Е.С. Тятюшкина, А.С. Козелков, А.А. Куркин ЗАДАЧИ ВЕРИФИКАЦИИ КОНЕЧНО-ОБЪЕМНЫХ МЕТОДОВ МОДЕЛИРОВАНИЯ ТРЕХМЕРНЫХ ТЕЧЕНИЙ СО СВОБОДНОЙ ПОВЕРХНОСТЬЮ, ВКЛЮЧАЯ ВОЛНЫ ЦУНАМИ

Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева, г. Нижний Новгород

Представлен минимальный базис задач, необходимый для верификации и валидации программ, моделирующих течения жидкости со свободной поверхностью.

Ключевые слова: базис, метод конечных объемов, уравнения Навье-Стокса, течения со свободной поверхностью, цунами

Перед тем как проводить численный эксперимент, необходимо выявить границы применимости физико-математической модели. Для этого необходимо провести процесс ее валидации. В процессе валидации численно решаются задачи, имеющие экспериментальные данные или аналитические решения. Степень точности, требуемая от результатов моделирования, зависит от предполагаемого их использования. Как правило, к каждой расчетной величине предъявляются свои требования. Обычно анализируются качественные (например, распределение полей скорости и давления) и количественные характеристики, для которых задается определенная точность.

В данной работе представлен минимальный базис задач, необходимый для верификации и валидации программ, моделирующих течения жидкости со свободной поверхностью. Под минимальным понимается базис, включающий задачи, которые в обязательном порядке должны быть численно решены программой, подлежащей валидации.

Практически все течения со свободной поверхностью - нестационарные, поэтому основная цель валидации сводится к необходимости сравнения с экспериментальными данными физических характеристик на определенный момент времени или оценке временного периода их колебаний. Для оценки физических характеристик на определенный момент времении в ременного периода их колебаний в базис вошли следующие задачи.

Задача об обрушении плотины

В задаче рассматривается падение столба жидкости (воды) на дно резервуара. Результаты экспериментального исследования падения столба жидкости представлены в [1]. Параметры экспериментальной установки и положение границы раздела фаз (жидкостьвоздух) в начальный момент времени приведены на рис. 1.

Задача о колебаниях воды в резервуаре под действием силы тяжести

В задаче рассматривается колебание жидкости, налитой в резервуар, под действием силы тяжести. Параметры численной схемы и положение границы раздела фаз (жидкостьвоздух) в начальный момент приведены на рис. 2 [1].

Задача об обрушении плотины на дно резервуара с препятствием

В задаче рассматривается падение столба жидкости (воды) на дно резервуара, где располагается препятствие прямоугольного сечения. Результаты экспериментального исследования падения столба жидкости представлены в [1]. Параметры экспериментальной установки и положение границы раздела фаз (жидкость-воздух) в начальный момент времени приведены на рис. 3.

Задача о гидравлическом ударе

Рассматривается задача о гидравлическом ударе, которая представляет собой движение горизонтального слоя жидкости со скоростью 1 м/с в ограниченной стенками области. В результате движения жидкости происходит ударение ее о противоположную стенку, обрушение и возникновение обратной волны. Параметры численной схемы приведены на рис. 4 [1]. Длина и высота емкости составляют 12.5 м и 4.0 м, соответственно.







открытая граница

Рис. 2. Схема экспериментальной установки



Рис. 3. Схема экспериментальной установки



Рис. 4. Параметры численной схемы

Задача о течении через шлюзовые ворота

Рассматривается задача о течении через шлюзовые ворота, разграничивающие бассейны с разными уровнями воды. Параметры геометрии задачи приведены на рис. 5 [1]. В начальный момент времени вода, заполняющая левую часть расчетной области, под действием силы тяжести начинает перетекать из левого бассейна в правый под тонкой стенкой, имитирующей шлюзовые ворота.



Рис. 5. Параметры геометрии задачи

Задача о падении шара в жидкость

В задаче моделируется падение твердого шара в воду с небольшой начальной скоростью. Подобный эксперимент проводился для шаров из разных материалов и изложен в [2]. Параметры геометрии задачи приведены на рис. 6.



Рис. 6. Параметры геометрии задачи

Задача о падении параллелепипеда в жидкость

Верификацию представленного алгоритма на правильное описание распространения волн на свободной поверхности можно осуществить с помощью численного моделирования эксперимента, описанного в [3]. Параметры геометрии задачи приведены на рис. 7.



Рис. 7. Параметры геометрии задачи

Задача о падении капли в жидкость

Рассматривается задача об ударе капли о поверхность жидкости с образованием короны. Капля имеет те же параметры, что и жидкость. Эксперименты и численное моделирование задачи приведены в [4, 5]. Параметры геометрии задачи приведены на рис. 8.



Рис. 8. Геометрия задачи

Моделирование схода надводного оползня

Рассматривается задача схода надводного оползня [6 – 8]. Конфигурация бассейна изображена на рис. 9.

Оползень начинает движение по наклонной плоскости с заданной начальной скоростью. Во время эксперимента измеряется скорость входа оползня в воду, а также высота поверхности воды в ряде мареографных точек, которые расположены как на «открытой» воде (мареограф с номером 1), так и в непосредственной близости к искусственным препятствиям с целью измерения заплеска (мареографы с номерами 2, 3).

Задача о набегании волны на препятствие

В задаче рассматривается набегание волны на препятствие. Результаты экспериментального исследования представлены в [9]. Параметры геометрии задачи и положение границы раздела фаз (жидкость-воздух) в начальный момент времени приведены на рис. 10. Проводится сравнение с экспериментальными данными.



Рис. 9. Конфигурации бассейна для изучения цунами оползневого типа



(Ш - расположение оползня, 🔵 - расположение мареографов)

Рис. 10. Параметры геометрии задачи

Задача об огибании волной конического острова

В задаче рассматривается огибание волной конического острова. Результаты экспериментального исследования представлены в [10]. Параметры геометрии задачи приведены на рис. 11. Проводится сравнение с экспериментальными данными.



Рис. 11. Параметры геометрии задачи

Представленные результаты получены при финансовой поддержке грантов Президента РФ для государственной поддержки ведущих научных школ РФ НШ-2685.2018.5 и молодых российских ученых-докторов наук МД-4874.2018.9, а также при финансовой поддержке РФФИ - проект № 16-01-00267.

Список литературы

1. Ubbink O. Numerical prediction of two fluid systems with sharp interfaces. PhD, Department of Mechanical Engineering Imperial College of Science, Technology & Medicine. London: London University, 1997. 69 p.

2. Aristoff J.M., Truscott T.T., Techet A.H., Bush J.W.M. The water entry of decelerating spheres // Physics of Fluids. 2010. V. 22. Iss. 3. P. 032102-1-8.

3. Букреев В.И., Гусев А.В. Гравитационные волны при падении тела на мелкую воду // Прикладная механика и техническая физика. 1996. Т. 37. № 2. С. 90-98.

4. Wang A.B., Chen C.C. Splashing impact of a single drop onto very film liquid films // Phisics of Fluids. 2000. V.12. № 9. P. 2155-2158.

5. Джанг Т., Оуянг Д., Ли Х., Рен Д., Ванг С. Численное исследование динамики удара капли о поверхность жидкости с образованием короны // Прикладная механика и техническая физика. 2013. Т. 54. № 5. С. 38-47.

6. Fritz H.M., Mohammed F., Yoo J., Lituya Bay Landslide Impact Generated Mega-Tsunami 50th Anniversary // Pure appl. geophys. 2009. V. 166. P. 153–175.

7. Mohammed F., Frits H.M., Experiments on tsunamis generated by 3D Granular Landslides // Submarine Mass Movements and Their Consequences. Advances in Natural and Technological Hazards Research. 2010. V. 28. P. 705-718.

8. Mohammed F. Physical Modeling of tsunamis generated by three-dimensional deformable granular landslides. PhD Thesis, Georgia Institute of Technology 2010.

9. Hsiao S.-C., Lin T.-C. Tsunami-like solitary waves impinging and overtopping an impermeable seawall: Experiment and RANS modeling // Coastal Engineering. 2010. V. 57. P. 1-18.

10. National Tsunami Hazard Mitigation Program. Proceedings and Results of the 2011 NTHMP Model Benchmarking Workshop. Boulder: U.S. Department of Commerce/ NOAA/NTHMP; (NOAA Special Report). 2012, 436 p.

E.S. Tyatyushkina, A.S. Kozelkov, A.A. Kurkin TASKS OF VERIFICATION OF FINITE-VOLUME METHODS OF MODELING OF THREE-DIMENSIONAL FLOWS WITH FREE SURFACE, INCLUDING TSUNAMI

Nizhny Novgorod State Technical University n.a. R.E. Alekseev, Nizhny Novgorod

The minimal basis of tasks necessary for verification and validation of programs of modeling fluid flows with a free surface is presented.

Keywords: basis, finite volume method, Navier-Stokes equations, flows with free surface, tsunami

Сведения об авторах

Тятюшкина Елена Сергеевна – младший научный сотрудник лаборатории «Моделирования природных и техногенных катастроф» НГТУ им. Р.Е. Алексеева, младший научный сотрудник ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ», 8(831)436-63-93, leno4ka-07@mail.ru.

Козелков Андрей Сергеевич – д. ф.-м. н., старший научный сотрудник лаборатории «Моделирования природных и техногенных катастроф» НГТУ им. Р.Е. Алексеева, начальник научно-исследовательской лаборатории ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ», 8(831)436-63-93, askozelkov@mail.ru.

Куркин Андрей Александрович – д. ф.-м. н., профессор, главный научный сотрудник, заведующий кафедрой «Прикладная математика», научный руководитель лаборатории «Моделирования природных и техногенных катастроф» НГТУ им. Р.Е. Алексеева, 8(831)436-63-93, aakurkin@gmail.com.