

УДК 532.5

УГЛОВОЕ ОБТЕКАНИЕ ДВУХ МОДЕЛЕЙ МОСТОВЫХ ПЕРЕХОДОВ

*А. А. Воскобойник**Институт гидромеханики НАН Украины, г. Киев*

Экспериментально исследованы особенности генерации крупномасштабных вихревых структур, формирующих подковообразную вихревую систему, при следном обтекании моделей двух мостовых переходов. Определены масштабы и месторасположение вихревых структур, а также кинематические и динамические характеристики поля скоростей вблизи модели трехрядного свайного ростверка, расположенного за призматической опорой, при их угловом и осесимметричном обтекании. Визуальные исследования позволили установить области формирования локального и глобального размывов перед мостовыми опорами, изучить их эволюцию и области максимальных касательных напряжений. Показано, что при угловом обтекании моделей, значения скоростей вблизи трехрядного свайного ростверка увеличились, по сравнению с их осесимметричным обтеканием.

Ключевые слова: групповая мостовая опора, угловое обтекание, поле скорости, когерентные вихревые структуры.

Введение. Мостовые конструкции представляют собой местные преграды для речного потока. Использование комплексных или групповых опор при строительстве мостовых переходов приводит к локальному размыву отдельных опор и глобальному размыву грунта вокруг мостовой конструкции в целом. Глобальный размыв обусловлен действием подковообразных вихревых структур, охватывающих всю сложную мостовую конструкцию. Механизм генерации и формирования таких подковообразных вихрей идентичен тому, который присущ для одиночных опор, но при обтекании комплексных опор присутствует взаимодействие между вихревыми потоками, генерируемыми вблизи каждого элемента мостовой конструкции. Вихревое взаимодействие зависит от ряда гидродинамических и гидрологических параметров и существенно изменяется от формы и конструкции групповой опоры, что накладывает определенные ограничения на численные и экспериментальные оценки особенностей генерации и развития вихревых структур вблизи опор и их действия на прилегающий грунт [1 – 3].

Известно, что вокруг мостовой опоры существует довольно широкий диапазон турбулентных масштабов, которые управляют процессом переноса грунта. Таким образом, чтобы понять механизм размыва, в первую очередь, необходимо качественно описать структуру когерентных вихрей, формирующих подковообразную систему, в различных режимах течения и количественно охарактеризовать эту особенность потока вблизи основания опоры.

Отрыв набегающего пограничного слоя и формирование отрывной (застойной) линии на поверхности дна вокруг опоры является следствием неблагоприятного градиента давления, обусловленного наличием опоры. Установлено [4 – 6], что продольные неблагоприятные градиенты давления являются основными причинами формирования подковообразных вихрей вокруг фронтальной части основания опоры. Подковообразные вихри являются следствием реорганизации завихренности пограничного слоя вниз по потоку от отрывной линии. Первичная подковообразная вихревая структура имеет то же направление вращения, что и завихренность в набегающем пограничном слое. Подковообразный вихрь вытягивается вокруг опоры и изгибается вокруг ее передней части вблизи дна, частично из-за поперечных градиентов давления. Следовательно, боковые вихревые линии становятся ориентированными в продольном направлении, огибая опоры, и имеют завихренность, противоположно направленную по обеим боковым сторонам обтекаемой опоры. Крупномасштабные подковообразные вихри переносят более высокоскоростную жидкость вдоль фронтальной части опоры по направлению ко дну, формируя ниспадающее течение. Как результат взаимодействия между ниспадающим течением, дном и подковообразным вихрем сопротивление вокруг фронтальной части опоры увеличивается. В случае набегающего турбулентного течения местоположение, масштаб и интенсивность подковообразных вихрей сильно изменяется во времени. Они генерируют высокую турбулентность и пульсации давления и образуют значительные касательные напряжения на дне, приводя к размыву грунта вблизи обтекаемых опор [7].

Эволюция подковообразной вихревой системы вокруг основания обтекаемого тела и неустойчивый след позади него является общими явлениями, которые имеют место в большинстве измерений динамики подобных течений, хотя ряд отличий сопряженных течений существенно изменяются в зависимости от параметров потока и формы плохообтекаемых тел [1, 5]. Экспериментальные исследования [1, 5] показывают, что структура подковообразной вихревой системы сильно зависит от числа Рейнольдса и характеристик пограничного слоя, который формируется перед обтекаемой преградой. Структура подковообразной вихревой системы для режима ламинарного обтекания состоит из трех основных вихрей, которые вращаются в одном направлении. Вихрь, который развивается, зарождается на позиции, которая находится на наибольшем расстоянии от поверхности обтекаемой опоры. Первичный вихрь располагает-

ся в средней позиции, в то время как угловой вихрь находится ближе всего к опоре. Развивающийся вихрь порождается пограничным слоем, который отрывается от обтекаемой поверхности дна, из-за интенсивного неблагоприятного градиента давления, генерируемого наличием опоры на обтекаемой поверхности. Этот вихрь постепенно переносится вниз по потоку и, в конце концов, становится новым первичным вихрем. В это время первичный вихрь конвектирует по направлению к угловому вихрю и постепенно сливается с ним. Как показывают исследования [8], процесс этот является периодическим.

Из-за сложности комплексных конструкций, включающих в себя обтекание ансамбля препятствий, установленных на сопрягаемой поверхности, их исследования не многочисленны. Так, например, в работах [8, 9] выполнены экспериментальные измерения течения вокруг системы кубов, которые были установлены на плоскую поверхность. Установлено, что для малых расстояний между кубами сдвиговый слой, оторвавшийся от первого куба, присоединяется на сторонах второго препятствия и регистрируется периодический сход вихрей только в следе нижнего за потоком куба. Таким образом, два куба действуют, как одно плохообтекаемое тело. В работе [8] наблюдали осцилляции вихревого потока в промежутке между кубами и явление следовой синхронизации для трехмерной тандемной геометрии. В работе [9] авторы показали характерные особенности поля осредненной скорости в диапазоне синхронизации и механизм схода следа на разных фазах цикла схода. Для больших разделений появляется второй подковообразный вихрь перед фронтальной частью второго куба и каждый из кубов обтекается, как независимое препятствие [10].

Учитывая выше приведенное, актуальным остается исследование взаимодействия вихревых структур и струйных течений при следном обтекании многосвайной конструкции. Этой проблематике посвящены представленные экспериментальные исследования обтекания групповой модели призматической опоры и трехрядного свайного ростверка, расположенных под углом 5° к набегающему потоку, и изучение особенностей формирования и динамики подковообразных вихревых структур, образующихся при обтекании этой конструкции двух мостовых переходов. (Опоры существующего железнодорожного моста на р. Днепр в г. Киеве и свайного ростверка строящегося автомобильно-железнодорожного моста).

Экспериментальная установка и методика измерений. Проведение экспериментальных исследований было осуществлено в гидродинамическом лотке длиной 14 м, шириной 0,8 м и глубиной до 0,8 м со свободной поверхностью воды. Детальное описание экспериментальной установки, программы и методики исследований вихревого течения при сопряженном обтекании трехрядного цилиндрического ростверка на плоской поверхности приведено в работе [11]. Поэтому в данном исследовании приведено лишь краткое описание основных элементов экспериментального стенда и методики опытов, которые относятся к инструментальным измерениям полей скорости вихревого течения вблизи моделей обтекаемых опор. Итак, вода в гидродинамический лоток подавалась с помощью насосов через отстойную камеру, диффузор, хонейкомбы и решетки, спрямляющие поток. На дне измерительного участка, расположенного посередине лотка, были установлены две модели мостовых опор, смонтированных по оси плоской пластины длиной 2 м (рис. 1). Модель призматической опоры располагалась выше по потоку, чем модель мостовой опоры в виде трехрядного свайного ростверка. Расстояние между моделями составляло около 0,4 м. Длина призматической опоры составляла 0,3 м, ширина – 0,1 м, а высота – 0,24 м. Длина ростверка была почти 0,6 м, ширина – 0,1 м, а высота – 0,2 м и он состоял из 31 цилиндрической сваи диаметром $d = 0,027$ м, которые располагались в три ряда в шахматном порядке. Глубина потока в опытах была постоянной и равнялась 0,2 м, а его скорость (U_∞) составляла 0,1 м/с.

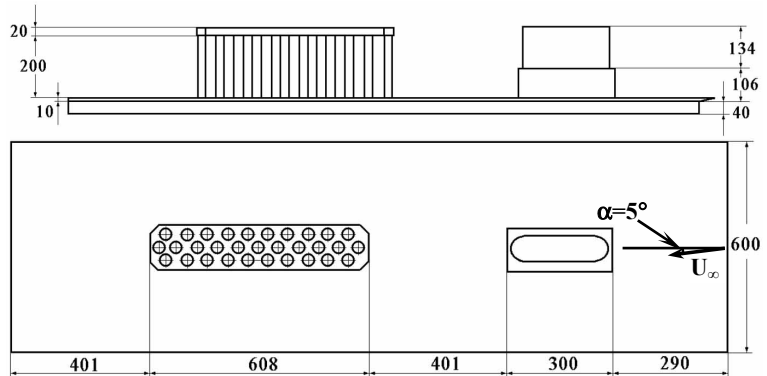


Рис. 1. Схема двух мостовых опор и их размещение на пластине при

Числа Рейнольдса и Фруда составляли $Re_x = xU_\infty/\nu = 10^5$, $Re_d = dU_\infty/\nu = 2,7 \cdot 10^3$ и $Fr = U_\infty / \sqrt{gH} = 0,067$, соответственно, где x – продольное расстояние в направлении потока от начала плоской пластины до первой центральной сваи ростверка, ν – коэффициент кинематической вязкости воды, g – ускорение свободного падения и H – глубина потока.

Качественная оценка пространственных и временных характеристик вихревого движения вблизи трехрядного ростверка и степени его взаимодействия с обтекаемой поверхностью, согласно разработанной программе и методике опытов [11], проводились во время визуальных исследований. В местах, где наблюдаются характерные когерентные вихревые структуры в виде подковообразных вихрей и следных

вихревых структур, проводились инструментальные измерения поля скорости.

Кинематические характеристики сопряженного течения измерялись с помощью специально разработанных и изготовленных миниатюрных термисторных датчиков скорости и пьезорезистивных датчиков скоростного напора. Термисторные датчики скорости (диаметр чувствительной поверхности 0,008 м) монтировались с помощью специальных державок в корреляционный блок (с фиксированным расстоянием между двумя датчиками). Контроль скорости потока осуществлялся с помощью манометрического датчика типа трубки Пито двойного напора, где в качестве чувствительного элемента применялся пьезорезистивный датчик полного давления. Электрические сигналы, генерируемые датчиками под действием соответствующих нагрузок, поступали на усиливающую и контрольно измерительную аппаратуру, а затем на средства регистрации информации и персональные компьютеры через соответствующие аналого-цифровые преобразователи. На персональных компьютерах и на специализированных двухканальных анализаторах спектров фирмы Брюль и Кьер экспериментальные данные обрабатывались и анализировались с помощью стандартных и специально разработанных программ с использованием теории вероятности и математической статистики.

Все средства измерения, контроля и регистрации информации перед применением, во время проведения опытов и после выполнения их тестировались и калибровались согласно паспортным данным и методике проведения опытов. Датчики аттестовались и поверялись с помощью абсолютных и относительных методов на специальных стендах и на соответствующем оборудовании. Погрешность измерений интегральных и осредненных значений скорости не превышала 4% (при надежности $P = 0,95$), пульсационных ее составляющих – до 6 %.

Результаты измерений. Визуальные наблюдения. Визуальные наблюдения углового (под углом 5°) обтекания двух моделей мостовых опор, расположенных в следе друг за другом, проводились при скорости набегающего потока равной $U_\infty = 0,1$ м/с. Время наблюдения составляло около (15 – 20) минут. Эволюцию размыва контрастного покрытия, в виде пленок высохшего сгущенного молока, качественно характеризующую касательные напряжения на обтекаемой поверхности, обусловленные действием вихревых структур и ниспадающим течением, можно описать следующим образом:

$t = (0 - 1)$ – начинается смыв пленки сгущенного молока в передней части призматической опоры, образуя за ней отрывные вихри. Значительное количество смываемого сгущенного молока уносится потоком к, стоящей в следе, модели опоры трехрядного свайного ростверка. Размыв контрастного покрытия в окрестности модели ростверка пока не наблюдается, т.е. пленка сгущенного молока еще сохраняется;

$t = (1 - 3)$ – перед моделью свайного ростверка начинается размыв контрастного покрытия вблизи первой и второй боковых опор (с наветренной стороны конструкции). Около остальных опор ростверка размыва нет, так как идет значительный нанос смываемого сгущенного молока от призматической опоры, расположенной выше по потоку;

$t = (3 - 4)$ – продолжается размыв контрастного покрытия перед призматической опорой и вблизи передних, а также около боковых опор в кормовой части ростверка, с наветренной стороны, см. рис. 2, а;

$t = (4 - 6)$ – за призматической опорой формируются следные вихри, образующие симметричную вихревую дорожку Кармана. Смываемое сгущенное молоко, объединенное в вихревые структуры, уносится вниз по потоку к свайному ростверку. Продолжаются размывы контрастного покрытия около передних свай и в кормовой части, с наветренной стороны ростверка, см. рис. 2, б;

$t = (6 - 9)$ – перед моделью трехрядного свайного ростверка наибольшие размывы контрастного покрытия (до $0.5d$) наблюдаются около передних свай, а также в кормовой части вблизи последних боковых цилиндрических опор (с наветренной стороны ростверка). С подветренной части модели ростверка размывы сгущенного молока незначительные;

$t = (9 - 12)$ – в передней части призматической опоры наблюдаются большие размывы контрастного покрытия в виде следов системы подковообразных вихрей. След первого вихря располагается у самой опоры, его ширина порядка $(3 - 4) \cdot 10^{-2}m$ или $(0,26 - 0,35)b$. След второй вихревой системы находится на расстоянии $(5 - 6) \cdot 10^{-2}m$ или $(0,44 - 0,53)b$ от опоры, ее ширина около $(1 - 2) \cdot 10^{-2}m$ или $(0,09 - 0,18)b$. Расстояние между этими размывами $(0.5 - 1) \cdot 10^{-2}m$ или $(0,04 - 0,09)b$. Оба подковооб-

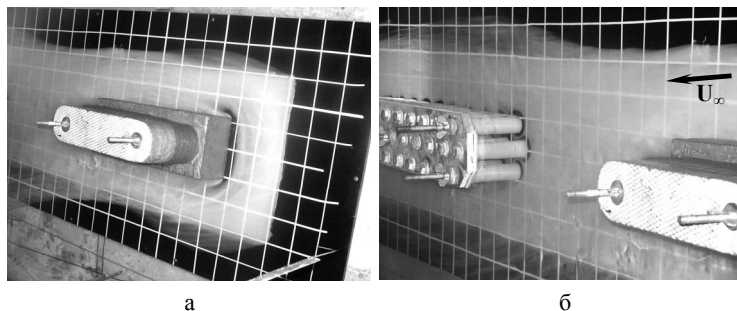


Рис. 2. Эволюция размыва контрастного покрытия при угловом обтекании двух мостовых переходов:
а) $t - (3 - 4)$ минута и б) $t - (4 - 6)$ минута

разных вихря огибают опору под углом ($20^\circ - 50^\circ$) с подветренной стороны и, под углом ($10^\circ - 40^\circ$) с наветренной стороны модели ростверка, см. рис. 3, а;

$t = (12 - 15)$ – значительные размывы контрастного покрытия наблюдаются в передней части призматической опоры. В кормовой части опоры сгущенное молоко еще сохраняется. Вблизи опоры в виде ростверка более всего размывто покрытие около передних цилиндрических свай, а также с наветренной стороны у боковых свай в кормовой части опоры. Неразмывтым покрытие остается за самой мостовой моделью и, с подветренной стороны у боковых свай в средней части опоры, см. рис. 3, б;

$t = (15 - 20)$ – процесс размыва контрастного покрытия в окрестности двух мостовых опор принял установившийся характер – новые области размыва покрытия не наблюдаются.

Визуальные исследования показали, что при угловом обтекании двух мостовых моделей, наибольшие размывы контрастного покрытия зафиксированы – для призматической опоры, в передней части опоры и в передней боковой части опоры. В кормовой части призматической опоры размывы незначительные. Для модели трехрядного свайного ростверка зафиксированы размывы в передней части опоры и в кормовой части опоры с наветренной стороны.

Инструментальные измерения. Все инструментальные измерения проводились только вблизи модели трехрядного свайного ростверка. Измерения были проведены перед первой и второй центральными сваями, а также перед второй боковой сваем модели ростверка. Экспериментальные измерения проводились при скорости набегающего потока $U_\infty = 0,1$ м/с, глубине потока $h = 0,2$ м, угле атаки $\alpha = 5^\circ$.

При угловом обтекании перед первой центральной опорой скорости увеличились, по сравнению с осесимметричным обтеканием двух мостовых конструкций. Результаты исследований показали, что перед самой опорой в местоположении ($x = -0,08d$; $y = 0,08d$; $z = 0$) средняя скорость увеличилась на (7 – 12)%, а на удалении от нее по направлению к призматической опоре – более чем в 2 раза. Так, например, при осевом следном обтекании моделей двух мостовых переходов скорость в районе $x = -(10 - 12) \cdot 10^{-3}$ м или $x = -(0,37 - 0,44)d$; $y = (6 - 8) \cdot 10^{-3}$ м или $(0,22 - 0,30)d$; $z = 0$ составляет около $0,3U_\infty$, а при угловом обтекании - $0,75U_\infty$. Кроме того, расположение и масштаб первой вихревой структуры из подковообразной системы, наиболее удаленной от конструкции ростверка, с координатами $x = -10 \cdot 10^{-3}$ м или $-0,37d$; $y = 4 \cdot 10^{-3}$ м или $0,15d$; $z = 0$, практически не изменился. В то же время скорости этого вихря, как осредненные, так и пульсационные возросли. Вторая вихревая структура подковообразной системы при угловом обтекании переместилась вдоль поверхности опоры почти в 2 раза выше над плоской пластиной. Координаты этого вихря составляют: $x = 4 \cdot 10^{-3}$ м или $0,15d$; $y = 6 \cdot 10^{-3}$ м или $0,22d$; $z = 0$, а масштаб его уменьшился до $4 \cdot 10^{-3}$ м или $0,15d$, как в продольном, так и в вертикальном направлениях.

Изменения средних скоростей в ядре и на периферии вихревых структур, формирующих подковообразную систему и расположенных вблизи места сопряжения первой центральной опоры свайного ростверка и плоскости пластины, показаны на рис. 4. Здесь кривая 1 и кривая 2 представляет собой изменения во времени осредненных скоростей, которые измерены в ядре и на периферии, соответственно, второй вих-



Рис. 3. Эволюция размыва контрастного покрытия при угловом обтекании двух мостовых переходов: а) $t = (9 - 12)$ минута, б) $t = (12 - 15)$ минута

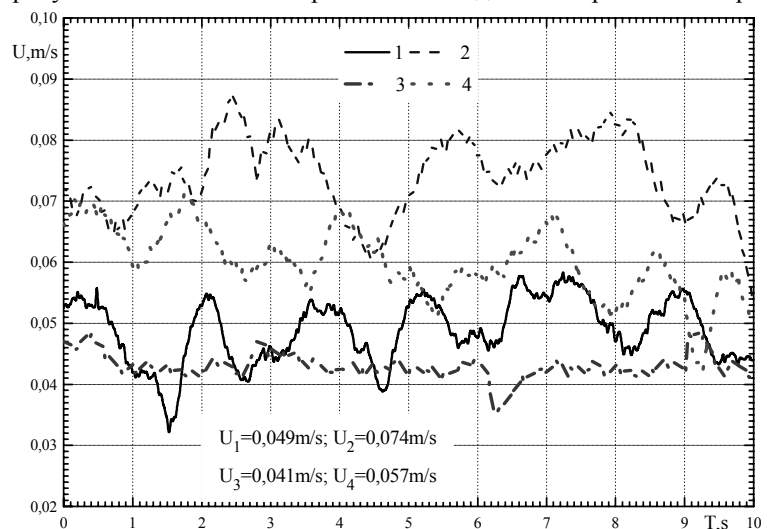


Рис. 4. Средние скорости в ядре и на периферии вихревых структур перед первой центральной опорой свайного ростверка при угловом и осесимметричном обтекании

ревой структуры при угловом обтекании групповой конструкции. Кривая 1 измерена в точке с координатами ($x = -0,15d$; $y = 0,22d$; $z = 0$), а кривая 2 – в точке ($x = -0,3d$; $y = 0,28d$; $z = 0$). Кривая 3 и кривая 4 измерены также в ядре и на периферии ближайшей к опоре вихревой структуры подковообразной системы, для которых координаты были следующими $x = -0,15d$; $y = 0,15d$; $z = 0$ (ядро вихря) и $x = -0,3d$; $y = 0,22d$; $z = 0$ – его периферия. Исследования показывают, что при угловом обтекании моделей мостовых переходов увеличиваются средние скорости как в ядре вихря, ближайшем к опоре, так и на его периферии в среднем на 20 % и 30 %, соответственно. При этом в ядре этого вихря интенсивно растут низкочастотные колебания скорости, обусловленные взаимодействием локальных и глобальных подковообразных систем со следными вихрями.

Как показали результаты экспериментальных исследований, перед второй центральной опорой значения средних скоростей также возросли, особенно ближе к середине между центральными опорами, и достигли $(0,9 - 0,95)U_\infty$. Линии равных скоростей имеют незамкнутый периодически осциллирующий характер и только возле самого дна замыкаются в вихревую систему, которая имеет приплюснутый ко дну вид. Центр этой вихревой структуры имеет координаты $x = -5 \cdot 10^{-3}$ м или $-0,19d$; $y = 3 \cdot 10^{-3}$ м или $0,11d$; $z = 0$ и скорость в ядре этого вихря составляет около $0,7U_\infty$. Масштаб этой вихревой структуры следующий: $\lambda_x = 8 \cdot 10^{-3}$ м или $0,3d$ и $\lambda_y = 5 \cdot 10^{-3}$ м или $0,19d$.

Перед второй боковой опорой с подветренной стороны трехсвайного ростверка скорости возросли до $(0,8 - 0,85)U_\infty$ ближе к срединному сечению между первой и второй боковыми опорами, а возле самой второй боковой опоры средняя скорость составляет порядка $0,75U_\infty$. Линии равных скоростей в месте сопряжения боковой опоры с пластиной образуют две замкнутые области с центрами $x = -11 \cdot 10^{-3}$ м или $-0,41d$ от второй боковой опоры; $y = 4 \cdot 10^{-3}$ м или $0,15d$; $z = 38 \cdot 10^{-3}$ м или $1,41d$ и $x = -5 \cdot 10^{-3}$ м или $-0,19d$; $y = 3 \cdot 10^{-3}$ м или $0,11d$; $z = 38 \cdot 10^{-3}$ м или $1,41d$. Радиусы этих вихрей составляют около $2 \cdot 10^{-3}$ м или $0,8d$ в горизонтальном направлении и около $3 \cdot 10^{-3}$ м или $0,11d$ – в вертикальном. В то же время для осесимметричного обтекания групповой конструкции мостовых опор перед второй боковой опорой ростверка была обнаружена только одна крупномасштабная вихревая структура подковообразной системы, которая имела масштаб $7 \cdot 10^{-3}$ м, как в горизонтальном, так и в вертикальном направлениях. Центр этой вихревой структуры находится на удалении порядка $x = -(9 - 11) \cdot 10^{-3}$ м или $x = -(0,33 - 0,41)d$ от боковой опоры и на расстоянии $y = (5 - 6) \cdot 10^{-3}$ м или $(0,21 - 0,22)d$ от поверхности плоской пластины. Таким образом, при угловом обтекании крупномасштабная вихревая структура перед второй боковой опорой свайного ростверка, генерируемая при осесимметричном обтекании групповой конструкции, разделилась на две меньшие по масштабу вихревые структуры, формирующие локальную подковообразную вихревую систему. Эта пара вихрей располагается перед второй боковой опорой почти на одной высоте от обтекаемой поверхности плоской пластины.

Для вихревой структуры, находящейся ближе ко второй боковой опоре при угловом обтекании групповой конструкции, и для вихревой структуры, огибающей вторую боковую опору при осесимметричном обтекании моделей двух мостовых переходов, изменения средних скоростей во времени показаны на рис. 5. Кривые 1 и 2 получены для углового обтекания групповой конструкции, соответственно, в ядре и на периферии вихря, а кривые 3 и 4 измерены для осесимметричного обтекания моделей мостовых опор. Координаты точек измерения: кривая 1 – ($x = 3d$; $y = 0,11d$; $z = 1,41d$), кривая 3 – ($x = 2,8d$; $y = 0,21d$; $z = 1,41d$), а

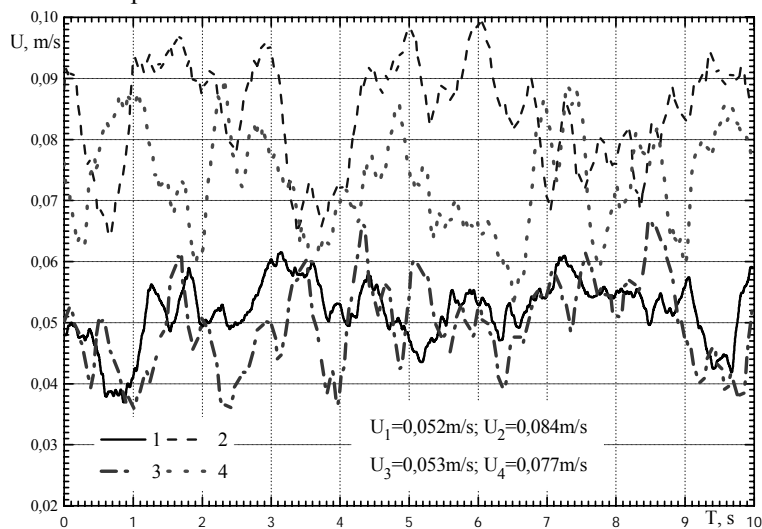


Рис. 5. Средние скорости в ядре и на периферии вихревых структур перед второй боковой опорой свайного ростверка при угловом и осесимметричном обтекании

кривые 2 и 4 – ($x = 2,85d$; $y = 0,19d$; $z = 1,41d$) и ($x = 2,7d$; $y = 0,24d$; $z = 1,41d$), соответственно. Как следует из представленных результатов, средние скорости в ядре вихревых систем при изменении режима обтекания, практически, не изменились (напомним, что при угловом обтекании точка измерений находилась на подветренной стороне ростверка). На наветренной стороне значения средних и пульсационных скоростей в окрестности боковых опор увеличиваются. На периферии вихревых структур локальных подковообразных систем в окрестности второй боковой опоры средняя скорость при угловом обтекании выросла почти на 10 % (см. кривую 2 и 4 на рис. 5).

Выводы Результаты экспериментальных исследований углового обтекания двух моделей мостовых переходов дали возможность сделать следующие выводы:

Обнаружено, что размыв контрастного покрытия, в первую очередь возникает перед призматической опорой, находящейся выше по потоку от модели ростверка, затем размыв начинается вблизи передних свай трехрядного ростверка, с наветренной стороны модели. По истечении (15 – 20) минут наибольшие участки размывов зафиксированы:

- перед призматической опорой в виде двух размывов следов от действия двух крупномасштабных вихревых структур, огибающих опору под азимутальным углом, приблизительно 35° с подветренной стороны и под углом около 25° с наветренной стороны;

- вблизи модели трехрядного ростверка, перед передними цилиндрическими сваями, а также в кормовой части, особенно, с наветренной стороны. В подветренной части ростверка наблюдаются незначительные размывы у передних боковых свай, а также в кормовой части модели.

Установлено, что перед первой центральной опорой ростверка значения скоростей (по сравнению с осесимметричным обтеканием) увеличились, перед самой опорой почти на 10%, а на удалении, ближе к призматической опоре более, чем в 2 раза. Перед этой опорой зафиксированы две вихревые структуры как при осесимметричном обтекании, так и при угловом обтекании. Размеры и масштаб первой вихревой структуры (наиболее удаленной от опоры) с изменением угла почти не изменился. Вторая вихревая структура при угловом обтекании переместилась вверх вдоль опоры, а масштаб этой структуры уменьшился. Значения средних скоростей, как в ядре этой вихревой структуры, так и на его периферии увеличились, в среднем на 20 % и 30 %, соответственно. При этом в ядре второй вихревой структуры подковообразной вихревой системы интенсивно растут низкочастотные колебания скорости, обусловленные взаимодействием локальных и глобальных подковообразных систем со следными вихрями.

Зафиксировано, что перед второй центральной опорой значения средних скоростей также возросли, особенно ближе к середине между центральными опорами, и достигли $(0,9 - 0,95)U_\infty$. Зарегистрирована вихревая система, которая имеет приплюснутый ко дну вид. Центр этой вихревой структуры имеет координаты $x = -0,19d$; $y = 0,11d$ и скорость в ядре этого вихря составляет около $0,7U_\infty$. Масштаб вихревой структуры следующий: $\lambda_x = 8 \cdot 10^{-3}$ м и $\lambda_y = 5 \cdot 10^{-3}$ м.

Установлено, что при угловом обтекании перед второй боковой опорой, с подветренной стороны ростверка, значения средних скоростей возросли до $(0,8 - 0,85)U_\infty$, а возле самой второй боковой опоры – до $0,75U_\infty$. Перед этой опорой зафиксированы две квазиустойчивые вихревые системы (при осесимметричном обтекании в этом месте была зарегистрирована одна, но более крупная вихревая система). Средние скорости в ядре вихревых систем при изменении режима обтекания, практически, не изменились. На периферии вихревых структур в окрестности второй боковой опоры средняя скорость при угловом обтекании выросла почти на 10 %. С наветренной стороны ростверка значения средних и пульсационных скоростей в окрестности боковых опор увеличиваются.

РЕЗЮМЕ

Експериментально досліджені особливості генерації великомасштабних вихревих структур, формуючих підковоподібну вихрову систему, при слідному обтіканні моделей мостових переходів. Визначені масштаби та місце розташування вихревих структур, а також кінематичні та динамічні характеристики поля швидкостей поблизу моделі трирядного пального ростверку, розташованого за призматичною опорою, коли вони обтікаються під кутом та вісесиметрично. Візуальні дослідження дозволили встановити області формування місцевого та глобального розмивів перед мостовими опорами, вивчити їхню еволюцію та області максимальних дотичних напруг. Показано, що при кутовому обтіканні моделей, значення швидкостей поблизу трирядного пального ростверку збільшились, в порівнянні з випадком, коли вони обтікаються вісесиметрично.

Ключові слова: групова мостова опора, кутове обтікання, поле швидкостей, когерентні вихрові структури.

SUMMARY

The features of generation of the large-scale vortex structures, which form the horseshoe vortex system, are investigated experimentally in the wake flow around two bridge models. Scales and locations of the vortex structures, as well as kinematical and dynamical characteristics of the velocity fields are determined near-the model of three-row pile grillage,

which is located behind the prismatic pier in the angular and axisymmetric flow. Visual study allows one to find the areas of forming of the local and global scours in front of the bridge piers, and study their evolution and areas of maximal wall shear stresses. It is shown that the values of velocities near the three-row pile grillage increased in the angular flow around of models compared to their axisymmetric flow values.

Keywords: group bridge pier, angular flow, velocity field, coherent vortex structures.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Ettema R. Similitude of large-scale turbulence in experiments on local scour at cylinders / R. Ettema, G. Kirkil, M. Muste // *J. Hydr. Eng.* – 2006. – Vol. 132, No 1. – P. 33-40.
2. Dargahi B. Controlling mechanism of local scouring / B. Dargahi // *J. Hydr. Eng.* – 1990. – Vol. 116, No 10. – P. 1197-1214.
3. Akilli H. Vortex formation from a cylinder in shallow water / H. Akilli, D. Rockwell // *Phys. Fluids.* – 2002. – Vol. 14. – P. 2957-2967.
4. Chen G. The effects of cylinder shape on the primary horseshoe vortex of juncture flow / G. Chen, X.D. Du, Q.D. Wei // 9th Symposium on Flow Visualization. – 2000. – Pap. 54. – 9 p.
5. Melville B.W. Pier and abutment scour: Integrated approach / B.W. Melville // *J. Hydr. Eng.* – 1997. – Vol. 123, No 2. – P. 125-136.
6. Numerical and experimental investigation of flow and scour around a circular pile / A. Roulund, B.M. Sumer, J. Fredsoe, J. Michelsen // *J. Fluid Mech.* – 2005. – Vol. 534. – P. 351-401.
7. Sahin B. Horseshoe vortex studies in the passage of a model plate-fin-and-tube heat exchanger / B. Sahin, N.F. Ozturk, C. Gurlek // *Int. J. Heat and Fluid Flow.* – 2008. – Vol. 29. – P. 340-351.
8. Kirkil G. Coherent structures in the flow field around a circular cylinder with scour hole / G. Kirkil, S.G. Constantinescu, R. Ettema // *J. Hydr. Eng.* – 2008. – Vol. 134, No 5. – P. 572-587.
9. Martinuzzi R. Vortex shedding from two surface-mounted cubes in tandem / R. Martinuzzi, B. Havel // *Int. J. Heat Fluid Flow.* – 2004. – Vol. 25. – P. 364-372.
10. Горбань В.О. Вивчення взаємодії квадратних циліндрів, розташованих тандемом / В.О. Горбань, І.М. Горбань // *Прикладна гідромеханіка.* – 2008. – Т. 10, № 1. – С. 36-47.
11. Воскобойник А.В. Спряжене обтікання трирядного пального ростверку на пласкій поверхні. Частина 1. Формування підковоподібних вихорів / А.В. Воскобойник, В.А. Воскобойник, О.А. Воскобойник // *Прикладна гідромеханіка.* – 2008. – Т. 10, № 3. – С. 28-39.

Поступила в редакцію 07.06.2011 г.