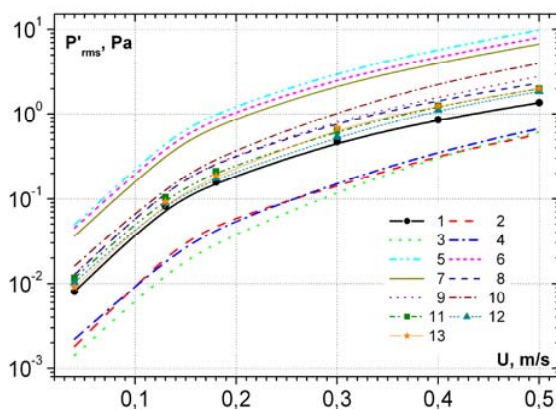


Рис. 3 Среднеквадратичные значения пульсаций пристеночного давления

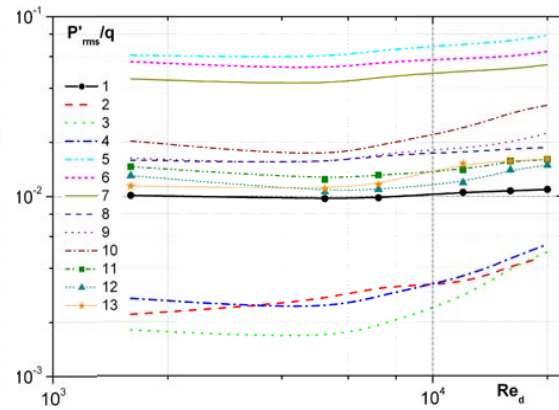


Рис. 4 Нормированная интенсивность пульсаций пристеночного давления

вертикальной оси с шагом 15 град. Металлические стержни с резьбовыми соединениями по концам, зафиксированные на нижней стороне пластины, служили креплением пластины внутри гидравлического лотка между его стенками. Глубина потока и его скорость регулировалась посредством специального оборудования, позволяющего плавно изменять эти параметры. При проведении исследований глубина потока составляла  $H=0.4$  м, а скорости течения ( $U$ ) изменялись от 0.02 м/с до 0.5 м/с, которым отвечали числа Рейнольдса  $Re_x = xU/\nu$  от  $2 \cdot 10^5$  до  $4 \cdot 10^6$  и  $Re_d = Ud/\nu$  от  $2 \cdot 10^3$  до  $5 \cdot 10^4$ , где  $\nu$  – кинематическая вязкость воды.

## РЕЗУЛЬТАТЫ ИЗМЕРЕНИЙ

В измерениях, согласно разработанной программе и методике исследований, использовалось 13 датчиков, установленных заподлицо с обтекаемой поверхностью лунки и пластины [5]. Схема расположения датчиков и их номера указаны на рис. 2. Среднеквадратичные значения пульсаций пристеночного давления в зависимости от скорости набегающего потока представлены на рис. 3. Здесь номера кривых соответствуют номерам датчиков, установленных заподлицо с обтекаемой поверхностью, согласно схеме рис. 2. С увеличением скорости течения пульсации давления растут и наибольшие их уровни имеют место на кормовой стенке лунки, где вихревые структуры сдвигового слоя взаимодействуют с поверхностью лунки [3-5]. Наименьшие значения пульсаций давления регистрируются на дне овальной лунки, что отображено кривыми 2, 3 и 4. Разница между наибольшими и наименьшими значениями пульсаций пристеночного давления составляет почти порядок величин.

Безразмерные интенсивности пульсаций пристеночного давления показаны на рис. 4. Нормировка пульсаций давления проводилась динамическим давлением, а результаты представлены в зависимости от числа Рейнольдса, определенного по скорости течения и диаметру овальной лунки. Перед овальной лункой интенсивность пульсаций давления пропорциональна квадрату скорости течения и остается, практически, неизменной для исследуемого диапазона чисел Рейнольдса, что отображено кривой 1. Внутри лунки (на ее дне) пульсации давления невысокие и растут с увеличением числа Рейнольдса, указывая на то, что здесь коэффициент пропорциональности в показателе степени скорости потока превышает значение 2, особенно для высоких чисел Рейнольдса. Кроме того, незначительный рост пульсаций давления с увеличением  $Re_d$  наблюдается и

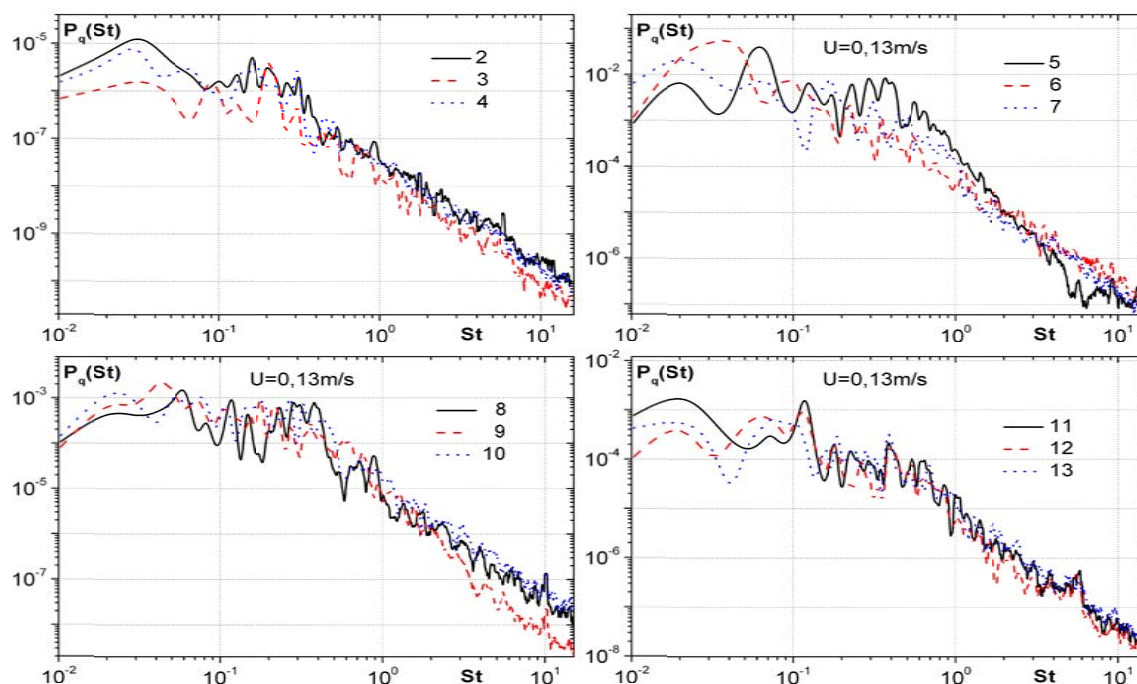


Рис. 5 Спектральные плотности мощности пульсаций пристеночного давления внутри поперечно обтекаемой овальной лунки и вблизи нее для  $U=0.13$  м/с и  $Re_d=5200$

еще для ряда измерительных точек, находящихся в следе поперечно обтекаемой овальной лунки (см., например, кривые 9, 10, 12 и 13). С удалением от лунки интенсивность пульсаций пристеночного давления постепенно приближается к значениям, измеренным перед лункой, то есть, пограничный слой постепенно восстанавливается.

Спектральные плотности мощности пульсаций пристеночного давления, нормированные динамическим давлением, в зависимости от числа Струхалия представлены на рис. 5 для скорости потока 0.13 м/с или числа Рейнольдса  $Re_d = 5200$ . Номера кривых, как и на последующих спектральных зависимостях поля пульсаций давления, соответствуют номерам датчиков, установленных заподлицо с обтекаемой поверхностью лунки и в ее ближнем следе (см., рис. 2). Здесь кривые сгруппированы по характерным областям обтекаемой поверхности, а именно, дно лунки, ее кормовая стенка и область следа. Особенности кривых является уменьшение спектральных уровней в области низких частот, наличие области экстремальных значений и постепенное снижение уровней спектров с ростом частоты. Вблизи конвективного гребня спектры убывают обратно пропорционально числу Струхалия, а затем наблюдаются области понижения спектральных уровней пульсаций давления пропорционально  $St^{-3}$ . Наряду с этим в спектральных зависимостях появляются дискретные или тональные составляющие (в основном в области низких частот), которые обусловлены действием вихревых структур, генерируемых внутри лунки и порождающих интенсивные пульсации давления [3, 5].

В придонной части овальной лунки, обтекаемой поперечным потоком относительно ее продольной оси, уровни спектральных составляющих пристеночных пульсаций давления самые низкие из всех исследуемых нами областей, особенно в срединном сечении лунки (кривая 3). В диапазоне частот  $St = (0.02...0.04)$  наблюдается подъем в спектрах, вызванный низкочастотными осцилляциями вихревого течения внутри

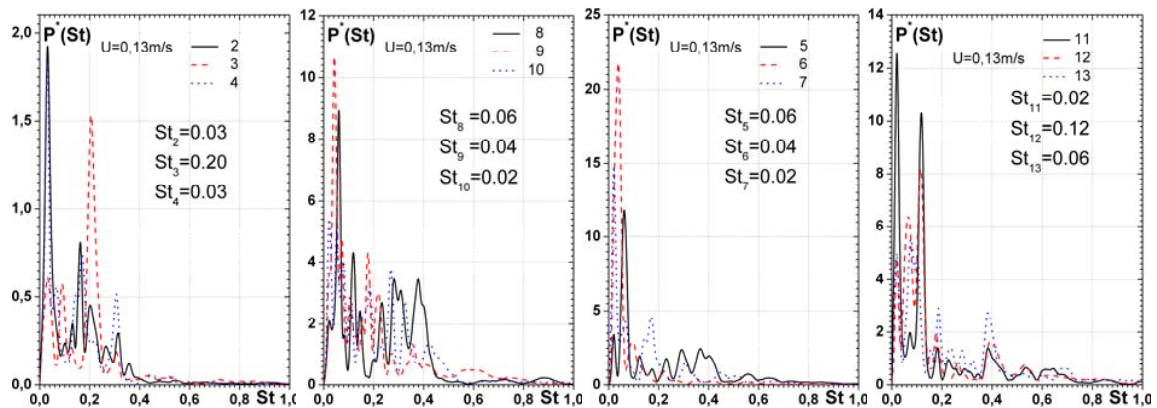


Рис. 6 Низкочастотные составляющие спектров пульсаций давления для скорости потока 0.13 м/с и числа Рейнольдса  $Re_d=5200$

лунки и выбросом вихрей наружу из лунки. В области частот  $St \approx (0.1...0.2)$  имеет место еще одна область увеличения спектральных уровней, которая обусловлена вращением циркуляционного течения и когерентных вихревых структур, формируемых внутри овальной лунки.

Наибольшая интенсивность пульсаций пристеночного давления наблюдается на кормовой стенке лунки, где происходит взаимодействие потока с поверхностью лунки. Здесь максимальные пульсации имеют место в области частот, соответствующих частоте выбросов вихревых систем. В ближнем следе лунки спектральные уровни пульсаций пристеночного давления несколько убывают и в меньшей мере проявляются дискретные подъемы на характерных частотах вихреобразования и выбросов.

С увеличением скорости течения основные характерные особенности спектральных зависимостей поля пульсаций пристеночного давления, в целом, остаются подобными. Наблюдается конвективный гребень, области повышения и понижения спектральных уровней с ростом частоты, дискретные подъемы в спектрах, обусловленные действием интенсивных квазиустойчивых вихрей. Необходимо отметить, что с ростом скорости течения в спектральных зависимостях расширяется инерционная область спектров (где  $P_q(St)$  пропорционально  $St^{-1}$ ). Кроме того, в области высоких частот наблюдается понижение спектральных уровней с более высоким темпом. В спектральных зависимостях дискретные подъемы наблюдаются в области низких частот  $St \approx 0.005$ , частотных диапазонах  $St \approx (0.02...0.05)$ ;  $St \approx (0.08...0.1)$  и  $St \approx (0.4...0.5)$ . Последний диапазон частот наиболее отчетливо проявляется в спектральных зависимостях, измеренных на кормовой стенке лунки и в ее ближнем следе. Эти частоты обусловлены взаимодействием вихревых структур сдвигового слоя с кормовой стенкой овальной лунки.

Наибольшим изменением в спектральных зависимостях, обусловленным действием вихревых структур, является наличие дискретных или тональных составляющих. В связи с этим проанализируем поведение тональных компонент, которые имеют место, в основном, в низкочастотной области спектров, для различных скоростей потока или режимов течения. Рассмотрим зависимости спектральных плотностей мощности пульсаций пристеночного давления, нормированных их среднеквадратичными значениями, для того чтобы площадь под каждой из кривых была равна единице. На рис. 6 приведены спектральные зависимости в линейном масштабе по амплитуде, измеренные на обтекаемой поверхности овальной лунки и в ее ближнем следе для  $U=0.13$  м/с, которой

отвечает число Рейнольдса  $Re_d = 5200$ . Для этого режима течения максимальные значения спектральных уровней наблюдаются в диапазоне низких частот, которым соответствуют числа Струхала  $St \approx (0.02...0.06)$  и  $St \approx (0.09...0.12)$ . На кормовой стенке лунки и в ее ближнем следе генерируются интенсивные пульсации давления на более высоких частотах и их гармониках. Для более высоких скоростей потока к дискретным подъемам в выше приведенных частотных диапазонах  $St \approx (0.02...0.06)$  и  $St \approx (0.09...0.12)$  добавились составляющие в полосе частот  $St \approx (0.003...0.007)$  и  $St \approx (0.3...0.5)$ .

## ВЫВОДЫ

Установлено, что интенсивность поля пульсаций пристеночного давления на кормовой стенке лунки почти на порядок выше, чем на передней стенке и с ростом скорости превышение увеличивается. Среднеквадратичные значения пульсаций давления на поверхности пластины пропорциональны квадрату скорости, а внутри лунки показатель степени пропорциональности превышает значение 2. Минимальная интенсивность пульсаций пристеночного давления зарегистрирована на передней стенке лунки. Наибольшие среднеквадратичные значения пульсаций пристеночного давления наблюдаются на кормовой стенке лунки, где происходит взаимодействие набегающего потока, слоя смещения и выбрасывающихся из лунки вихревых структур с поверхностью лунки.

Обнаружено, что статистические моменты высших порядков распределения поля пульсаций пристеночного давления претерпевают существенные изменения внутри лунки и в ее ближнем следе относительно исследуемых параметров, измеренных для пограничных слоев на гладкой плоской поверхности. В спектральных зависимостях в частотном представлении появляются дискретные составляющие, отвечающие характерным низкочастотным колебаниям вихревого течения внутри углубления, частоты которых отвечают числу Струхала 0.003. Кроме того, в спектрах преобладают составляющие на частотах выбросов вихревых структур наружу из лунок  $St=(0.04...0.06)$ , частотах вращения циркуляционного течения внутри лунки, генерирующего крупномасштабные когерентные вихревые структуры,  $St=(0.08...0.18)$  и частотах, отвечающих сдвиговым модам автоколебаний вихревых структур сдвигового слоя  $St=(0.4...0.5)$ .

## ЛИТЕРАТУРА

1. Гортышов Ю. Ф., Попов И. А., Олимпиев В. В. Теплогидравлическая эффективность перспективных способов интенсификации теплоотдачи в каналах теплообменного оборудования. – Казань : Центр инновац. технологий, 2009. – 531 с.
2. Халатов А. А. Теплообмен и гидродинамика около поверхностных углублений (лунок) – Киев: ИТТФ НАНУ, 2005. – 76 с.
3. Воскобойник В. А. Вихроутворення усередині поперечно обтічної овальної лунки // Прикл. гідромех. – 2012. – **14**, № 4. – С. 37–46.
4. Воскобойник А. А., Воскобойник А. В., Воскобойник В. А. Характеристики пульсаций псевдозвукового давления в лунке при малых числах Рейнольдса // Акуст. вісн. – 2009. – **12**, № 4. – С. 10–22.
5. Воскобойник В. А., Воскобойник А. В. Структура течії та пульсації тиску усередині овальної лунки // Наукоємні технології. – 2012. – **13**, № 1. – С. 12–18.