
МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ

DOI:10.25743/ICT.2024.29.2.002

Моделирование локального размыва грунта около опоры мостового перехода

Б. В. Архипов*, Д. А. Шапочкин

Федеральный исследовательский центр “Информатика и управление” РАН, 119333, Москва, Россия

*Контактный автор: Архипов Борис Витальевич, e-mail: arh12.bor12@yandex.ru

Поступила 22 апреля 2023 г., доработана 27 июля 2023 г., принята в печать 13 сентября 2023 г.

Представлено численное моделирование местного размыва грунта возле мостовой опоры, вызванного речным потоком. Использованы трехмерная гидродинамическая модель с параметризацией турбулентного обмена и модель переноса осадков. В результате моделирования установлено, что воронка размыва стабилизируется. Сравнение результатов моделирования с имеющимися эмпирическими данными о местных размывах, используемыми в проектировании, показало, что они хорошо согласуются.

Ключевые слова: локальный размыв, круглая опора мостового перехода, перенос осадков, влекомые и взвешенные наносы, гранулометрический состав, эрозия, осадки, течения.

Цитирование: Архипов Б.В., Шапочкин Д.А. Моделирование локального размыва грунта около опоры мостового перехода. Вычислительные технологии. 2024; 29(2):5–20. DOI:10.25743/ICT.2024.29.2.002.

Введение

Локальный размыв аллювиального дна рек и каналов вокруг препятствий представляет собой проблему, вызывающую постоянный интерес. Этот размыв состоит в удалении донных отложений вокруг или около сооружений, расположенных в потоке, следствием чего являются понижение уровня дна русла реки из-за его эрозии и обнажение оснований моста в результате эрозионного воздействия течения, размывающего и перемещающего наносы со дна и берегов, а также из-под опор и устоев мостов [1].

Размыв вокруг опор и свайных конструкций может привести к обрушению конструкции и гибели людей. Глубина воронки ниже предполагаемого естественного уровня дна называется глубиной размыва. Размыв может быть общим, не связанным с наличием препятствия, или местным, который является прямым результатом изменения поля потока вокруг опоры. Это объясняется наличием трехмерного турбулентного потока вокруг устоев и опор моста, ускорением потока и возникающими вихрями, вызванными препятствиями.

Когда вертикальная свая помещается на дно в стационарном течении, поток претерпевает существенные изменения. Во-первых, около дна перед и по бокам сваи образуется подковообразный вихрь, во-вторых, вихревой след формируется с подветренной стороны препятствия, в-третьих, линии тока сгущаются по бокам препятствия. Кроме того, в результате замедления течения перед опорой возникает нисходящий поток. Если дно

подвержено эрозии, общий эффект этих изменений, как правило, заключается в увеличении перемещения наносов, что приводит к образованию местного размыва около препятствия.

В настоящей статье местный размыв вокруг круглой опоры изучается с использованием математической модели на основе системы гидродинамического моделирования Delft3D-FLOW [2]. Результаты моделирования сравниваются с результатами, полученными по использованным в проектировании эмпириическим формулам [3] для прогнозирования местных размывов. Показано, что с практической точки зрения наблюдается близость результатов моделирования и расчетов на основе эмпирических формул.

1. Общая характеристика проблемы

В последние годы в связи с постоянно растущими возможностями компьютерной техники и программного обеспечения для определения поведения потока жидкости в промышленных и экологических приложениях широко применяется численное моделирование. В частности, значительный прогресс достигнут в использовании численного моделирования для изучения течения вокруг мостовых опор и процесса местного размыва.

Рассмотрим некоторые основные работы по данной теме. Большинство моделей перемещения наносов основаны на приближении однофазного потока. Работа Олсена и Мелааена [4] является одной из первых, в которой моделирование течения сочетается с моделированием потока наносов для круглой опоры. Они рассмотрели процесс развития местного размыва в условиях стационарного течения, используя трехмерную модель течений и модель переноса наносов. Это исследование расширено Олсеном и Кьеллесвигом [5] для условий нестационарного потока и более детального изучения местного размыва. Нужно отметить, что расчеты были достаточно трудоемкими. Для полного развития процесса размыва требовалось 416 ч модельного времени. Расчеты в начале 1990-х гг. проводились на IBM-370, их продолжительность занимала несколько недель процессорного времени.

Были выполнены расчеты перемещения как взвешенных, так и влекомых наносов до достижения равновесия. Для дискретизации области использован метод конечных объемов (finite volume method — FVM) на структурной криволинейной сетке, а для расчета динамического поведения потока жидкости применялись усредненные по Рейнольдсу уравнения Навье–Стокса (Reynolds averaged Navier–Stokes — RANS) и $k - \varepsilon$ -модель турбулентности. Расчеты негидростатического давления проводились полуявным методом для системы уравнений, связанных через давление (semi-implicit method for pressure-linked equations — SIMPLE). Снижение донного трения на наклонном дне оценивалось с использованием алгоритма скольжения наносов. Результаты показали хорошее согласие с экспериментом и эмпирически рассчитанными значениями максимальной глубины размыва, однако сравнение рассчитанного поля течений с измерениями не проводилось. Кроме того, в работе подробно описано моделирование нисходящего потока перед опорой и сгущения линий тока по бокам цилиндра, но подковообразный вихрь и вихревой след были смоделированы недостаточно тщательно.

Ричардсон и Панчанг [6] произвели трехмерные расчеты обтекания вертикального круглого цилиндра для трех вариантов: в первом рассчитывалось течение с твердым плоским дном, во втором — с промежуточной “замороженной” воронкой размыва и в третьем — с равновесной “замороженной” воронкой размыва. В последнем случае воронка размыва была “копией” измеренной в эксперименте “с чистой водой” Мелвил-

ла и Раудкиви [7]. Замыкание уравнения Рейнольдса для турбулентных членов выполнялось с помощью ряда усовершенствованных схем, включая теорию длины перемешивания Прандтля, модель вихревой вязкости, модель $k - \varepsilon$ с двумя уравнениями и $k - \varepsilon$ -модель RNG, которая получена при помощи теории ренормализированных групп, имеет схожую форму со стандартной $k - \varepsilon$ -моделью, но включает ряд улучшений [8]. При сравнении смоделированных результатов с экспериментальными обнаружено, что 3D-гидродинамическая модель хорошо воспроизводит сложные схемы течения вокруг опоры. В частности, получены стационарное течение и подковообразный вихрь. При этом расчетов местного размыва, например, в режиме live bed (“живого дна”) не проводилось. В зависимости от внешних условий дно может формироваться относительно плоским или с образованием микроформ рельефа (рифелей). Возможен режим транспорта донных осадков высокой концентрации в тонком приповерхностном слое толщиной, как правило, в несколько сантиметров (sheet flow). Размывание в режиме live bed происходит там, где донное напряжение вверх по потоку превышает пороговое значение и донный материал перемещается.

Роулунд и др. [9] изучали поле течения вокруг вертикальной круглой сваи, подверженной воздействию постоянного течения на основе моделирования и эксперимента. Для исследования процессов вихревого обтекания сваи подковообразным вихрем и вихревым следом с подветренной стороны они использовали модель RANS и модель турбулентного замыкания $k - \omega$. Сетка включала $110 \times 110 \times 64 = 774\,400$ расчетных ячеек. Рассмотрено влияние толщины пограничного слоя, числа Рейнольдса и донной шероховатости на подковообразный вихрь. Верификация модели проведена на основе измерений гидродинамических и морфодинамических характеристик в лабораторном лотке 35 м длины и 8 м ширины. Диаметр сваи 53.6 см.

Сравнение стационарного и нестационарного течений показало, что усредненное по времени донное трение, полученное из нестационарного решения, лучше согласуется с измеренными данными, чем с данными из стационарного решения. Это оказалось важным для расчета процесса размыва, где вычислительное время значительно больше при нестационарном моделировании. Модель течений была объединена с морфологической моделью для расчета локального размыва вокруг цилиндра. В результате моделирования получены все основные особенности процесса размыва (т. е. подковообразный вихрь, оползни осадков по бокам воронки размыва, донные рифели, форма размывной ямы). Равновесная глубина размыва в расчетах хорошо согласовалась с измерениями.

В работе Дж. Вонкеман [10] исследована модель трехфазного потока, в которой уравнения непрерывности (переноса) и импульса рассматривались для трех сред: одной жидкой и двух твердых, а также были описаны влекомые наносы. Твердые среды соответствовали сальтирующим и катящимся частицам. Решалась задача местного размыва для опор разной формы: круглой, прямоугольной с круглыми концами и прямоугольной с острыми концами. Рассматривалась составная сетка из трех подобластей. Количество ячеек сетки в области цилиндрической части опоры 1 020 000 (в тестовых расчетах до 5 155 248). Количество ячеек в области круглой носовой части 1 460 000, в области острой носовой части 1 500 000. Для реализации такой модели использовались многопроцессорный компьютер и распараллеливание расчетов.

Предлагаемые модели перемещения наносов, с одной стороны, достаточно перспективные, поскольку могут давать результаты, совпадающие с наблюдениями, и описывать подковообразные вихри, с другой — они чрезвычайно чувствительны к параметрам и могут проявлять неустойчивость. Для достижения численно устойчивого и более

точного решения потребовалась дополнительная настройка модели. Некоторые особенности применения метода частиц приведены в работе [11].

В качестве примера использования Delft3D-FLOW для изучения местных размывов можно привести работу Е. Симоонс [12], где исследуется размыв на краю защитной каменной наброски вокруг моноблоков морских ветровых электростанций. Такой размыв в зарубежной литературе называется краевым размывом (edge scour) в отличие от размыва непосредственно около опоры моноблока. Он может развиваться на границе защитного слоя и незащищенного дна. Ряд авторов связывают такой размыв с небольшими подковообразными вихрями на краю защитного слоя.

Обследования [13], проведенные в 2004–2005 гг. в морском парке ветровых турбин Scroby Sands, расположенным в Северном море в 2.5 км от побережья Great Yarmouth, UK, показали заметное повреждение защитного слоя, включающее как проседание каменной наброски, так и значительный краевой размыв.

Первым морским парком ветровых турбин в Нидерландах является парк около местечка Эгмонд-ан-Зе (offshore wind park Egmond aan Zee — OWEZ). Исследование [12] посвящено моделированию краевого размыва около моноблока в этом парке, для которого проводились мониторинговые наблюдения. Установлено, что приливная асимметрия в области голландского побережья Северного моря влияет непосредственно на возникновение краевого размыва, который развивается в основном ниже по течению от моноблока в соответствии с преобладающим приливом. Моделирование проводилось без учета ветровых волн. Вихри с подветренной стороны в области вихревого следа моноблока играют важную роль в образовании воронки краевого размыва.

Отмечено, что стандартная гидростатическая постановка может применяться как в двух, так и в трех измерениях, с моделированием больших горизонтальных вихрей (horizontal large eddy simulation — HLES), так и без него. В этих гидростатических версиях Delft3D-FLOW обычно применяется сигма-система координат. Недавно стала доступна полностью негидростатическая трехмерная версия Delft3D-FLOW, в которой предположение о мелководности рассматриваемой области не используется. В отличие от других вариантов, негидростатическая версия реализована в Z -системе координат, где толщина слоев по вертикали фиксирована, а сетка не адаптирована к границам области, т. е. к поверхности и дну водоема (boundary fitted). Численная вязкость при использовании Z -координат имеет порядок $u\Delta x$, что неприемлемо для генерации вихревого подветренного следа при моделировании в случае разумно больших размеров сетки. Установлено, что в сигма-системе координат величина численной вязкости существенно меньше, чем в Z -системе.

Сделаны выводы, что возможности Delft3D-FLOW для моделирования краевого размыва недостаточны. Существует значительное расхождение между рассчитанной глубиной размыва и зафиксированной в процессе мониторинговых наблюдений в области OWEZ. Дополнительно отмечено, что временные затраты на расчеты неприемлемо велики. Последнее относится к варианту с применением HLES, т. е. необходима разработка менее трудоемкого метода расчета глубины краевого размыва.

В работе Кантаржи и др. [14] помимо течений, воздействующих на перемещение наносов, учитываются и ветровые волны. На основе трехуровневой двумерной системы взаимосвязанных моделей, включающей модель ветровых волн, модель течений и литодинамическую модель, производится численное моделирование ветровых волн, течений и литодинамических процессов для исследования величин волнового размыва грунта дна около причальных сооружений морского терминала. В ходе анализа метода оценки

местного размыва ВСП 33-03-07 [15] авторы пришли к выводу, что он обладает принципиальными недостатками для условий многорядной свайной конструкции и не может гарантировать необходимую точность прогноза.

Как следует из приведенного обзора, нет недостатка в различных подходах моделирования размыва как вокруг опор, так и в других ситуациях. Большинство из них имеет ряд общих черт: использование негидростатической постановки, сравнение с данными лабораторных измерений, т. е. на установках с размером лотка до нескольких десятков метров в длину и нескольких метров в ширину, использование довольно подробных сеток в вертикальном направлении со сгущением у дна (больше 50 узлов), использование сгущения узлов около опоры и т. п. Так, в работах [9, 10] в моделировании использовано от одного до нескольких миллионов расчетных ячеек, что характеризует степень их трудоемкости. Необходимо обратить внимание, что в случае Delft3D-FLOW в варианте с применением HLES временные затраты на расчеты неприемлемо велики. В работе [12] сообщается, что для расчета одного приливного цикла по трехмерной модели с двадцатью вертикальными слоями требуется около 70 сут. вычислений на центральном процессоре. Нужно сказать, что расчеты в этом случае требуют значительных ресурсов и, вообще говоря, актуально исследование возможности использования более простых подходов и сравнение с натурными данными в реальных условиях.

2. Описание модели

В Delft3D-FLOW [2] решаются нестационарные уравнения гидродинамики с включением блока переноса осадков. В гидродинамическом модуле можно задавать различные модели замыкания турбулентности. В работе используются гидростатические уравнения гидродинамики и применяется $k-\varepsilon$ -модель турбулентности в вертикальном направлении. При рассмотрении переноса осадков в Delft3D-FLOW они схематически разделяются на два типа: несвязные (песок) и связные (ил). Перенос несвязных осадков осуществляется в виде влекомых и взвешенных наносов, а перемещение связных осадков рассматривается только в виде взвешенных наносов. В настоящей работе рассматриваем несвязные осадки.

В Delft3D-FLOW, в отличие от ряда других работ (см., например, [16]), перенос взвешенных осадков моделируется путем решения трехмерного уравнения адвекции – диффузии (баланса массы), поэтому представляет интерес более подробно рассмотреть основные аспекты модели переноса осадков, принятые в Delft3D-FLOW. Для несвязных осадков Van Рейн проводит различие между переносом их ниже контрольной высоты a , который рассматривается как перенос влекомых наносов, и выше контрольной высоты, который рассматривается как перенос взвешенных наносов [17–20]. В обоих случаях перенос осадков возникает, когда донное трение превосходит критическое значение, основанное на характеристике донного материала и кривой Шилдса [17]. Локальные скорости потока и турбулентная диффузия определяются из гидродинамических расчетов.

Для расчета переноса взвешенных и влекомых наносов необходимо найти донное напряжение и/или скорость трения. Для определения скорости трения u_* в Delft3D-FLOW, как и в большинстве работ, используется придонный логарифмический профиль изменения скорости течения в турбулентном пограничном слое (в настоящей работе рассматривается вариант без ветровых волн). Считается, что первая сеточная точка, наиболее близкая ко дну, в гидродинамической модели находится в области логарифмического

ческого слоя. Координата этой точки и скорость потока в ней подставляются в формулу логарифмического профиля. В этом случае скорость трения находится через скорость и координату нижнего придонного вычислительного слоя, после чего определяется донное трение.

Рассмотрим понятие неразмывающей скорости, используемое в нормативных документах. В [3] средняя на вертикали неразмывающая скорость потока определяется в зависимости от глубины воды и характеристик донных наносов d по формуле $V_0 = 1.15\sqrt{g}(Hd)^{1/4}$. В Delft3D-FLOW поток наносов возникает, когда донное трение и/или скорость трения превышают критические значения. Для двумерного потока, усредненного по глубине, предполагается, что трение на дне связано со средней по глубине горизонтальной скоростью течения (\mathbf{U} , $|\mathbf{U}| = U$) квадратичным законом $\tau_b = \frac{\rho_w g U^2}{C_{2D}^2}$ или $u_* = \frac{\sqrt{g}U}{C_{2D}}$. Коэффициент Шези (C_{2D}) может быть определен в соответствии с формулой Уайта–Коулброка [2] в виде $C_{2D} = 18 \log_{10} \left(\frac{12H}{k_s} \right)$, где k_s — шероховатость дна. В расчетах можно использовать разные методы определения донного трения (например, путем непосредственного задания коэффициентов Шези или Маннинга, использования формулы Уайта–Коулброка или отметки нулевой скорости z_0). В настоящих расчетах задавался коэффициент Шези C_{2D} , равный 65. В таком подходе неразмывающая скорость вычисляется по формуле $U = \frac{u_{*,cr} C_{2D}}{\sqrt{g}}$. Здесь $u_{*,cr} = [(s-1)gD_{50}\Theta_{cr}]^{1/2}$ — критическая скорость трения. Параметр Θ_{cr} определяется по кривой Шилдса [2] в зависимости от размера частиц $D_* = D_{50}[(s-1)g/\nu^2]^{1/3}$:

$$\Theta_{cr}^{(l)} = \begin{cases} 0.24D_*^{-1} & \text{при } 1 < D_* < 4, \\ 0.14D_*^{-0.64} & \text{при } 4 < D_* \leq 10, \\ 0.04D_*^{-0.1} & \text{при } 10 < D_* \leq 20, \\ 0.013D_*^{0.29} & \text{при } 20 < D_* \leq 150, \\ 0.055 & \text{при } 150 < D_*. \end{cases}$$

В вычислительном отношении трехмерный перенос и диффузия взвешенных наносов определяются точно так же, как перенос любого другого консервативного компонента, такого, например, как соленость и т. п. Для консервативного компонента выполняется закон сохранения, т. е. если проинтегрировать уравнение переноса–диффузии по расчетной области и получить баланс для рассматриваемой величины, то источники и стоки в уравнении баланса возникнут только на границе области из-за граничных условий, а внутренние источники и стоки, например, за счет химических реакций отсутствуют. А если граничные потоки обнулить, то количество компонента в процессе моделирования будет сохраняться.

Однако существует ряд важных различий между взвешенными (ВВ) и другими загрязняющими веществами, например, обмен ВВ между дном и потоком в результате осаждения ВВ под действием силы тяжести и/или их взмучивания со дна в воду. Другие процессы, такие как влияние ВВ на локальную плотность смеси и, следовательно, на затухание турбулентности, также принимаются во внимание. Кроме того, если происходит обмен с дном, то результатирующее изменение батиметрии должно влиять на последующие гидродинамические расчеты, а взаимодействие фракций имеет значение

для расчета локальной скорости затрудненного осаждения каждой фракции ВВ. Дополнительно учитывается влияние уклона дна на перенос влекомых наносов.

Перенос взвешенных осадков рассчитывается путем решения трехмерного уравнения адвекции – диффузии (баланса массы) для концентрации ВВ каждой фракции. Для его решения помимо других граничных условий необходимо задать граничные условия на дне. Оно определяется выражением потока ВВ из воды в дно в виде отложений (сток) и потока осадков со дна в воду в виде эрозии (источник).

Выражения для источника и стока существенно различаются для связанных и несвязанных осадков. Дополнительно описание связанных и несвязанных осадков различается описанием скорости осаждения частиц. Для несвязанных наносов поток ВВ из воды в дно (сток) и со дна в воду (источник) определяется введением контрольной высоты a и контрольной концентрации c_a . Перенос ВВ между дном и водой для несвязанных осадков моделируется с использованием стока и источника, действующих на придонный расчетный слой в гидродинамическом модуле, который полностью находится выше контрольной высоты Ван Рейна a . В модели источника и стока описываются количество ВВ, поступающих в поток из-за восходящей диффузии от контрольной высоты, и количество ВВ, выпадающих из потока за счет осаждения. Источник возникает, когда контрольная концентрация становится положительной, причем это происходит через пороговый механизм, подобный возникновению переноса влекомых наносов. Моделирование переноса влекомых наносов течениями осуществляется по формулам Ван Рейна [18, 19] в виде двумерных алгебраических выражений. Поток влекомых наносов возникает при превышении донного трения критической величины донного трения начала движения частиц, полученной на основе параметризации кривой Шильдса [17]. Направление вектора переноса влекомых наносов в случае отсутствия волн совпадает с придонным течением с учетом уклона дна.

3. Входные данные и результаты расчетов

Численное моделирование течения и размыва дна возле опоры проведено на расчетной сетке, которая покрывает область канала размером 104×104 ячеек в направлениях x , y . Шаг по x и y равен 1 м, глубина 6 м (рис. 1 и 2). По оси z в модели задавались четыре слоя ячеек с небольшим сгущением ко дну. Толщина слоев в процентах от глубины, если считать сверху вниз, равнялась 40, 40, 15 и 5 %. В расчетах используется сигма-система координат. Диаметр опоры равен 2 м. На западной границе задавались скорости течений 0.6, 1.0 и 1.2 м/с и значения нулевых концентраций отдельных фракций. На восточной границе для скорости задавалось условие Римана. Дно сложено из осадков с $D_{50} = 0.5$ и 1 мм. На северной и южной границах задавались условия Неймана.

Принятый в работе подход состоит в вычислении течений, потока наносов и изменения дна. Моделирование проводилось на период от 20 до 30 сут. до достижения равновесного состояния. Результаты моделирования приведены на рис. 3–7. На рис. 3 показаны графики аккумулятивного накопления/осаждения осадков, полученные в моделировании для ячеек 50–54, 50–56 и 53–56, показанных на рис. 2. Проводилось три расчета. Первый расчет выполнен при скорости течения 1.0 м/с и $D_{50} = 1.0$ мм, второй — при скорости течения 1.2 м/с и $D_{50} = 1.0$ мм и третий — при скорости 1.0 м/с и $D_{50} = 0.5$ мм. Расчеты при скорости 0.3 м/с и $D_{50} = 1.0$ мм показали, что эрозии/аккумуляции грунта на дне не происходит и перенос осадков не возникает (см. ниже о неразмывающей скорости).

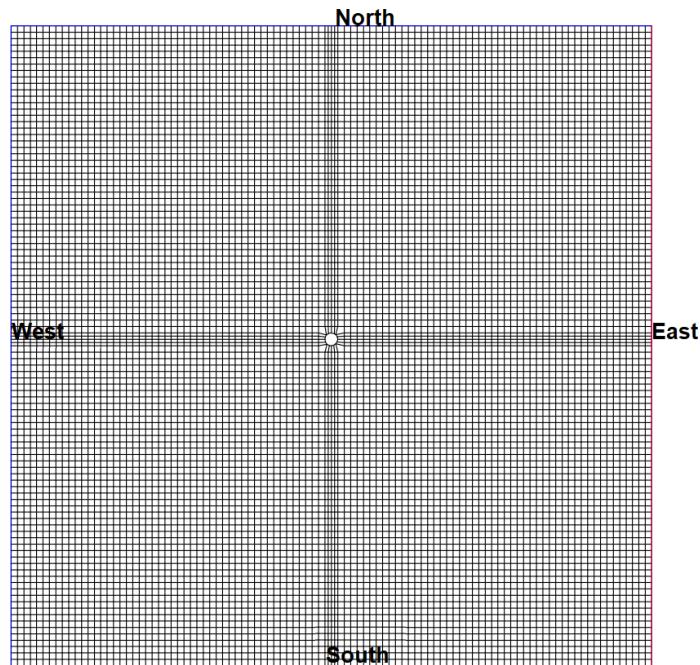


Рис. 1. Модельная сетка с шагом 1 м

Fig. 1. Model grid with a step of 1 m

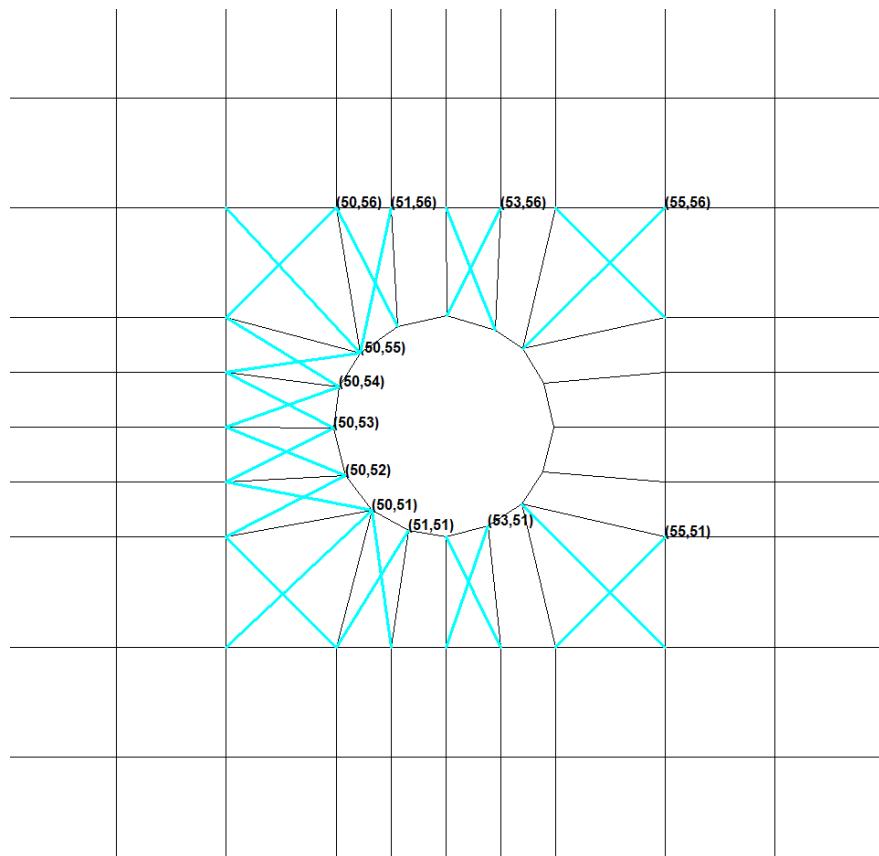


Рис. 2. Вид сетки около опоры и положение ячеек для построения графиков величин, изменяющихся во времени

Fig. 2. View of the grid near the pier and cell positions for plotting quantities that change over time

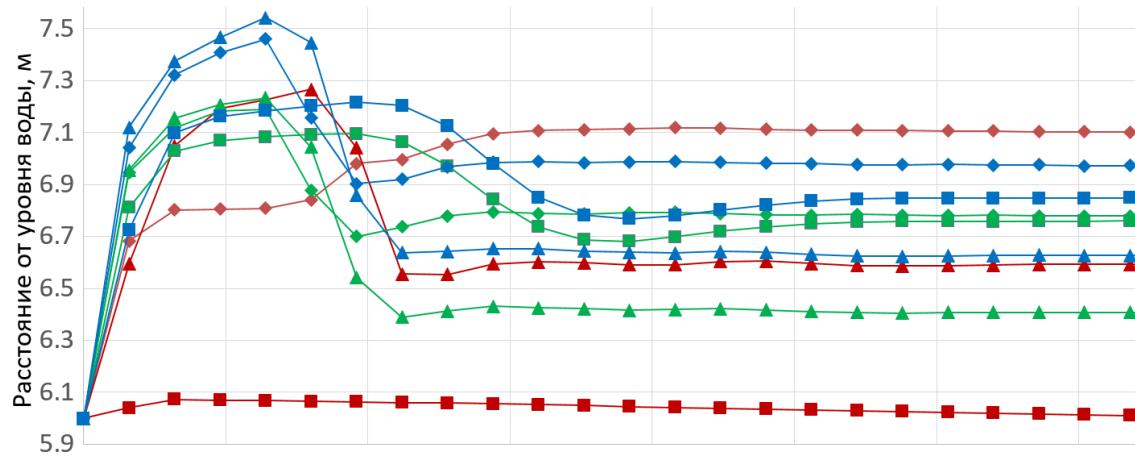


Рис. 3. Графики накопления/эрозии осадков, полученные в моделировании для ячеек (см. рис. 2) 50–54 (красный цвет), 50–56 (зеленый), 53–56 (синий): первый расчет (квадраты), скорость течения 1.0 м/с и $D_{50} = 1.0$ мм; второй расчет (ромбы), скорость 1.2 м/с и $D_{50} = 1.0$ мм; третий расчет (треугольники), скорость 1.0 м/с и $D_{50} = 0.5$ мм

Fig. 3. Plots of accumulation/deposition of sediments obtained in the simulation for cells (see Fig. 2) 50–54 (red color), 50–56 (green), 53–56 (blue): first calculation (squares), velocity 1.0 m/s and $D_{50} = 1.0$ mm; second calculation (diamonds), velocity 1.2 m/s and $D_{50} = 1.0$ mm; third calculation (triangulars), velocity 1.0 m/s and $D_{50} = 0.5$ mm

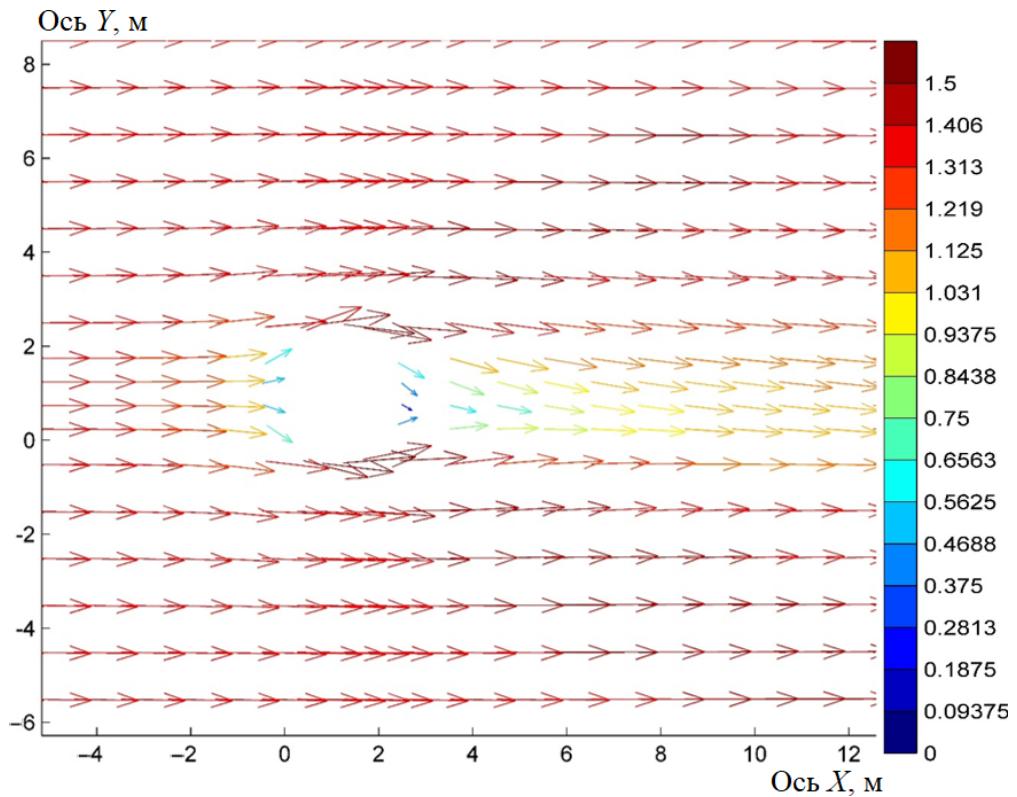


Рис. 4. Скорость течения в верхнем слое, м/с

Fig. 4. Flow velocity in the upper layer, m/s

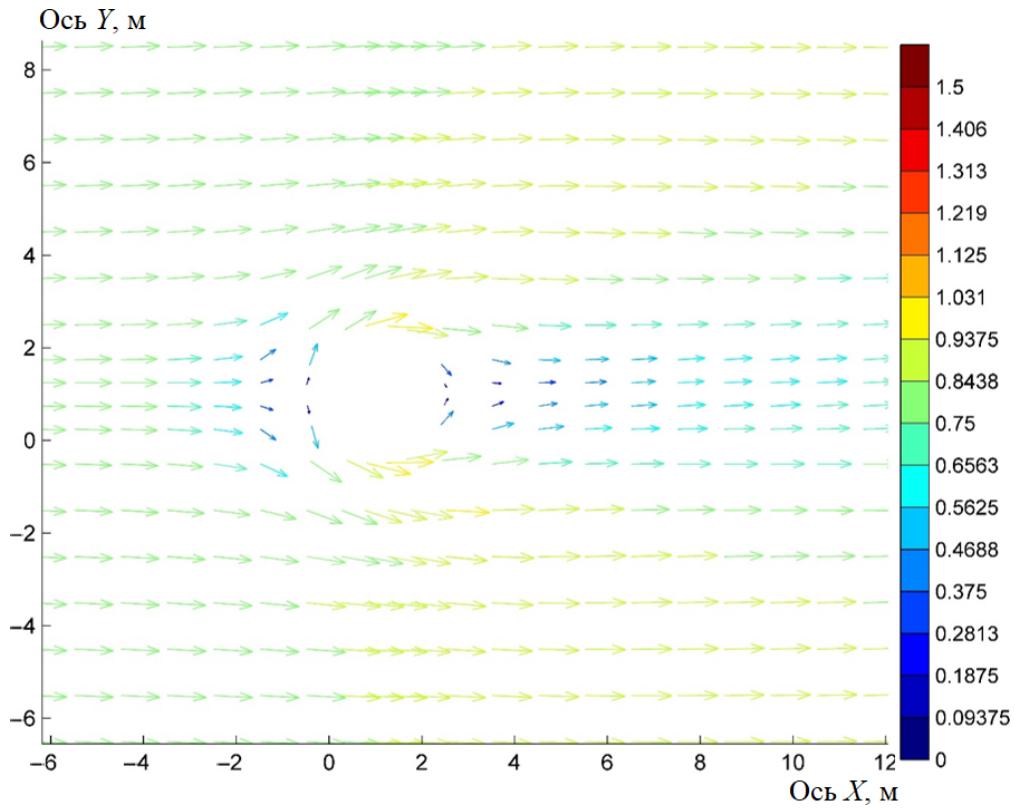
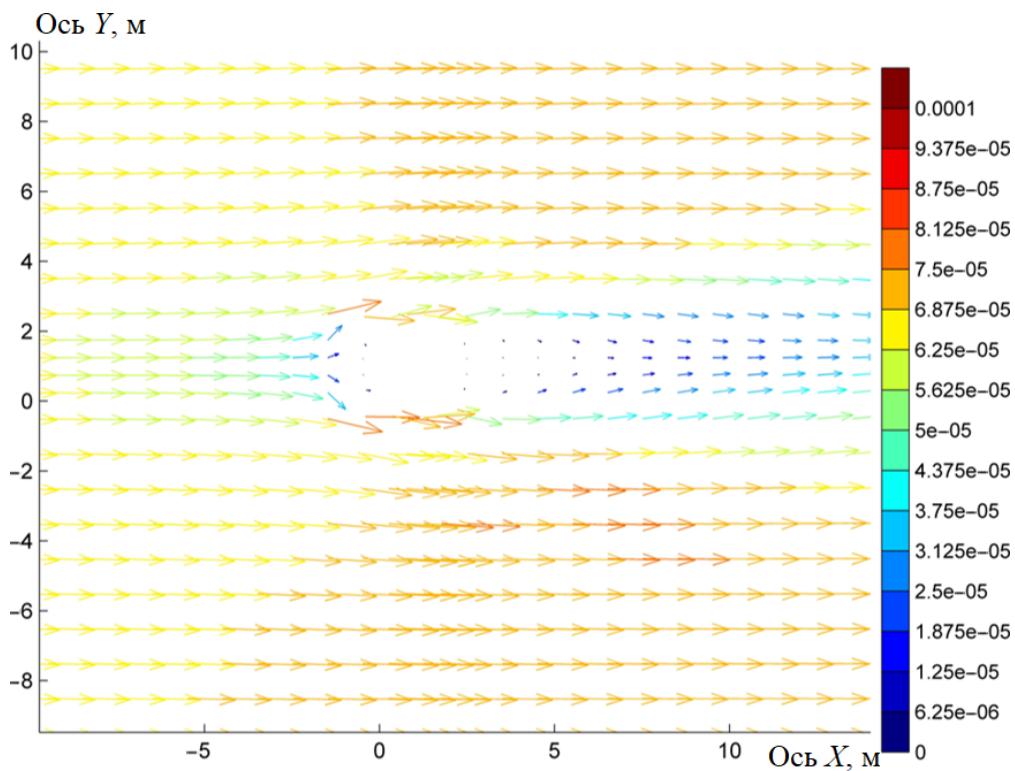


Рис. 5. Скорость течения в нижнем слое, м/с

Fig. 5. Flow velocity in the lower layer, m/s

Рис. 6. Перенос осадков, $\text{m}^3/(\text{м}\cdot\text{с})$ Fig. 6. Sediment transport, $\text{m}^3/(\text{m}\cdot\text{s})$

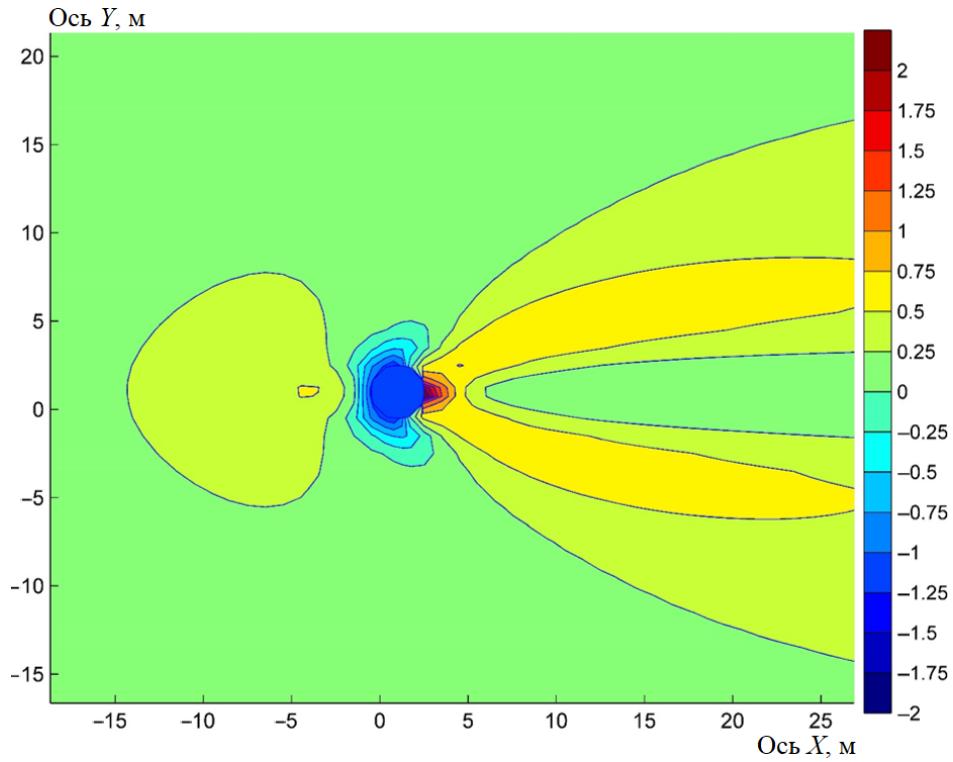


Рис. 7. Глубина размыва около опоры, м

Fig. 7. Scour depth near the pier, m

Результаты расчетов неразмывающей скорости и глубины воронки размыва
Calculation results for non-erosion velocity and depth of the erosion funnel

Скорость течения, м/с	Диаметр частиц, мм	V_0 , м/с		h , м	
		Эмпирическая формула	Моделирование	Эмпирическая формула	Моделирование
1.0	1.0	1.0	0.48	1.45	1.5
1.2	1.0	1.0	0.48	1.6	1.7
1.0	0.5	0.8	0.33	1.54	1.8

Во всех рассмотренных вариантах скорость течения превосходит неразмывающую скорость, определенную по Delft3D-FLOW, т. е. они относятся к случаю “живого дна”. Равновесие наступает достаточно быстро — примерно через 200 ч модельного времени. Первый расчет по эмпирической формуле дает глубину размыва 1.45 м, а моделирование — 1.5 м. Во втором случае скорость несколько больше, чем в первом, и равна 1.2 м/с. Во втором случае расчет по эмпирической формуле дает глубину размыва 1.6 м, а моделирование — 1.7 м. В третьем расчете по формуле дает глубину размыва 1.54 м, а моделирование — 1.8 м.

На рис. 4–7 показаны результаты для второго варианта. На рис. 4 и 5 приведены скорости течения в верхнем и нижнем слоях около опоры. Видно, что в верхнем слое поток натекает на опору, а в нижнем слое наблюдается растекание потока в поперечных направлениях. На рис. 6 приведены потоки наносов, на лицевой и боковых гранях видно наличие областей дивергенции, на подветренной грани — области конвергенции, их величина около $10^{-5} \text{ м}^3/(\text{м}\cdot\text{с})$. Глубина размыва около опоры в плане показана на рис. 7.

Пример расчета наибольшей глубины местного размыва у опоры моста приведен, например, в документе [3]. По формулам этого документа при входных параметрах, соот-

вествующих моделированию, определяется глубина местного размыва у опоры моста. Она может определяться в двух вариантах. В варианте “живого дна” при поступлении наносов в воронку размыва, когда скорость течения больше неразмывающей скорости ($V > V_0$), глубина размыва определяется как

$$h = 0.77H^{0.4}b^{0.6} \left(\frac{V}{V_v} \right)^{1/2} MK. \quad (1)$$

В варианте “чистой воды” при $V \leq V_0$ глубина размыва вычисляется по формуле

$$h = 0.77H^{0.4}b^{0.6} \left(\frac{V_0}{V_v} \right)^{1/2} \left(\frac{V - V_h}{V_0 - V_h} \right)^{3/4} MK. \quad (2)$$

В уравнения (1), (2) входят несколько величин, имеющих размерность скорости, м/с. Здесь V — скорость течения; $V_0 = 1.15\sqrt{g}(Hd)^{1/4}$ — средняя на вертикали, неразмывающая скорость потока на плоском дне определяется в зависимости от глубины потока воды и характеристик донных наносов d ; $V_v = (Hgw)^{1/3}$ — взмучивающая скорость, определяется в зависимости от глубины потока воды и гидравлической крупности w ($w \sim 0.3$ м/с при $D_{50} = 1.0$ мм, $w \sim 0.15$ м/с при $D_{50} = 0.5$ мм) донных наносов; $V_h = V_0(d/b)^{1/8}\mu$ — начальная (непередвигающаяся) скорость воды перед опорой, при которой частицы грунта у опоры приходят в движение и появляются первые признаки размыва; $\mu = \frac{0.95 + 0.5H/b}{0.4 + H/b}$ — коэффициент; $H = 6$ м — глубина русла; $b = 2$ м — диаметр опоры; $M \sim 1$ — параметр формы для круглой опоры; $K \sim 1$ — коэффициент косины, при угле между направлением течения перед опорой ($\alpha = 0$) и ее продольной осью.

Результаты расчетов неразмывающей скорости и глубины воронки размыва приведены в таблице. Из нее следует, что неразмывающая скорость в модели в два раза меньше, а максимальная глубина размыва для случая “живого дна” превышает полученное значение в эмпирических формулах, а при приближении скорости течения к неразмывающей различие увеличивается.

Выводы

Выполнено численное моделирование локального размыва около мостовой опоры на основе гидроморфодинамической компьютерной модели Delft3D-FLOW. Гидродинамическое течение моделируется с помощью модуля Delft3D-FLOW, который решает уравнения гидродинамики с включением блока перемещения наносов. Применен несколько упрощенный подход по сравнению с принятым в некоторых работах, указанных в первом разделе. Используются гидростатические уравнения гидродинамики и реальные размеры (диаметр опоры 2 м), довольно грубая сетка в вертикальном направлении (4 узла) с небольшим сгущением у дна и искривлением узлов горизонтальной сетки около опоры для описания ее круглой формы, k — ε -модель турбулентности в вертикальном направлении и т. п. Такое упрощение дает возможность провести расчеты от 15 до 30 сут. модельного времени, что требует около 4–6 сут. на процессоре Intel(R) Core(TM) i7-7740X CPU 4.30 GHz. Результаты моделирования сравниваются с имеющимися эмпирическими данными о местных размывах, выраженными в виде аналитических формул [3], которые используются в проектировании.

Из полученных данных можно сделать выводы. Во-первых, в расчетах с “живым дном” результаты по моделированию и эмпирической формуле подобны с практической точки зрения, хотя в моделировании они завышены по сравнению со эмпирикой, различие может достигать 30 %. Результаты расчета показывают, что моделирование может применяться для первичной оценки размыва в случае “живого дна”. В то же время не нужно забывать, что и эмпирические формулы не являются абсолютно надежными хотя бы потому, что их разные варианты, приводящиеся, например, в [21–25], могут давать различающиеся оценки.

Усовершенствование численного моделирования местного размыва можно проводить в следующих направлениях. Рекомендуется выполнить численное моделирование с большим количеством ячеек и вертикальных слоев, а также с использованием негидростатической версии модели. Следует учесть, что в этом случае необходимо построение модели турбулентности в трех измерениях, поскольку условие малости вертикального масштаба по сравнению с горизонтальным нарушается около опоры. В настоящем исследовании результаты моделирования практически не были подтверждены из-за отсутствия подходящих данных для верификации. Для получения таких данных рекомендуется проведение сравнения с результатами, полученными в лабораторных экспериментах, а также с данными натурного мониторинга. Представляется перспективным использование неструктурированных сеток. Кроме того, в качестве предмета дальнейшего изучения рекомендуется исследование влияния многослойного строения донных наносов.

Список литературы

- [1] Richardson E.V., Davis S.R. Evaluating scour at bridges. Publication No. FHWA NHI 01-001. 4-th Edition. Hydraulic Engineering Circular No. 18. Fort Collins, Colorado: U.S. Department of Transportation. Federal Highway Administration; 2001: 378.
- [2] Delft3D-FLOW user manual. Version: 3.15. Revision: 18392 (September 7, 2011). Delft: Deltares; 2011: 684.
- [3] Сооружения мостовых переходов и подтопляемых насыпей. Методы расчета местных размывов. СП 32-102-95. М.: Корпорация “Трансстрой”; 1990: 44.
- [4] Olsen N.R.B., Melaaen M.C. Three-dimensional calculation of scour around a cylinder. Journal of Hydraulic Engineering. ASCE. 1993; 119(9):1048–1054. DOI:10.1061/ASCE.0733-9429(1993)119:9(1048).
- [5] Olsen N.R.B., Kjellesvig H.M. Three-dimensional numerical flow modelling for estimation of maximum local scour depth. IAHR Journal of Hydraulic Research. 1998; (36):579–590.
- [6] Richardson J.E., Panchang V.G. Three-dimensional simulation of scour-inducing flow at bridge piers. Journal of Hydraulic Engineering. 1998; (124):530–540. DOI:10.1061/(ASCE)0733-9429(1998)124:5(530).
- [7] Melville B.W., Raudkivi A.J. Flow characteristics in local scour at bridge piers. Journal of Hydraulic Research. 1977; (15):373–380.
- [8] Orszag S.A., Yakhot V., Flannery W.S., Boysan F., Choudhury D., Maruzewski J., Patel B. Renormalization group modeling and turbulence simulations. International Conference on Near-Wall Turbulent Flows. Tempe, Arizona; 1993: 1031–1046.

- [9] **Roulund A., Sumer B.M., Fredsoe J., Michelsen J.** Numerical and experimental investigation of flow and scour around a circular pile. *Journal of Fluid Mechanics*. 2005; (534):351–401.
 - [10] **Vonkeman J.K.** Coupled fully three-dimensional hydro-morphodynamic modelling of bridge pier scour in an alluvial bed. Stellenbosch University; 2019: 180.
 - [11] **Arkhipov B., Koterov V., Solbakov V., Shapochkin D., Yurezanskaya Y.** Numerical modeling of pollutant dispersion and oil spreading by the stochastic discrete particles method. *Studies in Applied Mathematics*. 2008; 120(2):87–104.
 - [12] **Simoons E.** Edge scour around an offshore wind turbine. MSc Thesis. Delft University of Technology; 2012: 76.
 - [13] **Whitehouse R.J.S., Harris J.M., Sutherland J., Rees J.** The nature of scour development and scour protection at offshore windfarm foundations. *Marine Pollution Bulletin*. 2011; 62(1):73–88.
 - [14] **Кантаржи И.Г., Гогин А.Г., Куприн А.В.** Аналитические и численные исследования размывов свайного основания морского причала. *Вестник МГСУ*. 2022; 17(5):603–613. DOI:10.22227/1997-0935.2022.5.603-613.
 - [15] Инструкция по проектированию откосных и сквозных оградительных сооружений и специальных подводных стендов. ВСП 33-03-07 МО РФ. 2008: 90.
 - [16] **Леонтьев И.О.** Прибрежная динамика: волны, течения, потоки наносов. М.: ГЕОС; 2001: 272.
 - [17] **van Rijn L.C.** Principles of sediment transport in rivers, estuaries and coastal seas. The Netherlands: Aqua Publications; 1993: 690.
 - [18] **van Rijn L.C.** Unified view of sediment transport by currents and waves. I: initiation of motion, bed roughness, and bed-load transport. *Journal of Hydraulic Engineering*. 2007; 133(6):649–667.
 - [19] **van Rijn L.C.** Sediment transport. Pt I: bed load transport. *Journal of Hydraulic Engineering*. 1984; 110(10):1431–1456.
 - [20] **van Rijn L.C.** Unified view of sediment transport by currents and waves. II: suspended transport. *Journal of Hydraulic Engineering*. 2007; 133(6):668–689. DOI:10.1061/ASCE0733-94292007133:6668.
 - [21] **Пейч Ю.Л., Писарев Ю.В.** Технические указания по расчету местного размыва у опор эксплуатируемых мостов. Утверждены ЦП МПС РОССИИ. 2001: 16.
 - [22] Пособие к СНиП 2.05.03-84 “МОСТЫ И ТРУБЫ” по изысканиям и проектированию железнодорожных и автодорожных мостовых переходов через водотоки (ПМП-91). М.; 1992: 349.
 - [23] **Демидов Д.В.** Изыскания мостовых и тоннельных переходов (методика, инструменты и средства их выполнения). Екатеринбург: УГЛТУ; 2020: 54.
 - [24] **Пуркин В.И., Холин А.С.** Проектирование мостовых переходов. Учебное пособие. 2-е изд., перераб. и доп. М.: МАДИ; 2014: 60.
 - [25] Методические рекомендации по расчету местного размыва у опор мостов. 2-е изд., перераб. и доп. М.: Союздорнии; 1988: 25.
-

Modelling the scour depth near the bridge pier

B. V. ARKHIPOV*, D. A. SHAPOCHKIN

Federal Research Center for Informatics and Management, 119333, Moscow, Russia

*Corresponding author: Boris V. Arkhipov, e-mail: arh12.bor12@yandex.ru

*Received April 22, 2023, revised July 27, 2023, accepted September 13, 2023.***Abstract**

Purpose. The paper presents a numerical simulation of local soil erosion near a bridge pier caused by a river flow.

Methodology. The simulation based on a three-dimensional hydrodynamic model with parametrization of turbulent mixing and a sediment transport model.

Findings. The simulation results show that the local scour is stabilizing. A comparison of the simulation results with the available empirical data on local scour used in the design shows the proximity of the depth of the scour in modelling and empirical data.

Originality/value. The paper attempts to understand by which models and/or empirical formulas to carry out calculations of local erosion in practice. Generally speaking, both model and empirical approaches are questionable. Delft3D (oceanographic model) in this article is adapted to calculate local erosion and compared with empirical formulas. Simulation data are obtained and a comparison with empirical data is given. In this sense, it can be argued that the material contains new computational and scientific data.

Keywords: local scour, circular bridge pier, bed load transport, suspended load transport, grain analysis, sediments erosion, deposition, currents.

Citation: Arkhipov B.V., Shapochkin D.A. Modelling the scour depth near the bridge pier. Computational Technologies. 2024; 29(2):5–20. DOI:10.25743/ICT.2024.29.2.002. (In Russ.)

References

- Richardson E.V., Davis S.R. Evaluating scour at bridges. Publication No. FHWA NHI 01-001. 4-th Edition. Hydraulic Engineering Circular No. 18. Fort Collins, Colorado: U.S. Department of Transportation. Federal Highway Administration; 2001: 378.
- Delft3D-FLOW user manual. Version: 3.15. Revision: 18392 (September 7, 2011). Delft: Deltares; 2011: 684.
- Sooruzheniya mostovykh perekhodov i podtopllyaemykh nasypey. Metody rascheta mestnykh razmyvov. SP 32-102-95 [Constructions of bridge crossings and flooded embankments. Methods for calculating local erosion. SP 32-102-95]. Moscow: Korporatsiya “Transstroy”; 1990: 44. (In Russ.)
- Olsen N.R.B., Melaaen M.C. Three-dimensional calculation of scour around a cylinder. Journal of Hydraulic Engineering. ASCE. 1993; 119(9):1048–1054. DOI:10.1061/(ASCE)0733-9429(1993)119:9(1048).
- Olsen N.R.B., Kjellesvig H.M. Three-dimensional numerical flow modelling for estimation of maximum local scour depth. IAHR Journal of Hydraulic Research. 1998; (36):579–590.
- Richardson J.E., Panchang V.G. Three-dimensional simulation of scour-inducing flow at bridge piers. Journal of Hydraulic Engineering. 1998; (124):530–540. DOI:10.1061/(ASCE)0733-9429(1998)124:5(530).
- Melville B.W., Raudkivi A.J. Flow characteristics in local scour at bridge piers. Journal of Hydraulic Research. 1977; (15):373–380.

8. **Orszag S.A., Yakhot V., Flannery W.S., Boysan F., Choudhury D., Maruzewski J., Patel B.** Renormalization group modeling and turbulence simulations. International Conference on Near-Wall Turbulent Flows. Tempe, Arizona; 1993: 1031–1046.
9. **Roulund A., Sumer B.M., Fredsoe J., Michelsen J.** Numerical and experimental investigation of flow and scour around a circular pile. *Journal of Fluid Mechanics*. 2005; (534):351–401.
10. **Vonkeman J.K.** Coupled fully three-dimensional hydro-morphodynamic modelling of bridge pier scour in an alluvial bed. Stellenbosch University; 2019: 180.
11. **Arkhipov B., Kotterov V., Solbakov V., Shapochkin D., Yurezanskaya Y.** Numerical modeling of pollutant dispersion and oil spreading by the stochastic discrete particles method. *Studies in Applied Mathematics*. 2008; 120(2):87–104.
12. **Simoons E.** Edge scour around an offshore wind turbine. MSc Thesis. Delft University of Technology; 2012: 76.
13. **Whitehouse R.J.S., Harris J.M., Sutherland J., Rees J.** The nature of scour development and scour protection at offshore windfarm foundations. *Marine Pollution Bulletin*. 2011; 62(1):73–88.
14. **Kantarzhi I.G., Gogin A.G., Kuprin A.V.** Analytical and numerical studies on the scouring of a pile foundation of a marine terminal. *Vestnik MGSU [Monthly Journal on Construction and Architecture]*. 2022; 17(5):603–0613. DOI:10.22227/1997-0935.2022.5.603-613. (In Russ.)
15. Instruktsiya po proektirovaniyu otkosnykh i skvoznykh ograditel'nykh sooruzheniy i spetsial'nykh podvodnykh stendov. VSP 33-03-07 MO RF. [Instructions for the design of sloping and through barrier structures and special underwater stands. DCR 33-03-07 MD RF]. 2008: 90. (In Russ.)
16. **Leontiev I.O.** Pribrezhnaya dinamika: volny, techeniya, potoki nanosov [Coastal dynamics: waves, currents, sediment transport]. Moscow: GEOS; 2001: 272. (In Russ.)
17. **van Rijn L.C.** Principles of sediment transport in rivers, estuaries and coastal seas. The Netherlands: Aqua Publications; 1993: 690.
18. **van Rijn L.C.** Unified view of sediment transport by currents and waves. I: initiation of motion, bed roughness, and bed-load transport. *Journal of Hydraulic Engineering*. 2007; 133(6):649–667.
19. **van Rijn L.C.** Sediment transport. Pt I: bed load transport. *Journal of Hydraulic Engineering*. 1984; 110(10):1431–1456.
20. **van Rijn L.C.** Unified view of sediment transport by currents and waves. II: suspended transport. *Journal of Hydraulic Engineering*. 2007; 133(6):668–689. DOI:10.1061/ASCE0733-94292007133:6668.
21. **Peich Yu.L., Pisarev Yu.V.** Tekhnicheskie ukazaniya po raschetu mestnogo razmyva u opor ekspluatiruemym mostov. Utverzhdeny TsP MPS ROSSII [Technical instructions for the calculation of local erosion near the supports of operated bridges. Approved by the CPU of the Ministry of Railways of Russia]. 2001: 16. (In Russ.)
22. Posobie k SNIP 2.05.03-84 “MOSTY I TRUBY” po izyskaniyam i proektirovaniyu zheleznodorozhnykh i avtodorozhnykh mostovykh perekhodov cherez vodotoki (PMP-91) [Manual to SNIP 2.05.03-84 “BRIDGES AND PIPES” on surveys and design of railway and road bridge crossings over watercourses (PMP-91)]. Moscow; 1992: 349. (In Russ.)
23. **Demidov D.V.** Surveys of bridge and tunnel crossings (methodology, tools and means of their implementation). Ekaterinburg: UGLTU; 2020: 54. (In Russ.)
24. **Purkin V.I., Kholin A.S.** Proektirovaniye mostovykh perekhodov. Uchebnoe posobie [Design of bridge crossings. Tutorial. 2nd ed., revised and additional]. Moscow: MADI; 2014: 60. (In Russ.)
25. Metodicheskie rekomendatsii po raschetu mestnogo razmyva u opor mostov [Guidelines for the calculation of local erosion near bridge supports. 2nd ed., revised and additional]. Moscow: Soyuzdornii; 1988: 25. (In Russ.)