

УДК 532.5

## ПУЛЬСАЦИИ ДАВЛЕНИЯ НА ПОВЕРХНОСТИ РАЗМЫВА ГРУНТА

А. А. ВОСКОВОЙНИК, А. В. ВОСКОВОЙНИК,  
В. А. ВОСКОВОЙНИК, В. И. НИКИШОВ

Институт гидромеханики НАН Украины, Киев,  
03680 Киев – 180, МСП, ул. Желябова, 8/4  
email: vlad.vsk@gmail.com

Получено 04.02.2014

Представлены результаты экспериментальных исследований поля пульсаций пристеночного давления на поверхности размыва грунта перед призматической опорой. Вблизи опоры генерируются подковообразные вихревые структуры и следные вихри. Внутри отверстия размыва грунта перед плохо обтекаемым телом формируются две квазистабильные крупномасштабные подковообразные вихревые структуры. Первая из них генерируется при отрыве пограничного слоя с передней кромки отверстия 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. Наибольшая глубина размыва грунта и интенсивность пульсаций пристеночного давления имеет место там, где ниспадающее течение взаимодействует с размываемым грунтом. В спектрах пульсаций давления наблюдаются дискретные подъемы на частотах вращения подковообразных вихрей. Частота вращения подковообразного вихря вблизи призмы в (2...3) раза выше, чем внутри верхнего по потоку склона отложения песка в отверстии размыва.

**КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА:** пульсации пристеночного давления, мостовая опора, подковообразный вихрь, размыв грунта

Наведено результати експериментальних досліджень поля пульсацій пристінного тиску на поверхні розмиву ґрунту перед призматичною опорою. Поблизу опори генеруються підковоподібні вихрові структури та слідні вихори. Усередині отвору розмиву ґрунту перед погано обтічним тілом формуються дві квазістійкі великомасштабні підковоподібні вихрові структури. Перша з них генерується під час відриву примежового шару з переднього краю отвору розмиву та формує верхній схил заглиблення. Друга підковоподібна структура меншого розміру утворюється під час взаємодії зсувного шару над заглибленням і течії, що спрямована до дна вздовж фронтальної поверхні призматичної моделі, та формує нижній схил заглиблення. Найбільша глибина розмиву та інтенсивність пульсацій пристінного тиску має місце там, де течія, що спрямована до дна, взаємодіє з розмивним ґрунтом. У спектрах пульсацій тиску спостерігаються дискретні підйоми на частотах обертання підковоподібних вихорів. Частота обертання підковоподібного вихору поблизу призми у (2...3) рази вища, ніж усередині верхнього за потоком схилу відкладання піску в отворі розмиву.

**КЛЮЧОВІ СЛОВА:** пульсації пристінного тиску, мостова опора, підковоподібний вихор, розмив ґрунту

The results of experimental researches of the field of wall-pressure fluctuations on the scour surface before prismatic pier are presented. The horseshoe vortical structures and wake vortices are generated near-by pier. Two quasistable large-scale horseshoe vortical structures are formed into scour opening before the bluff body. First from them is generated at boundary layer separation from the front edge of scour opening and forms the overhead slope of cavity. The second horseshoe structure of less size is formed at interaction of shear layer above cavity and spilling flow along the frontal surface of prismatic model and forms the bottom slope of cavity. The most depth of scour and intensity of wall-pressure fluctuations takes place wherein a spilling flow interact with the scour soil. In the pressure fluctuation spectra there are the discretets on frequencies of horseshoe vortex rotation. Frequency of horseshoe vortex rotation near-by a prism in (2...3) time higher, than into the overhead streamwise slope deposit of sand in scour opening.

**KEY WORDS:** wall-pressure fluctuations, bridge pier, horseshoe vortex, scour

### ВВЕДЕНИЕ

В ходе строительства и эксплуатации мостовых переходов через водные преграды, при установке буровых опор и оснований ветроэнергетических установок в шельфовой зоне, строительстве причальных сооружений на размываемом грунте под действием течения происходит размыв грунта вблизи плохо обтекаемых тел [1–4]. Процесс образования отверстий размыва грунта вблизи таких тел обусловлен формированием и последующим развитием подковообразных вихревых систем и следных вихрей, возникающих вокруг обтекае-

мой конструкции вблизи ее сопряжения с дном. Эволюция вихревых структур вокруг группового свайного сооружения имеет много общего с образованием подковообразных или ожерельеподобных вихревых систем, которые возникают при обтекании одиночных плохо обтекаемых конструкций или опор. Для того чтобы понять механизм размыва, в первую очередь необходимо качественно описать структуру когерентных вихрей, которые образуют подковообразную и следную вихревую систему, для разных режимов течения и количественно охарактеризовать этот эффект в потоке и на дне реки вблизи основания опоры. Трехмерность и неустойчивый характер поля тече-

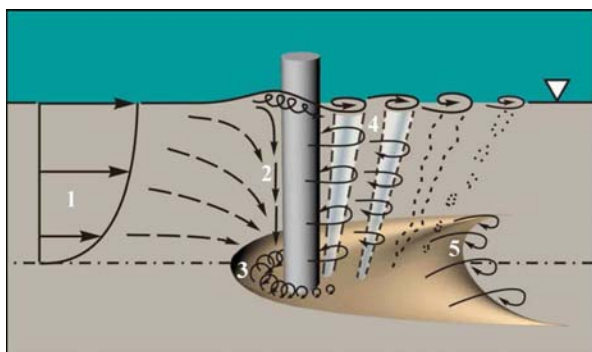


Рис. 1. Схема формирования размыва и намыва грунта вблизи цилиндрической опоры

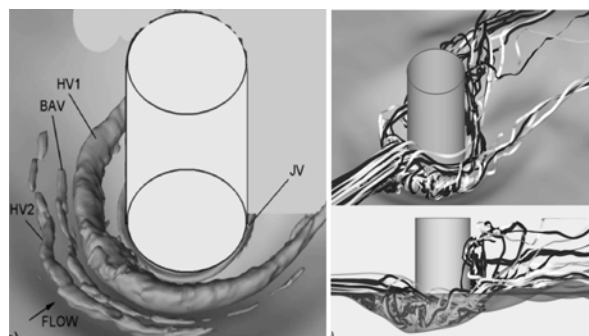


Рис. 2. Схематическое изображение особенностей генерации подковообразных вихревых структур перед цилиндром и их влияние на размыв и намыв грунта

ния, которое формируется размывом [5–7], создают значительные трудности при изучении механизмов размыва грунта. Структура турбулентности, имеющая широкий спектр турбулентных масштабов, присуща вихревому течению вокруг плохо обтекаемого тела. Действительно, поле течения в отверстии размыва вокруг опоры насыщено организованными когерентными структурами в виде подковообразных вихрей в основании опоры, крупномасштабных свертков в следе позади опоры и более мелких по размеру, но очень энергоемких вихревых трубок в сдвиговых слоях, которые отрываются от плохо обтекаемого тела [8, 9]. Для того чтобы выяснить, как течение размывает грунт вокруг опоры, необходимо изучить и описать структуру этих крупномасштабных когерентных вихревых систем и мелкомасштабных вихрей, а также их взаимодействие с обтекаемой поверхностью и грунтом на разных стадиях процесса размыва.

Известно, что основной механизм формирования и развития отверстия размыва включает в себя (рис. 1) направленное ко дну течение в передней или фронтальной части опоры (2), формирование подковообразной вихревой системы (3) вблизи основания опоры и следных вихрей (4), которые сходят с поверхности опоры [8, 10, 11]. В результате взаимодействия отрывного и ниспадающего течений перед опорой, подковообразных и следных вихрей грунт перед опорой размывается, а позади нее образуется намыв грунта (5) в виде дюн или рифелей. Подковообразный вихрь обусловлен отрывом пограничного слоя (1), натекающего на опору, в результате действия отрицательного градиента давления, возникающего вблизи фронтальной части опоры. Взаимодействие пограничного слоя с поверхностью опоры вынуждает структуру турбулентности перестроиться вблизи передней

части опоры в месте сопряжения ее с дном в ряд ожерельеподобных вихрей. Эти вихревые системы при передвижении вытягиваются вокруг опоры под действием боковых градиентов давления. Расположение, размер и интенсивность подковообразных вихрей значительным образом изменяются во времени в зависимости от стадии или фазы их формирования или развития [12–14]. При этом дополнительно наблюдается значительное увеличение турбулентной кинетической энергии, уровней пульсаций скорости и давления, а также придонных сдвиговых напряжений внутри и вблизи подковообразной вихревой области.

Экспериментальные и численные исследования [7, 10, 13–16] показывают, что структура подковообразной вихревой системы сильно зависит от числа Рейнольдса и характеристик пограничного слоя, который формируется перед обтекаемой преградой. Структура подковообразной вихревой системы, например, для режима ламинарного обтекания состоит из ряда основных крупномасштабных вихрей (рис. 2) [5, 7]. Первичный вихрь (*HV1*) располагается в средней позиции, в то время как угловой вихрь (*JV*) находится ближе всего к опоре. Вторичный вихрь (*HV2*), который развивается, формируется на позиции, которая находится на наибольшем расстоянии от поверхности обтекаемой опоры. Между первичным и вторичным вихрем генерируется придонный присоединенный вихрь (*BAV*). Развивающийся вихрь порождается пограничным слоем, который отрывается от обтекаемой поверхности дна. Этот вихрь постепенно переносится вниз по потоку и, в конце концов, становится новым первичным вихрем. В это время первичный вихрь перемещается по направлению к угловому вихрю и постепенно сливается с ним (см. рис. 2). Процесс этот является периодическим [4, 7, 17], генерируя низкочастотные колебания ви-



Рис. 3. Вид модели гидродинамического канала и расположение мостовых опор в ходе исследований

хревого течения как вокруг плохо обтекаемых тел, установленных на жесткую поверхность, так и расположенных на размываемом грунте.

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 [18, 19]. При этом спектральное представление, например, поля 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 дви-

жением 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 [17, 19]. 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 звуковые. Для этих давлений сжимаемость жидкости не является определяющим фактором, а их интенсивность не зависит от числа Маха. Скорость переноса 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 [20].

Цель данной экспериментальной работы – 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 открытом гидродинамическом канале 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. 3), засыпанная просеянным кварцевым песком на высоту около 0.3 м от дна канала. В измерениях песок, имеющий размер зерен  $d_{50} = 0.35 \cdot 10^{-3}$  м, формировался в виде плоского дна [21]. Ширина прямоугольника у основания призматической модели составляла  $b = 114 \cdot 10^{-3}$  м, а длина  $a = 300 \cdot 10^{-3}$  м (крупномасштабная модель масштабом 1:50 относительно природы) и  $b = 40 \cdot 10^{-3}$  м и  $a = 95 \cdot 10^{-3}$  м (мелкомасштабная модель). В ходе исследований глубина потока ( $H$ ) изменялась от 0.17 до 0.34 м, а среднерасходная скорость течения ( $U$ ) – от 0.15 до 0.59 м/с, которым соответствуют числа Рейнольд-

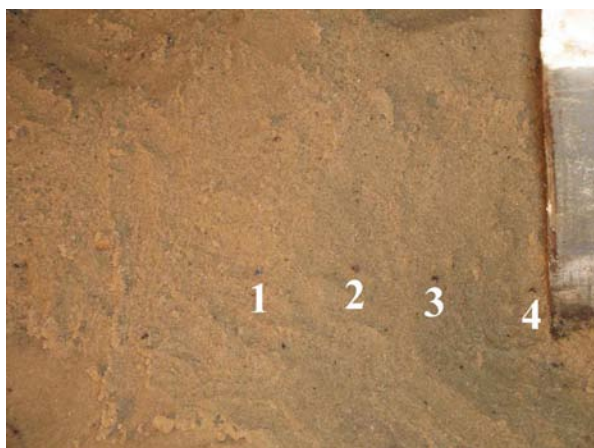


Рис. 4. Расположение датчиков пульсаций пристеночного давления в отверстии размыва грунта перед призматической опорой

са  $Re_b = Ub/\nu$  от 6000 до 67000 и числа Фруда  $Fr = U/\sqrt{gH}$  от 0.08 до 0.45, где  $\nu$  – коэффициент кинематической вязкости воды;  $g$  – ускорение свободного падения.

В соответствии с разработанной методикой и программой исследований в отверстии размыва грунта перед обтекаемой призматической моделью пульсации пристеночного давления измерялись миниатюрными (диаметр чувствительной поверхности  $1.6 \cdot 10^{-3}$  м) датчиками пульсаций давления, которые располагались заподлицо с обтекаемой поверхностью отверстия размыва и вблизи него вдоль срединного сечения призмы, как показано на рис. 4. Датчики устанавливались следующим образом: датчик № 1 находился перед отверстием размыва на удалении  $(15 \dots 20) \cdot 10^{-3}$  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 склонами отложения песка в отверстии размыва и датчик № 4 располагался на удалении около  $10 \cdot 10^{-3}$  м от поверхности призматической модели (в области наибольшей глубины размыва).

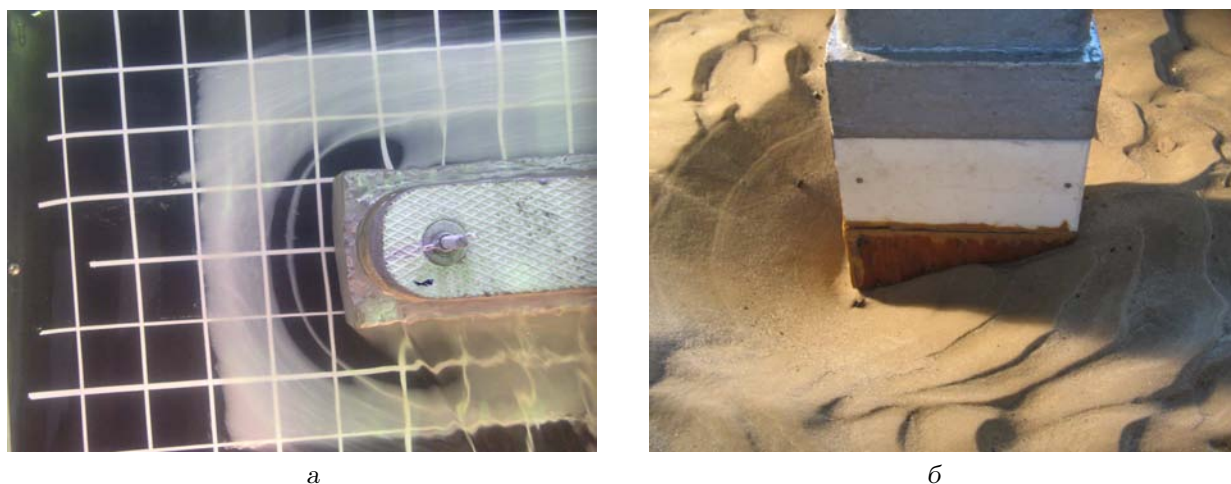
Электрические сигналы, генерируемые пьезокерамическими элементами датчиков, которые соответствовали уровням пульсаций пристеночного давления в точках измерений, поступали на предварительные усилители. Далее сигналы подавались на двухканальный анализатор спектров фирмы "Брюль и Кьер" либо посредством 16-канальных аналогово-цифровых преобразователей на персональные компьютеры. Измеренные данные обрабатывались и анализировались с использованием алгоритма быстрого преобразова-

ния Фурье по стандартным и специально разработанным программам и алгоритмам статистической обработки случайных процессов. Перед измерениями и в процессе измерений датчики калибровались и поверялись с помощью абсолютных и относительных методов. Погрешность измерений интенсивности пульсаций пристеночного давления не превышала 6% с надежностью 0.95 или  $2\sigma$ , а спектральных составляющих пульсаций давления – до 2 дБ в частотном диапазоне от 0.2 до 800 Гц.

## 2. РЕЗУЛЬТАТЫ ИЗМЕРЕНИЙ

Как показали визуальные наблюдения [9, 21], 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 течения и генерации подковообразных и следных вихрей. Размыв грунта перед опорами, независимо от их формы и размеров, и намыв грунта позади них формируется подковообразными и следными вихревыми системами. Эти системы, соответственно, огибают основание опоры вблизи ее сопряжения с размываемым грунтом, а также зарождаются в кормовой части опоры. Вследствие действия 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 [1, 7]. 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 [1, 8, 14].

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. Формирование подковообразных вихрей и их взаимодействие с обтекаемой поверхностью приводит к интенсивному размыву контрастного покрытия, которое использовалось при проведении визуальных исследований (рис. 5, а). На размываемой поверхности, когда придонная ско-



а

б

Рис. 5. Размыв контрастного покрытия вблизи призматической модели на жесткой поверхности (а) и размыв грунта вблизи нее на размываемой поверхности (б)

рость, обусловленная вихревым движением, превышает критическую скорость переноса частичек грунта, определенную из [22] эмпирической зависимостью  $V_c = 6.19H^{1/6}d_{50}^{1/3}$ , тогда песчинки начинают перемещаться и вблизи опор формируются размыв и намыв грунта (рис. 5, б). С течением времени глубина размыва грунта увеличивается, а высота намыва растет. При установившемся режиме размыва, который наступает через нормированное время  $V_c t / H > 4 \cdot 10^4$ , форма и размеры размывов остаются практически постоянными. Как показали исследования [21], наибольшая глубина размыва грунта наблюдается на удалении  $0.25b$  от основания призмы, а ширина отверстия размыва составляет 2.5 глубины размыва.

Профили размыва грунта перед фронтальной стенкой призмы имеют два характерных участка с разными углами наклона (см. рис. 5, б и 6, б). Они обусловлены формированием двух систем квазистойчивых крупномасштабных подковообразных вихревых структур. Когда плохообтекаемое тело, независимо от его формы, располагается на неразмываемой поверхности, то в его основании генерируется система подковообразных вихрей, схематически показанная на рис. 6, а. Эта система состоит из двух пар противоположно вращающихся вихрей, огибающих мостовую опору. Эти вихревые структуры колеблются в пространстве вблизи опоры и взаимодействуют как между собой, так и с обтекаемой поверхностью. Как показали исследования пространственно-временных характеристик полей скорости и давления вблизи моделей мостовых опор [17, 19], частота колебаний крупномасштабных вихрей 1 и 3 на рис. 6, а соответствует

числам Струхаля  $St = fd/U = (0.15 \dots 0.2)$ .

Обнаружено, что размыв грунта сначала происходит вблизи фронтальных ребер призмы за счет формирования отрывного течения и вертикальных вихрей на этих ребрах. Затем размыв наблюдается под крупномасштабными вихрями, обозначенными цифрами 1 и 3 на рис. 6, а. При этом размыв под вихрем № 3 происходит более интенсивно. В то время, когда размывы увеличиваются, мелкомасштабные подковообразные вихревые структуры № 2 и № 4 становятся менее заметными и постепенно вырождаются. Когда глубина размыва грунта достигает величины, близкой половине ширины призмы, формируется квазистойчивая подковообразная вихревая система, которая состоит из двух крупномасштабных вихрей, сформированная из вихрей 1 и 3, показанных на рис. 6, а.

Схема равновесного состояния размыва грунта в его фронтальном срединном сечении показана на рис. 6, б. В углублении вращаются две крупномасштабные подковообразные вихревые структуры, формирующие размыв грунта и переносящие частички песка от передней части конструкции в ее кормовую область. Подковообразные вихри совершают осциллирующее движение, обмениваются друг с другом энергией, нередко объединяются и разрушаются на более мелкие вихри. Перед призматической опорой вихревая структура, располагающаяся ближе к фронтальной стенке, имеет меньший масштаб. Она образует наибольший размыв грунта, обладающий большим углом наклона отложения песка. В области взаимодействия отрывного подковообразного вихря (1 на рис. 6)

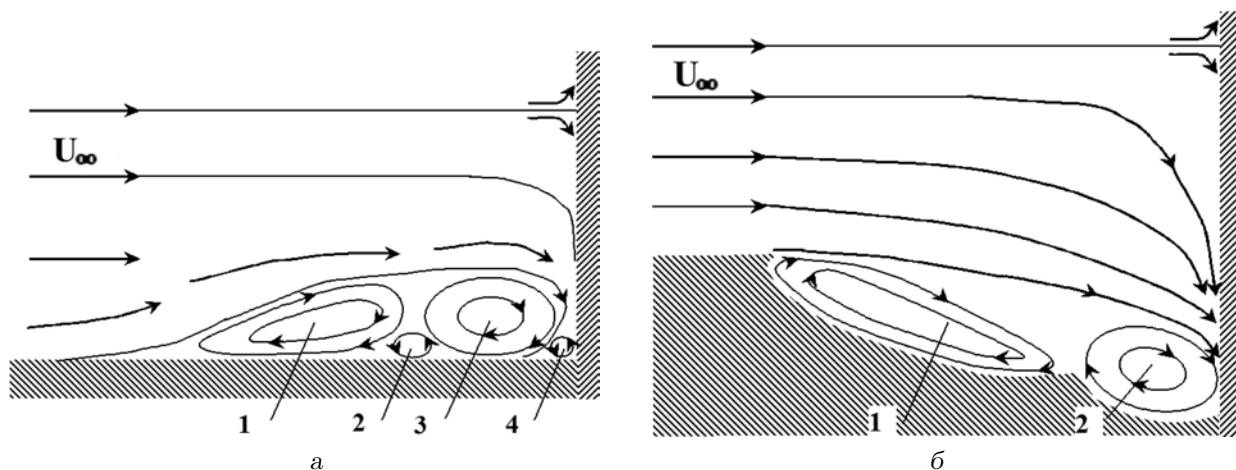


Рис. 6. Схема формирования подковообразных вихревых структур перед плохо обтекаемым телом на жесткой поверхности (а) и в отверстии размыва грунта (б)

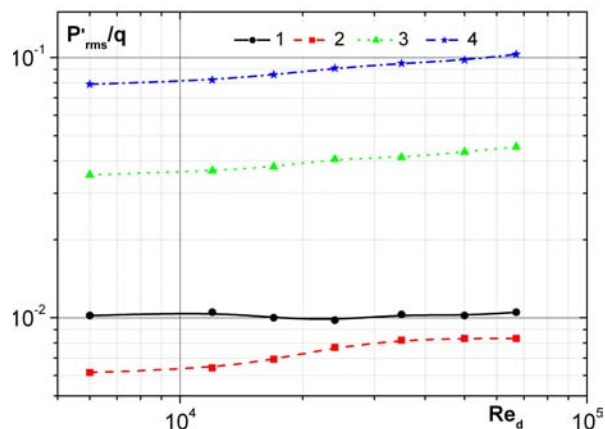


Рис. 7. Изменение интенсивности пульсаций пристеночного давления на поверхности размыва грунта перед призматической опорой

с размываемым грунтом угол склона отложения песка в отверстии размыва меньше и размыв под этим вихрем менее глубокий. Перед опорой, в месте сопряжения поверхностей опоры и дна, там, где показан вихрь № 4 на рис. 6, а, на всех профилях размыва грунта регистрируется намыв грунта. Также между двумя углублениями, которые формируются крупномасштабными подковообразными системами, в профиле размыва грунта наблюдается намыв песка (см. рис. 6, б). Этот намыв песка разделяет два склона отверстия размыва и при визуальных наблюдениях имеет достаточно четкие очертания, хотя ему и присущий осциллирующий в пространстве характер, отвечающий частотам колебательного движения вихревых структур.

В зависимости от местоположения точек измерения пульсаций пристеночного давления интенсивность пульсаций и их спектральный характер изменяются в соответствии с особенностями вихревого течения внутри отверстия размыва грунта. Среднеквадратичные значения пульсаций пристеночного давления, нормированные динамическим давлением ( $q = \rho U^2 / 2$ ), показаны на рис. 7 в зависимости от числа Рейнольдса, рассчитанного по ширине призматической модели. Здесь номера кривых отвечают номерам датчиков, показанным на рис. 4. Перед отверстием размыва пульсации пристеночного давления равны  $0.01q$  и слабо зависят от числа Рейнольдса. В отверстии размыва интенсивность пульсаций пристеночного давления растет с ростом числа Рейнольдса. Наименьшие уровни пульсаций пристеночного давления наблюдаются в области формирования верхнего склона размыва, где генерируется крупномасштабная подковообразная вихревая структура (обозначенная цифрой 1 на рис. 6, б), обусловленная отрывом пограничного слоя с передней кромки отверстия размыва. Максимальные уровни пульсаций пристеночного давления зафиксированы там, где ниспадающее течение вдоль поверхности призмы взаимодействует с размываемым грунтом, формируя интенсивный подковообразный вихрь (2), который образует нижний склон отверстия размыва. Интенсивность пульсаций пристеночного давления в нижней части отверстия размыва более чем на порядок превышает интенсивность пульсаций пристеночного давления под отрывным подковообразным вихрем, образующим верхний склон отложения песка в отверстии размыва грунта перед призматической моделью (см. кривые 4 и 2 на

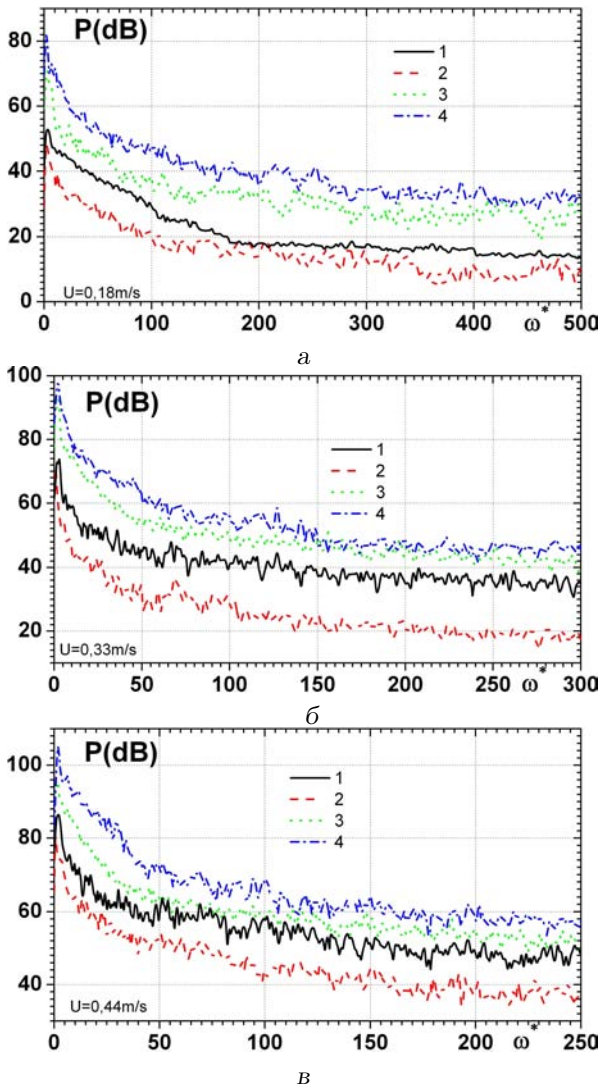


Рис. 8. Спектральные плотности мощности пульсаций пристеночного давления на поверхности размыва грунта перед призматической опорой для чисел Рейнольдса и Фруда:  $Re_b = 20500$  и  $Fr = 0.1$  (а),  $Re_b = 37600$  и  $Fr = 0.19$  (б) и  $Re_b = 50200$  и  $Fr = 0.25$  (в)

рис. 7).

Спектральные плотности мощности пульсаций пристеночного давления внутри и вблизи отверстия размыва грунта перед призматической моделью показаны на рис. 8. Здесь уровни спектров представлены в дБ относительно  $2 \cdot 10^{-5}$  Па в зависимости от безразмерной частоты в виде  $\omega^* = 2\pi fb/U$ . Номера кривых соответствуют номерам датчиков, показанным на рис. 4. Для скорости течения  $0.18$  м/с, которой соответствуют числа Рейнольдса  $Re_b = 20500$  и Фруда  $Fr = 0.1$ , спектральные зависимости представлены на рис. 8,а. Вблизи

призматической модели уровни пульсаций пристеночного давления наибольшие во всем исследуемом частотном диапазоне (кривая 4), а в области формирования подковообразной вихревой структуры из отрывной области пограничного слоя спектральные уровни наименьшие (кривая 2). Разница между спектральными зависимостями составляет более чем 20 дБ. Максимум спектров имеет место на безразмерной частоте  $\omega^* \approx 1.3$  в области верхнего склона отложения песка в отверстии размыва и  $\omega^* \approx 2.8$  вблизи призматической модели. В области расположения датчика № 3 (область наноса песка между двумя склонами) максимальные значения наблюдаются на обеих этих безразмерных частотах.

Результаты исследований спектральных зависимостей пульсаций пристеночного давления на обтекаемой поверхности размыва грунта перед призматической моделью для скорости течения  $0.33$  м/с ( $Re_b = 37600$  и  $Fr = 0.19$ ) показаны на рис. 8,б. Для этого режима течения характер изменения спектров в исследуемых местоположениях остался прежним. Максимальные уровни наблюдаются вблизи призмы, а минимальные – в области формирования подковообразной вихревой структуры, располагающейся выше по потоку. Максимумы спектров имеют место на безразмерных частотах  $\omega^* \approx 0.76$  в области верхнего склона осаждения песка в отверстии размыва и  $\omega^* \approx 2.28$  вблизи призматической модели.

Когда скорость потока в гидродинамическом канале увеличили до  $0.44$  м/с, которой соответствуют числа Рейнольдса и Фруда  $Re_b = 50200$  и  $Fr = 0.25$ , то характер изменения спектральных зависимостей остался прежним, как показано на рис. 8,в. Однако максимальные значения спектральных уровней наблюдаются на безразмерных частотах  $\omega^* \approx 0.57$  в области верхнего склона осаждения 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 имеют место повышенные уровни пульсаций пристеночного давления вблизи призмы там, где взаимодействует ниспадающее течение, направленное вдоль обтекаемой поверхности призматической модели ко дну. Максимумы спектральных уровней в области, прилегающей к обтекаемой поверхности призмы, зафиксированы на частотах, которые в (2...3) раза выше, чем в области формирования отрывной подковообра-

зной вихревой системы. Эти частоты, как показывают визуальные измерения, отвечают частотам вращения крупномасштабных вихревых структур, огибающих призматическую модель [17, 19]. 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. 6, б. 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 обоих подковообразных вихрей уменьшается.

## ВЫВОДЫ

Результаты экспериментальных исследований дали возможность сделать следующие выводы:

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

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 20 дБ во всем исследуемом диапазоне частот. В спектральных зависимостях наблюдаются дискретные подъемы на частотах вращения крупномасштабных подковообразных вихрей, формирующихся внутри отверстия размыва. Частота вращения подковообразного вихря вблизи призмы 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.

1. *Dargahi B.* Flow field and local scouring around a cylinder.– Stockholm, Sweden: Royal Institute of Technology, 1987.– 47 p.
2. *Beg M., Beg S.* Scour reduction around bridge piers: A review // *International Journal of Engineering Inventions.*– 2013.– **2**, № 7.– P. 7–15.
3. *Sorensen R.M.* Basic coastal engineering.– Berlin: Springer, 2006.– 324 p.
4. *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.
5. *Ettema R., Kirkil G., Muste M.* Similitude of large-scale turbulence in experiments on local scour at cylinders // *J. Hydraulic Eng.*– 2006.– **132**, № 1.– P. 33–40.
6. *Ataie-Ashtiani B., Aslani-Kordkandi A.* Flow field around side-by-side piers with and without a scour hole // *European J. Mechanics - B/Fluids.*– 2012.– **36**, № 6.– P. 152–166.
7. *Melville B. W.* Pier and abutment scour: Integrated approach // *J. Hydraulic Eng.*– 1997.– **123**, № 2.– P. 125–136.
8. *Ettema R., Constantinescu G., Melville B.* Evaluation of bridge scour research: Pier scour processes and predictions // *Final Report for NCHRP Project 24-27(01).*– 2011.– № 175.– P. 1–195.
9. *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.



10. Воскобійник А. В., Воскобійник В. А., Воскобойник О. А. Спряжене обтікання трирядного пального ростверку на пласкій поверхні. Частина 1. Формування підковоподібних вихорів // Прикладна гідромеханіка.– 2008.– **10**, № 3.– С. 28–39.
11. Krajnović S. Flow around a tall finite cylinder explored by large eddy simulation // J. Fluid Mech.– 2011.– **676**.– P. 294–317.
12. Kirkil G., Constantinescu G. A numerical study of the laminar necklace vortex system and its effect on the wake for a circular cylinder // Phys. Fluids.– 2012.– **24**, № 7.– P. 073602–1–26.
13. Escauriaza C., Sotiropoulos F. Lagrangian model of bed-load transport in turbulent junction flows // J. Fluid Mech.– 2011.– **666**.– P. 36–76.
14. Kirkil G., Constantinescu G., Ettema R. Coherent structures in the flow field around a circular cylinder with scour hole // J. Hydraulic Eng.– 2008.– **134**, № 5.– P. 572–587.
15. Radice A., Tran C. K. Study of sediment motion in scour hole of a circular pier // J. Hydraulic Research.– 2012.– **50**, № 1.– P. 44–51.
16. Das S., Das R., Mazumdar A. Comparison of characteristics of horseshoe vortex at circular and square piers // Research Journal of Applied Sciences, Engineering and Technology.– 2013.– **17**, № 5.– P. 4373–4387.
17. Воскобійник А. В., Воскобійник В. А., Воскобойник О. А. Просторово-часові кореляції та спектри пульсацій швидкості спряженої течії поблизу трирядного ансамблю циліндрів // Проблеми водопостачання, водовідведення та гідравліки.– 2009.– **Вип. 12**.– С. 165–177.
18. Ataie-Ashtiani B., Aslani-Kordkandi A. Flow field around single and tandem piers // Flow, Turbulence and Combustion.– 2013.– **90**, № 3.– P. 471–490.
19. Воскобойник В. А. Статистические характеристики поля скоростей сопряженного течения вокруг трехрядного свайного ростверка // Вісник Донецького Університету, Сер. А: Природничі науки.– 2008.– **Вип. 2**.– С. 130–137.
20. Блохинцев Д. И. Акустика неоднородной движущейся среды.– М.: Наука, 1981.– 208 с.
21. Воскобойник А. А., Воскобойник А. В., Воскобойник В. А., Марченко А. Г., Никишов В. И. Локальный размыв грунта при взаимодействии мостовых опор, находящихся в следе друг за другом // Прикладна гідромеханіка.– 2006.– **8**, № 3.– С. 16–26.
22. Laursen E. M. An analysis of relief bridge scour // J. Hydraulic Division.– 1963.– **89**.– P. 93–118.