МЕЖДУНАРОДНЫЙ
АКАДЕМИК
научный журнал

АКАДЕМИК

МЕЖДУНАРОДНЫЙ НАУЧНЫЙ ЖУРНАЛ

Г.КАРАГАНДА
www.academic-journal.kz

“Международный научный журнал АКАДЕМИК”

№ 1 (124), часть 1, 2021 г.
Апрель, 2021 г.

Караганда
2021 г.

ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ВЛИЯНИЕ ПОТОКА ВОДЫ НА ЗАЩИТНЫЕ ГИДРОТЕХНИЧЕСКИЕ СООРУЖЕНИЯ ПРИ ПОДВИЖНОМ СЛОЕ

Исахов А.А., Ногаева А.К.

Казахский Национальный университет им. аль-Фараби

АО «Казахстанско-Британский технический университет»

АННОТАЦИЯ

Целью данной работы является исследование воздействия импульсных волн на гидротехнические сооружения, вызванных подвижным слоем. Для моделирования этого процесса используются трехмерное уравнение неразрывности и усредненные по Рейнольдсу уравнения Навье-Стокса (RANS) для несжимаемых потоков трех несмешивающихся фаз. Для аппроксимации свободной поверхности используется метод объема жидкости (VOF). Для калибровки модели были использованы фактические результаты лабораторных экспериментов. Корректность работы модели была показана путем сравнения численных результатов с экспериментальными данными.

Ключевые слова: Прорыв дамбы, подвижной слой, метод объема жидкости, усредненные по Рейнольдсу уравнения Навье-Стокса

ТҮЙІНДЕМЕ

Бұл жұмыстың мақсаты жылжымалы қабаттан туындаған гидравликалық құрылымдарға импульстік толқындардың әсерін зерттеу болып табылады. Бұл процесті модельдеу үшін үш өлшемді үздіксіздік теңдеуі және Рейнольдс бойынша орташаланған Навье-Стокс теңдеулері (RANS) үш араласпайтын фазалардың сығылмайтын ағындары үшін қолданылады. Бос беттің аппроксимациясы үшін сұйықтық көлемінің әдісі (VOF) қолданылады. Модельді тексеру үшін зертханалық эксперименттердің нақты нәтижелері

пайдаланылды. Модель жұмысының дұрыстығы сандық нәтижелерді эксперименттік деректермен салыстыру арқылы көрсетілді.

Түйінді сөздер: Бөгеттің бұзылуы, сұйықтық көлемі әдісі, қозғалмалы қабат, Рейнольдс бойынша орташаланған Навье-Стокс теңдеулері

ANNOTATION

The purpose of this work is to study the impact of pulsed waves on hydraulic structures caused by a moving layer. To model this process, we use the three-dimensional continuity equation and the Reynolds-averaged Navier-Stokes equations (RANS) for incompressible flows of three immiscible phases. The free-surface movement captured by using the volume of fluid (VOF) method. The accuracy of the numerical models were tested using the actual laboratory experiments. The correctness of the model was shown by comparing the numerical results with the experimental data.

Key words: Dam break, moving bed, VOF method, RANS equations

Введение

Различные факторы воздействия, которые приводят к разрушению гидротехнических сооружений, связаны с резким увеличением потока воды. Такими факторами могут быть: интенсивные таяния снега и льда, сильные осадки и высокая влажность почв и человеческий фактор.

Разрушение гидротехнических сооружений является событием, которое приводит к материальному ущербу и нанесению значительного ущерба окружающей среде, а также к гибели людей. Ярким примером импульсивной волны вызванной подвижным слоем является мегацунами в заливе Литуйя в 1958 году, в результате землетрясения магнитудой 8.3 с гор сошёл мощный оползень. В воды залива обрушилось около 30 миллионов кубических метров камней и льда что высвободило достаточно энергии, чтобы создать гигантскую волну, способную достигнуть 524 м высоты.

С увеличением вычислительной мощности, моделирование данного процесса стало эффективным средством принятия решений в этой области. В последние десятилетия большое внимание уделяется методам численного расчета течений со свободной поверхностью, которые задействованы в различных областях техники. При разрушении гидротехнических сооружений высвобождается объем смешанной жидкости, где свободной поверхностью является фазовая граница между жидкостью и находящимся над ней газом [1]. В предыдущих работах данный процесс изучали с учетом не только соотношения плотностей флюидов [2-4], но и влияние на структуры [5-6], при наличии препятствия [6-7], с учетом эффекта наклона [8-9] и интенсивности турбулентности и физики двухфазного потока [8-12]. Также были исследования, где рассматривают поток как смесь воды и частиц [13-14]. Общие этапы данных работ можно классифицировать как теоретический анализ, экспериментальные измерения и численное моделирование.

Для моделирования потока несжимаемой жидкости через препятствия различной формы используется усредненные по Рейнольдсу уравнения Навье-Стокса. Для аппроксимации свободной поверхности используется вычислительный метод объема жидкости. Точность данного вычислительного метода объема жидкости был проверен в предыдущих работах с помощью сравнения численных результатов с экспериментальными данными [26].

Моделирование данного процесса дает возможность определения оптимальных решений. Важным параметром при анализе результатов является изменение давления потока на гидротехнические сооружения. При численной реализации различных сценариев выявляется оптимальный вариант с помощью сравнения результатов.

Математическая модель

Определяющие уравнения для моделирования этого процесса выполняются трехмерными уравнениями неразрывности и усредненными по

Рейнольдсу уравнениями Навье-Стокса (RANS) для несжимаемых потоков трех несмешивающихся фаз.

$$\frac{\partial u_j}{\partial x_j} = 0 \qquad (1)$$

$$\frac{\partial u_j}{\partial t} + \frac{\partial u_i u_j}{\partial x_j} = \frac{1}{\rho} f - \frac{1}{\rho}\frac{\partial P}{\partial x_i} + \frac{1}{\rho}\frac{\partial}{\partial x_j}(\tau + \mu_t) \qquad (2)$$

$$\frac{\partial \chi}{\partial t} + u_j \frac{\partial \chi}{\partial x_j} = 0 \qquad (3)$$

где, u - скорость потока, t - время, p - давление, ρ - плотность, f - средняя внешняя сила, τ - тензор напряжений, μ_t – турбулентная вязкость, χ - фазовая характеристика. Рассматриваемая внешняя сила - это сила тяжести, где $f = \rho g$, g - ускорение свободного падения.

Для замыкания усредненных по Рейнольдсу уравнений Навье - Стокса (1) - (3) используются различные турбулентные модели. Одна из основных трудностей при моделировании турбулентных течений - это прогнозирование отрыва потока от плоской поверхности. Турбулентных моделей, описываемых двумя стандартными уравнениями, недостаточно для описания отрыва потока от плоской поверхности и его уровня в случае неблагоприятного градиента давления. Отрыв потока от плоской поверхности играет ключевую роль во многих технических вопросах. SST k - ω адекватно моделирует распределение потока с плоской поверхности и ее уровня с учетом транспортных эффектов вихревой вязкости при неблагоприятном градиенте давления.

$$\frac{\partial \rho k}{\partial t} + \frac{\partial \rho u_j k}{\partial x_j} = P_k - \beta^* k\omega + \frac{\partial}{\partial x_j}\left((\mu + \delta^* \mu_t)\frac{\partial k}{\partial x_j}\right)$$

$$\frac{\partial \rho \omega}{\partial t} + \frac{\partial \rho u_j \omega}{\partial x_j} = \alpha S^2 - \beta \omega^2 + \frac{\partial}{\partial x_j}\left((\mu + \delta_\omega \mu_t)\frac{\partial \omega}{\partial x_j}\right) +$$

$$+2(1 - f_1)\delta_{\omega 2}\frac{1}{\omega}\frac{\partial k}{\partial x_i}\frac{\partial \omega}{\partial x_i}$$

где

$$\mu_t = \frac{a_1 k}{\max(a_1 \omega_1 S f_2)}$$

$$P_{k_1} = \mu_t \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i}\right)\frac{\partial u_i}{\partial x_j} - \frac{2}{3}\frac{\partial u_k}{\partial x_k}(3\mu_t \frac{\partial u_k}{\partial x_k} + \rho k)$$

$$f_2 = \tanh((\max(\frac{2\sqrt{k}}{\beta^* \omega y}, \frac{500\mu}{y^2 \omega}))^2)$$

$$P_k = \min(P_{k_1}, 10\beta^* k\omega)$$

$$f_1 = \tanh((\min(\max\left(\frac{2\sqrt{k}}{\beta^* \omega y}, \frac{500\mu}{y^2 \omega}\right), \frac{4\delta \omega_2 k}{CD_{k\omega} y^2}))^4)$$

$$CD_{k\omega} = \max(2\rho \delta_{\omega_2} \frac{1}{\omega}\frac{\partial k}{\partial x_i}\frac{\partial \omega}{\partial x_i}, 10^{-10})$$

$$\varphi = \varphi_1 f_1 + \varphi_2 (1 - f_1)$$

Константы имеют следующие значения:

$$\alpha_1 = \frac{5}{9} \qquad \alpha_2 = 0.44, \ \beta_1 = 0.0828$$

$$\beta^* = \frac{9}{100} \quad \delta_{k_1} = 0.85 \quad \delta_{k_2} = 1$$

$$\delta_{\omega 1} = 0.5 \quad \delta_{\omega 2} = 0.856$$

Верификация двухмерной модели

Калибровка двухмерной модели производилась с помощью сверки численных и экспериментальных данных [14]. Испытательная площадка эксперимента представляет собой резервуар с размером 6 × 0.7 м (Рисунок 1). Дно резервуара покрыто подвижным слоем неньютоновской жидкости плотностью 2683 кг/м^2. Левая половина резервуара над подвижным слоем наполнена водой высотой 0.35 м. Во время эксперимента вода за счет гравитации стекает вниз и приводит к движению подвижной слой.

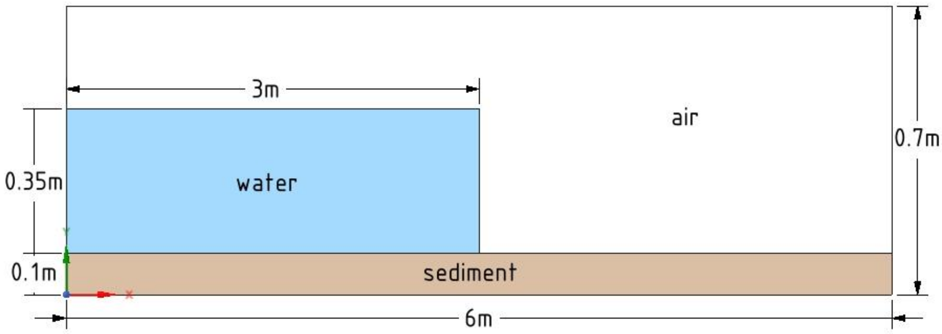

Рисунок 1. Геометрия экспериментальной установки

Для моделирования тестовой задачи использовалась структурированная сетка с размером 0.01 м. На Рисунке 2 показано, что рассчитанные профили свободной поверхности хорошо совпадают со значениями эксперимента [14] и расчетными значениями других авторов [16]. Снимки моделирования и эксперимента в разные моменты времени показаны на Рисунке 3. Как видно из рисунка, поток воды замедляется трением и приводит к движению вязкой фазы.

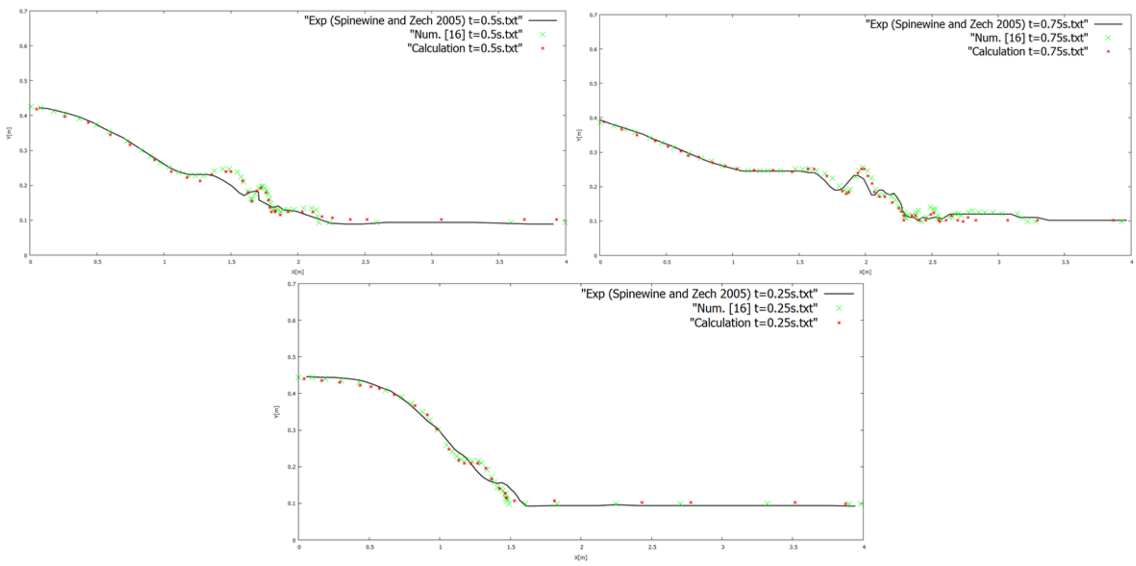

Рисунок 2. Профили свободной поверхности в разные моменты времени t=0.25, 0.5, 0.75 с

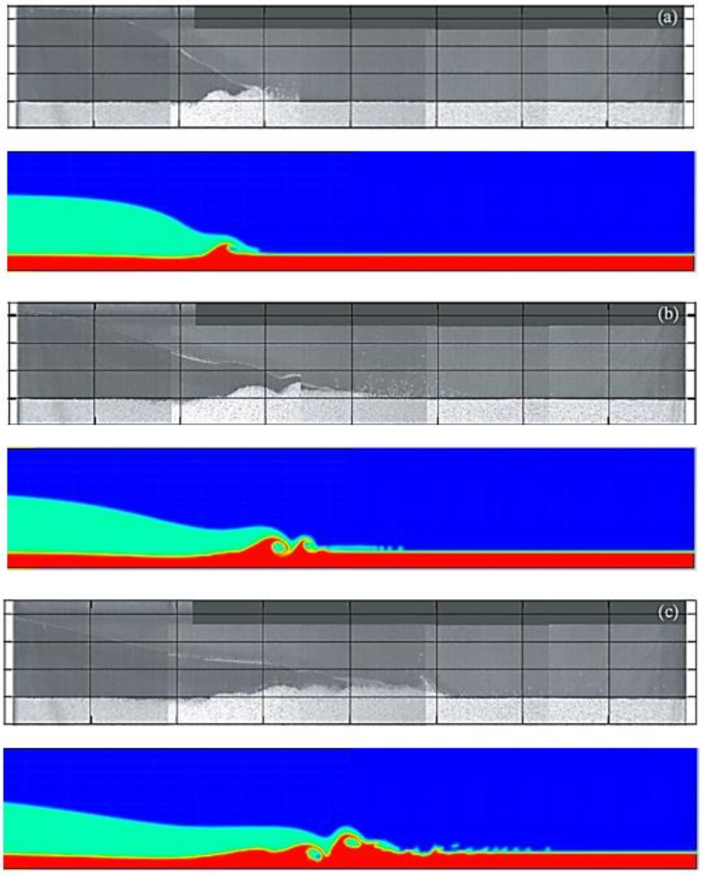

Рисунок 3. Снимки моделирования и эксперимента [14] в разные моменты времени t=0.25, 0.5, 0.75 с

Верификация трехмерной модели

Эксперимент по прорыву плотины был проведен для проверки трехмерной модели [8]. Испытательная площадка представляет собой резервуар с размером 3.22 × 1 × 1 м. Правая часть ограничена перегородкой, где объем высотой 0.55 м заполнен водой. Внутри резервуара находится контейнер коробчатой формы. Контейнер содержит 8 датчиков, измеряющих изменение давления. Четыре из них расположены на противоположной стене плотины, остальные на верхней поверхности. На Рисунке 4 показана экспериментальная геометрия и расположение датчиков.

Во время эксперимента в результате прорыва дамбы жидкость в резервуаре под действием силы тяжести стекает вниз. Когда поток достигает плотины, давление потока на стенку плотины измеряется датчиками. Эксперимент проводится до тех пор, пока поток не достигнет противоположной стенки и не вернется в стационарное состояние.

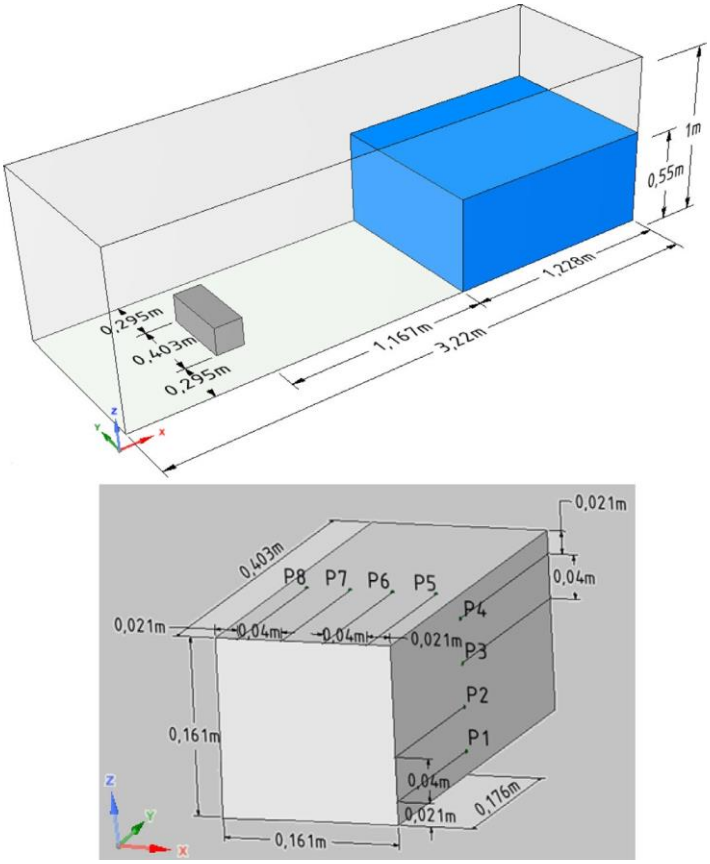

Рисунок 4. Геометрия эксперимента [8]

На Рисунке 5 показаны экспериментальные и численные результаты изменения давления по времени в точке P1 для различных размеров сетки [8]. Как показано на диаграмме, при использовании вычислительной сетки (мин=3.5 мм и макс=35 мм) изменение давления с течением времени соответствует практике, и первый пик давления моделируется правильно.

Как показано на рисунке 5, изменение давления при достижении барьера потока лучше всего описывается численной моделью. Аномальные пики давления, где заметно явное различие между результатами численного моделирования и экспериментальными данными можно объяснить тем, что вода доходит до правой стены и появляются всплески. Когда вода снова падает капли воды попадают в пустые ячейки, полностью окруженные ячейками с жидкостью, и эти пустые ячейки меняются на ячейки с жидкостью за один временной интервал. Это прерывистое изменение приводит к аномальному давлению.

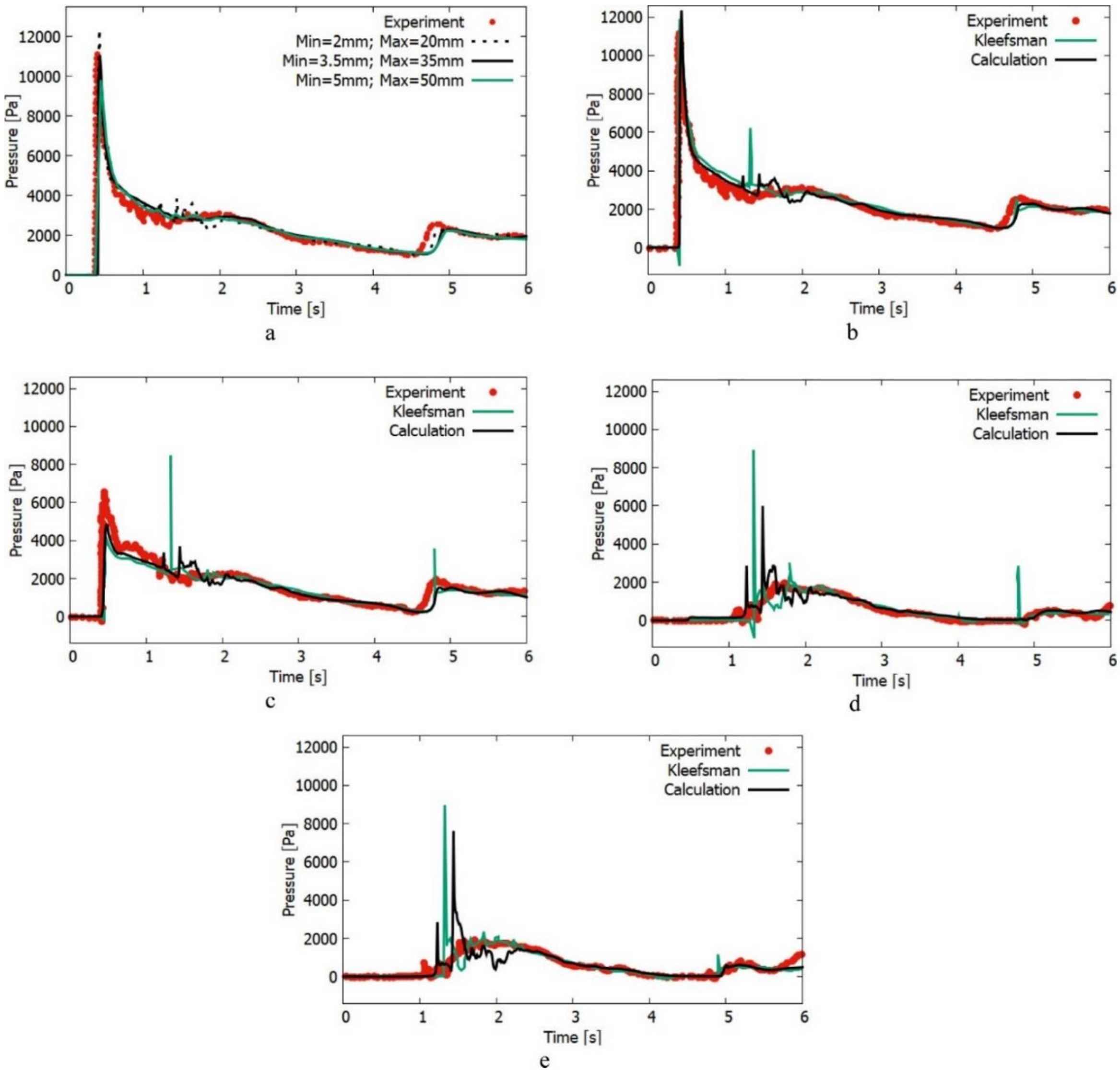

Рисунок 5. Изменение давления в разных точках: (a) - точка P1 для решеток разного размера, (b) - P1, (c) - P3, (d) - P5, (e) - P7 для численных и экспериментальных результатов [8]

На Рисунке 6 сравниваются результаты эксперимента и численного решения в двух временных точках (0.4 сек и 0.56 сек) [8]. Замечено, что период первого удара воды по плотине в момент времени t=0.4 сек хорошо согласуется с практикой. На следующем рисунке показано время t=0.56 сек, после взаимодействия с преградой поток направлен вверх. Результаты моделирования соответствуют результатам эксперимента.

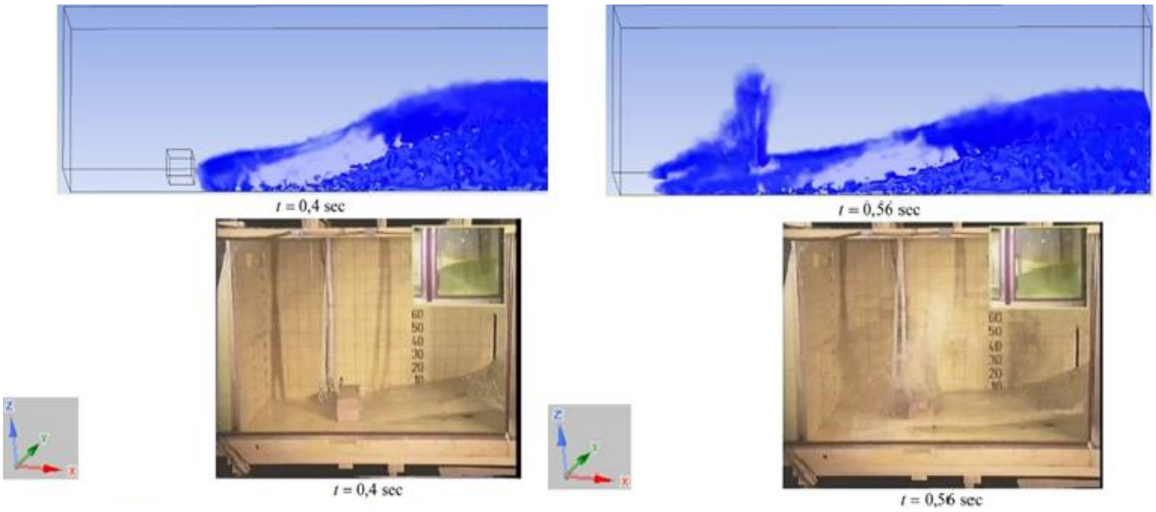

Рисунок 6. Количественные результаты и экспериментальные результаты расчета трехмерного импульса барьера при 0,4 с и 0,56 с

Численное моделирование трехмерной задачи

Геометрия данной задачи представляет собой резервуар формы трапеции. Стенка шириной 0.15 м делит резервуар на две части. Одна часть наполнена водой высотой 0.5 м.

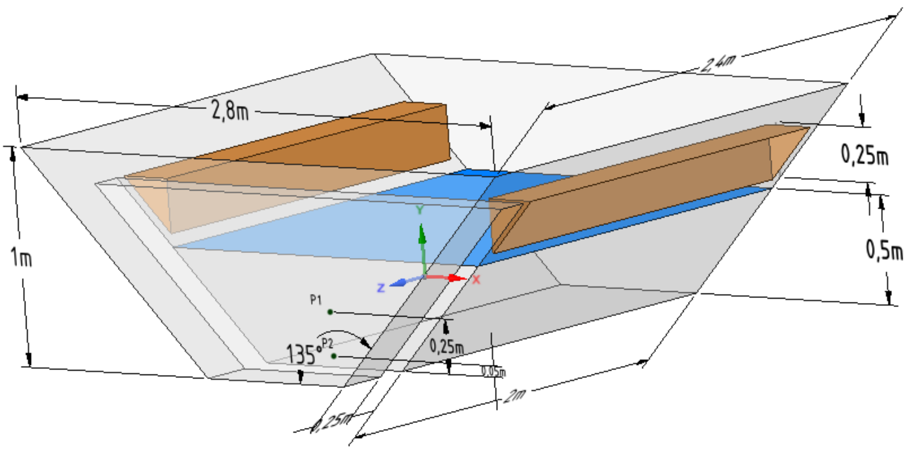

Рисунок 7. Геометрия трехмерной задачи

При моделировании подвижной слой высотой 0.25 м, который в начальном этапе времени находится над водой на высоте 0.05 м за счет гравитации стекает вниз и вызывает волны на поверхности воды. Данная задача является трехфазной и изменение межфазных границ по времени показаны на снимках моделирования на Рисунке 8.

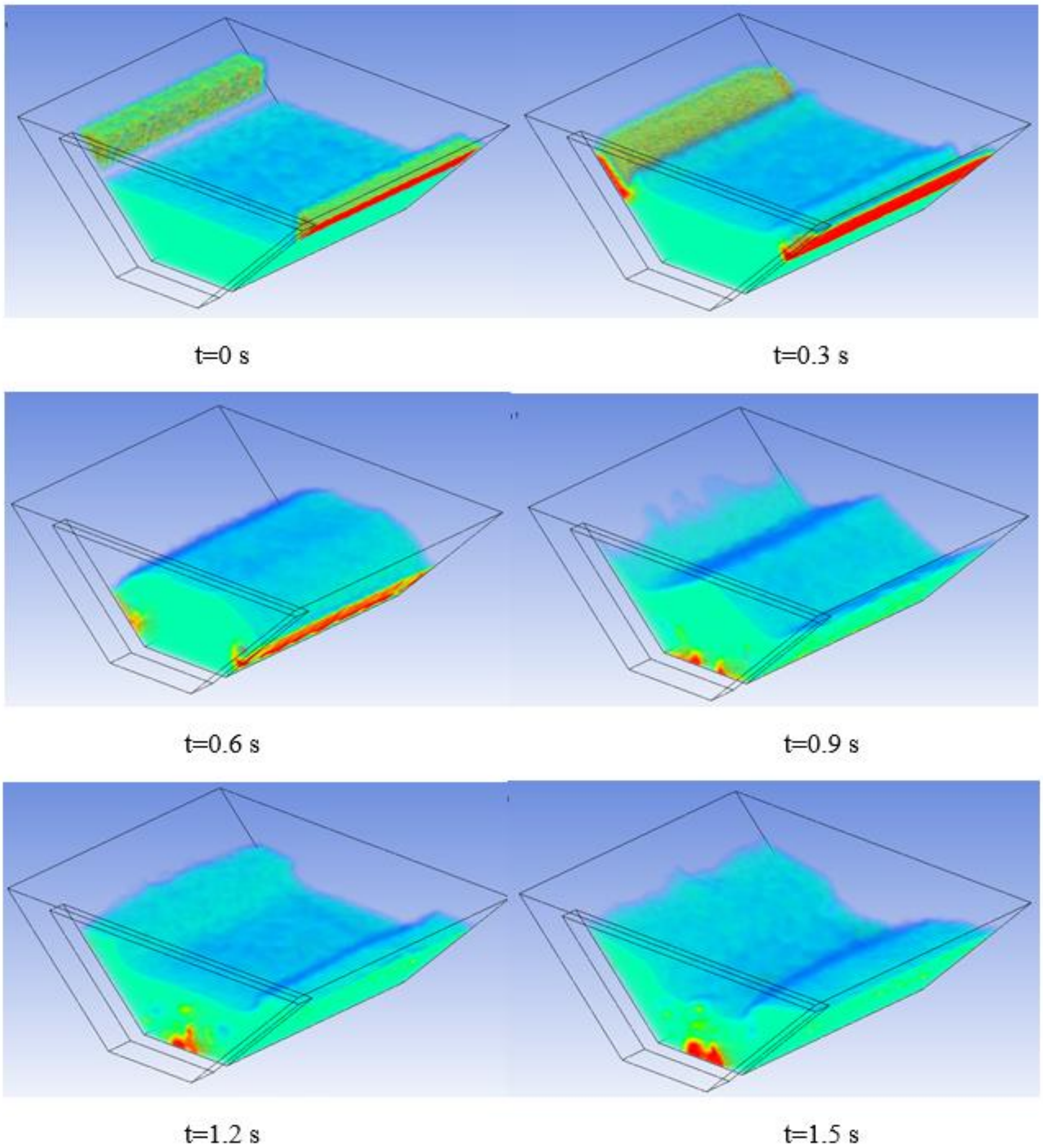

Рисунок 8. Снимки моделирования потока воды с подвижным слоем в различные моменты времени

Графики распределения давления на поверхности препятствия для точек Р1, Р2 показаны на Рисунке 9. Максимальное давление в нижней точке препятствия для прямоугольной формы составляет 3688 Па.

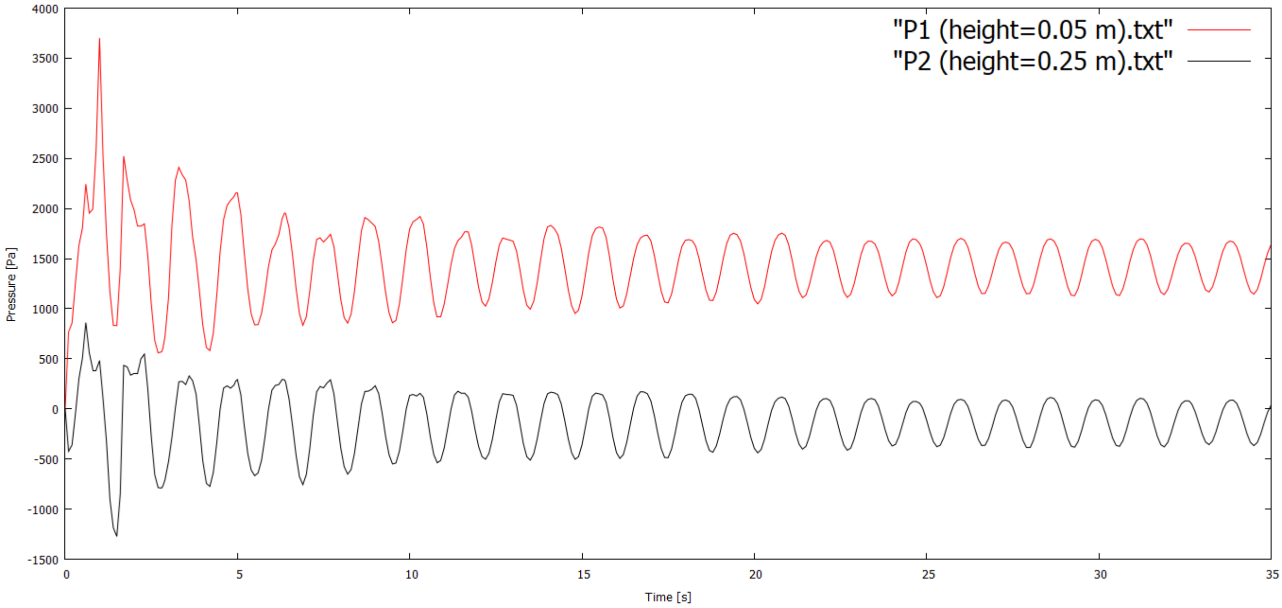

Рисунок 9. Распределения давления для точек P1, P2

Заключение

В данной статье предлагается численная модель течения жидкости при подвижном слое с использованием метода VOF. Подвижной слой обладает свойствами неньютоновской жидкости и является третьей фазой после воздуха и воды. Для проверки адекватности модели были численно реализованы тестовые задачи. Полученные численные результаты сопоставлены с экспериментальными и численными результатами других авторов. Хотя численный результат отличается от экспериментальных данных, модель позволяет получать прогнозы с определенной точностью. В целом численная модель описывает изменение давления во времени для двумерных и трехмерных расчетов, близких к экспериментальным результатам. В результате были получены изменение давления на стенке плотины и распределение потока во времени. Результаты показывают периодичность изменения давления, также зависимость от высоты. При численном решении задачи рассматривалась турбулентная модель SST k −ω. На основании полученных результатов можно сказать, что метод объема жидкости эффективен для моделирования двухмерного и трехмерного потока воды. Как видно из полученных данных с помощью численного моделирования были удовлетворительно интерпретированы процесс импульсивной волны вызванной подвижным слоем.

Список литературы:

1. Scardovelli R., Zaleski S. Direct numerical simulation of free-surface and interfacial flow //Ann. Rev. Fluid Mech.- 1999. 31.- 567–603.

2. Colagrossi A., Landrini M. Numerical simulation of interfacial flows by smoothed particle hydrodynamics //J. Comput. Phys.-2003.- 191 (2).- 448–475.

3. Monaghan J.J., Rafiee A. A simple SPH algorithm for multi-fluid flow with high density ratio //Int. J. Numer. Methods Fluid.- 2013.- 71 (5).- 537–561.

4. Nayamatullah M., Pillalamarri, NarasimhaRao, Bhaganagar, Kiran, Large-eddy-simulation approach in understanding flow structures of 2D turbulent den- sity currents over sloping surfaces //Fluid Dyn. Res.- 2018.- 50 (2).- 025506.

5. Abdolmaleki K., Thiagarajan K.P., Morris-Thomas M.T. Simulation of the dam break problem and impact flows using a Navier-Stokes solver // In: Proceedings of the 15th Australasian fluid mechanics conference the University of Sydney.- 2004.

6. Lobovský L., Botia-Vera E., Castellana F., Mas-Soler J., Souto-Iglesias A. Experimental investigation of dynamic pressure loads during dam break //J. Fluid Struct.- 2014.- 48.- 407–434.

7. Lin, San-Yih , Chen, Yi-Cheng A pressure correction-volume of fluid method for simulations of fluid–particle interaction and impact problems //Int. J. Multiph. Flow.- 2013.- 49.- 31–48 March.

8. Kleefsman K.M.T., Fekken G., Veldman A.E.P., Iwanowski B., Buchner B. A volume-of-fluid based simulation method for wave impact problems //J. Comput. Phys.- 2005.- 206 (1).- 363–393.

9. Bhaganagar K., Pillalamarri N.R. Lock-exchange release density currents over three-dimensional regular roughness elements // J. Fluid Mech.- 2017.- 832.- 793–824.

10. Nsom B., Debiane K., Piau J.M. Bed slope effect on the dam break problem //J. Hydraul. Res.- 2000.- 38 (6).- 459–464.

11. Park I.R., Kim K.S., Kim J., Van S.H. Numerical investigation of the effects of turbulence intensity on dam-break flows //Ocean Eng.- 2012.- 42.- 176–187.

12. Ozmen-Cagatay H., Kocaman S. Dam-break flow in the presence of obstacle: experiment and CFD simulation //Eng. Appl. Comput. Fluid.- 2011.- 5 (4).

13. Razavitoosi, S.L., Ayyoubzadeh, S.A., Valizadeh, A., 2014. Two-phase SPH modelling of waves caused by dam break over a movable bed //Int. J. Sediment Res. 29 (3), 344–356.

14. Spinewine, B., Zech, Y., 2007. Small-scale laboratory dam-break waves on movable beds. J. Hydraul. Res. 45 (Suppl. 1), 73–86.

15. Issakhov, A., Zhandaulet, Y., Nogaeva, A., 2018. Numerical simulation of dam break flow for various forms of the obstacle by VOF method //Int. J. Multiphas. Flow 109, 191–206.

16. Issakhov, A., Zhandaulet, Y., 2020a. Numerical study of dam break waves on movable beds for various forms of the obstacle by VOF method // Ocean. Eng. 209, 107459.

“Международный научный журнал АКАДЕМИК”

№ 1 (124), часть 1, 2021 г.
Апрель, 2021 г.

В авторской редакции
мнение авторов может не совпадать с позицией редакции

Международный научный журнал "Академик". Юридический адрес:
M02E6B9, Республика Казахстан, г.Караганда, ул.Университетская 21
E-mail: info@academic-journal.kz