

УДК 533.9.01; 519.63; 519.684
МРНТИ 50.07.05; 27.35.14

ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ТРЕХМЕРНОГО ПРОРЫВА ПЛОТИНЫ МЕТОДОМ VOF

ИСАХОВ А.А.^{1,2}, ЖАНДАУЛЕТ Е.Ж.^{1,2}

¹Казахский Национальный университет им. аль-Фараби

²Казахстанско-Британский технический университет

Аннотация: Плотины – это одна из важных сооружений для сбора и хранения воды, выработки электроэнергии, защиты от наводнений и ирригаций. В этой статье представлены численные результаты трехмерного моделирования прорыва плотины. Предложенная численная модель была проверена путем сравнения численных результатов с экспериментальными измерениями и численными результатами других авторов. Численный метод основан на уравнениях Навье-Стокса, описывающих поток несжимаемой вязкой жидкости. Движение поверхности воды захватывается с использованием метода объемной жидкости (VOF), что приводит к строгому сохранению массы. Точность и надежность 3D-модели была испытана с использованием небольшого лабораторного эксперимента по разрушению плотины. Показано, что предложенная модель хорошо предсказывает ударное давление потока прорыва. Также было определено в какой части препятствия возникает максимальное давление после прорыва плотины. При трехмерном моделировании прорыва плотины были рассмотрены разные формы препятствия, с помощью которых можно будет снизить ударное давление. Из представленных численных результатов была определена оптимальная форма препятствия, которую можно использовать в качестве дополнительной страховочной дамбы для основной плотины.

Ключевые слова: трехмерное моделирование, прорыв плотины, уравнение Навье-Стокса, метод VOF

VOF ӘДІСІМЕН 3D ДАМБАНЫҢ БҰЗЫЛУЫН САНДЫҚ ТҮРДЕ МОДЕЛЬДЕУ

Аңдатпа: Плотиналар су жинау және сақтау, электр энергиясын өндіру, су тасқынынан қорғаудың және суарудың маңызды нысандарының бірі болып табылады. Бұл мақалада плотинаның бұзылуын үш өлшемді модельдеудің сандық нәтижелері берілген. Ұсынылған сандық модель сандық нәтижелерді эксперименттік өлшемдермен және басқа авторлардың сандық нәтижелерімен салыстыру арқылы расталды. Сандық әдіс сызылмайтын тұтқыр сұйықтықтың ағынын сипаттайтын Навье-Стокс теңдеуінде негізделген. Су бетінің қозғалысы массаны қатаң сақтауға әкелетін сұйықтық көлемдер әдісі (VOF) арқылы іске асырылады. 3D модельдің нақтылығы мен сенімділігі шағын дамбаның бұзылуына арналған зертханалық тәжірибені қолдана отырып сыналды. Көрсетілген модель ағынның соққы қысымын дәл болжайтыны айқындалған. Дамба бұзылғаннан кейін кедергінің қай бөлігінде максималды қысым болатыны анықталды. Плотинаның бұзылуын үш өлшемді модельдеуде әртүрлі кедергілер қарастырылды, олардың көмегімен соққы қысымын төмендетуге болады. Аталған сандық нәтижелерден кедергінің тиімді түрі екені нақтыланды және оны негізгі плотина үшін қосымша қауіпсіздік дамбасы ретінде пайдалана аламыз.

Түйінді сөздер: үш өлшемді модельдеу, плотина бұзылуы, Навье-Стокс теңдеуі, VOF әдісі

NUMERICAL SIMULATION OF 3D DAM BREAK BY VOF METHOD

Abstract: Dams are one of the important installations for collecting and storing water, generating electricity, and protecting against floods and irrigation. This article presents the numerical results of three-dimensional modeling of a dam break. The proposed numerical model was verified by comparing numerical results with experimental measurements and numerical results of other authors. The numerical method is based on the Navier-Stokes equations describing the flow of an incompressible viscous fluid. The movement of the surface of the water is captured using the volume of fluid method (VOF), which leads to strict conservation of mass. The accuracy and reliability of the 3D model was tested using a small laboratory experiment on the destruction of the dam. The proposed model predicts well the impact pressure of the breakthrough flow. It was also determined in which part of the obstacle the maximum pressure occurs after the dam breaks. In three-dimensional modeling of a dam break, various forms of obstacles were considered, with the help of which it will be possible to reduce the impact pressure. From the presented numerical results, the optimal form of the obstacle was determined, which can be used as an additional safety dam for the main dam.

Key words: three dimensional modeling, dam break, Navier-Stokes equation, VOF method

Введение

Несмотря на все усилия, направленные на продвижение безопасности плотин, прорыв плотин может произойти в результате дефектов фундамента, землетрясения, человеческих ошибок и т.д. Прорыв плотин может привести к потере жизни и имущества и нанести много ущерба окружающей среде. В основном, исследования потока прорыва плотины могут быть классифицированы как теоретический анализ, экспериментальное измерение и численное моделирование. С увеличением вычислительной мощности, численные исследования потока прорывов плотин стали экономически эффективными.

В последние десятилетия большое внимание уделялось разработке численных методов расчета потоков свободной поверхности, которые задействованы в различных областях. Потоки свободной поверхности относятся к проблемам двухфазного или многофазного течения жидкости, которые связаны с двумя или более несмешивающимися жидкостями. Классические прорывы плотины хорошо изучены в последние годы [1-4]. В исследованиях изучалось развитие численных методов [5-10] с учётом влияния отношений плотности жидкостей [9,10], с учётом влияния на структуры [11-14], при наличии препятствий [14], с учётом эффекта наклона слоя [15] и с учётом физики двухфазного потока [16].

Вычислительные методы, разработанные для моделирования потоков прорыва плотины можно разделить на три класса: бессеточные, подвижные сетки и методы фиксированной сетки. Методы бессеточного типа не требуют построения сетки, тем самым облегчая её трудоемкое и сложное генерирование. Однако из-за трудности решения оператора Лапласа, бессеточный метод обычно применяется для потока с малым числом Рейнольдса. В методах подвижной сетки для дискретизации определяющих уравнений в криволинейных координатах, соответствующих физическим границам, включают в себя сетку пересылки на каждом временном шаге. Хорошо известно, что для генерации подвижной сетки требуется значительная вычислительная мощность и время. В методах фиксированной вычислительной сетки [17-19] необходимо учитывать обработку интерфейсов текучей среды и твердых границ при прогнозировании потока интерфейса. Твердые границы и интерфейсы текучей среды могут иметь неограниченные движения по основным фиксированным линиям сетки. Эти методы упрощают требования к построению сетки и применяются к фиксированным криволинейным и неструктурированным сеткам. В этом исследовании метод объема жидкости (VOF), который принадлежит методу фиксированной сетки, вы-

бирается для моделирования потока несжимаемой жидкости.

Вычислительный метод объема жидкости (VOF) впервые был представлен Хёртом и Николсом [20], и данный метод представляет собой один из самых популярных для изучения многофазных задач. Это метод захвата интерфейса, в котором местоположение интерфейса захватывается путем отслеживания объемной доли каждой вычислительной ячейки в сетке по отношению к одной из фаз текучей среды: ячейки, которые имеют объемную долю от нуля до единицы. На основе этих объемных данных восстанавливается свободная поверхность. Однако для этого метода требуется очень мелкая вычислительная сетка для успешного восстановления поверхности жидкости.

В настоящей работе проведены численные вычисления, имитирующие потоки прорыва плотины. Также в работе была оценена точность метода VOF сравнением результатов с экспериментальными данными. Моделью исследуются особенности потока на начальных этапах разрушения плотины и влияние удара потока на стену. Точность настоящей модели для моделирования потоков прорыва оценивается путем сравнения вычисленных результатов с экспериментальными данными. Определяющее уравнение, численные методы и результаты разработанной модели представлены в следующих разделах. Полученные результаты были промоделированы на программном продукте ANSYS Fluent.

Математическая модель

Определяющими уравнениями для моделирования являются трехмерные уравнения Навье-Стокса (RANS), осреднённые по Рейнольдсу, уравнения неразрывности для несжимаемых потоков и уравнения для фаз.

$$\frac{\partial u}{\partial t} + (\nabla u)u = \frac{1}{\rho} f - \frac{1}{\rho} \nabla p + \frac{1}{\rho} \nabla(\mu \nabla u) \quad (1)$$

$$\nabla u = 0 \quad (2)$$

$$\frac{\partial \chi}{\partial t} + u \nabla \chi = 0 \quad (3)$$

где u – вектор скоростей потока, t – время, p – давление, ρ – плотность, f – внешняя сила ($f = \rho g$, g – гравитация), μ – динамическая вязкость и χ – фазовая характеристика.

В методе объёма жидкости нужно определить границы между фазами (воздух-вода). Основная идея метода, каждая вычислительная ячейка находится в некоторой скалярной величине, представляющая долю данной ячейки фазой воды. В пустой ячейке эта величина равна 0, а заполненная равна 1. Ячейки, где значения находятся между 0 и 1, содержат межфазную границу. Свободная поверхность воды определяется уравнением (4) и (5).

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

$$\rho = \alpha \rho_1 + (1 - \alpha) \rho_2, \quad \mu = \alpha \mu_1 + (1 - \alpha) \mu_2 \quad (5)$$

где α – объемная доля воды в определенной ячейке, а $1 - \alpha$ – объемная доля воздуха соответственно.

Для численной реализации уравнений (1)-(5) используется модель $k-\omega$. В вычислительной гидродинамике модель турбулентности $k-\omega$ является общей моделью турбулентности двух уравнений, которая используется как замыкание для усредненных по Рейнольдсу уравнений Навье-Стокса (уравнения RANS). Модель пытается предсказать турбулентность двумя дифференциальными уравнениями с частными производными для двух переменных k и ω , причем первая переменная представляет собой кинетическую энергию (k) турбулентности, а вторая (ω) – удельная скорость диссипации.

$$\frac{\partial(\rho k)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho k u_j)}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] + P_k - \beta^* \rho k \omega + P_{kb} \quad (6)$$

$$\frac{\partial(\rho\omega)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho\omega u_j)}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\omega} \right) \frac{\partial \omega}{\partial x_j} \right] + \alpha \frac{\omega}{k} P_k - \beta \rho k \omega^2 + P_{\omega b} \quad (7)$$

$$\text{где } P_{\omega b} = \frac{\omega}{k} ((\alpha + 1) C_3 \max(P_{kb}, 0) - P_{kb})$$

Константы модели определяются следующим образом: $\sigma_k = 2$, $\sigma_\omega = 2$, $\beta = 0.075$, $\beta^* = 0.09$, $\alpha = 5/9$.

Верификация математической модели

Для верификации предложенной модели был использован эксперимент прорыва плотины, который был проведен в Исследовательском институте морских исследований Нидерландов (MARIN) [13]. Этот эксперимент можно рассматривать как простую модель потока воды. Большой резервуар с размером 3.22x1.0x1.0 м используется с открытой крышей. Правая часть резервуара сначала закрывается дверью, когда дверь мгновенно поднимает за дверью в бак поступает вода с высотой 0.55 м. Геометрия эксперимента изображена на рисунке 1.

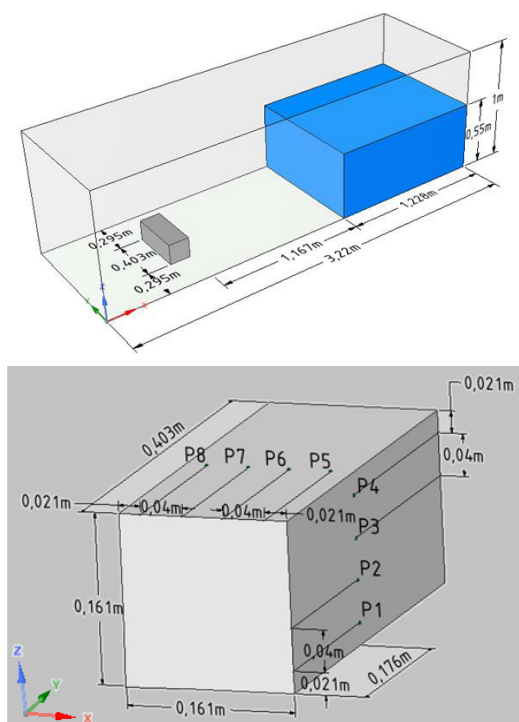


Рис. 1 – Геометрия эксперимента Исследовательского института морских исследований Нидерландов (MARIN) [13]

Также на рисунке 1 видно, что в бак была помещена коробка, представляющая масштабную модель контейнера. Контейнер был покрыт восемью датчиками давления, четыре на передней панели и четыре на верхней части. На рисунке 2 представлены сравнения численных результатов с экспериментальными данными.

Момент, когда волна попадает в ящик, отлично захватывается моделированием, как видно из рисунка 2. Здесь показано распределение давления передней части коробки в точках P1 и P3, а также в верхней части коробки в точках P5 и P7 (рисунок 1). Величина ударного давления одинакова как для результатов моделирования и экспериментальных данных в точке P1 (самая низкая на коробке). В тот момент, когда обратная волна снова попадает в ящик (примерно 4.7 с), снова хорошо отображается на графиках. В нижних графиках рисунка 2, где показаны диаграммы распределения давления по времени в верхней части коробки возникает явная разница между результатами симуляции и эксперимента. Эти аномальные распределения давления появляются несколькими всплесками, которые видны во всех графиках в один и тот же момент (например, на 1.3 с). Эти всплески происходят, потому что маленькие капельки воды после всплеска попадают в пустые клетки, которые полностью окружены клетками с жидкостью, и эти пустые клетки изменяются на клетки с жидкостью за один промежуток времени. Это прерывистое изменение приводит к появлению аномального пика давления во всем поле давления. На рисунке 3 показаны два снимка ранних этапов симуляции вместе с изображениями из эксперимента [13] (в те же моменты времени) для различных временных слоев.

Между моментальными снимками симуляции и эксперимента существует очень хорошее совпадение, когда вода впервые попа-

дает в коробку на 0.4 с. Форма свободной поверхности, изгибающаяся немного вперед, а во втором изображении отображаются экспериментальные данные и результаты моделирования на 0.56 с. Результаты моделирования

находятся в хорошем согласии с экспериментальными данными. Глобальное поведение жидкости одинаково, и ударный пик давления хорошо согласуется, особенно в нижней части коробки.

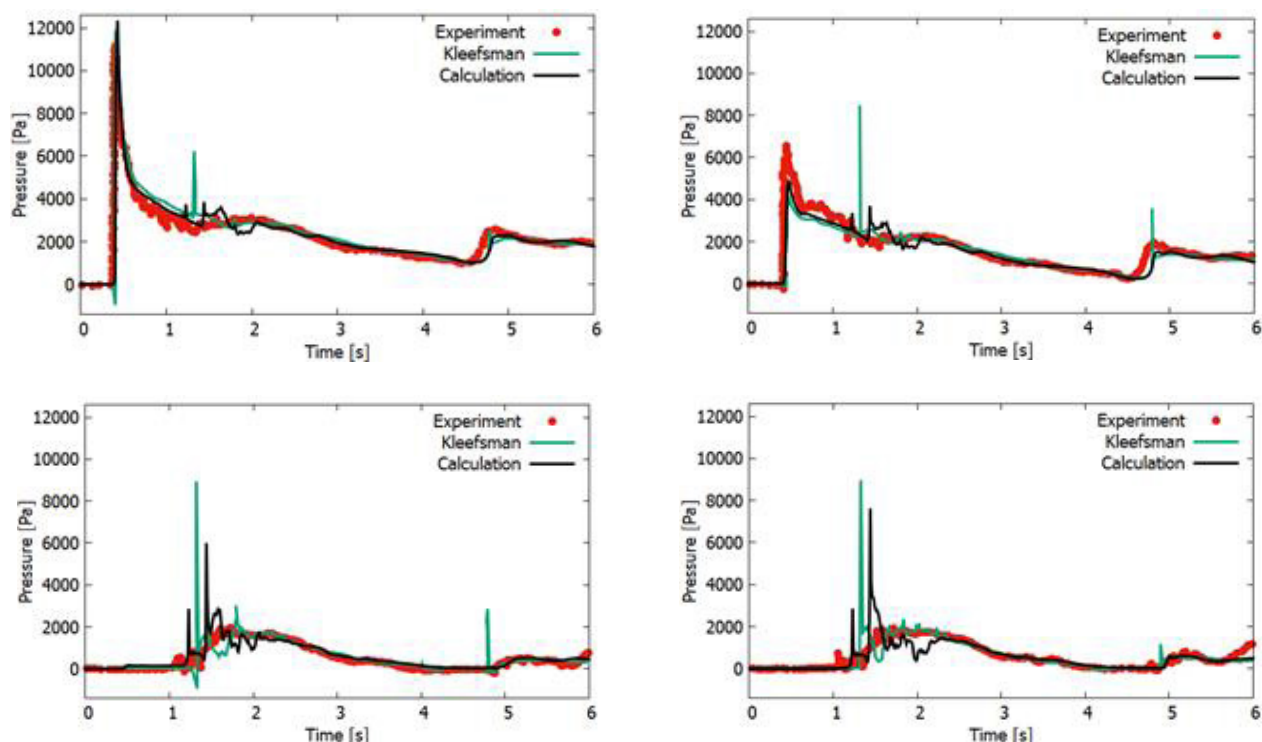


Рис. 2 – Истории давления по времени на P1 (левый верхний), P3 (правый верхний), P5 (левый нижний) и P7 (правый нижний)

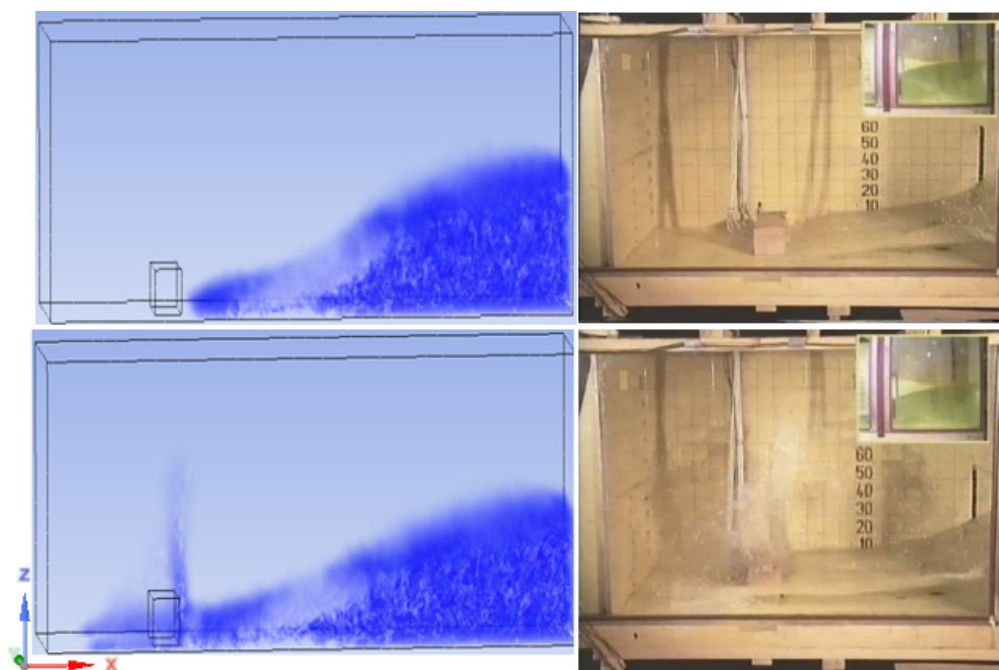


Рис. 3 – Снимки моделирования прорыва плотины с коробкой и снимки эксперимента в момент времени 0.4 и 0.56 с

Численные результаты 3D-моделирования

Максимальное давление на поверхности препятствия эксперимента возникает на самой нижней точке препятствия, распределения давления на этой точке показана на рисунке 4. Из рисунка 4 видно, что максимальное давление 13000 Па возникает при первом ударе потока о препятствия. Для снижения максимального давления при ударе в работе [21] были предложены оптимальные формы. Эти оптимальные формы препятствия с наклоном 30° и арочное препятствие с центральным углом дуги 45° были рассмотрены для 3D-модели как в эксперименте [13]. Эти формы препятствия выглядят как на рисунке 5, также на рисунке 5 показаны точки поверхности, на которых были измерены давления.

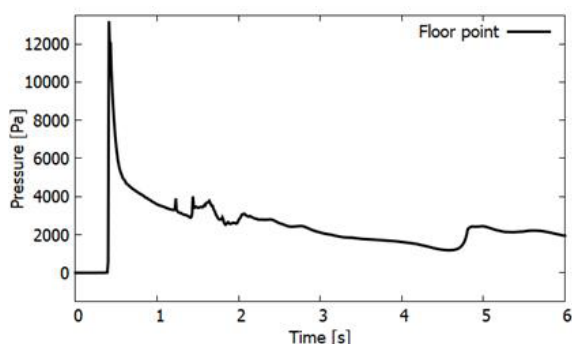


Рис. 4 – График распределения давления на самой нижней точке препятствия эксперимента

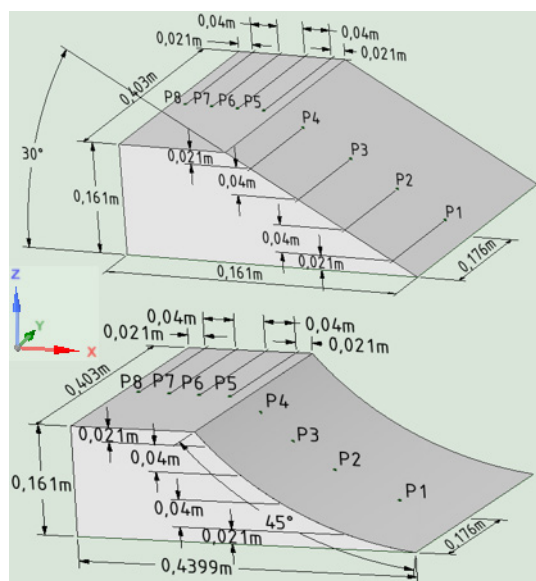


Рис. 5 – Оптимальные 3D-формы препятствия

Графики давления для формы с простым наклоном 30° показаны на рисунке 6 для точек поверхности этого препятствия.

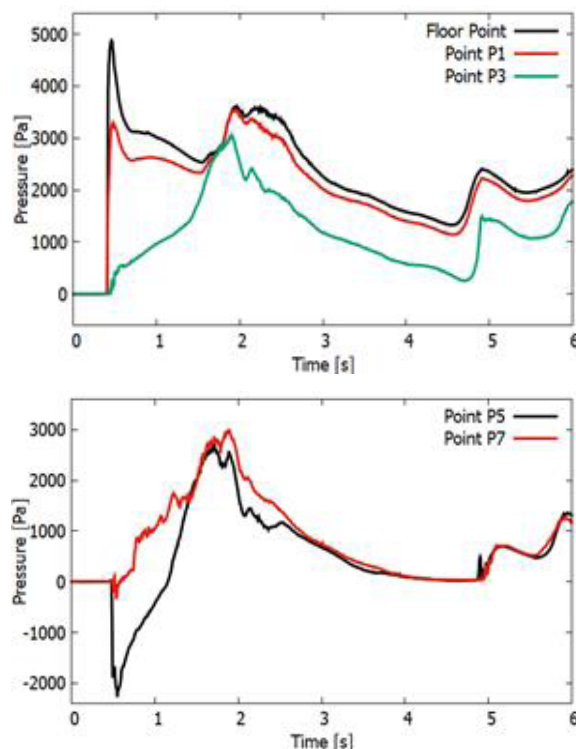


Рис. 6 – Давления на точках поверхности препятствия для простой наклонной формы рисунка 5

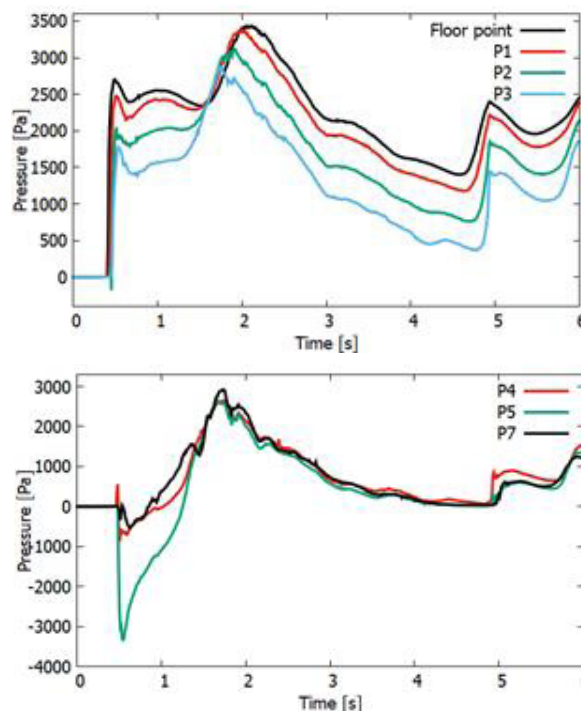


Рис. 7 – Давления на точках поверхности препятствия для арочной формы рисунка 5

Максимальное давление на нижней точке препятствия с наклоном в 30° равно 4900 Па (рисунок 6), это в 2.6 раза меньше максимального давления прямоугольной формы. На рисунке 7 представлены профили давления на точках поверхности арочной формы с центральным углом дуги 45° .

По данным из рисунка 7 максимальное давление для арочной формы (рисунок 5) равно 3500 Па, это в 3,7 раза меньше, чем максимальное давление прямоугольной формы. Поведения потоков при оптимальных формах препятствия описаны на рисунке 8.

На рисунке 8 представлены скриншоты 3D-моделирования прорыва плотины на 0.4 с с формами препятствия из рисунка 5. Из рисунка 8 видно, что вода впервые попадает в коробку, имеющую изгиб, а также скриншот моделирования на 0.56 с., когда вода уже ударила о препятствия.

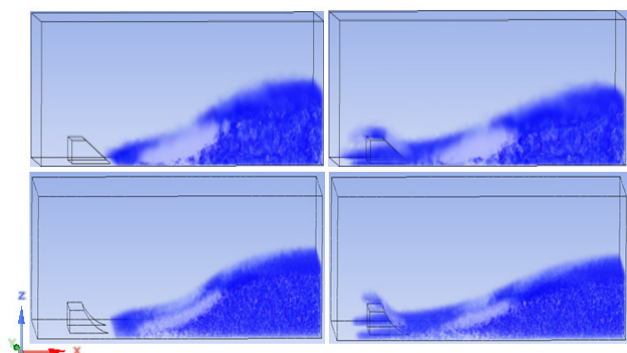


Рис. 8 – Снимки моделирования прорыва плотины с оптимальными формами препятствия из рисунка 5 в момент времени 0.4 и 0.56 с

Заключение

В настоящей работе представлены результаты моделирования прорыва плотины с использованием уравнения Навье-Стокса с перемещением свободной поверхности на основе метода VOF. Связь скорости и давления достигается с использованием численного алгоритма PISO. Метод показал, что он сходится во времени и пространстве, выполняя

регулярные симуляции волн с увеличением разрешения. Была оценена точность метода, сравнивая результаты с экспериментальными данными. Давление воды на препятствие численно рассчитывается для трёхмерного эксперимента. Хотя есть определенная разница, ударное давление может быть предсказано с приемлемой точностью. Выбирая хорошие числовые граничные условия для скоростей на свободной поверхности, метод может точно моделировать крутые волны очень надежно. Численные прогнозы показали хорошее согласие с экспериментом, в частности, было хорошо воспроизведено глобальное поведение жидкости и тенденции давления. Результаты моделирования дают большую уверенность в эффективности метода. Основным преимуществом двухфазной модели является то, что граничные условия для скоростей на свободной поверхности, которые оказывают большое влияние на надежность и точность метода, не нужны. В целом, численные результаты удовлетворительно сравниваются с данными эксперимента.

В ходе моделирования потока прорыва плотины была проведена оценка нескольких турбулентных моделей, такие как Realizable, SST, модели DES и особенно модель LES, которая очень хорошо описывает поведение потока.

Также были рассмотрены оптимальные формы препятствия для снижения давления. Препятствие с наклонами 30° , которое позволило снизить максимальное давление в 2.6 раза. Арочное препятствие с центровым углом дуги 45° снизило максимальное давления в 3.7 раза. Исходя из этих результатов установлено, что метод VOF может эффективно и разумно моделировать трехмерный коллапс воды с препятствием. На следующем шаге будут расширены численные моделирования на другие проблемы со свободной поверхностью.

ЛИТЕРАТУРА

1. Brufau P, Vázquez-Cendón ME, García-Navarro P. (2002), "A numerical model for the flooding and drying of irregular domains", *Int J Numer Methods Fluids*, Vol. 39 No. 3, pp. 247–75.
2. Jha A.K., Akiyama J., Ura M. (1995), "First- and second-order flux difference splitting schemes for dam-break problem", *J Hydraul Eng*, Vol. 121 No. 12, pp. 877–84.
3. Zhou J.G., Causon D.M., Mingham C.G., Ingram D.M. (2004), "Numerical prediction of dam-break flows in general geometries with complex bed topography", *J Hydraul Eng*, Vol. 130 No. 4, pp. 332–40.
4. Scardovelli R., Zaleski S. (1999), "Direct numerical simulation of free-surface and interfacial flow", *Ann. Rev. Fluid Mech.*, Vol. 31, pp. 567–603.
5. Shigematsu T., Liu P.L., Oda K. (2004), "Numerical modeling of the initial stages of dam-break waves", *J Hydraul Res*, Vol. 42 No. 2, pp. 183–95.
6. Harlow F.H., Welch J.E. (1965) "Numerical calculation of time-dependent viscous incompressible flow of fluid with free surface", *Phys Fluids*, Vol. 8 No. 12, pp. 2182–9.
7. Koshizuka S., Oka Y. (1996) "Moving-particle semi-implicit method for fragmentation of incompressible fluid", *Nucl Sci Eng*, Vol. 123 No. 3, pp. 421–34.
8. Shao S., Lo E.Y. (2003), "Incompressible SPH method for simulating Newtonian and non-Newtonian flows with a free surface", *Adv Water Resour*, Vol. 26 No. 7, pp. 787–800.
9. Colagrossi A., Landrini M. (2003), "Numerical simulation of interfacial flows by smoothed particle hydrodynamics", *J Comput Phys*, Vol. 191 No. 2, pp. 448–75.
10. Monaghan J.J., Rafiee A. (2013), "A simple SPH algorithm for multi-fluid flow with high density ratio", *Int J Numer Methods Fluid*, Vol. 71 No. 5, pp. 537–61.
11. Abdolmaleki K., Thiagarajan K.P., Morris-Thomas M.T. (2004), "Simulation of the dam break problem and impact flows using a Navier-Stokes solver", 15th Australasian fluid mechanics conference the University of Sydney.
12. Lobovský L., Botia-Vera E., Castellana F., Mas-Soler J., Souto-Iglesias A. (2014), "Experimental investigation of dynamic pressure loads during dam break" *J Fluid Struct*, Vol. 48, pp. 407–34.
13. Kleefsman K.M.T., Fekken G., Veldman A.E.P., Iwanowski B., Buchner B. (2005) "A volume-of-fluid based simulation method for wave impact problems", *J Comput Phy*, Vol. 206 No. 1, pp. 363–93.
14. Ozmen-Cagatay H., Kocaman S. (2011), "Dam-break flow in the presence of obstacle: experiment and CFD simulation", *Eng Appl Comp Fluid*, Vol. 5 No 4, pp. 541–52.
15. Nsom B., Debiante K., Piau J.M. (2000), "Bed slope effect on the dam break problem", *J Hydraul Res*, Vol. 38 No. 6, pp. 459–64.
16. Park I.R., Kim K.S., Kim J., Van S.H. (2012), "Numerical investigation of the effects of turbulence intensity on dam-break flows", *Ocean Eng*, Vol. 42, pp.176–87.
17. Yang J., Stern F., Sharp J. (2009), "Interface immersed-boundary/level-set method for wave-body interactions", *Comput. Phys*, Vol. 228 No. 17, pp. 6590–6616.
18. Zhang Y., Zou Q., Greaves D., Reeve D., Hunt-Raby A., Graham D., James P., Lv X. (2010), "A level set immersed boundary method for water entry and exit", *Commun. Comput. Phys.*, Vol. 8 No. 2, pp. 265–288.
19. Zhang C., Lin N., Tang Y., Zhao C. (2014), "A sharp interface immersed boundary/VOF model coupled with wave generating and absorbing options for wave-structure interaction", *Comput. Fluids*, Vol. 89, pp. 214–231.
20. Hirt C.W., Nichols B.D. (1981), "Volume of fluid (VOF) method for the dynamics of free boundaries", *J Comput Phys*, Vol. 39, pp. 201–25.