

## ПОЛЕ ДАВЛЕНИЯ ТУРБУЛЕНТНОГО ТЕЧЕНИЯ ВНУТРИ И В ОКРЕСТНОСТИ ГЛУБОКОЙ СФЕРИЧЕСКОЙ ЛУНКИ

В.А. ВОСКОБОЙНИК, А.В. ВОСКОБОЙНИК

*Институт гидромеханики НАН Украины, Киев*

Экспериментально определено влияние локального углубления на плоской поверхности в виде глубокой сферической лунки на поле давления внутри лунки и ее окрестности для турбулентного режима течения. Установлены особенности вихреобразования внутри лунки и показано влияние вихревых структур, которые выбрасываются наружу из сферической лунки на структуру турбулентного пограничного слоя.

### ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время в современных энергосберегающих технологиях широко применяют обтекаемые поверхности, имеющие ансамбли лунок разнообразных геометрических форм и размещений. В большинстве технических конструкций и изделий используются сферические лунки различного углубления, что обусловлено не только их технологичностью изготовления, но и спецификой формирования и эволюции внутри них вихревых систем и струйных течений. Вихри и струи взаимодействуют с пограничным слоем, генерируя такое вихревое течение, которое значительно увеличивает теплогидравлическую эффективность обтекаемой поверхности, уменьшает, при определенных условиях, сопротивление и гидродинамический шум луночных рельефов, изменяет условия перехода пограничного слоя из ламинарного в турбулентный. Определяющей особенностью течений в выемках является наличие сдвигового слоя, который формируется, когда набегающий поток отрывается от переднего края углубления из-за геометрического разрыва поверхности обтекания. Осредненные по времени течения в углублении обладают двух- и трехмерными особенностями. Из большого количества экспериментальных, теоретических и численных исследований, выполненных за последние годы, известно, что картина течения внутри и вокруг углубления существенно зависит от параметров течения. Среди них скорость набегающего потока, толщина пограничного слоя, уровень турбулентности, а также основные геометрические характеристики самого углубления, такие, например, как отношение глубины к ширине выемки или конфигурация углубления [1-3].

Неустойчивость сдвигового слоя является центральной в вихревом течении внутри углубления и интегральной в развитии осцилляций. Из-за точки перегиба в профиле скорости сдвиговый слой становится неустойчивым к малым возмущениям благодаря механизму неустойчивости Кельвина–Гельмгольца. По мере удаления сдвигового слоя вниз по потоку от переднего края углубления процесс селективного усиления порождает волны неустойчивости, которые первоначально растут экспоненциально с ростом расстояния вниз по потоку до такой степени, что нелинейные эффекты становятся важными. После этой начальной стадии нелинейные эффекты преобладают, и сдвиговый слой, как часто наблюдается, сворачивается, формируя когерентные крупномасштабные поперечно ориентированные вихри (например, для прямоугольных углублений). Хотя образование таких структур не существенно для развития осцилляций, они обычно дают необходимое дискретное возбуждение, которое становится достаточным для порождения и сохранения осцилляций, и являются, следовательно, наиболее важными при изучении

течений в углублении. Зависящая от времени и пространственно очень сложная природа сдвиговых слоев в углублении делает их экспериментальное определение трудным. В частности, поскольку сдвиговые слои в углублении содержат достаточно широкий спектр развивающихся масштабов и структур и, кроме того, часто характеризуются значительным биением или циклическими вариациями, существующие односточные измерения и время- либо фазоусредненные данные не полностью адекватно отражают динамику и сложность сдвиговых слоев в углублении. Из-за этого требуется больше количественных данных глобальной и мгновенной природы с использованием методики многоточечных исследований.

В то время как пограничный слой отрывается от верхнего по потоку края углубления, формируя сдвиговой слой, генерируются неустойчивые поля давлений. Сложный механизм обратной связи между стенкой углубления и отрывной областью, находящейся выше по потоку, поддерживает значительные пульсации, как амплитуды, так и конвективной скорости волн неустойчивости в сдвиговом слое, приводя к росту гидродинамического и акустического явлений. Однако механизм, по которому генерируются звуковые и псевдозвуковые пульсации давления, зависит от динамических и спектральных характеристик набегающего пограничного слоя, а также от геометрии углубления. Дополнительно неустойчивости сдвигового слоя сворачиваются в вихревые структуры, ударяющиеся в кормовую стенку углубления, и производят акустический отклик. Эта тенденция углубления генерировать звук, обусловленный узкополосным или широкополосным излучением шума завихренностью сдвигового слоя, оказывается в большинстве случаев нежелательным явлением. Высокое давление перед кормовой стенкой лунки и низкое давление позади ее передней стенки образуют возвратное течение внутри лунки. Оно формирует внутреннее циркуляционное течение, конфигурация которого зависит от режима течения и геометрии лунки. Вихревые структуры различных масштабов, генерируемые внутри лунки, представляют собой не хаотическую группу вихрей, а самоорганизованные вихревые структуры, которые взаимно координируют свое поведение. Низкочастотные крупномасштабные когерентные вихревые системы, формируемые из циркуляционного течения, и мелкомасштабные вихри, образуемые внутри лунки, а также сдвигового слоя и в месте его взаимодействия с кормовой стенкой лунки, выбрасываются из лунки, приводя к широкому спектру пульсаций скорости и давления с интенсивными тональными компонентами. Генерация звука и псевдозвука вихревым и струйным течением приводит к значительным вибрациям обтекаемой поверхности и передаче акустического возбуждения в окружающую среду. Изучение и учет полей пульсаций давления и виброакустических характеристик обтекаемых поверхностей имеет большое значение на стадии проектирования и эксплуатации объектов, движущихся в жидкости, а также при проведении мероприятий по улучшению экологической обстановки вблизи транспортных магистралей.

Цель исследования – экспериментально изучить поле давления и особенности формирования и развития крупномасштабных вихревых структур внутри глубокой сферической лунки на плоской поверхности, обтекаемой турбулентным потоком.

## 1. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ УСТАНОВКА

Экспериментальные исследования проводились в узком гидродинамическом канале Ростокского университета (Германия). Канал выполнен из плексигласа длиной около 1,2м, шириной 0,2м и глубиной 0,015м, вода в канал поступала из успокоительной емкости 1 (рис. 1). В ней располагалась регулируемая по высоте заслонка 3,

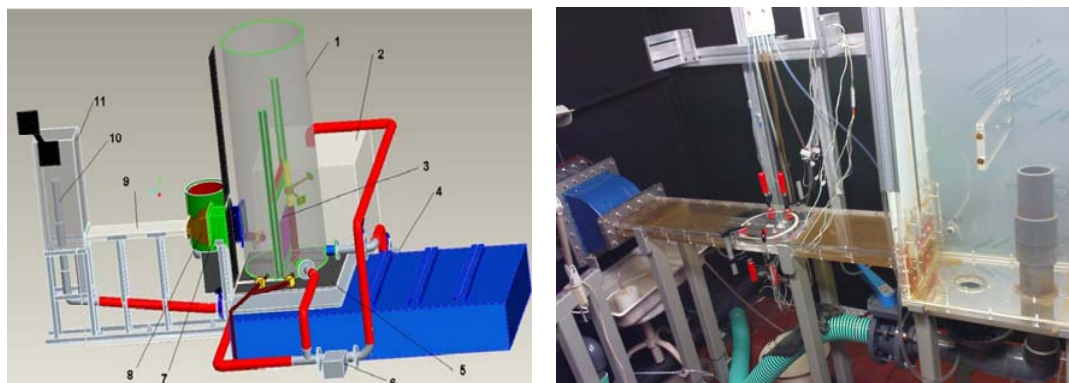


Рис. 1

обеспечивающая установление необходимой скорости течения в канале. Вода в успокоительную емкость, закрепленную на основании 5, поступала из резервуара 2 посредством насоса 4. Из успокоительной емкости вода через входной участок 7 и конфузор 8 подавалась в гидродинамический канал, а затем через промежуточную емкость 11 и выходной трубопровод 10, где устанавливались заслонки и вспомогательный насос 6, поступала в резервуар 2. На дне гидродинамического канала было сделано отверстие кругового сечения, куда устанавливался диск диаметром 0,18м, в центре которого располагалась сферическая лунка диаметром 0,046м, глубиной 0,012м и, соответственно, углублением  $h/d=0,26$ . Центр лунки находился на удалении порядка 0,6м от конфузора в осевом сечении канала.

Заподлицо с обтекаемой поверхностью лунки и в ее окрестности устанавливались миниатюрные датчики абсолютного давления и пульсаций пристеночного давления, фотография и расположение которых показано на рис. 2. Датчик № 1 располагался перед сферическим углублением на поверхности стенки канала и регистрировал пульсации пристеночного давления в пограничном слое, не нарушенном углублением. Внутри лунки датчики устанавливались на расстоянии 0,01м друг от друга, а датчик № 3 располагался в центре лунки на ее дне. Позади сферической лунки датчики находились на удалении 0,015м друг от друга и первый по потоку ряд датчиков (ближнее поле лунки) находился на расстоянии 0,015м от кормовой кромки лунки.

Поле давления на обтекаемой поверхности лунки и стенки канала регистрировалось пьезорезистивными датчиками, которые измеряли статическое и динамическое давление в низкочастотном диапазоне (до 200Гц). Эти датчики, изготовленные с применением микроэлектронной техники, где радиоэлементы напылялись на кварцевую мембрану, изгибающуюся под действием приложенных нагрузок, пропорциональных давлению, отличались повышенной стабильностью и точностью. В наших исследованиях применялись датчики, специально разработанные и изготовленные для этих целей, которые позволяли измерять давления от 1Па (0,1мм водяного столба) до 6кПа с погрешностью 0,01%. На обтекаемых поверхностях лунки и стенки канала были сделаны отверстия диаметром 0,8мм, в которые устанавливались пьезорезистивные датчики давления. Поле пульсаций пристеночного давления регистрировалось миниатюрными пьезокерамическими датчиками пульсаций давления мембранного и стержневого типов. Датчики, имеющие диаметры чувствительной поверхности 1,6мм и 1,3мм соответственно, устанавливались заподлицо с обтекаемой поверхностью лунки и плоской стенки канала. Электрические сигналы датчиков через

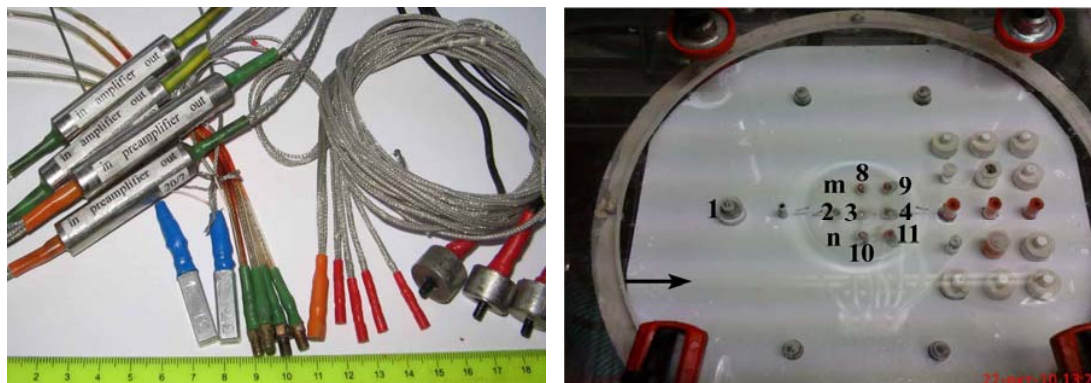


Рис. 2

мостовые и полумостовые схемы поступали на контрольно-измерительную и регистрирующую аппаратуру, а далее через многоканальные аналогово-цифровые преобразователи на персональные компьютеры. Результаты измерений обрабатывались и анализировались по специально разработанным программам и методикам [4, 5].

Погрешность измерений интегральных характеристик поля давления и пульсаций пристеночного давления составляла не более 4%, корреляционных зависимостей - не более 6%, в диапазоне частот до 1250Гц с доверительным интервалом 0,95 или 2 $\sigma$ .

## 2. РЕЗУЛЬТАТЫ ИЗМЕРЕНИЙ

При турбулентном течении, когда скорость потока в канале составляла 0,86м/с и более ( $Re_d = Ud/\nu \geq 40000$ ), визуальные исследования, посредством подачи красящих веществ из отверстий на обтекаемой поверхности, показали, что внутри лунки формируются крупномасштабные асимметричные вихревые структуры. Квазиустойчивые крупномасштабные вихри зарождаются в придонной области лунки ближе к ее передней части. При достижении определенных размеров, они выбрасываются наружу из лунки над противоположной боковой кормовой стенкой, формируя наклонную относительно направления течения вихревую систему. С ростом числа Рейнольдса турбулентного течения угол наклона вихревых структур увеличивается. Выброс вихревых систем происходит почти периодически, но при достаточно высоких числах Рейнольдса наблюдается существенная хаотизация этого процесса. При прошествии ряда выбросов с одной стороны лунки происходит “переключение” вихревой структуры на противоположную сторону лунки и начинают формироваться новые наклонные вихревые системы. Выброс вихревых систем происходит под углом  $\pm(40..60)^\circ$  относительно срединного сечения лунки то с одной, то с другой его стороны. Обнаружено, что для  $Re_d = 40000$  наклонные вихри выбрасываются под углом  $\pm 45^\circ$ , а для  $Re_d = 60000$  угол формирования вихря и его выброс увеличивается до  $\pm 60^\circ$ .

Характерное изменение давления внутри обтекаемого углубления и вблизи него наблюдается, как в экспериментальных исследованиях, так и в численных расчетах, что показано на рис. 3. Здесь представлены результаты численного моделирования распределения давления вдоль продольной оси гидродинамического канала, проходящей через срединное сечение сферической лунки углублением 0,26, а также для канала, поверхность которого не нарушена локальным углублением. Расчеты в работах [3, 6]

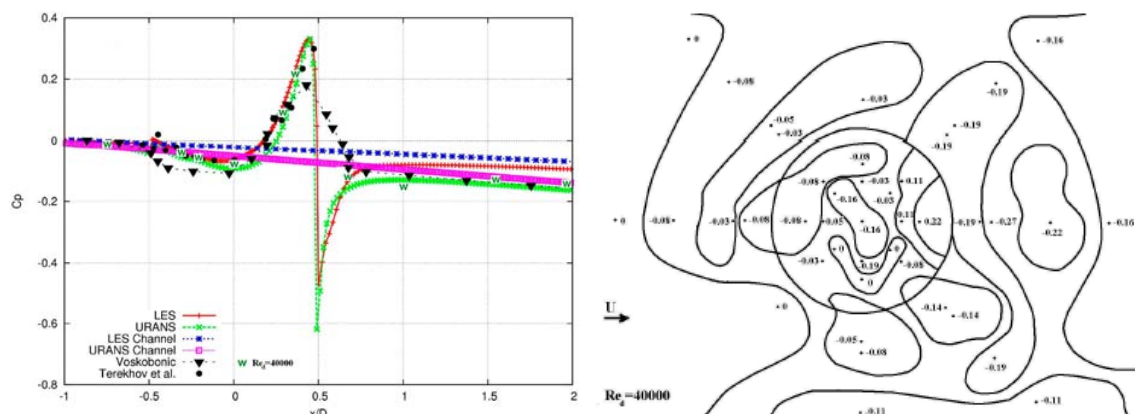


Рис. 3

проведены двумя методами – методом крупных вихрей (LES) и методом решений усредненных уравнений Навье-Стокса (URANS). Также на рис. 3 представлены результаты экспериментальных исследований, полученные для числа Рейнольдса  $Re_d = 40000$  в работе [7] и в наших измерениях [8]. Следует отметить, что в целом экспериментальные и численные результаты коррелируют друг с другом, но имеются и некоторые отличия, обусловленные погрешностями измерений и расчетов, а также особенностями математических моделей и экспериментальных стендов. Поле давления, рассчитанное и измеренное внутри углубления, отображает области ускорения и торможения потока вследствие формирования и развития вихревого течения внутри лунки. Наряду с этим следует отметить, что расположение локального углубления исследуемой формы и размеров на стенке узкого гидродинамического канала не приводит к росту местного гидравлического сопротивления канала для турбулентного течения. Это указывает на то, что уменьшение сопротивления трения, образующееся над отверстием углубления, уравновешивается увеличением сопротивления формы, которое возникает в результате торможения набегающего потока на кормовой стенке лунки.

Распределение давления на обтекаемой поверхности лунки и в ее окрестности для турбулентного режима течения, которому соответствует число Рейнольдса  $Re_d = 40000$ , показано на рис. 3. Следует отметить, что картина изменения давления имеет явно асимметричный характер. Например, область пониженного давления в придонной области лунки наклонена под углом близким к 45 градусов относительно направления течения, что согласуется с местоположением квазиустойчивого крупномасштабного вихря, наблюдаемого для турбулентного течения в визуальных исследованиях [3, 9]. На боковой стороне кормовой стенки там, где выбрасывается эта вихревая система в пограничный слой, регистрируются уровни пониженного давления. Между кромкой лунки, над которой выбрасывается асимметричный вихрь, и придонной областью лунки наблюдается область повышенных давлений, что связано с течением жидкости от кормовой стенки (из области взаимодействия набегающего потока с поверхностью лунки). Эта жидкость, проходящая под асимметричным вихрем, дойдя до передней стенки, частично уносится в источник вихря, а частично, формируя циркуляционное течение, обгибает квазиустойчивый крупномасштабный вихрь, подпитывая его энергией набегающего потока. Как показывают визуальные исследования и инструментальные измерения поля пульсаций пристеночного давления [3, 10], этот вихрь совершает осциллирующие движения в трех взаимно перпендикулярных плоскостях. Часть

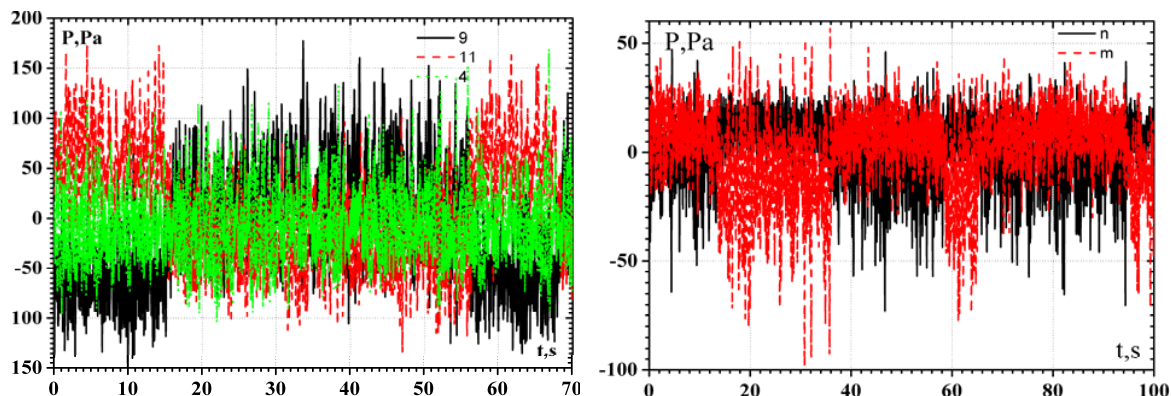


Рис. 4

асимметричного вихря, а нерідко і весь вихрь вибрасуються над кормовою стінкою, переміщуючись в виді продольної вихревої системи в пограничний шар позади лунки. Це приводить до трансформації поперечної або вернее сказати нахиленої під кутом 45 градусів до напрямку потоку завихренності в продольну завихренність. Коли асиметричний крупномасштабний вихрь вибрасується над однією з бокових сторін кормової стінки, то всередині лунки генерується або такого ж напрямку вихрь, або з'являється крупномасштабна вихрева система, но направлена перпендикулярно (або майже перпендикулярно) вихрю вихрю. Джерело такого асиметричного вихря розташоване на другій боковій стороні передньої стінки лунки (в її придонній частині), а сток знаходиться на протилежній боковій стороні кормової стінки ближче до її кромки, подібно до схеми, запропонованої в роботі [3]. Як показали результати візуальних і інструментальних досліджень, розташування асиметричних вихрей не рівнозначно по тривалості перебування в тому або іншому місці лунки. Один з них реєструється більшу частину часу спостережень, що і обумовлює асиметричне розподілення тиску всередині лунки і її оточення для турбулентного режиму течії (див. рис. 3). Крім того, необхідно відзначити, що непрямо за кормовою стінкою лунки спостерігаються підвищені рівні тиску, а в її ближньому сліді формуються області знижених тисків, характеризує те, що тут течія прискорюється.

Встановлено, що для турбулентного течії ( $Re_{\varphi} \geq 40000$ ) пульсації пристіночного тиску в різних частинах передньої і кормової стінок сферическої лунки виконують протифазні коливання. В вимірних точках №9 і №11, а також "m" і "n" (рис.4) спостерігаються високі рівні протифазних коливань або антикорреляції пульсацій тиску, що обумовлено особливостями формування вихревої течії всередині лунки. Відкрито, що на одній з бокових сторін кормової стінки лунки, там, де відбувається взаємодія вихревих структур шару зміщення з останнім, спостерігаються підвищені рівні пульсацій пристіночного тиску, з переважанням позитивних тисків. На поверхні протилежній боковій частині кормової стінки лунки, над якою відбувається викид крупномасштабних вихревих структур, рівні пульсацій пристіночного тиску кілька нижче, і тут переважають негативні тиски.

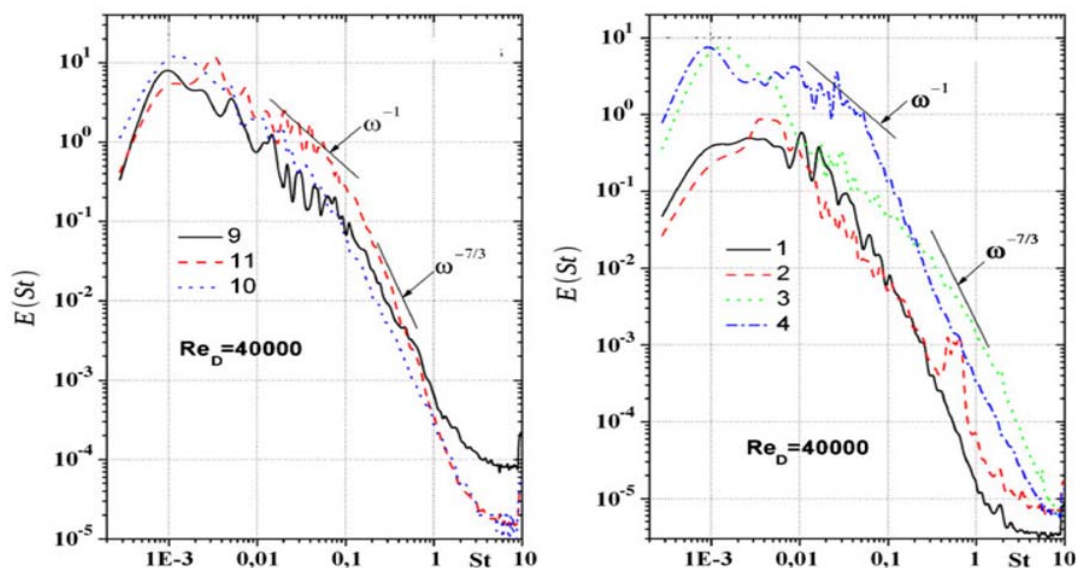


Рис. 5

Спектральные плотности мощности пульсаций пристеночного давления на обтекаемой поверхности глубокой сферической лунки и на стенке канала перед лункой представлены на рис. 5 в зависимости от числа Струхали  $St=fd/U$ . На этих рисунках представлены отрезки прямых линий соответствующие изменениям спектральных составляющих от частоты  $\omega^{-1}$  и  $\omega^{-7/3}$  (где круговая частота  $\omega=2\pi f$ ), которые являются характерными для поведения спектров пульсаций скорости и давления в пристеночных течениях. Максимальные уровни пульсаций пристеночного давления на частотах  $St \approx (0,002 \dots 0,003)$  на боковых сторонах кормовой стенки обусловлены частотой “переключения” вихреобразования внутри лунки, что согласуется с визуальными исследованиями и противофазными колебаниями пульсаций давления. Посередине кормовой стенки (датчик №4) максимальные спектральные уровни наблюдаются на частоте  $St \approx 0,05$ , которая соответствует частоте выбросов крупномасштабных вихревых структур наружу из лунки. Кроме того, в этом сечении лунки, где происходит взаимодействие вихревых структур сдвигового слоя со стенкой лунки, наблюдаются наибольшие уровни спектральных составляющих пульсаций пристеночного давления практически во всем исследуемом диапазоне частот. На передней стенке лунки, где происходит отрыв пограничного слоя и формируется сдвиговый слой, в области частот  $St \approx (0,3 \dots 0,5)$  наблюдается дискретный подъем в спектрах пульсаций давления (кривая 2 на рис. 5), который отвечает автоколебаниям сдвигового слоя.

## ВЫВОДЫ

1. Обнаружено, что внутри глубокой сферической лунки формируются крупномасштабные асимметричные вихревые структуры, источник которых находится на передней стенке лунки несколько сбоку от срединного сечения лунки, а сток располагается на противоположной боковой стороне кормовой стенки лунки, т. е., вихревые структуры имеют наклонное положение и пересекают срединное сечение лунки. Совершая колебательное движение, асимметричный крупномасштабный вихрь периодически выбрасывается над кормовой стенкой под углом, который растет с

увеличением скорости течения. Установлено, что при числе Рейнольдса  $Re_d=40000$  угол выброса вихря равен приблизительно  $45^\circ$ , а при  $Re_d=60000$  – уже почти  $60^\circ$ .

2. Зарегистрировано, что на поверхности лунки, обтекаемой турбулентным потоком, и в ее окрестности поле давления имеет асимметричный характер, обусловленный особенностями генерации вихревого течения внутри них и выбросами крупномасштабных вихревых структур наружу из сферической лунки. Максимальная интенсивность давления и коэффициент сопротивления давления наблюдается на кормовой стенке лунки, а минимальная - на ее передней стенке.

3. Установлено, что при “переключении” вихревого течения из одной стороны лунки в другую поле пульсаций пристеночного давления совершает противофазные колебания в половинках лунки, разделенных продольной осевой плоскостью.

4. Обнаружено, что спектральные составляющие пульсаций пристеночного давления на обтекаемой поверхности сферической лунки имеют дискретные составляющие, отвечающие частотам “переключения” вихреобразования внутри лунки ( $St \approx 0,003$ ), частотам выбросов вихревых структур наружу из лунки ( $St \approx 0,05$ ) и частотам автоколебаний сдвигового слоя ( $St \approx 0,4$ ).

## ЛИТЕРАТУРА

1. Леонтьев А.И., Алексеенко С.В., Волчков Э.П., Дзюбенко Б.В., Драгунов Ю.Г., Исаев С.А., Коротеев А.А., Кузма-Кичта Ю.А., Попов И.А., Терехов В.И. Вихревые технологии для энергетики. – М.: Издательский дом МЭИ, 2017. – 350 с.
2. Воскобойник В.А., Воскобойник А.В., Воскобойник О.А., Турик В.М. Поле швидкості у серединному перерізі напівсферичної лунки // Прикладна гідромеханіка. – 2014. – Т. 16, № 4. – С. 17–27.
3. Voskoboinick V., Kornev N., Turnow J. Study of near wall coherent flow structures on dimpled surfaces using unsteady pressure measurements // Flow Turbulence Combust. – 2013. – Vol. 90, № 4. – P. 709–722.
4. 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. – Vol. 31, № 1. – P. 87–100.
5. Voskoboinick V.A., Grinchenko V.T., Makarenkov A.P. Pseudo-sound behind an obstacle on a cylinder in axial flow // Int. J. Fluid Mech. - 2005. – Vol. 32, № 4. – P. 488 – 510.
6. Turnow J., Kornev N., Isaev S., Hassel E. Vortex mechanism of heat transfer enhancement in a channel with spherical and oval dimples // Heat and Mass Transfer. – 2011. – Vol. 47, № 3. – P. 301–313.
7. Терехов В.И., Калинина С.В., Мшвидобадзе Ю.М. Экспериментальное исследование развития течения в канале с полусферической каверной // Сибир. физ.-техн. ж. – 1992. – Вып. 1. - С. 77–86.
8. Воскобойник В.А. Распределение давления на обтекаемой поверхности со сферической лункой // Водний транспорт. – 2014. – Т. 18, № 3. – С. 90–96.
9. Воскобойник А.В., Воскобойник В.А., Исаев С.А., Жданов В.Л., Корнев Н.В., Турноу Й. Бифуркация вихревого течения внутри сферической лунки в узком канале // Прикладна гідромеханіка. – 2011. – Т. 13, № 4. – С. 3–21.
10. Voskoboinick V.A., Voskoboinick A.V., Kornev N.V., Zdanov V.L., Turnow J. Coherent vortex flow switching inside deep spherical dimple // Abstracts “Fluxes and Structures in Fluids: Physics of Geospheres”. – Vladivostok, 2011. – P. 231–234.