

УДК 532.517.4

МОДЕЛИРОВАНИЕ ВОДОСЛИВА МЕТОДОМ КОНТРОЛЬНОГО ОБЪЕМА

Курбаналиев Абдикерим Ырысбаевич, д.ф.-м.н., профессор, E-mail: kurbanaliev@rambler.ru

Ойчуева Бурулгул Рахманбердиевна, аспирант, E-mail: oichuevab@gmail.com

Бокоев Кутман Амирбаевич, к.т.н., доцент, E-mail: bokoevka@list.ru

Марс кызы Тамтыбубу, E-mail: tatu_1995@list.ru

[Oшский технологический университет](http://www.oishu.ru)

Oшский государственный университет

Oш, 723500, Кыргызская Республика,

Аннотация: Приведены результаты численного моделирования водослива через плотину трапециевидной формы. Для моделирования свободной границы использовался метод объема жидкости. Целью работы была демонстрация возможностей пакета OpenFoam 7.0 для моделирования рассматриваемого класса течений

Ключевые слова: численное моделирование, метод объема жидкости, свободная граница, OpenFOAM.

ПЛОТИНА АРКЫЛУУ ӨТКӨН СУУНУН АГЫМЫН КОНТРОЛДУК КӨЛӨМДӨР ЫКМАСЫ МЕНЕН МОДЕЛДЕШТИРҮҮ

Аннотация: Трапеция формасындагы дамбадан ашып өткөн суунун агымын сандык моделдөөнүн жыйынтыктары келтирилген. Эркин чек ара үчүн суюктуктун колому ыкмасы колдонулган. Каралып жаткан агымдардын классын моделдөө үчүн OpenFOAM 7.0 пакетинин мүмкүнчүлүктөрүн көрсөтүү иштин максаты болуп эсептелинет.

Ачкыч сөздөр: сандык моделдөө, суюктуктун көлөмү ыкмасы, эркин чек ара, OpenFOAM.

SPILLWAY SIMULATION BY CONTROL VOLUME METHOD

Abstract: The results of the numerical modeling of the water flow over a trapezoidal spillway were presented in this paper. The volume of fluid method was used for capturing of the free surface. The aim of this paper was to demonstrate the capability of the OpenFOAM 7.0 for simulation of the considering problem.

Key words: numerical simulation, volume of fluid, free surface, OpenFOAM.

1. Введение

Гидротехнические сооружения относятся к числу сложных инженерных объектов, создающих целый ряд экологических и природо-пользовательских проблем даже при штатном режиме работы. Возникновение внештатных ситуаций на таких сооружениях приводит, в частности, к таким гидродинамическим авариям, как разрушение напорного фронта гидроузла и образование волны прорыва с катастрофическими последствиями - разрушениями плотин, дамб, энергетических, промышленных и гражданских объектов, затоплению территорий, человеческим жертвам.

В данной работе рассматривается численное моделирование несжимаемого турбулентного перелива жидкости через водослив трапециевидальной формы (Седов, 1970), (Спицын и Соколова, 1990). Численное моделирование основано на трехмерных нестационарных уравнениях Навье-Стокса, с учетом сильно изменяющейся свободной поверхности. Целью работы является демонстрация возможностей пакета OpenFOAM 7.0 (2020) для моделирования рассматриваемого класса течений.

2. Математическая модель

Геометрия рассматриваемой задачи приведена на рис. 1. Все размеры указаны в метрах, геометрическая пропорция не сохранена.

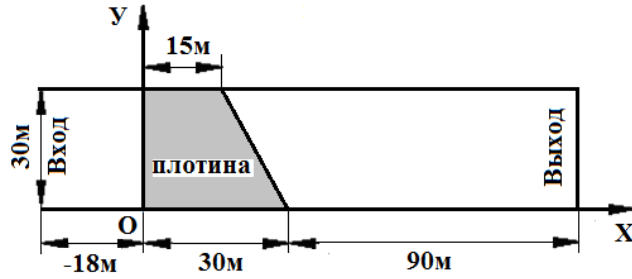


Рис. 1. Геометрия задачи.

Вода втекает в расчетную область слева со скоростью 0.6м/с, что соответствует среднему расходу потока воды 3.6м³/с на единицу ширину канала и вытекает через открытую правую границу.

Данный класс течения описывается усредненными по Рейнольдсу уравнениями Навье-Стокса (Ferziger и Peric,2002), в которую входят уравнения неразрывности и переноса импульса:

$$\frac{\partial}{\partial x_i} (\rho \bar{u}_i) = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho \bar{u}_i) + \frac{\partial}{\partial x_j} (\rho \bar{u}_i \bar{u}_j + \rho \overline{u'_i u'_j}) = -\frac{\partial \bar{p}}{\partial x_i} + \frac{\partial \bar{\tau}_{ij}}{\partial x_j} + \rho g_i \quad (2)$$

где \bar{u}_i – компоненты средней скорости, ρ – плотность, \bar{p} – среднее давление, $\bar{\tau}_{ij} = \mu \left(\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} + \frac{\partial \bar{u}_j}{\partial x_i} \right)$ – тензор вязких напряжений, связанный с молекулярной вязкостью μ , $\overline{u'_i u'_j}$ – напряжения Рейнольдса, требующие моделирования. Усреднение производится по времени, а штрих означает флуктуационную часть.

Замыкание системы уравнений (1-2) основано стандартной на k - ε – модели турбулентности (Ferziger и Peric ,2002):

$$\frac{\partial (\rho k)}{\partial t} + \frac{\partial (\rho \bar{u}_j k)}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} + P_k - \rho \varepsilon \quad (3)$$

$$\frac{\partial (\rho \varepsilon)}{\partial t} + \frac{\partial (\rho \bar{u}_j \varepsilon)}{\partial x_j} = C_{\varepsilon 1} P_k \frac{\varepsilon}{k} - \rho C_{\varepsilon 2} \frac{\varepsilon^2}{k} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \quad (4)$$

где $P_k = \mu_t \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \frac{\partial u_i}{\partial x_j}$ – скорость генерации энергии турбулентности средним течением, $\mu_t = \rho C_\mu k^2 / \varepsilon$ – турбулентная вязкость, а коэффициенты модели имеют следующие стандартные значения: $C_\mu = 0,09$, $C_{\varepsilon 1} = 1,44$, $C_{\varepsilon 2} = 1,92$, $\sigma_k = 1,0$, $\sigma_\varepsilon = 1,3$, $C_\mu = 0.09$; $C_{\varepsilon 1} = 1.44$; $C_{\varepsilon 2} = 1.92$; $\sigma_k = 1.0$; $\sigma_\varepsilon = 1.3$.

Для отслеживания свободной границы раздела вода-воздух использовался известный метод объема жидкости. Идея метода объема жидкости (Патанкар ,1984), (Ferziger и Peric,2002), заключается в том, что для каждой вычислительной ячейки определяется некоторая скалярная величина α , представляющая собой степень заполнения этой же ячейки одной фазой, например водой: $\alpha = \frac{\text{объем воды}}{\text{объем ячейки}}$. В начальный момент времени дается распределение этой величины, и дальнейшая её временная эволюция вычисляется как решение следующего транспортного уравнения:

$$\frac{\partial \alpha}{\partial t} + \frac{\partial (\alpha u_i)}{\partial x_i} = 0 \quad (5)$$

Положение свободной границы определяется уравнением: $\alpha(x, y, z, t) = 0$. Поэтому, физические свойства газожидкостной смеси вычисляются осреднением с соответствующим весовым коэффициентом:

$\rho = \alpha\rho_1 + (1 - \alpha)\rho_2; \mu = \alpha\mu_1 + (1 - \alpha)\mu_2$. Здесь индексы 1 и 2 соответствуют жидкой и газовой фазе.

3. Численная модель

Расчетная сетка. Первоначальная расчетная сетка была создана при помощи утилиты blockMesh, которая разделяет область расчета на контрольные объемы гексаэдральной формы. Подпрограмма snappyHexMesh генерирует 3-х мерные сетки из гексаэдральных и расщеплённых гексаэдральных контрольных объемов автоматически из триангулированной геометрии плотины в формате стереолитографии (STL). Сетка приближается к геометрической поверхности посредством итерационного улучшения исходной сетки и подгонки полученных расщеплённых гексаэлементов. Опционально, на следующем шаге, сетка уплотняется и дополняется элементами пристеночного слоя. Настройка уровня улучшения исходной сетки очень гибка и работа с поверхностями является трудоёмким процессом при заданном качестве сетки, которое необходимо достигнуть. Утилита поддерживает распараллеливание и балансировку нагрузки на каждой итерации OpenFOAM (2020).

Начальные условия. Для нестационарной задачи необходимо задание начальных значений всех зависимых переменных. Значения всех компонент скорости равны нулю, так как по условию рассматриваемой задачи до момента времени $t = 0$ движение отсутствовало. Давление тоже равно нулю. Кинетическая энергия турбулентности и скорость её диссипации имеют некоторое малое значение, которое обеспечивает хорошую сходимость численного решения на первых шагах интегрирования. Начальное распределение объемной доли α было неоднородным, так как не все расчетные ячейки заполнены водой (см. рис.2).

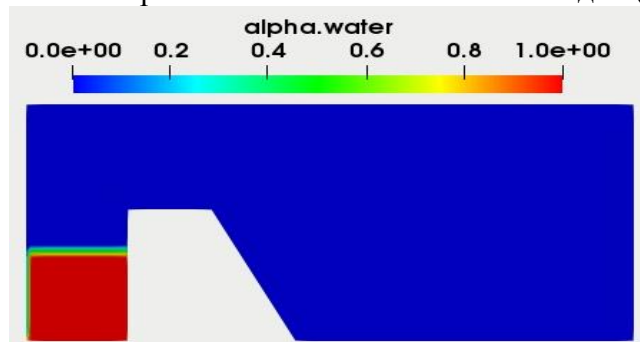


Рис.2. Начальное распределение объемной доли воды.

Граничные условия. На твердых стенках расчетной области задано условие прилипания, что дает условие равенства нулю всех компонент вектора скорости. Для давления и объемной доли воды заданы условия непроницаемости, энергии турбулентности k и скорости ее диссипации ϵ граничные условия задавались при помощи аппарата пристеночных функций OpenFOAM (2020). На свободной границе заданы нулевые значения для давления, объемной доли воды и всех компонент скорости.

Дискретизация основных уравнений. Дискретизация расчетной области получается методом контрольных объемов (Патанкар,1984), (Ferziger и Peric,2002). Использование разностной схемы против потока для конвективных и Gauss linear схемы для диффузионных членов дает приемлемую точность численных расчетов.

Для дискретизации производной по времени использовался явный метод Эйлера первого порядка. Численное решение связанных через давление нестационарных уравнений основывалось на методе PISO (Ferziger и Peric ,2002) с числом корректоров 3.

Результаты численных расчетов.

Для визуализации результатов численного моделирования использовался пакет Paraview 5.6, входящий в состав OpenFOAM 7.0. На рис. 3. представлено распределение объемной доли воды для моментов времени $t=10c, 20c, 30, 40c$.

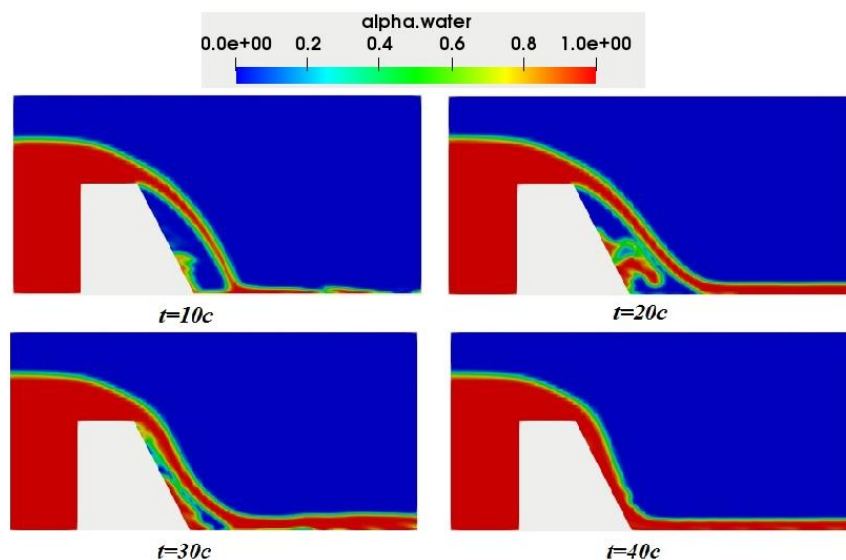


Рис. 3. Объемная доля воды в разные моменты времени.

На рис. 4. представлено поле вектора скорости двухфазного течения для моментов времени $t=10c$, $20c$, $30c$, $40c$.

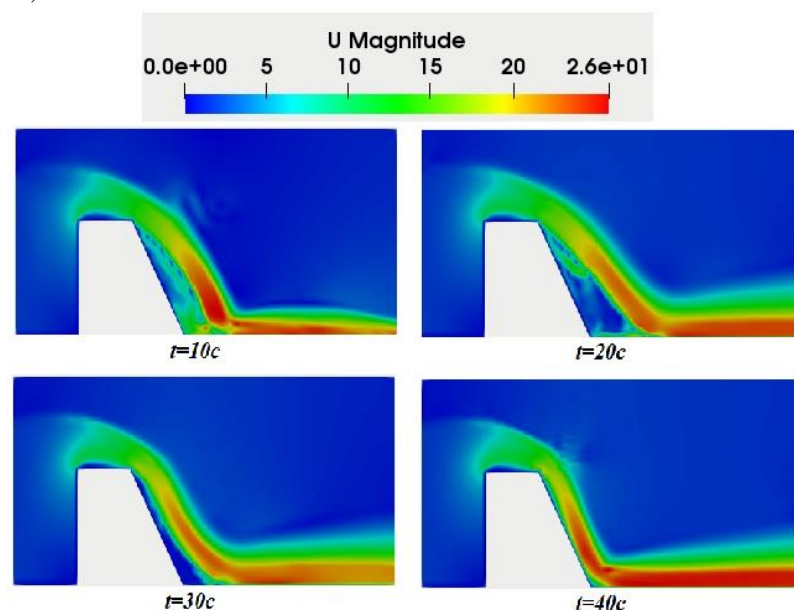


Рис. 4. Поле вектора скорости в разные моменты времени.

Выводы

Приведены результаты численного моделирования водослива через плотину трапециевидной формы. Для моделирования свободной границы использовался метод объема жидкости. Полученные вполне адекватные физические результаты, численные демонстрируют возможности открытого пакета OpenFoam 7.0 для моделирования рассматриваемого класса течений.

Литература:

1. Седов, Л. И. (1970). Механика сплошной среды. Т. 2 –М.:–568с.
2. Спицын И. П., Соколова В. А.(1990).Общая и речная гидравлика. – Ленинград: Гидрометеиздат, –359с.
3. Патанкар С.В. (1984). Численные методы решения задач теплообмена и динамики жидкости: Пер. с. англ. –М.: Энергоатомиздат. – 152с.
4. <http://www.openfoam.org/docs/>. (2020). OpenFOAM 7.0. User's Guide. Access data 01.03.2020.
5. Ferziger J. H., Peric M. (2002). Computational Methods for Fluid Dynamics. Berlin: Springer Verlag, –42

