

МРНТИ 27.35.21

С.И. Миннуллина¹ (orcid – 0000-0003-4513-5972) – основной автор,
А.А. Исахов²

¹Магистрант, ²PhD, профессор

¹Казахстанско-Британский технический университет, Алматы, Казахстан

²Казахский Национальный университет имени аль-Фараби, Алматы, Казахстан

E-mail: ¹saniya_minnullina@mail.ru, ²alibek.issakhov@gmail.com

ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ДВИЖЕНИЯ ПОТОКА ВОДЫ ПРИ РАЗРУШЕНИИ ЗАЩИТНЫХ ГИДРОТЕХНИЧЕСКИХ СООРУЖЕНИЙ

Аннотация. Моделирование массивного ущерба, полученного в результате разрушения гидротехнического сооружения, представляется затруднительным, на том основании, что характер воздействия транспортабельных твердых частиц на поток жидкости не определен. В настоящей работе приведен анализ водного потока с плавающими частицами, а также представлена численная трехмерная модель переноса данных твердых тел, в количестве 1031, и осадочного материала, уложенного в три слоя. Несжимаемый поток исследует три фазы: воздух, вода и седиментационная фаза (sediment). Рассматриваемая форма трехмерной модели состоит из двух комплексных препятствий: барьер трапециевидной формы, содержащим частичное отверстие и преграда, состоящая из пяти цилиндров, диаметром 30 мм каждый. Большое разнообразие барьеров необходимо для детального анализа движения водного потока в пределах изучаемой области. Разработанная численная модель прошла проверку тестовой задачей и показала хорошие численные результаты при сравнении с экспериментальными данными и результатами других авторов. Все результаты численного моделирования приложены в виде сравнительных графиков.

Ключевые слова: моделирование прорыва плотины, зона затопления, уравнения Навье-Стокса, алгоритм PISO, метод VOF, модель LES, твердые частицы, седимент.

Введение. Анализ распространения потока воды при техногенной катастрофе представляется довольно сложным процессом, поскольку для моделирования необходимо учитывать множество влияющих факторов. При условии создания численной модели без изъяна, несомненно, возникают новые факторы, оказывающие влияние на моделирование водного потока. Для имитации движения водного потока во время разрушения техногенной конструкции, необходимо изучить физическую природу такой катастрофы. Обвал гидротехнических удерживающих сооружений может привести к катастрофическим последствиям таким как: повреждение зданий (S. Soares-Frazão and Y. Zech, 2007, [1]; С. Н. Yu et al., 2019, [2]) и инфраструктур, расположенных возле плотин, а также к подтоплению области вблизи произошедшего прорыва дамбы.

Для имитации реальных разрушений при прорыве плотины в исследованиях используется гидродинамическая модель и проводится анализ причин возникновения, связанных с некоторыми параметрами. Применяя математические модели существенно упрощается работа с нерегулярной топографией, а также появляется возможность прогнозировать силовые воздействия на конструкции. Разработанные модели считаются корректными, при условии, что они приближены к экспериментальным данным и прошли необходимую проверку тестовой задачей.

На тему прорыва плотины существует большое количество разработанных аналитических и численных методов для моделирования движения водного потока. В данной работе исследуется трехмерная модель, численный метод которой представлен методом объема жидкости (VOF). Данный метод (C.W. Hirt and B.D. Nichols, 1981, [3]) фиксирует интерфейс, отслеживая объемные доли каждой вычислительной ячейки, находящиеся в рассматриваемой сетке, сопоставляя с исследуемыми фазами, а именно, ячейки принимают значения объемной доли от нуля до единицы.

Помимо рассмотрения водного потока анализируется его влияние на различный вид препятствий, оказавшиеся на пути водной массы. В работах (T.J. Chang et al., 2011, [4]; Alibek Issakhov et al., 2018, [5]; Alibek Issakhov and Gulderayim Musakulova, 2018, [6]; Alibek Issakhov and Medina Imanberdiyeva, 2019, [7]) ранее рассматриваются различные модели плотин, что способствовало выбору наиболее благоприятной формы препятствий. В исследовании (J.Duricic et al., 2013, [8]) описываются различные виды препятствий с точки зрения статистических процедур для прогнозирования средней нормированной силы, действующей на преграды. Для рассматриваемой модели исследуется препятствие в виде цилиндров круглой формы, с маленьким диаметром (30 мм), поскольку существует малое количество разработок с использованием данного вида.

Для дополнительного усложнения анализа движения водной массы существует немногочисленное количество работ, в которых рассматриваются переносимые твердые тела. Так, например в исследовании (B.Spinewine, 2005, [9]; G.Pahar and A.Dhar, 2017, [10]) рассматривается модель при разрушении плотины, на которую воздействует эрозия и показывается применение частиц методом SPH. В работе (M.Hassaballah, 2019, [11]; R.Panahiet al., 2006, [12]) исследуется твердое тело, которое опускают с высоты 10 см, и показывается его воздействие на водный поток. В разработанной модели изучается поток, состоящий из неньютоновской жидкости, необходимая для согласования с частицами и осадочным материалом, как и в исследовании (Xingyue Li and Jidong Zhao, 2018, [13]; K.Hosseini et al., 2019, [14]). Во время реального разрушения плотины твердые тела могут причинить серьезные повреждения близко расположенным зданиям и даже привести к жертвам, поэтому следует внимательно провести анализ транспорта плавающих твердых частиц. Так, например в исследовании (R. V.Canelas et al., 2016, [15]) рассматривается водный поток с использованием одной, трех и шести твердых тел в форме куба. Разрушение плотины с 12 твердыми цилиндрами моделируется с использованием модели DEM хорошо показано в работе (S.Zhanget al., 2009, [16]; R. V.Canelas et al., 2016, [15]). В описанных выше работах не исследуется движение потока жидкости с большим количеством транспонируемых твердых частиц, который проходит через различные преграды. Существуют работы, в которых рассматривается плавающее тело, имеющее 6 степеней свободы оказывающее влияние на две фиксированные преграды (A.Amicarellet al., 2015, [17]). А также модель с двумя препятствиями и тремя плавающими транспортабельными телами, описанная в исследовании (R.Albano et al., 2016, [18]; Zidi Wang et al., 2019, [19]).

Достоверная численная модель, описанная в данной работе, исследует поток неньютоновской жидкости с транспортабельными твердыми частицами, в количестве 1031, и осадочным материалом (sediment), который движется через две фиксированные преграды.

Статья построена следующим образом. Описаны математическая и турбулентные модели, которые являются основой для исследуемой модели. Следующим этапом исследуется тестовая задача прорыва плотины и оценивается достоверность численных результатов. На заключительном этапе представлена разработанная трехмерная модель, описаны все детали, приведены сравнительные графики полученных численных результатов исследуемой модели прорыва плотины и экспериментальных данных.

Условия и методы исследований. Для моделирования движения потока следует использовать трехмерное уравнение неразрывности и уравнения Навье-Стокса для несжимаемой жидкости.

Рассмотрим данную систему в векторном виде:

$$\nabla \cdot \mathbf{u} = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial \mathbf{u}}{\partial t} + (\mathbf{u} \cdot \nabla) \mathbf{u} = \frac{1}{\rho} \mathbf{f} - \frac{1}{\rho} \nabla p + \frac{1}{\rho} \nabla \cdot (\mu_{eff} \nabla \mathbf{u}) \quad (2)$$

здесь $\mu_{eff} = \mu + \mu_t$, \mathbf{u} – компонента скорости потока, t – время движения, p – сила давления, ρ – плотность вещества, \mathbf{f} – внешняя сила, μ – динамическая вязкость, μ_t – турбулентная вязкость. Взаимосвязь между внешней силой и плотностью задается в виде $\mathbf{f} = \rho \mathbf{g}$, где $\mathbf{g} = \text{const}$, ускорение свободного падения.

Система уравнений (1)-(2) представлена в консервативной форме векторного вида. Учитывая, что плотность является константой в области, где решаются эти уравнения, представляется возможным исключить конвективные члены уравнения импульса и переменные, зависящие от времени. Физические свойства двухфазной смеси усредняются с помощью весового коэффициента в фазовом уравнении:

$$\begin{aligned} \rho &= \alpha \rho_1 + (1 - \alpha) \rho_2 \\ \mu &= \alpha \mu_1 + (1 - \alpha) \mu_2 \end{aligned} \quad (3)$$

здесь индекс 1- жидкость и 2- воздух соответственно.

Для моделирования потока газожидкостной смеси используется метод объема жидкости (VOF), основной задачей которого являлось изучение несжимаемого потока. Разработанная модель прорыва плотины состоит из трех фаз: вода, воздух и фаза для отложения осадков в качестве имитации натуральной поверхности. Если в данной ячейке это значение равно 0, то оно пустое, если равно 1, то оно заполняется, если его значение лежит между 0 и 1, то полагается, что ячейка содержит свободную (межфазную) границу.

В начальный момент времени $t = 0$ зависимость данной величины задано следующим выражением: $\alpha(x, y, z, t) = 0$, далее следует рассматривать как уравнение переноса

$$\frac{\partial \alpha}{\partial t} + \frac{\partial \alpha u_i}{\partial x_i} = 0 \quad (4)$$

Значения объемной доли вычисляются на предыдущем временном шаге с помощью явной дискретизации, иными словами, используется уже полученная информация.

Используя закон сохранения массы, получим уравнение неразрывности в следующем виде:

$$\frac{\partial u_j}{\partial x_j} = 0$$

Перепишем систему уравнений Навье-Стокса:

$$\frac{\partial u_i}{\partial t} + u_j \frac{\partial u_i}{\partial x_j} = f_i + \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x_i} + \nu \frac{\partial^2 u_i}{\partial x_j \partial x_j} + f_{si}$$

здесь f_{si} внешняя сила, которая определяется формулой $f_{si} = \frac{\beta(u_{pi} - u_i)}{\rho}$, где u_{pi} - компонента скорости частицы, β - коэффициент доли пустот ячеек.

В случае, когда коэффициент доли пустот β меньше 0.8 уравнение пустот для уплотненного слоя рассчитывается без данного показателя. В случае если рассматриваемый коэффициент больше 0.8, то для данной области используется модифицированное уравнение сопротивления жидкости, поскольку влияние частицы оказывает слабое воздействие на движение водной массы.

Рассмотрим закон равновесия силы, который действует на частицы. В данном исследовании используется модель, способную анализировать траекторию частицы в дискретной фазе, интегрируя закон равновесия сил, действующих на частицу, который записан в лагранжевой системе отсчета. Закон равновесия сил можно представить в следующем виде:

$$\frac{d\vec{u}_p}{dt} = \frac{\vec{u} - \vec{u}_p}{\tau_r} + \frac{\vec{g}(\rho_p - \rho)}{\rho_p} + \vec{F}^{\ddagger} \quad (*)$$

здесь \vec{F}^{\ddagger} - сила дополнительного ускорения массы частицы, член $\frac{\vec{u} - \vec{u}_p}{\tau_r}$ - компонент, отвечающий за силу сопротивления на единицу массы частицы и время релаксации частицы тела τ_r определяется по формуле $\tau_r = \frac{\rho_p d_p^3}{18\mu c_d Re}$.

Здесь τ_r - время релаксации частицы, \vec{u} - компонент фазовой скорости потока, \vec{u}_p - компонент скорости частицы, μ - коэффициент вязкости потока, ρ - плотность жидкости, ρ_p - плотность тела частицы, d_p - диаметр частицы, Re - относительное число Рейнольдса, задаваемое формулой: $Re \equiv \frac{\rho d_p |\vec{u}_p - \vec{u}|}{\mu}$.

Для детального анализа движения водной массы с частицами необходимо определить скорость частицы в каждой точке траектории. Проинтегрировав уравнение (*) по времени, получим скорость частицы в каждой точке траектории, где данная траектория определяется в следующем виде

$$\frac{dx}{dt} = u_p \quad (1)$$

Уравнения (*) и (1) связаны обыкновенными дифференциальными уравнениями, поэтому можно переписать в следующем виде:

$$\frac{du_p}{dt} = \frac{1}{\tau_p}(u - u_p) + a \quad (1^*)$$

здесь величина a содержит дополнительные ускорения, возникающие под действием других сил, кроме силы сопротивления.

Турбулентная модель. С целью замыкания системы уравнений (1) и (2) приведенных для математической модели используется турбулентная модель Метод крупных вихрей (англ. LES (Large Eddy Simulation)). Турбулентная модель обязывает добавление эффективной вязкости, приведенную в работе (Joseph Smagorinsky, 1963, [20]). Применив данное усреднение к системе уравнений Навье-Стокса и сделав некоторые преобразования, можно записать в следующем виде:

$$\frac{\partial \tilde{u}_k \tilde{u}_i}{\partial x_k} + \frac{\partial \tilde{u}_k \tilde{u}_i}{\partial x_k} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial \tilde{p}}{\partial x_i} + \nu \frac{\partial}{\partial x_k} \left(\frac{\partial \tilde{u}_i}{\partial x_k} \right) - \frac{\partial \tau_{SGS}}{\partial x_k}$$

$$\frac{\partial \tilde{u}_k}{\partial x_k} = 0$$

Для метода крупных вихрей вязкость рассчитывается по формуле:

$$\mu_{eff} = \mu + C_s^2 \Delta^2 \sqrt{2S_{ij}^2} \quad (5)$$

здесь μ – коэффициент динамической вязкости, C_s – коэффициент Смагоринского, и S_{ij} определяется по формуле: $S_{ij} = \frac{(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i})}{2}$. Для данной модели коэффициент Смагоринского принимается за $C_s = 0.2$. В исследуемой численной модели масса водного потока заменяется неньютоновской жидкостью для изучения более вязкой среды.

Алгоритм численного моделирования. Для реализации движения потока при обвале гидротехнических сооружений необходимо численно решить уравнения турбулентной модели. В качестве алгоритма численного моделирования для решения системы уравнений (1)-(5) был выбран метод PISO (Pressure Implicit with Splitting of Operators) (R.I. Issa, 1986, [21]).

Скорректированные первой поправкой компоненты скорости, могут не удовлетворять полностью уравнению неразрывности, поэтому вводится дополнительно второй корректор, способный вычислить компоненты скорости и поля силы давления. Вычислительный алгоритм PISO обращается к системе предиктор-корректор, состоящий из трех шагов, и может быть записан в следующем виде:

1. Шаг предиктора: Первым этапом необходимо предположить силу давления p^* и представить компоненты скорости u^* и v^* с использованием дискретной аппроксимации уравнения закона сохранения импульса. Оценка силы давления полученная на первом этапе может быть неправильной поэтому решение продолжается на втором этапе.

2. Шаг корректора 1: Поправочные коэффициенты определяются по следующим формулам: $p' = p^{**} - p^*$, $v' = v^{**} - v^*$, $u' = u^{**} - u^*$, здесь коэффициенты p^{**}, v^{**}, u^{**} соответствуют правильному давлению и компонентам скоростей движения; компоненты p', v', u' являются поправками; компоненты p^*, v^*, u^* приходятся предполагаемым давлением и компонентами скоростей движения из первого шага предиктора. Поставив исправленное давление p^{**} для корректора, используя приведенные выше вычислительные формулы, получим исправленные компоненты скорости движения u^{**} и v^{**} для корректора. После того как корректор для силы давления p' будет известен, станет возможным найти корректор для компонент скоростей движения v' и u' .

3. Шаг корректора 2: Рассмотрим дополнительные значения для второго этапа проверки необходимых компонент:

$$p^{***} = p^{**} + p''; p'' = p^* + p',$$

$$u^{***} = u^{**} + u''; u'' = u^* + u',$$

$$v^{***} = v^{**} + v''; v'' = v^* + v', \quad \text{где } p^{***}, u^{***}, v^{***} - \text{соответственно}$$

корректные компоненты давления и скорости движения, p'', u'', v'' - корректные поправки для второго шага. Заметим, что $p = p^{***}, u = u^{***}, v = v^{***}$, здесь p, u, v – корректные компоненты силы давления и скорости.

Результаты исследований. Проверка работы всех алгоритмов с помощью моделирования тестовой задачи.

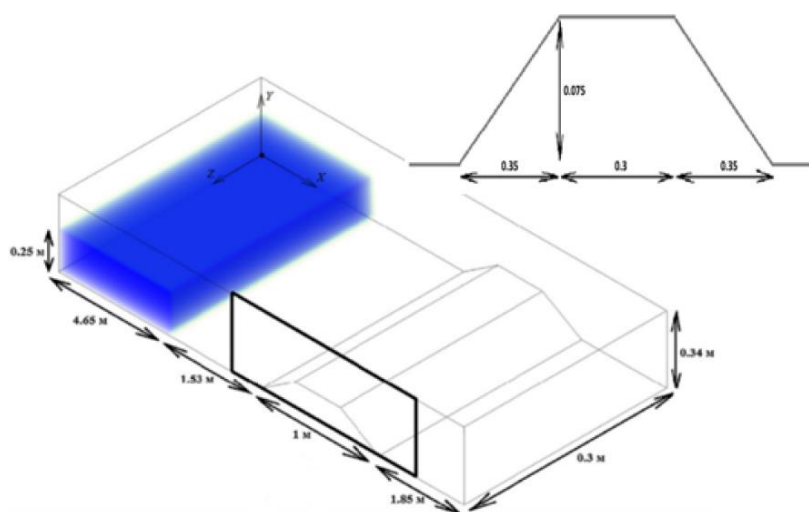


Рис. 1. 3D Геометрия резервуара с барьером в форме трапеции

Для корректной работы численной модели следует сперва убедиться в правильности выполнения всех алгоритмов, путем моделирования тестовой задачи. Вычисленные численные результаты данной тестовой модели сравниваются с экспериментальными данными (S. Kocaman, 2007, [22]), а также с полученными численными результатами (R. Marsooliand W. Wu, 2014, [23]) и (H. Ozmen-Cagatayand S. Kocaman, 2011, [24]) при тех же условиях. Схема трехмерного резервуара показана на рис. 1. Тестовая проблема моделирует движение воды через уступ трапециевидной формы. Такая форма выбрана не случайно, поскольку является наиболее эффективной для уменьшения силы давления оказываемое водной массой на барьеры при прорыве плотины. Длина резервуара, указанного на рис. 1, составляет по оси $x = 9,03$ м, вдоль оси $y = 0,34$ м и по оси $z = 0,3$ м. Трапециевидный техногенный барьер имеет длину вдоль оси x 1 м, по оси y равен 0,075 м, а вдоль оси $z = 0,3$ м. Мобильные ворота, которые удерживают объем воды, расположены перпендикулярно вдоль оси x на расстоянии $x = 4,65$ м. В начальный ($t=0$) момент времени высота воды находится на отметке $h_0 = 25$ см.

На первом этапе моделирования происходит поднятие мобильных затворов, удерживающих водный поток, в качестве имитации разрушения гидротехнической конструкции. После этого водная масса начинает свое движение под действием силы тяжести, здесь ускорение свободного падения направлено вниз. Для численного моделирования тестовой проблемы используется равномерная сетка, состоящая из 1518720 элементов. Размер вычислительных ячеек составляет 10 мм.

На рис. 2 можно наблюдать сравнение полученных собственных численных результатов, отмеченных синей линией на графиках и результаты других авторов, указанных ранее. Для реализации тестовой модели аналогично работе (R. Marsooliand W. Wu, 2014, [23]), была использована турбулентная модель крупных вихрей (LES), однако в исследовании (H. Ozmen-Cagatayand S. Kocaman, 2011, [24]) использовали модель k - ϵ модель, при размере вычислительных ячеек 5 мм. Сравнивая полученные численные результаты с экспериментальными данными (S. Kocaman, 2007, [22]), можно

сделать вывод, что турбулентная модель вихрей LES дает наиболее точный результат по сравнению с реальным экспериментом, чем полученные значения из работы (H. Ozmen-Cagatay and S. Kocaman, 2011, [24]), в которой использовали турбулентную модель k-эпсилон. Сравнительный анализ показывает хорошее согласие с экспериментом (S. Kocaman, 2007, [22]) и расчетами других авторов (H. Ozmen-Cagatay and S. Kocaman, 2011, [24]; R. Marsooli and W. Wu, 2014, [23]), что доказывает правильность соблюдения всех алгоритмов, так как расчеты тестовой задачи оказались очень близки с экспериментальными данными.

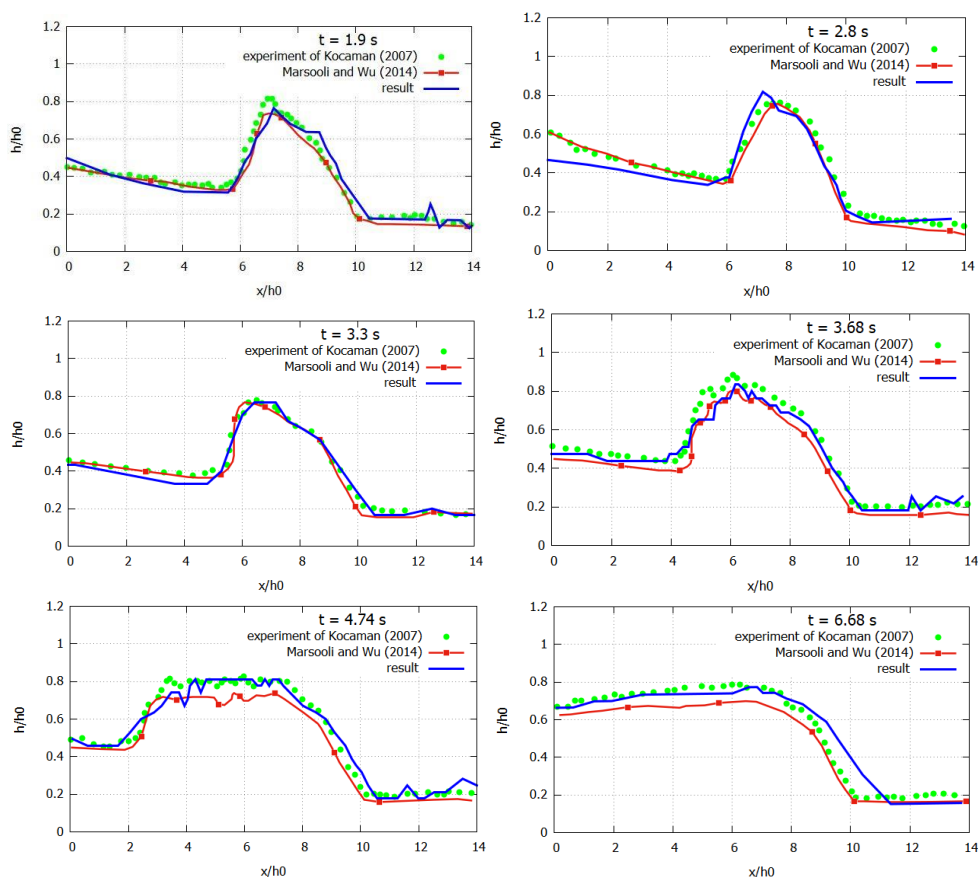


Рис. 2. Изменения уровня воды во время прорыва плотины в течение определенного времени

Обсуждение результатов исследований. Резервуар с трапецидальным препятствием и в форме цилиндров.

Разработанная численная трехмерная модель с двумя барьерами исследует движение водной массы при прорыве техногенного сооружения, с добавлением плавающих твердых тел, имитирующих обломки. Схема рассматриваемого резервуара показана на рис.3. Первое препятствие, созданное в виде трапеции, имеет частичное отверстие в 0,075 м вдоль всей длины и расположено на 1,85 м от правой стенки резервуара. Второе препятствие, расположенное на расстоянии 0,925 м от правой стенки исследуемого танка, содержит 5 цилиндров. Диаметр каждого из цилиндров составляет 0,03 м, а высота равняется 0,1 м по оси у. Более подробную схему

барьера, состоящего из пяти цилиндров, можно наблюдать на рис. 4. Для реализации численной модели с непростой геометрией была введена трехмерная система координат, центр которой представлен на рис.3. Вектор ускорения свободного падения действует в противоположном направлении оси y . Эффективность барьера в форме трапеции уже доказана для тестовой модели. Второе препятствия, состоящее из пяти цилиндров, обладает пропускной способностью, для свободного перемещения водной массы после уменьшения ее скорости первым барьером. Данная модификация препятствия не позволяет водному потоку накапливаться, тем самым, не создается большое давление на плотину, что уменьшает вероятность разрушения. А также колонны способны задерживать большие твердые тела, имитирующие обломки во время разрушения техногенной плотины.

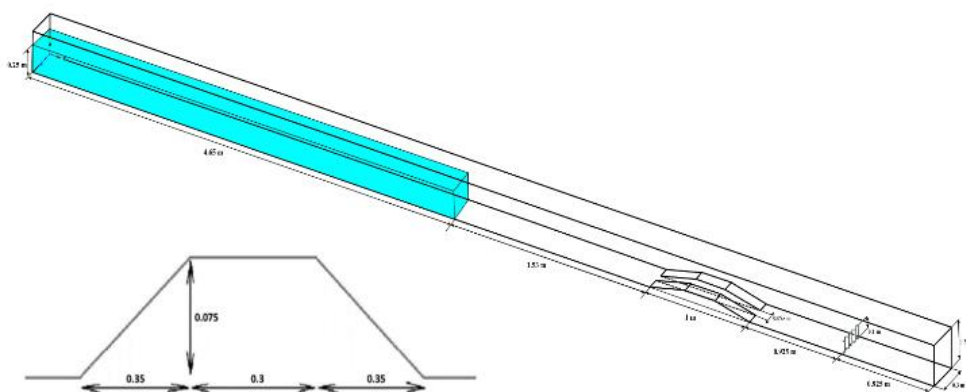


Рис. 3. 3D Геометрия резервуара трапециевидным барьером и преградой в форме цилиндров и схема препятствия в разрезе

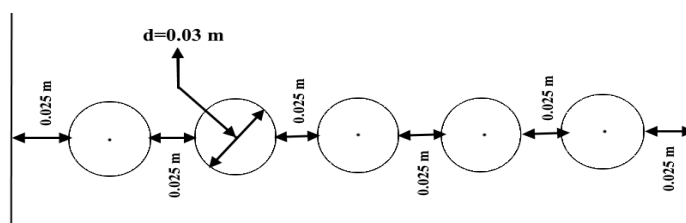


Рис. 4. Схема второго препятствия, имеющего форму цилиндров. Вид сверху

Исследование потока жидкости во время разрушения дамбы происходит точно так же, как и для тестовой задачи, рассмотренной ранее. Мобильные затворы, удерживающие поток жидкости, расположены перпендикулярно оси x на расстоянии $x = 4,65$ м. В начальный момент времени ($t=0$) высота воды находится на отметке $h_0 = 25$ см, как можно видеть из рис.3. На первом этапе ворота, сдерживающие жидкостную массу, разрушаются и исследуемый поток начинает свое движение под действием силы тяжести.

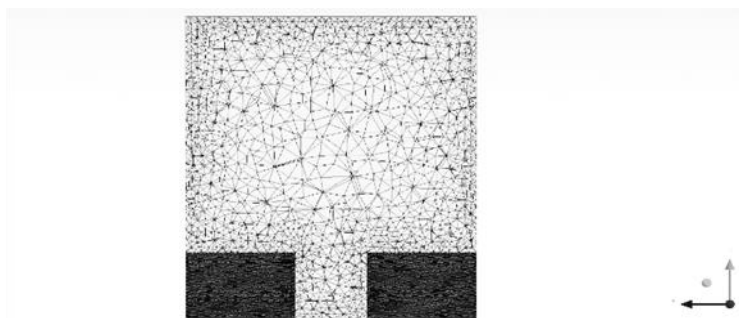


Рис. 5. Расчетная сетка в разрезе, посередине препятствия, имеющие длину 1 м

Вычислительная сетка, состоящая из 4 464 648 элементов и 864225 узлов (nodes), изображена на рис.5 и 6. Размер каждой расчетной ячейки равен 7,5 мм. Подробно в разрезе можно рассмотреть на рис. 5. Из рис.5 можно заметить, что вычислительная сетка является неструктурированной, поскольку состоит из простых фигур: треугольники или тетраэдры.

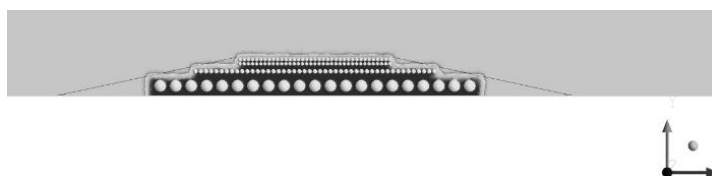


Рис. 6. Три слоя транспортабельных твердых тел и осадочного материала.
Вид сбоку

В дополнение к реализации сложной геометрии резервуара с двумя преградами присоединяется исследование транспорта твердых частиц, плотностью 2800 кг/м^3 , а также формируется новая фаза слоя осадочного материала (sediment). Плавающие твердые частицы вместе со слоями осадочной грязи добавлены в частичное отверстие, которое составляет 0,075 м, первого барьера, в форме трапеции, в качестве имитации обломков гидротехнической плотины. Частицы обломков с грязью уложены в три слоя и чередуются между собой как показано на рис.6. Гранулированный поток, состоящий из трех слоев частиц плотностью 2800 кг/м^3 и диаметром 0.008, 0.01 и 0.035 соответственно. Плавающие твердые тела добавлены в количестве 1031 штук, что является намного большим значением, чем в исследованиях (A. Amicarelli, et al., 2015, [17]; R.Albano et al., 2016, [2]; Zidi Wanget al., 2019, [19]). Размер диаметра больших твердых частиц составляет 0,035 м, выбран не случайно, не позволяет частицам свободно проходить сквозь второе препятствие с цилиндрами, расположенное на расстоянии 0,925 м от первого барьера в исследуемом резервуаре на рис.3.

Разработанная трехмерная модель исследует поведение водного потока, в котором присутствуют транспонируемые твердые тела: частицы разного диаметра. Мелкие частицы с легкостью проходят между цилиндрами, расстояние между которыми составляет 0.025 м, однако твердые тела большего размера застревают в преграде и не могут достигнуть правой стенки рассматриваемого резервуара.

Моделирование движения потока вместе с плавающими частицами и дополнением в виде вязкого слоя осадочного материала доказывает правильность рассматриваемой модели, поскольку дамба в форме цилиндров

способна удерживать крупные плавающие предметы. На этом основании можно сделать вывод, что при реальном разрушении техногенного сооружения становится возможным снизить скорость потока и оказываемое им ударное давление на преграды, а также предотвратить катастрофичный урон, который может быть нанесен большим потоком жидкости с тяжелыми транспортируемыми телами. Полученные численные результаты для исследуемой модели, отображенные на графиках рис. 7, были сравнены с результатами тестовой задачи, описанной ранее.

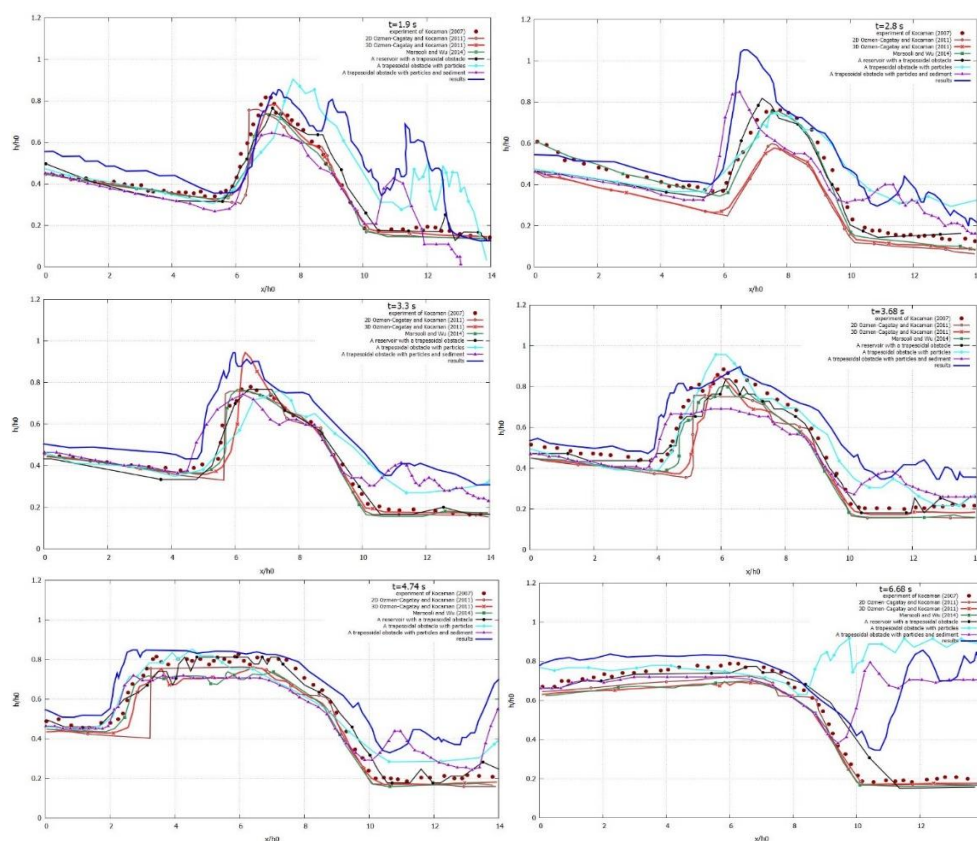


Рис. 7. Графики изменения уровня воды в течение определенного времени

Проводя анализ полученных расчетов, отмеченных синей линией на рис. 7, следует отметить хорошее согласие с экспериментом и вычислительными данными тестовой задачи. Однако же, аномальный рост уровня воды на последних секундах испытания объясняется тем, что плавающие частицы скапливаясь преграждают свободный коридор, по которому движется водный поток. Для снижения уровня воды и уменьшения давления, которое оказывает поток жидкости на плотину, целесообразно дополнить геометрию, добавив еще одно препятствие, которое и рассматривается в данной работе. Преграда в форме цилиндров не монолитная, а содержит отверстия, через которые водный поток с дополнениями имеет возможность свободно проходить, поэтому можно наблюдать снижения высоты столба потока. Другими словами, поскольку, в барьере существуют разрывы, по этой причине не наблюдается значительный уровень воды на рис. 9, так как водный поток с легкостью проходит сквозь

цилиндры. Резюмируя, можно сделать вывод, большое скопление водного потока не наблюдается, в случае, когда существуют отверстия в плотине, через которые производится слив жидкости, таким образом, не позволяя увеличиться уровню воды и образовывать большое давление на дамбу.

Заключение. Исследования, приведенные в данной работе, моделируют движение водной массы с плавающими твердыми частицами сквозь вязкий осадочный слой. Для процесса моделирования необходимо применять упрощение и идеализацию процесса, поскольку возможность современных компьютеров пока ограничена и не способна учесть все естественные факторы. Помимо этого, в работе указывается на проблему выявления причин, которые могут привести к катастрофе. Одна из таких проблем – определение максимального давления, оказываемое на гидротехническое сооружение. Волны, вызванные разрушением плотины, могут стать причиной крупного наводнения с многочисленными жертвами и повреждениями. По этой причине в данной работе рассматривалось движение водного потока вместе с гранулированными частицами при разрушении плотины, которые передвигаясь могли нанести урон в зоне затопления. При помощи данной численной модели рассматривалось влияние осадочного слоя на снижение скорости водного потока.

Вычислительный эксперимент моделирует движение водного потока, который является неньютоновской жидкостью, с добавлением плавающих твердых частиц, в количестве 1031, и осадочным материалом (sediment), где твердые тела являлись имитацией обломков при разрушенной конструкции гидротехнического сооружения, а остаточный материал в качестве вязкого препятствия, который затрудняет движение водного потока. Математическая модель для тестовой и главной задачи основана на уравнениях Навье-Стокса для несжимаемой жидкости. Численный алгоритм представлен методом PISO. В качестве численного метода был использован метод VOF, который подтвердил свою эффективность для моделирования трехмерных задач близкие к реальным условиям.

Из полученных результатов следует сделать вывод, что осадочный материал способен увеличить глубину жидкости в зоне затопления. Однако, препятствие в виде цилиндров, в рассматриваемом резервуаре, свободно пропускает поток жидкости, таким образом, снижается высота столба жидкости потока. Осадочные слои значительно тормозят скорость потока жидкости, как следствие снижается ударное давление, оказываемое на преграды, при этом уменьшается возможный риск ущерба дамб.

Описанная в этой работе, вычислительная трехмерная модель является достоверной, поскольку прошла проверку тестовой задачей и показала хорошие результаты при сравнении с экспериментальными данными. Численные результаты и попытки могут быть применены для будущих исследований, прогнозирующие критическое давление, с использованием более реалистичных каналов и модифицированных препятствий, которые будут учитывать все факторы, как например, рельеф местности и условия окружающей среды.

Список литературы

1. Soares-Frazão, S., & Zech, Y. (2007). Experimental study of dam-break flow against an isolated obstacle. *Journal of Hydraulic Research*, 45(sup1), 27–36.

2. Yu, C. H., Wen, H. L., Gu, Z. H., & An, R. D. (2019). Numerical simulation of dam-break flow impacting a stationary obstacle by a CLSVOF/IB method. *Communications in Nonlinear Science and Numerical Simulation*, 79, 104934.
3. C.W. Hirt, B.D. Nichols, Volume of fluid (VOF) method for the dynamics of free boundaries, *J. Comput. Phys.* 39 (1981) 201–225.
4. T.-J. Chang, H.-M. Kao, K.-H. Chang and M.-H. Hsu, Numerical simulation of shallow-water dam break flows in open channels using smoothed particle hydrodynamics, *Journal of Hydrology*, 408(1-2), 2011, 78–90.
5. A. Issakhov, Y. Zhandaulet, A. Nogaeva, Numerical simulation of dam break flow for various forms of the obstacle by VOF method, *Int. J. Multiph. Flow* (2018).
6. A. Issakhov, G. Musakulova, Numerical Simulation for Forecasting the Flooding Flow Impact on Different Shape of Dam, *INTERNATIONAL CONFERENCE OF NUMERICAL ANALYSIS AND APPLIED MATHEMATICS (ICNAAM 2017)*, 2018.
7. A. Issakhov, M. Imanberdiyeva, Numerical simulation of the movement of water surface of dam break flow by VOF methods for various obstacles, *INTERNATIONAL JOURNAL OF HEAT AND MASS TRANSFER* (2019) 1030-1051.
8. Duricic, J., Erdik, T., Pektaş, A., & van Gelder, P. (2013). Mean Normalized Force Computation for Different Types of Obstacles due to Dam Break Using Statistical Techniques. *Water*, 5(2), 560–577.
9. B. Spinewine, Two-layer flow behaviour and the effects of granular dilatancy in dam-break induced sheet-flow. Ph.D. thesis, Universit catholique de Louvain, 12 2005.
10. Pahar, G., & Dhar, A. (2017). Couple din compressible Smoothed Particle Hydrodynamics model for continuum-based modelling sediment transport. *Advances in Water Resources*, 102, 84–98.
11. M. Hassaballah, A. M. Aly and A. Abdelnaim, Interactive fluid flow simulation in computer graphics using incompressible smoothed particle hydrodynamics, *Computer Animation and Virtual Worlds* (2019).
12. Panahi, R., Jahanbakhsh, E., & Seif, M. S. (2006). Development of a VoF-fractional step solver for floating body motions simulation. *Applied Ocean Research*, 28(3), 171–181.
13. X. Li and J. Zhao, Dam-break of mixtures consisting of non-Newtonian liquids and granular particles, *Powder Technology* 338 (2018) 493–505.
14. Hosseini, K., Omidvar, P., Kheirkhahan, M., & Farzin, S. (2019). Smoothed particle hydrodynamics for the interaction of Newtonian and non-Newtonian fluids using the $\mu(I)$ model. *Powder Technology*.
15. R. B. Canelas, A. J. C. Crespo, J. M. Domínguez, R. M. L. Ferreira and M. Gómez-Gesteira, SPH–DCDEM model for arbitrary geometries in free surface solid–fluid flows, *Computer Physics Communications*, 202(2016) 131–140.
16. S. Zhang, S. Kuwabara, T. Suzuki, Y. Kawano, K. Morita and K. Fukuda, Simulation of solid–fluid mixture flow using moving particle methods, *Journal of Computational Physics*, 228(7)(2009) 2552–2565.
17. A. Amicarelli, R. Albano, D. Mirauda, G. Agate, A. Sole, and R. Guandalini, A Smoothed Particle Hydrodynamics model for 3D solid body transport in free surface flows, *Computers & Fluids*, 116 (2015) 205–228.
18. R. Albano, A. Sole, D. Mirauda and J. Adamowski, Modelling large floating bodies in urban area flash-floods via a Smoothed Particle Hydrodynamics model. *Journal of Hydrology*, 541 (2016) 344–358.
19. Zidi Wang, F. Hu, G. Duan, K. Shibata and S. Koshizuka, Numerical modelling of floating bodies transport for flooding analysis in nuclear reactor building, *Nuclear Engineering and Design*, 2019, 341: 390-405.
20. Joseph Smagorinsky, General circulation experiments with the primitive equations, *Mon. Weather Rev.* 91 (3) (1963) 99–164.

21. R.I. Issa, Solution of the implicitly discretized fluid flow equations by operator splitting, *J. Comput. Phys.* 62 (1) (1986) 40–65.
22. S. Kocaman, Experimental and theoretical investigation of dam-break problem Ph.D. dissertation, University of Cukurova, Adana, Turkey, 2007.
23. R. Marsooli, W. Wu, 3-D finite-volume model of dam-break flows over uneven beds based on VOF method, *Adv. Water Resour.* (2014).
24. H. Ozmen-Cagatay, S. Kocaman, Dam-break flow in the presence of obstacle: experiment and CFD simulation, *Eng. Appl. Comp. Fluid* 5 (4) (2011) 541– 552.

Материал поступил в редакцию 14.05.22.

С.И. Миннуллина¹, А.А. Исахов²

¹Қазақстан-Британ техникалық университеті, Алматы, Қазақстан

²әл-Фараби атындағы Қазақ ұлттық университеті, Алматы, Қазақстан

ҚОРҒАНЫС ГИДРОТЕХНИКАЛЫҚ ҚҰРЫЛЫСТАРЫН БҰЗУ КЕЗІНДЕГІ СУ АҒЫНЫНЫҢ ҚОЗҒАЛЫСЫН САНДЫҚ МОДЕЛЬДЕУ

Аннотация. Гидротехникалық құрылысты бұзу нәтижесінде алынған жаппай залалды модельдеу қиын болып көрінеді, өйткені тасымалданатын қатты бөлшектердің сұйықтық ағынына әсер ету сипаты анықталмаған. Бұл жұмыста өзгермелі бөлшектермен су ағынын талдау, сонымен қатар 1031 мөлшерінде қатты денелердің деректерін берудің сандық үш өлшемді моделі және үш қабатқа салынған шөгінді материал ұсынылған. Сығылмайтын ағын үш фазаны зерттейді: ауа, су және тұндыру фазасы (sediment). Үш өлшемді модельдің қарастырылып отырған формасы екі күрделі кедергілерден тұрады: трапеция тәрізді тосқауыл, ішінара ашылуы және әрқайсысының диаметрі 30 мм болатын бес цилиндрден тұратын кедергі. Зерттелетін аймақтағы су ағынының қозғалысын егжей-тегжейлі талдау үшін көптеген кедергілер қажет. Әзірленген сандық модель тест тапсырмасымен тексеріліп, эксперименттік мәліметтермен және басқа авторлардың нәтижелерімен салыстырғанда жақсы сандық нәтижелер көрсетті. Сандық модельдеудің барлық нәтижелері салыстырмалы графиктер түрінде қолданылады.

Тірек сөздер: бөгеттің бұзылуын модельдеу, су басу аймағы, Навье-Стокс теңдеулері, PISO алгоритмі, VOF әдісі, LES моделі, қатты бөлшектер, шөгінділер.

S.I. Minnullina¹, A.A. Issakhov²

¹Kazakh-British Technical University, Almaty, Kazakhstan

²Al-Farabi Kazakh National University, Almaty, Kazakhstan

NUMERICAL MODELING OF THE MOVEMENT OF WATER FLOW DURING THE DESTRUCTION OF PROTECTIVE HYDRAULIC STRUCTURES

Abstract. Modeling massive damage resulting from the destruction of a hydraulic structure is difficult, on the basis that the nature of the impact of transportable solids on the fluid flow is not defined. In this paper, an analysis of a water flow with floating particles is presented, as well as a numerical three-dimensional model for the transfer of these solid bodies, in the amount of 1031, and sedimentary material, laid in three layers. Incompressible flow explores three phases: air, water and sedimentation phase (sediment). The considered form of the three-dimensional model consists of two complex obstacles: a trapezoidal barrier containing a partial hole and an obstacle consisting of five cylinders, each with a diameter of 30 mm. A wide variety of barriers is necessary for a

detailed analysis of the movement of the water flow within the study area. The developed numerical model was tested by a test problem and showed good numerical results when compared with experimental data and the results of other authors. All results of numerical simulation are attached in the form of comparative graphs.

Keywords: dam failure modeling, flood zone, Navier-Stokes equations, PISO algorithm, VOF method, LES model, solid particles, sediment.