

УДК 532.5

## ЛОКАЛЬНЫЙ РАЗМЫВ ГРУНТА ПРИ ВЗАИМОДЕЙСТВИИ МОСТОВЫХ ОПОР, НАХОДЯЩИХСЯ В СЛЕДЕ ДРУГ ЗА ДРУГОМ

А. А. ВОСКОВОЙНИК, А. В. ВОСКОВОЙНИК,  
В. А. ВОСКОВОЙНИК, А. Г. МАРЧЕНКО, В. И. НИКИШОВ

*Институт гидромеханики НАН Украины, Киев*

*Получено 15.01.2006 ◊ Пересмотрено 16.03.2006*

Представлены результаты экспериментальных исследований формирования и развития локальных размывов грунта вблизи мостовых опор. Показано влияние расположения двух мостовых переходов, которые находятся в следе друг за другом, на физику процесса формирования размыва грунта. Перед призматической опорой размыв обусловлен взаимодействием с грунтом подковообразных вихревых структур, ниспадающим течением вдоль фронтальной поверхности опоры и боковыми вихревыми системами, которые зарождаются при отрыве набегающего потока с передних граней призматической опоры. Перед многотрубчатой опорой в виде ростверка размыв грунта связан с действием подковообразной вихревой системы, огибающей ростверк как единое целое, подковообразных вихрей, которые зарождаются возле каждой из цилиндрических опор ростверка, и струеобразного течения, которое возникает между передними опорами ростверка. При взаимном расположении двух мостовых переходов, находящихся в следе друг за другом, локальный размыв грунта перед призматической опорой старого моста возрастает при сверхкритических скоростях потока на мелкой воде и уменьшается при докритических скоростях на глубокой воде.

Наведено результати експериментальних досліджень формування та розвитку локальних розмивів ґрунту поблизу мостових опор. Показаний вплив розташування двох мостових переходів, які знаходяться в сліді один за одним, на фізику процесу формування розмиву ґрунту. Перед призматичною опорою розмив обумовлений взаємодією з ґрунтом підковоподібних вихревих структур, течією, яка спрямована до низу, вздовж фронтальної поверхні опори та боковими вихревіми системами, які зароджуються при відриві набігаючого струменя з передніх граней призматичної опори. Перед багатотрубчатого опорою в вигляді ростверку розмив ґрунту обумовлений дією підковоподібної вихревої системи, яка огинає ростверк як одне ціле, підковоподібних вихорів, що зароджуються біля кожної із циліндричних опор ростверку, та струмоподібної течії, яка виникає між передніми опорами ростверку. При взаємному розташуванні двох мостових переходів, які знаходяться в сліді один за одним, локальний розмив ґрунту перед призматичною опорою старого мосту збільшується при надкритичних швидкостях мілкої потоку та зменшується при докритичних швидкостях, коли вода глибока.

The results of the experimental investigations of local bed scour formation and development around bridge piers are reported. Influence of an arrangement of two bridges which are found in the wake one after another, on physics of the bed scour formation is shown. The scour before prismatic pier is caused by the bed interaction of the horseshoe vortical structures, the downflow along a frontal pier surface and lateral vortical systems which are arised at a separation of the incident flow with the forward edges of the prismatic pier. The bed scour before the multitubular pier in the form of grillage is connected by action of the horseshoe vortical system which is bending around grillage as a single whole, of the horseshoe eddies which are arised near each of the cylindrical pier of the grillage and jet-stream which is arised between forward piers of the grillage. The local bed scour before prismatic pier of the old bridge is increased at the supercritical flow velocities on the fine water and it's decreased at subcritical flow velocities on deep water at a positional relationship of two bridges locating in the wake one after another.

### ВВЕДЕНИЕ

Обтекание мостовых опор, в большинстве случаев имеющих форму плохо обтекаемых тел, тесно связано с образованием локальных или местных размывов грунта вблизи опор. Хотя много экспериментальных измерений сфокусировано на изучении эволюции размыва грунта вокруг опоры моста, детальное исследование физики течения и динамики когерентных структур, ответственных за процесс размыва на различных его стадиях, остается еще не проведенным. В случае набегающего турбулентного потока, который имеет место практически во всех естественных руслах, широкий ди-

апазон турбулентных масштабов присутствует вокруг опоры и управляет процессом переноса окружающего грунта. Рис. 1, позаимствованный из работы [1], дает схематическое представление об особенностях осредненного течения, отвечающего за появление размыва. Независимо от формы мостовой опоры, основным механизмом, который управляет формированием и эволюцией размываемого углубления, является подковообразная вихревая система в основании опоры [2 – 4]. С приближением к цилиндру пограничный слой должен преодолеть значительный градиент давления, образуемый торможением набегающего потока. Это приводит к отрыву пограничного слоя. В области отрыва формируется вихревая система, которая огибает цилиндр в виде подковообразной ви-

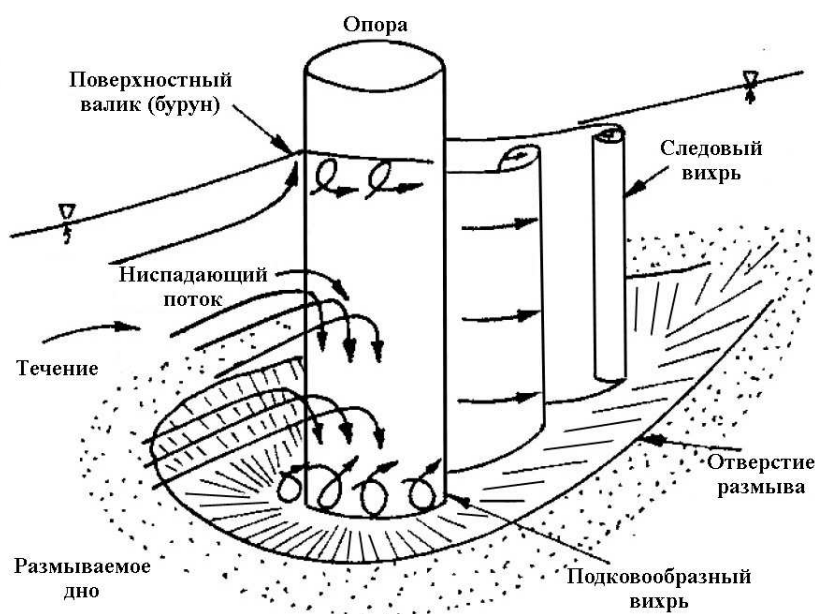


Рис. 1. Схема обтекания цилиндрической опоры и вихревые системы, формируемые возле нее (из работы [1])

хревой структуры. Подковообразный вихрь сильно модернизирует структуру турбулентности потока, набегающего на фронтальную часть опоры. Основным эффектом является рост локальных касательных напряжений на грунте и уровней пульсаций давления вблизи дна возле носовой части обтекаемой конструкции [5, 6].

В фронтальной плоскости осевой симметрии мостовой опоры, независимо от уровня турбулентности набегающего потока, основной когерентной структурой является подковообразный вихрь. Условия набегающего потока оказывают определенное воздействие на форму и размер вихревых структур. Низкочастотные осцилляции основных вихревых структур (в частности, подковообразного вихря) являются менее энергоемкими при турбулентном режиме обтекания [7]. В случае ламинарного обтекания низкочастотные периодические или квазипериодические осцилляции подковообразной вихревой системы являются только видом возможных осцилляций. Это согласуется с экспериментальными наблюдениями, которые подтверждают, что при очень высоких числах Рейнольдса подковообразная вихревая система становится более стабильной в смысле того, что низкочастотные колебания ядра этих вихрей являются очень маленькими [7, 8]. В то же время, более

широко наблюдаются меньшие масштабы и более высокие частоты внутри этих крупномасштабных структур. Оказывается, что при продвижении в направлении роста азимутальных углов подковообразный вихрь приближается к линии сопряжения дна и цилиндра и его форма становится более вытянутой.

Бэкер [2] установил, что для больших чисел Рейнольдса характеристики турбулентной подковообразной вихревой системы практически не зависят от числа Рейнольдса. Оказалось, что они зависят от значения параметра  $D/\delta^*$ , где  $\delta^*$  – толщина вытеснения набегающего пограничного слоя в местоположении цилиндра диаметром  $D$ . Турбулентная подковообразная вихревая система в среднем содержит три первоначальных вихря, вращающихся в одном и том же направлении, и двух присоединенных ко дну вихрей [4]. Число вихрей зависит от  $Re_D$  и увеличивается с ростом числа Рейнольдса. Такому классу течений присуще явление неустойчивости [9, 10] в виде подковообразной вихревой структуры, неустойчивому схождению отделяющихся сдвиговых слоев и следовому взаимодействию с придонной поверхностью и с ножками подковообразных вихрей.

В случае, когда набегающий поток был полностью турбулентным, Дергаши [3, 4] наблюдал, что

размыв инициировался в зоне следа цилиндра, после чего размыв, образуемый подковообразной вихревой системой у основания цилиндра, становится доминирующим. Дергаши сделал вывод, что размыв во фронтальной части обусловлен следующими факторами: 1) скоростью вращения подковообразной вихревой системы; 2) уменьшением локального давления вокруг частичек грунта; 3) высокими уровнями турбулентности и 4) квазипериодическим движением, обусловленным подковообразными вихрями. В области следа цилиндра, механизм размыва коррелирует с процессом схода следовых вихрей. Частички грунта эжектируют, когда пониженные давления и высокие уровни пульсаций, порождаемые конвекцией или переносом этих вихрей, наблюдаются в придонной области возле опоры.

Большинство работ направлено на понимание явления локального размыва. Так, экспериментальные исследования отчетливо показывают, что глубина размыва сильно зависит от формы и размера цилиндра. Обычно влияние других переменных, таких как скорость течения, глубина потока, размер частичек грунта, играют менее важную роль [4]. Группирование опор приводит к изменению глубины локального размыва, что обусловлено взаимным влиянием вихревого течения вокруг отдельных опор, формирующих групповую конструкцию. В зависимости от местоположения, конструкции и режима обтекания изменяются кинематические и динамические характеристики подковообразных и следовых вихрей, а также их интенсивность воздействия на эрозию прилегающего к ним грунта. Так, локальный размыв грунта в фронтальной части вблизи первой по направлению течения опоры возрастает почти в 1.2 раза, согласно [11–13], при следовом группировании цилиндрических опор на расстоянии порядка  $5D$  друг от друга. Взаимодействие группы мостовых опор, имеющих неодинаковую форму конструкции, а также следовое расположение опор параллельных и близко расположенных мостовых переходов практически не изучено и литературных данных для таких конструктивных решений не приведено. Это обуславливает необходимость проведения численных и экспериментальных исследований для решения такого класса задач.

Данная работа посвящена экспериментальному изучению на моделях влияния обтекания конструкций опор строящегося мостового перехода, располагающегося ниже по течению, на локальный размыв грунта вблизи опор существующего железнодорожного мостового перехода на р. Днепр в г. Киве.

## 1. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ УСТАНОВКА, ПАРАМЕТРЫ ИЗМЕРЕНИЙ

Экспериментальные исследования взаимного влияния мостовых опор на локальный размыв грунта проводился в гидродинамическом лотке, имеющем длину рабочего участка порядка 14 м, ширину – 1.5 м и глубину – 0.65 м. Вода в лоток подавалась посредством насоса, находящегося на удалении более 30 м от рабочего участка. От насоса до лотка вода поступала через промежуточный гидравлический лоток длиной около 20 м, где возмущения, вводимые в поток насосом, затухали. Далее вода поступала в водосборник, имеющий форму конфузора, перед рабочим участком, оборудованным хонейкомбами и сетчатыми спрямляющими и направляющими поток устройствами. Позади прямолинейного рабочего участка располагался сливной водосборник в виде диффузора, с регулируемой системой сброса воды в подземное водохранилище, находящееся под гидравлической лабораторией, из которого воду качал насос для проведения исследований. Таким образом, в экспериментах использовалась вода, имеющая постоянную температуру, а, следовательно, и кинематическую вязкость.

На удалении порядка 8 м от начала рабочего участка располагались три пары моделей мостовых опор, засыпанные просеянным кварцевым песком на высоту около 0.3 м от дна лотка. В измерениях песок формировался в виде плоского дна либо как модель существующего рельефного дна, исследуемого участка русла Днепра. Пример фотографии размыва грунта вблизи моделей мостовых опор для исходно плоского дна показан на рис. 2. Мостовые опоры в виде прямоугольных призм существующего моста располагаются выше по потоку от мостовых опор в виде трубчатого трехрядного ростверка строящегося моста. Ширина прямоугольника  $b = 40 \cdot 10^{-3}$  м, а длина  $a = 95 \cdot 10^{-3}$  м, ширина ростверка  $b = 40 \cdot 10^{-3}$  м, а длина  $a = 200 \cdot 10^{-3}$  м, диаметр цилиндрического элемента конструкции ростверка  $D = 10 \cdot 10^{-3}$  м. Расстояние между осями моделей мостовых опор составляло  $l_x = 0.31$  м и  $l_y = 0.35$  м, где  $x$  – продольная координата по направлению скорости набегающего потока ( $U$ ), а  $y$  и  $z$  – поперечные координаты вдоль ширины и глубины соответственно. Глубина и скорость набегающего потока регулировались посредством задвижки в системе сброса воды и числом оборотов двигателя центробежного насоса. Средний размер зерен кварцевого песка составляет  $d_{50} = 0.35 \cdot 10^{-3}$  м. В ходе измерений глубина потока изменялась от 0.17 до 0.34 м, а сре-

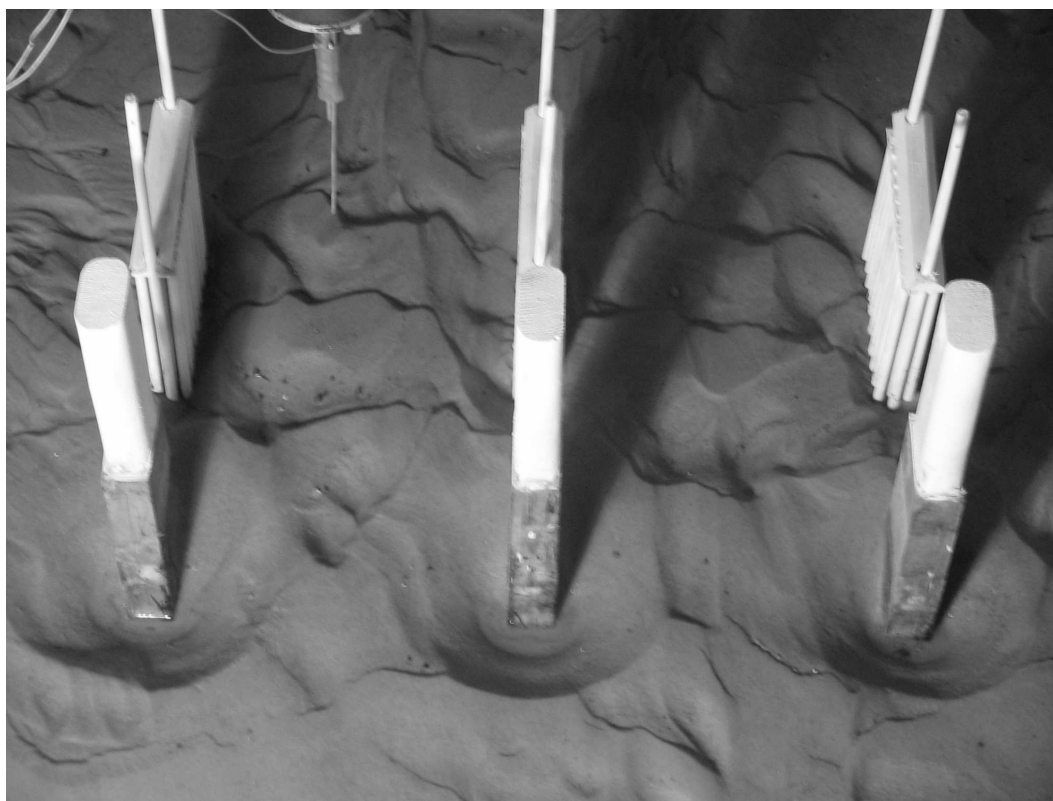


Рис. 2. Расположение моделей опор двух мостовых переходов и рельеф дна после проведения экспериментальных исследований в гидродинамическом лотке на исходно гладком песчаном дне

днерасходная скорость – от 0.15 до 0.59 м/с.

## 2. ПРИЕМНЫЕ ЭЛЕМЕНТЫ, МЕТОДИКА И ПРОГРАММА ИЗМЕРЕНИЙ

Для измерения глубины размыва грунта был разработан и изготовлен датчик глубины размыва. В основу работы приемника был положен механизм измерения глубины, на которой находится чувствительный элемент датчика полного давления. Датчик давления, заканчивающийся тонким жестким стержнем, помещался на дно измеряемого углубления. Стержень использовался тонким для уменьшения его влияния на структуру вихревого движения в измеряемом объеме. На конце стержня помещался наконечник в виде полусферы для того, чтобы стержень под весом датчика давления не погружался в песчаное дно лотка. В измерениях использовался ансамбль из четырех датчиков глубины размыва, разнесенных на известное расстояние друг от друга (рис. 3). Конструкция измерительного блока позволяла датчикам размыва свободно перемещаться под собственным весом в направляющих отверстиях. При перемещении изме-

рительного блока по направлению ко дну лотка датчики размыва поочередно останавливались в своем перемещении на той глубине, где проводились измерения. При остановке последнего датчика перемещение измерительной конструкции прекращалось. Данные глубины перемещения датчиков передавались через соответствующий многоканальный аналогово-цифровой преобразователь на персональный компьютер, где по моменту прекращения изменения нарастания давления, регистрируемого каждым из измерительных датчиков, определялась глубина размыва грунта. По измеренным глубинам строился профиль отверстия размыва в различных сечениях вблизи мостовых опор. Замеры проводились периодически по мере проведения экспериментальных исследований, что позволяло определить глубину размыва и ее рельеф в зависимости от времени измерений. После окончания экспериментальных исследований и высыхания рельефа дна, полученного в ходе измерений, проводилась фотосъемка и замеры характерных особенностей дна (профили дюн, отверстий размывов). Измерения рельефа дна проводились с помощью игольчатых датчиков, перемеща-

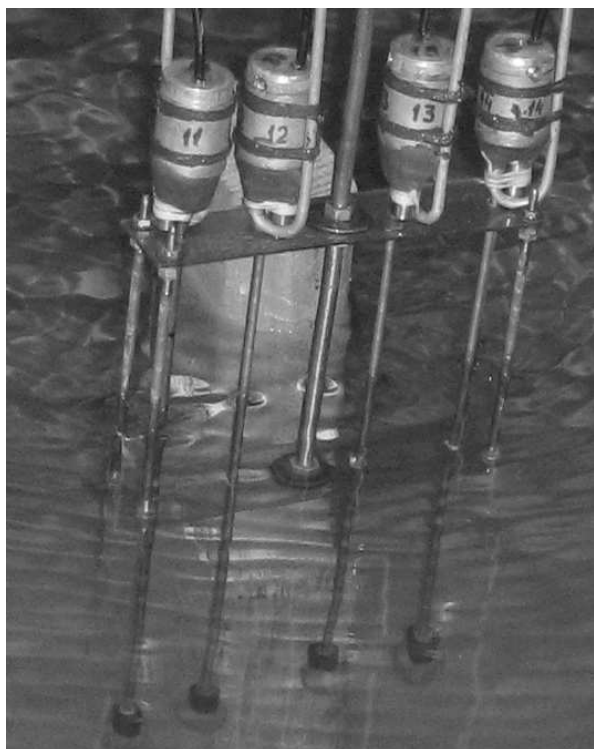


Рис. 3. Погружение в исследуемый поток измерительной конструкции с ансамблем из четырех датчиков глубины размыва перед моделью призматической мостовой опоры

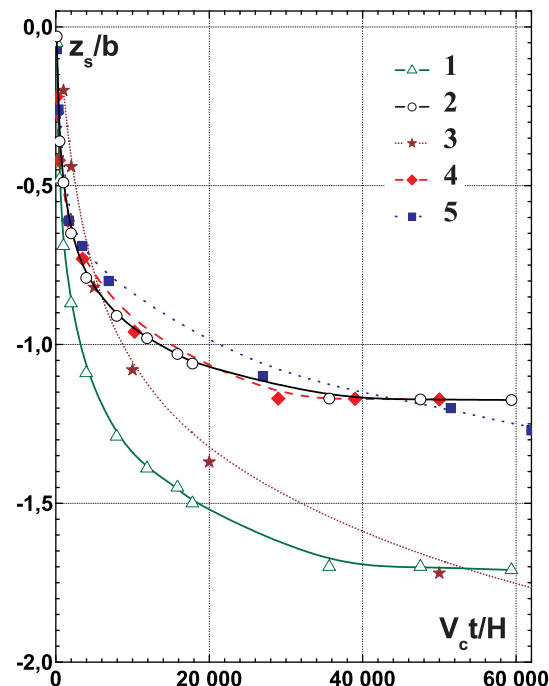


Рис. 4. Изменение во времени максимальной глубины размыва грунта перед фронтальной поверхностью призматической опоры

ющихся тастером, со шкалой деления с точностью до  $0.1 \cdot 10^{-3}$  м.

Скорость набегающего потока измерялась посредством микровертушек и термисторных датчиков скорости. Микровертушки и термисторы перемещались с помощью соответствующих державок и кронштейнов в характерные места измерений полей скоростей. Микровертушки диаметром около  $10 \cdot 10^{-3}$  м определяли осредненные скорости набегающего потока. Полученные данные позволили построить профили скорости и определить среднерасходную скорость набегающего потока. Миниатюрные термисторные датчики (диаметр чувствительной поверхности порядка  $0.8 \cdot 10^{-3}$  м), объединенные в корреляционные блоки, дали возможность измерять осредненные и пульсационные составляющие скорости. Малые размеры этих датчиков обеспечили введение минимальных искажений в структуру вихревого движения, присущего обтеканию мостовых опор. Пространственно-временная корреляция пульсаций скорости, измеренная ансамблем термисторных датчиков, позволила оценить кинематические и геометрические характеристики вихревых систем, формируемых и

развиваемых внутри отверстий размыва и вблизи мостовых опор. Трехмерный характер полей скоростей, присущий обтеканию мостовых опор, изучался посредством визуализации потока контрастными веществами, такими как цветные водорастворимые краски и чернила, а также алюминиевая пудра. Красящие вещества вводились в поток и фиксировались одновременно цифровыми видео- и фотокамерами. Полученные кадры и снимки регистрировались и обрабатывались на персональных компьютерах с применением соответствующих редакторов и программ. Кроме красящих веществ в поток вводились контрастные частички нейтральной плавучести и применялась методика регистрации движения шелковинок (цветные шелковые нитки), которые принимали форму траекторий движения вихревых структур. Использование меченых частичек при проведении видеосъемки позволило определить как амплитуду, так и направление движения этих частичек, которые отображали поле скоростей в исследуемом объеме вихревого течения.

Наибольшая погрешность измерений, при доверительном интервале 0.95 наблюдалась при изме-

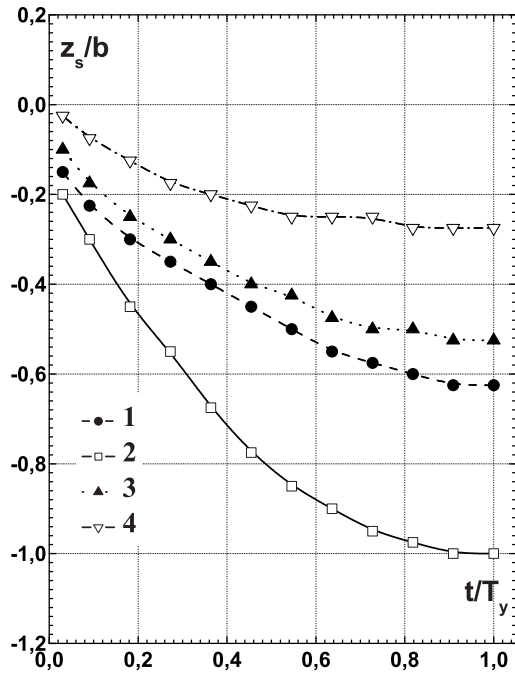


Рис. 5. Изменение во времени глубины размыва грунта вблизи призматической опоры вдоль продольной координаты на удалении  $0.75b$  от опоры

рени скорости по движению меченых частичек (около 10%). По данным термисторных датчиков и микровертушек погрешность измерений не превышала 5%. Замеры глубины локального размыва грунта датчиками размыва осуществлялись с погрешностью измерений порядка 5%, а игольчатыми датчиками рельеф дна регистрировался с погрешностью порядка 1%.

### 3. РЕЗУЛЬТАТЫ ИЗМЕРЕНИЙ И АНАЛИЗ ДАННЫХ

Возможность измерения глубины локального размыва грунта по ходу проведения экспериментальных исследований позволила определить степень роста наибольшей глубины размыва во времени, что проиллюстрировано на рис. 4. На этом рисунке представлена зависимость глубины локального размыва перед призматической опорой старого моста ( $z_s/b$ ), нормированная шириной опоры ( $b$ ), от безразмерного времени проведения исследований ( $V_c t/H$ ), где  $V_c$  – критическая скорость начала перемещения частичек грунта, определенная по зависимости  $V_c = 6.19H^{1/6}d_{50}^{1/3}$ , представленной в работе [14];  $t$  – время проведения ис-

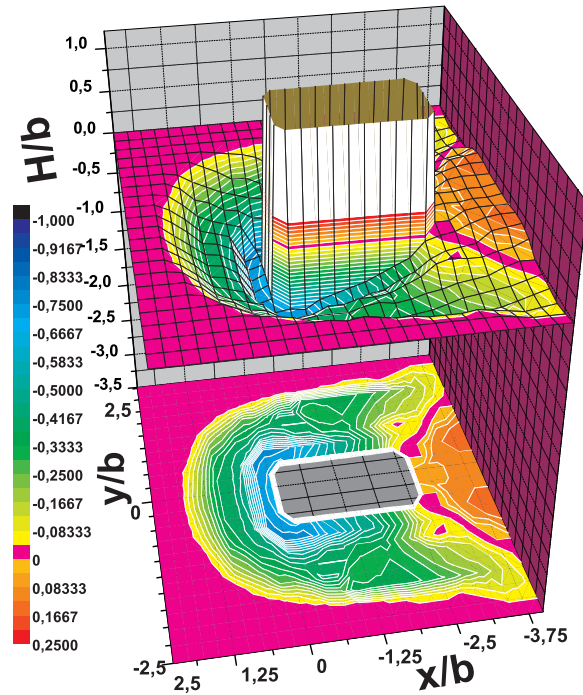


Рис. 6. Схема локального размыва грунта вблизи модели призматической опоры старого железнодорожного моста

следований на размываемой модели;  $H$  – глубина потока над исходно плоским дном. Кривые 1 и 2 этого рисунка соответствуют измеренным нами данным для  $Fr = U/\sqrt{gH} = 0.38$ ;  $b/d_{50} = 114$  и  $Fr = 0.15$ ;  $b/d_{50} = 114$  соответственно. Кривая 3 – данные из работы [15] для  $Fr = 0.44$ ;  $b/d_{50} = 14$ . Кривые 4 и 5 – данные из работ [16] и [17] для  $Fr = 0.11$ ;  $b/d_{50} = 518$  и  $Fr = 0.18$ ;  $b/d_{50} = 181$ . В целом, тенденция поведения кривых, полученных в наших исследованиях, неплохо коррелирует с общепризнанными результатами. Темп роста глубины размыва с увеличением времени проведения исследований убывает близко к экспоненциальному закону [18, 19]. С ростом числа Фруда глубина размыва увеличивается. При достижении значения  $V_c t/H$  порядка  $4 \cdot 10^4$  можно, с приемлемой степенью точности, считать, что размыв принимает форму установившегося процесса. Хотя для более крупной фракции зерен кварцевого песка ( $b/d_{50} = 14$ ) установившийся размыв наступает значительно позже, что видно из кривой 3 на рис. 4.

Оценить рост глубины размыва песчаного грунта вблизи призматической опоры за промежуток времени, необходимый для наступления установившегося размыва, можно из рис. 5. Здесь время



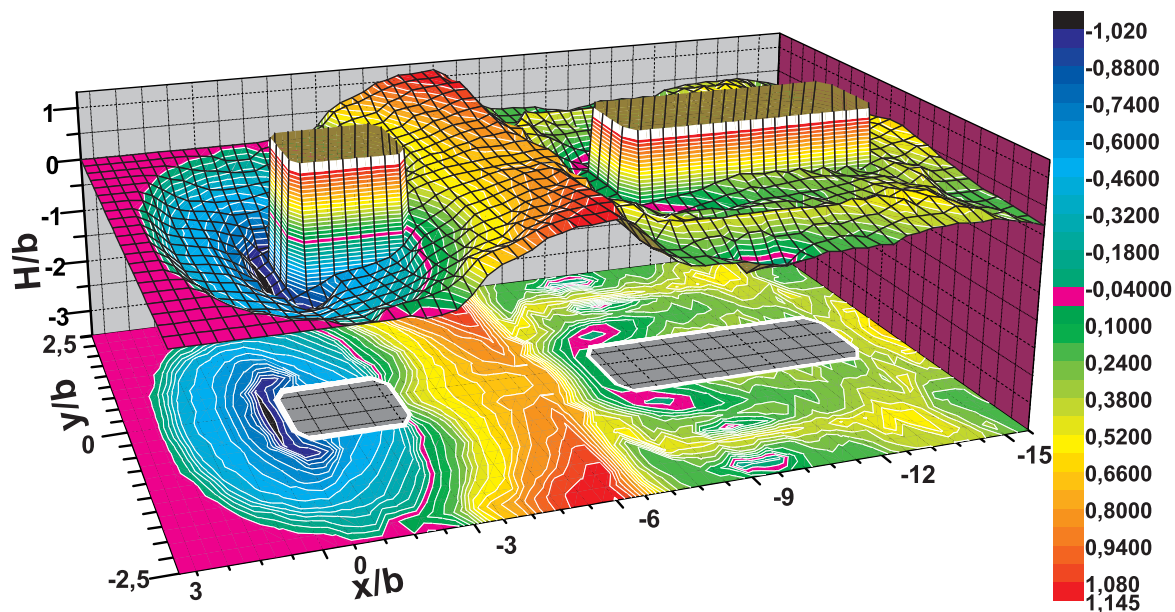


Рис. 7. Схема размыва грунта и участок рельефа дна, зарегистрированный при взаимодействии моделей опор двух мостовых переходов

размыва нормируется временем установившегося процесса ( $t/T_y$ ). Измерения проведены в сечении, параллельном боковой стенке опоры на удалении  $y = 0.75b$  от нее на различных расстояниях вдоль продольной оси. Кривая 1 соответствует значению  $x = 0.63b$ ; кривая 2 –  $x = 0$ ; кривая 3 –  $x = -b$ , а кривая 4 –  $x = -1.88b$ . Из приведенных результатов следует, что наибольший темп роста углубления наблюдается вблизи фронтальной стенки опоры (передняя грань опоры). В этом местоположении на грунт значительное воздействие оказывает ниспадающее течение вдоль фронтальной поверхности опоры, отрывное течение на боковой стенке опоры (зарождающееся на передней грани) и подковообразная вихревая структура, формируемая перед фронтальной стенкой опоры в нижней части полости размыва.

Схематически локальный размыв грунта, измеренный при исследовании обтекания призматических опор модели существующего железнодорожного мостового перехода, построенный в аксонометрии, показан на рис. 6. На рисунке координаты нормированы по ширине призматической опоры и данные получены для скорости потока 0.25 м/с и числа Фруда  $Fr = 0.15$ . Наибольшая глубина размыва наблюдается перед фронтальной плоскостью опоры и вблизи боковых граней. Верх-

ний склон фронтального углубления, находящийся выше по потоку, имеет меньший угол относительно горизонтальной оси, чем угол склона нижней части отверстия размыва. В области верхнего склона формируется подковообразная вихревая система, образуемая в зоне отрыва пограничного слоя. В нижней части размыва формируется другая квазиустойчивая подковообразная вихревая система, тесным образом связанная с ниспадающим течением вдоль фронтальной поверхности опоры, которое возникает при ударном взаимодействии набегающего потока с передней стенкой призматической опоры (см. рис. 1). Это взаимодействие, а также отрывное течение, зарождающееся на передних гранях опоры, которое формирует вертикально расположенные вихревые системы на боковых стенках опоры и действующие, как пылесос, образуют наибольшее углубление, охватывающее переднюю часть опоры в виде подковы. Кстати, наличие боковых отрывных вихрей приводит к появлению размыва первоначально вблизи передних боковых граней призматической опоры, что подобно наблюдениям, отмеченным в работе [5]. Подковообразные вихревые системы, развивающиеся в отверстии размыва, выносят грунт из отверстия и откладывают его позади опоры и по ее бокам, образуя дюны или рифели.

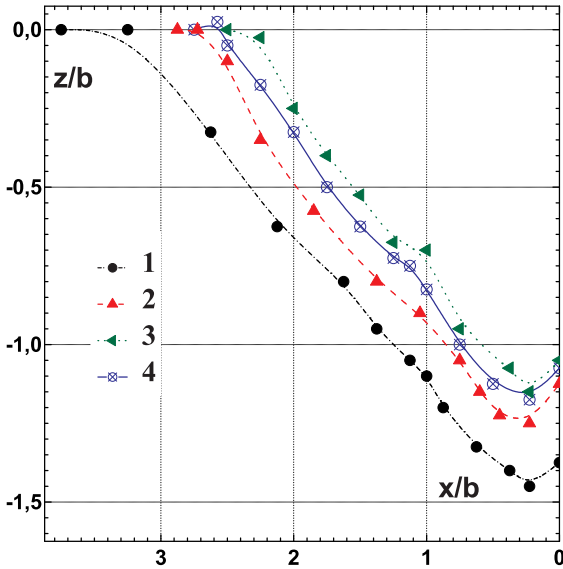


Рис. 8. Профиль локального размыва грунта в фронтальной плоскости осевой симметрии призматической опоры

Помещение многотрубчатой опоры в виде ростверка позади призматической опоры не меняет физику зарождения и формирования размыва перед призматической опорой, но воздействует на кормовую, следовую часть вихревого течения за опорой, что приводит к изменению рельефа грунта вблизи такого комплекса опор (рис. 7). Отложение песка позади призматической опоры приводит, практически, к минимальному размыву перед многотрубчатой опорой. В основном вблизи опор строящегося моста наблюдается намыв грунта, отложившегося в виде дюн и размывов по длине опоры. Наибольший размыв грунта вблизи опор строящегося моста наблюдается между первыми и вторыми боковыми трубчатыми опорами. Здесь взаимодействуют подковообразная вихревая система, огибающая всю мостовую опору в целом, подковообразные вихревые структуры, огибающие каждую трубчатую опору, и струеобразное течение, возникающее, главным образом, между первой и второй боковыми опорами. В области пятой – шестой трубчатой опоры (порядка  $(2...3)b$ , середина ростверка) обнаружен наибольший намыв грунта.

Профили локального размыва грунта в плоскости осевой симметрии перед фронтальной стенкой призматической опоры для различных глубин и скоростей потока показаны на рис. 8. Кривая 1 измерена для  $U = 0.27$  м/с и  $H = 0.2$  м; кри-

вая 2 – для  $U = 0.59$  м/с и  $H = 0.2$  м; кривая 3 – для  $U = 0.23$  м/с и  $H = 0.33$  м и кривая 4 – для  $U = 0.32$  м/с и  $H = 0.34$  м. Эти данные получены при исследовании размыва только перед одними опорами старого моста. Следует отметить, что профили размыва имеют два характерных участка с различными углами наклона углубления, которые обусловлены формированием двух систем квазиустойчивых крупномасштабных подковообразных вихревых структур. При этом глубже находящаяся вихревая структура, которая расположена ближе к опоре, имеет меньший масштаб, а, следовательно, и углубление под ней имеет меньшие линейные размеры. Перед опорой, в месте сопряжения поверхности опоры и дна на всех профилях регистрируется намыв грунта. С нашей точки зрения, углового вихря [4], обладающего противоположным направлением вращения, относительно подковообразных вихрей, существовать не должно. Он, зародившись при формировании углубления размыва, постепенно вырождается. По крайней мере, в условиях установившегося размыва и в осевом сечении симметрии опоры. Также между двумя подковообразными системами отсутствует, в установившемся режиме, противоположно вращающийся вихрь, поскольку на предполагаемом месте его формирования в профиле размыва наблюдается намыв песка. Этот намыв песка разделяет два склона углубления и при визуальном наблюдении имеет довольно четкие очертания, хотя и носит осциллирующий в пространстве характер, соответствующий частотам колебаний вихревых структур. Итак, с увеличением скорости обтекания и уменьшением глубины потока, размыв увеличивается. Ширина отверстия размыва почти в  $(2...2.5)$  раза больше глубины размыва и максимальная глубина размыва наблюдается перед опорой на удалении порядка  $0.25b$ .

Нахождение строящегося мостового перехода ниже по течению опор существующего моста привело к изменениям в профилях, которые показаны на рис. 9 для разных глубин и скоростей потока. Кривая 1 получена для  $U = 0.17$  м/с и  $H = 0.17$  м; кривая 2 – для  $U = 0.30$  м/с и  $H = 0.19$  м; кривая 3 – для  $U = 0.57$  м/с и  $H = 0.18$  м; кривая 4 – для  $U = 0.16$  м/с и  $H = 0.31$  м; кривая 5 – для  $U = 0.20$  м/с и  $H = 0.34$  м и кривая 6 – для  $U = 0.31$  м/с и  $H = 0.32$  м. Как отмечалось ранее, взаимодействие двух конструкций мостовых опор не приводит к существенным изменениям в процесс формирования размыва перед призматической опорой. На размыв большее влияние оказывают подковообразные вихре-



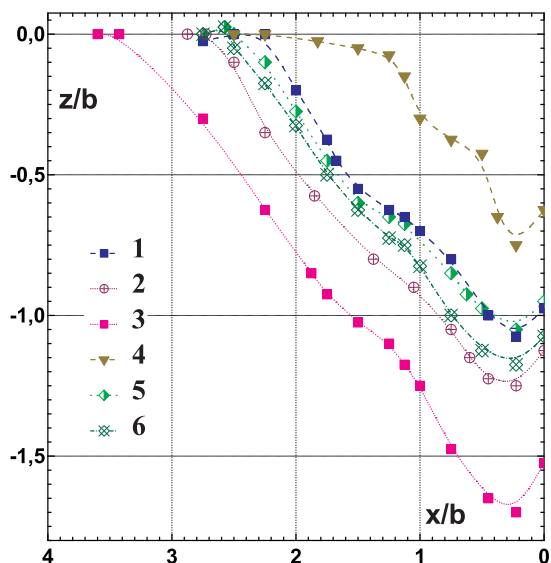


Рис. 9. Профиль локального размыва грунта при исследовании совместного расположения моделей двух мостовых переходов

вые системы, формируемые при отрыве пограничного слоя с верхней передней кромки углубления и при ударном взаимодействии набегающего потока и фронтальной поверхности опоры. При сопоставлении профилей размыва, приведенных на рис. 8 и 9, можно отметить следующее. Помещение в поток опор строящегося моста приводит к углублению размыва грунта перед призматической опорой на 15% при сверхкритических скоростях потока ( $U/V_c \approx 1.8$ ) и неглубокой воде (например, кривая 2 на рис. 8 и кривая 3 на рис. 9). Этот режим обтекания соответствует случаю течения с перемещаемым грунтом. Для режима обтекания чистой воды ( $U/V_c < 1$ ) глубина размыва перед опорой старого моста уменьшается почти на 20 % (кривая 4 на рис. 8 и кривая 6 на рис. 9) при совместном исследовании двух мостовых переходов.

Изменение максимальной глубины локального размыва перед призматической опорой в зависимости от скорости набегающего потока представлено на рис. 10. Здесь кривые 1 и 2 соответствуют измерениям глубины для исследования совместного обтекания опор двух мостовых переходов для мелкой ( $H \approx 5b$ ) и глубокой ( $H \approx 8b$ ) воды. Кривые 3 и 4 отвечают подобным измерениям, но при исследовании размыва только для опор старого мостового перехода. Измеренные точки, обозначенные индексами 5 и 6, отвечают данным [15]

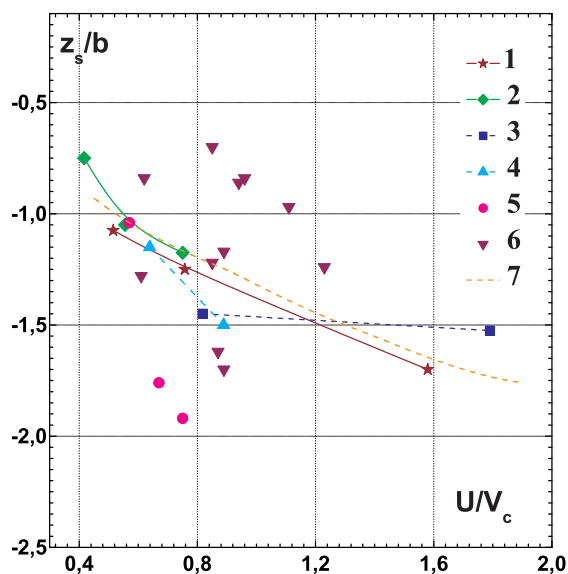


Рис. 10. Максимальная глубина локального размыва грунта перед призматической опорой в зависимости от среднерасходной скорости набегающего потока

и [16, 20] соответственно, полученным при обтекании одиночных цилиндрических опор для сопоставимых с нашими чисел Фруда, Рейнольдса,  $H/b$  и  $b/d_{50}$ . Кривая 7 получена по зависимости НЕС–18, рекомендованной и используемой в США при исследовании обтекания опор мостовых переходов для условий чистой воды [12, 21, 22]. Из представленных результатов следует, что с увеличением скорости обтекания максимальная глубина локального размыва вблизи фронтальной поверхности опоры возрастает. Наибольший темп роста глубины наблюдается для докритических скоростей. При скоростях, близких к критической скорости переноса размываемого грунта, максимальная глубина размыва соответствует почти  $1.5b$  для исследуемых режимов обтекания, геометрических размеров опор и глубин потока, а также зернистости песчаного грунта.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

На основе экспериментальных исследований характерных особенностей зарождения и формирования локального размыва грунта вблизи моделей мостовых опор, находящихся в следе друг за другом, можно сделать следующие выводы:

1. Локальный размыв грунта, формируемый в носовой (фронтальной) области обтекания при-

зматической опоры при докритическом режиме течения, обусловлен взаимодействием подковообразных вихревых структур, огибающих опору, ниспадающим течением жидкости вдоль фронтальной поверхности опоры, а также боковыми вертикальными вихревыми системами, зарождающимися при отрыве потока с передних граней опоры старого моста.

2. Установлено, что для исследуемых режимов обтекания, геометрии и конфигурации опор, а также характера придонного грунта, установившийся процесс формирования локального размыва наступает при безразмерном времени измерений, превышающем  $4 \cdot 10^4$ . Наибольшая глубина размыва грунта наблюдается вблизи фронтальной стенки призматической опоры и при достижении среднерасходной скорости потока значения критической скорости начала перемещения грунта глубина размыва близка к полутора ширинам призматической опоры.

3. Обнаружено, что при установившемся режиме обтекания в плоскости осевой симметрии опоры отверстие локального размыва образуется в виде двух склонов отложения песчаного грунта. Верхний склон фронтального углубления, находящийся выше по потоку, имеет меньший угол наклона относительно горизонтальной оси, чем угол склона нижней части отверстия размыва, прилегающий к передней поверхности опоры. Зафиксировано, что ширина отверстия размыва почти в 2.5 раза больше глубины размыва и максимальная глубина размыва наблюдается перед призматической опорой на удалении порядка четверти ее ширины.

4. Установлено, что в отверстии локального размыва грунта перед призматической опорой для исследуемого режима обтекания формируются две квазиустойчивые крупномасштабные подковообразные вихревые структуры. Первая из них возникает 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 опоры и формирует нижний склон углубления. Между подковообразными системами и в угловой области сопряжения дна углубления и передней поверхности опоры не зарегистрировано противоположно вращающихся вихревых структур при установившемся режиме развития размыва. В этих зонах локального углубления зафиксировано отложение песчаного грунта в виде местных наносов.

5. Обнаружено, что локальный размыв грунта

в условиях установившегося процесса вблизи конструкции трехрядной многотрубчатой опоры в виде ростверка обусловлен: а) формированием подковообразной вихревой структуры, которая огибает переднюю часть ростверка, как единое целое, б) развитием подковообразных вихрей, зарождающихся вокруг каждой цилиндрической опоры, составляющей ростверк, и в) струеобразным течением, возникающим между передними боковыми трубчатыми опорами. Наибольший размыв грунта зарегистрирован вблизи первой и второй боковыми опорами многотрубчатой конструкции, а максимальное отложение песка в виде дон зафиксировано вблизи срединного поперечного сечения ростверка.

6. Установлено, что размещение многотрубчатой опоры в виде ростверка позади призматической опоры не меняет физику процесса зарождения и формирования локального размыва грунта перед призматической опорой, но воздействует на кормовую, следовую часть вихревого течения за первой по потоку опорой, что приводит к изменению рельефа дна вблизи такого комплекса мостовых опор. Отложение песка позади призматической опоры приводит к минимальному размыву грунта перед многотрубчатой опорой. Локальный размыв грунта перед призматической опорой старого моста возрастает почти на 15% при сверхкритических скоростях потока ( $U > V_c$ ) на мелкой воде и уменьшается почти на 20% при докритических скоростях на глубокой воде при взаимном расположении двух мостовых переходов, находящихся в следе друг за другом.

Авторы признательны канд. физ.-матем. наук Горбаню В.А., канд. физ.-матем. наук Островерху Б.Н., канд. физ.-матем. наук Хомицкому В.В. за активное участие в постановке задач, анализе данных и обсуждении полученных результатов, а также сотрудникам Гидравлической лаборатории Ивахову В.П., Романенко П.Ю. и Харченко А.Г. за помощь при изготовлении экспериментального оборудования, приемных элементов и за участие в проведении экспериментальных исследований.

1. Kothyari U. C., Ranga Raju K. G. Scour around spur dikes and bridge abutments // J. Hydraul. Res.– 2002.– **39**, N 4.– P. 367–374.
2. Baker C. J. The turbulent horseshoe vortex // J. Wind Engng Industr. Aerodynam.– 1980.– N 6.– P. 9–23.
3. Dargahi B. Flow field and local scouring around a cylinder.– Stockholm, Sweden: Royal Institute of Technology, 1987.– 47 p.
4. Dargahi B. Controlling mechanism of local scouring // J. Hydraul. Engng.– 1990.– **116**, N 10.– P. 1197–1214.

5. Melville B. W. Pier and abutment scour: Integrated approach // *J. Hydraul. Engng.*– 1997.– **123**, N 2.– P. 125–136.
6. Salaheldin T. M., Imran J., Chaudhry M. H. Numerical modeling of three-dimensional flow field around circular piers // *J. Hydraul. Engng.*– 2004.– **130**, N 2.– P. 91–100.
7. Kirkil G., Constantinescu G., Ettema R. The horseshoe vortex system around a circular bridge pier on equilibrium scoured bed // *World Water and Environmental Resources Congress, EWRI.*– Alaska, 2005.– P. 1–12.
8. Zhang X., Liu Z., Liang C., Fu Q. Application of energy approach to estimating scour depth // *Nature and Science.*– 2004.– **2**, N 2.– P. 77–82.
9. Muzzammil M., Gangadhariah T. The mean characteristics of horseshoe vortex at a cylindrical pier // *J. Hydraul. Res.*– 2003.– **41**, N 3.– P. 285–297.
10. Ettema R., Nakato T., Muste M. An overview of scour types and scour-estimation difficulties faced at bridge abutments // *Proc. 2003 Mid-Continent Transportation Research Symposium.*– Ames, Iowa, 2003.– P. 1–11.
11. Raudkivi A. J. Functional trends of scour at bridge piers // *J. Hydraulic Division.*– 1986.– **112**, N 1.– P. 37–49.
12. Richardson E. V., Briaud J.-L., Buchanan S. J. United States practice for bridge scour analysis // *Mitteilungsblatt der Bundesanstalt für Wasserbau.*– 2002.– N 85.– P. 71–97.
13. Sumer B. M., Bundgaard K., Fredsøe J. Global and local scour at pile groups // *Int. J. Offshore Polar Engng.*– 2005.– **15**, N 3.– P. 204–209.
14. Laursen E. M. An analysis of relief bridge scour // *J. Hydraulic Division.*– 1963.– N 89.– P. 93–118.
15. Sturm T., Sotiropoulos F., Landers M., Gotvald T., Lee S.-O., Ge L., Navarro R., Escauriaza C. Laboratory and 3D numerical modelling with field monitoring of regional bridge scour in Georgia // *GDOT Res. Project No 2002.*– Atlanta, 2004.– P. 1–158.
16. Sheppard D. M. Large scale and live bed local pier scour experiments: Phase 1. Large scale, clearwater scour experiments // *FDOT Centr. No BB-473, Final Rep.*– Univ. Florida, 2003.– P. 1–199.
17. Miller W. Jr. Model for the time rate of local sediment scour at a cylindrical structure.– PhD Thesis: Univ. Florida, 2003.– 226 p.
18. Ansari S. M., Kothyari U. C., Ranga Raju K. G. Influence of cohesion on scour around bridge piers // *J. Hydraul. Res.*– 2002.– **40**, N 6.– P. 717–729.
19. Constantinescu G., Koken M. Time dependent and time averaged turbulence structure of flow past a surface mounted cylinder // *Proc. 4-th Int. Conf. on Computational Heat and Mass Transfer.*– Paris-Cachan, France, 2005.– P. 139.1–139.3.
20. Sheppard D. M. Large scale and live bed local pier scour experiments: Phase 2. Live bed experiments // *FDOT Centr. No BB-473, Final Rep.*– Univ. Florida, 2003.– P. 1–28.
21. Richardson E. V., Harrison J. H., Davis S. R. Evaluating scour at bridges.– *Hydraulic Engineering Circular 18, Federal Highway Administration Publication No FHWA-IP-90-017, HEC-18.* Washington, DC, 1991.– 177 p.
22. Huizinga R. J., Rydlund P. H. Jr. Potential-scour assessments and estimates of scour depth using different techniques at selected bridge sites in Missouri.– *US Geological Survey Scientific Investigations Rep. 2004-5213.* Denver, 2004.– 42 p.