

ПСЕВДОЗВУКОВЫЕ ПУЛЬСАЦИИ ПРИСТЕНОЧНОГО ДАВЛЕНИЯ В ОТВЕРСТИИ РАЗМЫВА ГРУНТА ПЕРЕД ПРИЗМАТИЧЕСКОЙ ОПОРОЙ

**В. И. НИКИШОВ, В. А. ВОСКОБОЙНИК,
А. А. ВОСКОБОЙНИК, А. В. ВОСКОБОЙНИК**

Институт гидромеханики НАН Украины, Киев, Украина

The results of experimental researches of the field of pseudosound wall-pressure fluctuations which is formed at the turbulent flow inside the local scour before prismatic pile are presented. Two quasistable large-scale horseshoe vortical structures are formed inside the scour. Most intensity of the wall-pressure fluctuations is observed wherein a handing down flow along the streamlined surface of prism interacts with the erosion soil. The most spectral levels of the pseudosound wall-pressure fluctuations in the scour hole before a prismatic model are observed near-by foundation of prism, and the least - on the bottom of overhead slope of a sand sediment in the scour hole.

ВВЕДЕНИЕ

В мостостроительной индустрии, при установке буровых опор и оснований ветроэнергетических установок в шельфовой зоне, строительстве причальных сооружений на размываемом грунте под действием течения образуется размыв грунта вблизи таких плохо обтекаемых тел [1, 2]. Размыв грунта перед опорами, независимо от их формы и размеров, и намыв грунта позади них формируется подковообразными и следными вихревыми системами, которые огибают основание опоры вблизи ее сопряжения с размываемым грунтом, а также зарождаются в кормовой части опоры. Из-за неблагоприятного градиента давления, обусловленного расположением плохо обтекаемого тела в потоке, при определенных числах Рейнольдса и Фруда, появляется отрыв пограничного слоя перед фронтальной частью опоры с формированием отрывной линии на поверхности дна вокруг опоры [3]. В области отрыва генерируются подковообразные вихревые структуры, которые огибают плохо обтекаемое тело. При взаимодействии набегающего потока с фронтальной поверхностью, например, мостовой опоры образуется ниспадающее течение, направленное ко дну, которое формирует еще одну систему крупномасштабных подковообразных вихрей [4-6].

Когда скорость ниспадающего течения и отрывного течения перед опорой превышает критическую скорость, то частички грунта начинают перемещаться. В результате вблизи плохо обтекаемого тела образуется отверстие размыва, глубина которого с течением времени увеличивается [1, 2]. При установившемся режиме образования отверстия размыва грунта и турбулентном обтекании плохо обтекаемого тела, поверхность размыва имеет двухскатную форму, отличающуюся углом склона отложения песка (рис. 1). Вблизи основания плохо обтекаемого тела размыв наибольший и угол склона отложения песка также большой. В области взаимодействия отрывного подковообразного вихря (1 на рис. 1) с размываемым грунтом угол склона отложения песка в отверстии размыва меньше и размыв под этим вихрем неглубокий.

Под действием подковообразных вихревых структур, имеющих различную форму и интенсивность, на обтекаемой поверхности отверстия размыва генерируются различные по интенсивности и спектральному наполнению поля касательных напряжений и пристеночных давлений [1, 3]. При этом спектральное представление, например, поля

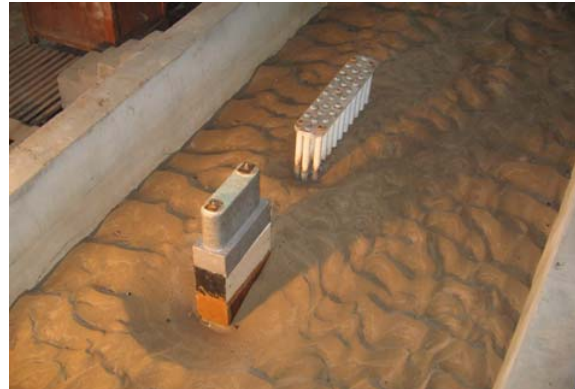
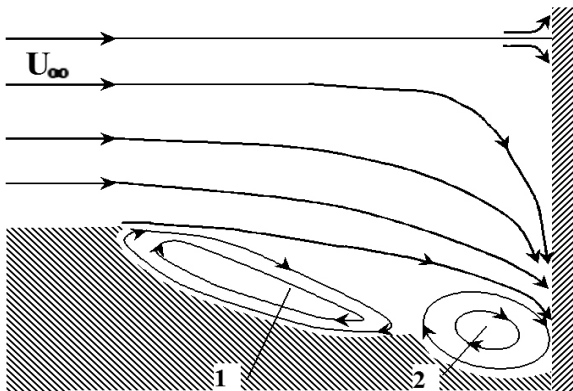


Рис. 1 Схема вихребразования в отверстии размыва перед призматической опорой

Рис. 2 Призматическая модель и ростверк на размываемом песчаном грунте

псевдозвуковых пульсаций пристеночного давления имеет характерные особенности в виде дискретных составляющих, обусловленных действием вихревых структур. Известно, что возникновение псевдозвуковых возмущений на обтекаемой поверхности обусловлено нестационарным взаимодействием вихревых структур в пограничном слое или отрывном течении между собой, а также взаимодействием вихрей с обтекаемой поверхностью. В связи с тем, что пульсации пристеночного давления интегрально отражают существование пульсаций поля скорости, характер и интенсивность поля пульсаций давления на обтекаемой поверхности во многом определяется движением когерентных вихревых структур в отверстии размыва грунта. В различных точках турбулентного потока вихревое движение, обусловленное перемещением вихревых структур различных масштабов, генерирует различные по интенсивности гидродинамические давления [7]. Перенос средним потоком этих источников мимо неподвижного наблюдателя (или мимо датчика давления) создает для наблюдателя эффект осциллирующих во времени давлений, внешне не отличимых от звуковых пульсаций. Однако эти пульсации не являются звуковыми. Для этих давлений сжимаемость жидкости не имеет значения, а их интенсивность не зависит от числа Маха. Скорость конвекции псевдозвуковых давлений не относится к скорости звука, а полностью определяется только скоростью их переноса потоком. Кроме того, звуковые волны подчиняются принципу суперпозиции (поскольку их можно считать линейными колебаниями среды), а псевдозвуковые пульсации скорости и давления в нестационарном потоке, представляющие собой нелинейные явления, не подчиняются принципу суперпозиции [7].

Целью данной экспериментальной работы является определение пространственно-временных характеристик поля псевдозвуковых пульсаций пристеночного давления в отверстии размыва грунта перед призматической моделью, а также источников их генерации.

1. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ УСТАНОВКА И МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЙ

Физическое моделирование вихревого течения вблизи плохо обтекаемого тела в виде призматической конструкции, установленной на размываемом основании, проводилось в гидродинамическом канале с открытой поверхностью воды длиной 14 м, шириной 1.5 м и глубиной 0.65 м. На удалении около 8 м от начала канала устанавливалась призматическая модель или опора (рис. 2), засыпанная просеянным кварцевым песком на высоту около 0.3 м от дна канала. В измерениях песок, имеющий

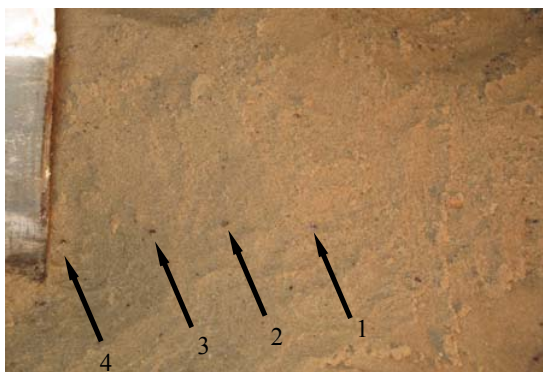


Рис. 3 Расположение датчиков пульсаций пристеночного давления

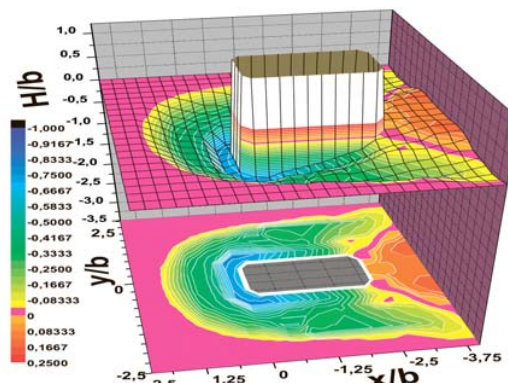


Рис. 4 Схема размыва грунта в окрестности призматической модели

размер зерен $d_{50} = 0.35 \times 10^{-3}$ м, формировался в виде плоского дна [2]. Ширина прямоугольника у основания призматической модели составляла $b = 114 \times 10^{-3}$ м, а длина $a = 300 \times 10^{-3}$ м (крупномасштабная модель) и $b = 40 \times 10^{-3}$ м и $a = 95 \times 10^{-3}$ м. В ходе исследований глубина потока (H) изменялась от 0.17 м до 0.34 м, а среднерасходная скорость течения (U) – от 0.15 м/с до 0.59 м/с, которым отвечают числа Рейнольдса $Re_b = Ub/\nu$ от 6000 до 67000 и числа Фруда $Fr = U/\sqrt{gH}$ от 0.08 до 0.45, где ν – коэффициент кинематической вязкости воды, а g – ускорение свободного падения.

В соответствии с разработанной методикой и программой исследований в отверстия размыва грунта перед обтекаемой призматической моделью пульсации пристеночного давления измерялись миниатюрными датчиками пульсаций давления, которые располагались заподлицо с обтекаемой поверхностью отверстия размыва и вблизи него вдоль срединного сечения призмы, как показано на рис. 3. Датчики устанавливались следующим образом: датчик № 1 находился перед отверстием размыва на удалении $(15...20) \times 10^{-3}$ м от кромки отверстия; датчик № 2 устанавливался по середине верхнего склона отложения песка в отверстии размыва; датчик № 3 находился на гребне между верхним и нижним склоном отложения песка в отверстии размыва и датчик № 4 располагался на удалении около 10×10^{-3} м от поверхности призматической модели (в области наибольшей глубины размыва).

2. РЕЗУЛЬТАТЫ ИЗМЕРЕНИЙ

Как показали визуальные наблюдения [8, 9], в результате взаимодействия набегающего потока с моделью призматической конструкции, расположенной на плоском размываемом дне, в окрестности последней наблюдается перемещение песка с формированием размывов и намывов грунта. Перенос размываемого грунта вблизи плохо обтекаемого тела обусловлен особенностями генерации подковообразных и следных вихрей. Визуализация течения вблизи призматической опоры и анализ видеоматериалов позволили оценить пространственно-временные характеристики подковообразных вихрей, генерируемых в отверстии размыва, а также проследить за их эволюцией [8, 9].

Измерения глубин и формы воронок размыва грунта [2, 8] дали возможность построить схему размыва грунта перед обтекаемой призматической моделью, которая представлена на рис. 4. Обнаружено, что ширина воронки размыва почти в 3.5 раза

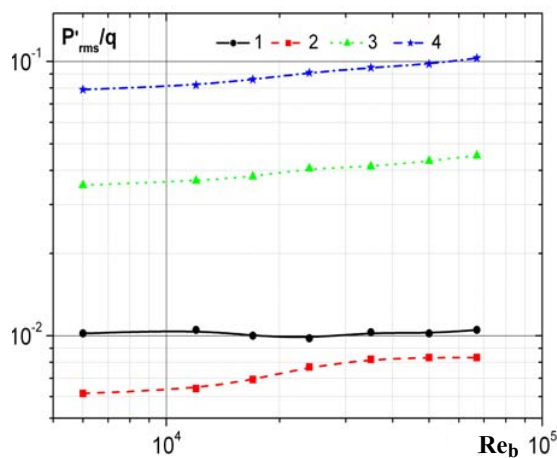


Рис. 5 Інтенсивність пульсацій пристеночного тиску в отвір'ї розмива ґрунта

пристеночного тиску зростає з ростом числа Рейнольдса. Найменші рівні пульсацій пристеночного тиску спостерігаються в області формування верхнього схилу розмива, де генерується крупномасштабна подковообразна вихрева структура (обозначена, як 1 на рис. 1), обумовлена відривом пограничного шару з передньої кромки отвір'ї розмива. Максимальні рівні пульсацій пристеночного тиску мають місце там, де ниспадаюче течення вздовж поверхні призми взаємодіє з розмиваемим ґрунтом, формуючи інтенсивний подковообразний вихор (2), який утворює нижній схил отвір'ї розмива. Інтенсивність пульсацій пристеночного тиску в нижній частині отвір'ї розмива більше, ніж на порядок перевищує інтенсивність пульсацій пристеночного тиску під відривним подковообразним вихрем, утворюючим верхній схил відкладення піску в отвір'ї розмива ґрунта перед призматическою моделлю (див., криву 4 і 2 на рис. 5).

Спектральні густоти потужності пульсацій пристеночного тиску всередині та поблизу отвір'ї розмива ґрунта перед призматическою моделлю показані на рис. 6. Тут рівні спектрів представлені в дБ відносно 2×10^{-5} Па в залежності від безрозмірної частоти в формі $\omega^* = 2\pi f b / U$. Нумери кривих відповідають нумерам датчиків, показаних на рис. 3. Для швидкості течення 0.18 м/с, до якої відповідають числа Рейнольдса $Re_b = 20500$ та Фруда $Fr = 0.1$, спектральні залежності представлені на рис. 6а. Вблизи призматическою моделі рівні пульсацій пристеночного тиску вище по всьому досліджуваному частотному діапазону, а в області формування подковообразної вихревої структури з відривної області пограничного шару спектральні рівні найменші. Різниця між спектральними залежностями спостерігається більше, ніж на 20 дБ. Максимум спектрів має місце на безрозмірній частоті $\omega^* \approx 1.3$ в області верхнього схилу відкладення піску в отвір'ї розмива та $\omega^* \approx 2.8$ вблизи призматическою моделі. В області розташування датчика № 3 (область нанесення піску між двома схилками, як показали візуальні дослідження та вимірювання профілю отвір'ї розмива) максимальні значення спостерігаються на обох цих безрозмірних частотах.

більше глибини розмива та максимальна глибина розмива спостерігається перед призматическою моделлю на відстані $0.25b$ від її передньої стінки.

Середньоквадратичні значення пульсацій пристеночного тиску, нормовані динамічним тиском ($q = \rho U^2 / 2$), показані на рис. 5 в залежності від числа Рейнольдса, розрахованого за шириною призматическою моделі. Тут номери кривих відповідають номерам датчиків, показаних на рис. 3. Перед отвір'єм розмива пульсації пристеночного тиску рівні $0.01q$, незалежно від числа Рейнольдса. В отвір'ї розмива інтенсивність пульсацій

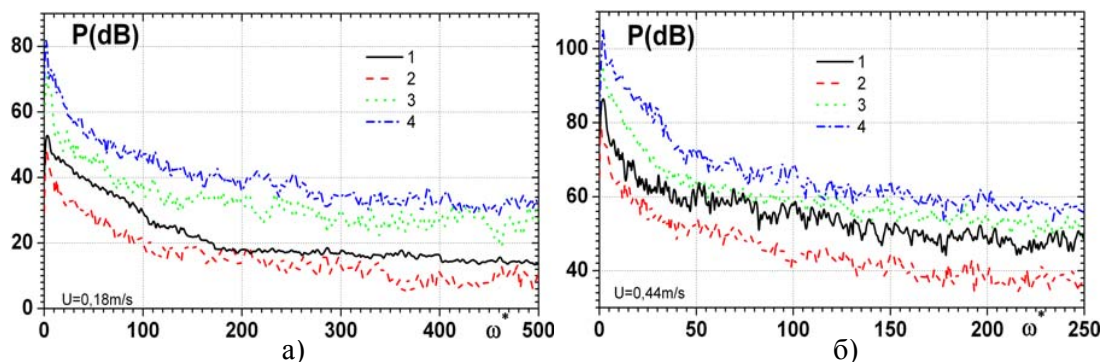


Рис. 6 Пульсации пристеночного давления на обтекаемой поверхности отверстия размыва грунта перед призмой для скорости потока 0.18 м/с (а) и 0.44 м/с (б)

Когда скорость потока в гидродинамическом канале увеличили до 0.44 м/с, которой отвечают числа Рейнольдса и Фруда $Re_b = 50200$ и $Fr = 0.25$, соответственно, то характер изменения спектральных зависимостей остался прежним, как показано на рис. 6б. Однако, максимальные значения спектральных уровней наблюдаются на безразмерных частотах $\omega^* \approx 0.57$ в области верхнего склона отложения песка и $\omega^* \approx 1.71$ вблизи призматической модели. При этом, максимумы в области наноса песка между двумя подковообразными вихревыми системами, формирующимися в отверстии размыва перед призматической моделью, наблюдаются на обеих этих частотах.

Итак, внутри отверстия размыва перед призматической моделью наблюдаются повышенные уровни пульсаций пристеночного давления вблизи призмы там, где взаимодействует ниспадающее течение, распространяющееся вдоль обтекаемой поверхности призматической модели ко дну, с размываемым песчаным грунтом. Максимумы спектральных уровней в области, прилегающей к обтекаемой поверхности призмы, имеют место на частотах, которые почти в (2...3) раза выше, чем в области формирования отрывной подковообразной вихревой системы. Эти частоты, как показывают визуальные измерения, отвечают частотам вращения крупномасштабных вихревых структур, которые огибают призматическую модель [8, 9]. Крупномасштабный подковообразный вихрь, который формируется из циркуляционного течения, генерируемого при отрыве пограничного слоя на передней кромке отверстия размыва, имеет безразмерную частоту вращения $St \approx (0.1...0.2)$. Напомним, что этот вихрь образует верхний склон отложения песка в отверстии размыва грунта перед призматической моделью, что схематически показано на рис. 1. Крупномасштабный подковообразный вихрь, который формируется в нижнем по потоку склоне отложения песка вблизи призматической модели вращается с безразмерной частотой $St \approx (0.3...0.5)$. При этом, с увеличением числа Рейнольдса, обусловленного ростом скорости потока, частота вращения обеих подковообразных вихрей уменьшается.

ВЫВОДЫ

1. Установлено, что в отверстии размыва грунта перед плохо обтекаемым телом, установленным на размываемый грунт, для устойчивого режима обтекания, формируются две квазистойчивые крупномасштабные подковообразные вихревые структуры. Первая из них генерируется при отрыве пограничного слоя с передней кромки

воронки размыва и формирует верхний склон углубления. Вторая подковообразная структура меньшего размера образуется при взаимодействии сдвигового слоя над углублением и ниспадающего течения вдоль фронтальной поверхности призматической модели и формирует нижний склон углубления. Верхний склон отложения песчаного грунта фронтального углубления, находящийся выше по потоку, имеет меньший угол наклона относительно горизонтальной оси, чем угол склона нижней части воронки размыва, прилегающий к передней поверхности призмы.

2. Найдено, что в отверстии размыва грунта перед призматической моделью наибольшая интенсивность пульсаций пристеночного давления наблюдается там, где ниспадающее течение вдоль обтекаемой поверхности призмы взаимодействует с размываемым грунтом. Здесь уровни пульсаций давления более, чем на порядок превышают пульсации давления под подковообразной вихревой системой, которая формируется при отрыве пограничного слоя с передней кромки отверстия размыва, образующей верхний склон отложения песка в отверстии размыва.

3. Обнаружено, что внутри отверстия размыва грунта перед призматической моделью наибольшие уровни спектральных составляющих пульсаций пристеночного давления наблюдаются вблизи основания призмы, а наименьшие – на дне верхнего склона отложения песка в отверстии размыва. Разница спектральных уровней в этих областях достигает более 20 дБ во всем исследуемом диапазоне частот ($0.2 < 2\pi fb/U < 500$). В спектральных зависимостях наблюдаются дискретные подъемы на частотах вращения крупномасштабных подковообразных вихрей, формирующихся внутри отверстия размыва. Частота вращения подковообразного вихря вблизи призмы почти в (2...3) раза выше, чем внутри верхнего по потоку склона отложения песка в отверстии размыва. С увеличением скорости течения (соответственно, чисел Рейнольдса и Фруда) безразмерная частота вращения подковообразных вихрей убывает.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Nielsen A. W., Liu X., Sumer B. M., Fredsoe J.* Flow and bed shear stresses in scour protections around a pile in a current // *Coastal Engineering*. – 2013. – **72**, № 2. – P. 20–38.
2. *Воскобойник А. А., Воскобойник А. В., Воскобойник В. А., Марченко А. Г., Никитишов В. И.* Локальный размыв грунта при взаимодействии мостовых опор, находящихся в следе друг за другом // *Прикл. гідромех.* – 2006. – **8**, № 3. – С. 16–26.
3. *Paik J., Escauriaza C., Sotiropoulos F.* On the bimodal dynamics of the turbulent horseshoe vortex system in a wing-body junction // *Phys. Fluids*. – 2007. – **19**, № 4. – P. 045107-1-20.
4. *Sahin B., Ozturk N. F., Gurlek C.* Horseshoe vortex studies in the passage of a model plate-fin-and-tube heat exchanger // *Int. J. Heat and Fluid Flow*. – 2008. – **29**. – P. 340–351.
5. *Ataie-Ashtiani B., Aslani-Kordkandi A.* Flow field around single and tandem piers // *Flow, Turbulence and Combustion*. – 2013. – **90**, № 3. – P. 471-490.
6. *Ataie-Ashtiani B., Aslani-Kordkandi A.* Flow field around side-by-side piers with and without a scour hole // *Eur. J. Mech. - B/Fluids*. – 2012. – **36**, № 6. – P. 152-166.
7. *Блохинцев Д.И.* Акустика неоднородной движущейся среды.– М.: Наука, 1981. – 208 с.
8. *Воскобойник А. А., Воскобойник А. В., Воскобойник В. А.* Визуализация сопряженного обтекания групповой мостовой опоры // *Вісник Донецького університету, Сер. А: Природничі науки*. – 2008. – Вип. 1. – С. 219 – 227.
9. *Воскобійник А. В., Воскобійник В. А., Воскобойник О. А.* Вихрова течія всередині трирядної пальної конструкції мостової опори // *Проблеми водопостачання, водовідведення та гідраліки*. – 2009. – Вип. 13. – С. 132-142.