

УДК 532.517.4

А.Ж.Жайнаков, А.Ы. Курбаналиев, М.М. Тайиров

МОДЕЛИРОВАНИЕ ДВИЖЕНИЯ СТОЛБА ЖИДКОСТИ В ПАКЕТЕ Open FOAM

В данной работе представлены результаты численного моделирования движение столба жидкости со свободной границей. Трехмерное нестационарное моделирование основано на решении усредненных по Рейнольдсу уравнений Навье-Стокса совместно с методом объема жидкости для отслеживания межфазной границы. Проверка адекватности математической модели производилась путем сравнения с соответствующими данными других авторов.

Введение

Гидродинамика течения со свободной границей, влияние потока жидкости на различные строения являются важной инженерной задачей при построении береговых защитных сооружений против селевых потоков, оползней и снежных лавин. Имеющаяся теория типа потенциальной, использующая метод граничных элементов, не применима для решения подобного класса задач. Такое положение, в дополнение к сложности геометрии межфазной границы, связано с разрывностью потока жидкой фазы и эффектом проникновения воздуха в жидкий поток.

В данной работе для решения уравнений Навье-Стокса, описывающих гидродинамику рассматриваемого класса течений, применен открытый пакет OpenFOAM 1.7.1 /1/, использующий метод конечных объемов /2/ и имеющий определенное количество имплементированных многофазных решателей. Целью этой работы была оценка возможностей данного пакета для моделирования многофазного течения с проблемой отслеживания межфазной границы. Использованный здесь многофазный решатель interFoam основан на методе объема жидкости (Volume of Fluid-VOF). Для получения наиболее реалистических результатов проведены расчеты на разных расчетных сетках. Данные методических численных расчетов сравнивались с данными работ /3- 5/.

Постановка задачи

Геометрия рассматриваемой модельной задачи представлена на рис. 1. Модель представляет собой резервуар гексаэдрной формы, размерами: длиной 3,22 м, высотой 2 м и шириной 1 м. В левом нижнем углу расположен столб воды высотой $H=0,6$ м, длиной 1,2 м и шириной 1 м. Для измерения силы давления потока жидкости на правую стенку резервуара соответствующий

измерительный датчик давления был расположен в точке Р с координатами $x = 3,22$ м и $y = 0,160$ м. Кроме того, в двух сечениях при $x_1 = 2,725$ м и $x_2 = 2,228$ м были измерены уровни свободной поверхности воды h_1 и h_2 . Плотность во: была равна 998,2 кг/м, а воздуха - 1,225 кг/м. Несмотря на то, эксперимент является трехмерным, простота геометрии позволъ моделировать его в двумерном приближении.

Граничные условия

Как показано на рис. 1, все границы представляют собой твердые поверхности, кроме верхней, открытой границы. На твердых стенках расчетной области задано условие прилипания, что дает условие равенства нулю все компонентов вектора скорости. Для давления и объемной доли воды заданы условия непроницаемости (условие Неймана - нулевые градиенты давления $V_p = 0$ и объемной доли воды $\gamma \nabla_\gamma = 0$); для кинетической энергии турбулентности k и скорости ее диссипации ε граничные условия задавались при помощи аппарата пристеночных функций. Влияние сил поверхностного натяжения между твердой стенкой и газожидкостной смесью в данной работе не учитывалось.

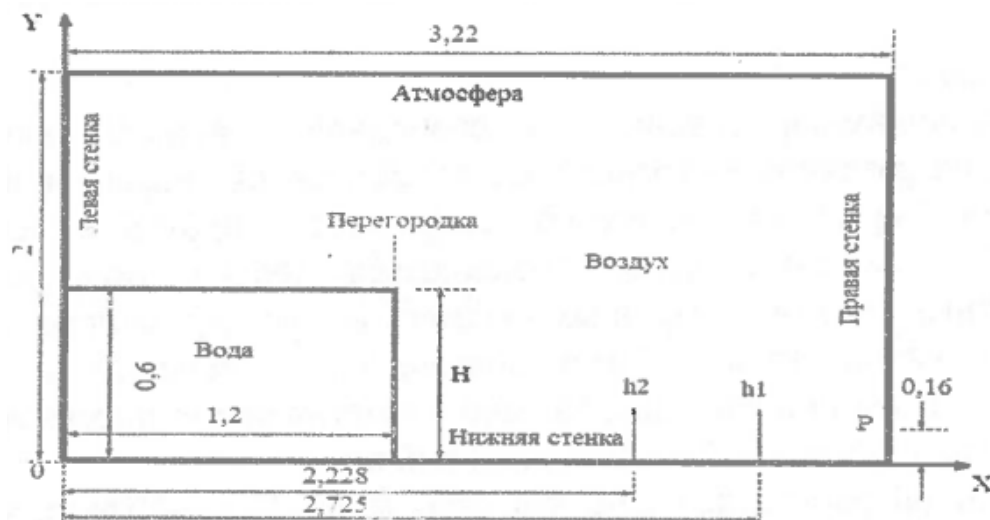


Рис. 1. Геометрия задачи и граничные условия.

На верхней, открытой границе расчетной области заданы нулевые значения для давления, объемной доли воды и всех компонент скорости.

Расчетная сетка

Простота геометрии задачи позволяет легко разделить ее на гексаэдральную сетку с равномерно расположенными ячейками. Для проверки влияния схемной диффузии были проведены тестовые расчеты при различных значениях расчетной ячейки:

1) 64x64, 2) 128x128, 3) 256x256, 4) 512x512. Проведенные методические расчеты показывают, что давление потока на правую стенку в точке Р и уровень свободной поверхности или высота водного столба сильно зависит от размеров ячеек. Кроме того, пропорциональное увеличение числа ячеек приводит к сильному увеличению времени расчета. Так для расчетной сетки размером

512x512 общее время расчета на компьютере Pentium ® Dual-Core CPU T4400 @2.20 GHz 2.87 Gb составляет около 15 часов, тогда как для сетки 64x64 это время равно приблизительно 55 с.

Более детальную информацию о методах дискретизации и численного решения трехмерных нестационарных усредненных по Рейнольдсу уравнений Навье-Стокса, методе объема жидкости для отслеживания межфазной границы можно получить из [1/].

Результаты численных расчетов

На рис. 2 представлены численные результаты объемной доли воды для различных моментов времени.

В момент времени $t = 0$ перегородка убирается мгновенно и столб воды под действием силы тяжести устремляется в правую пустую часть резервуара.

В момент времени около $t = 0,65$ с вода достигает правой стенки и, ударяясь об нее под действием силы инерции, устремляется вверх. По мере движения вверх по правой стенке поток утончается и в момент времени $t = 1,3$ с, когда сила тяжести превышает силу инерции, происходит возвратное движение воды с образованием характерного крючка. Сформированного таким образом обратная волна, достигая основного потока, ударяясь об него, образует вторичную волну и т.д. (при $t = 1,5$ с и $t = 1,8$ с). После момента времени $t = 2,2$ с инерция воды сильно уменьшается, и дальнейшее рассмотрение движения не представляет практического интереса.

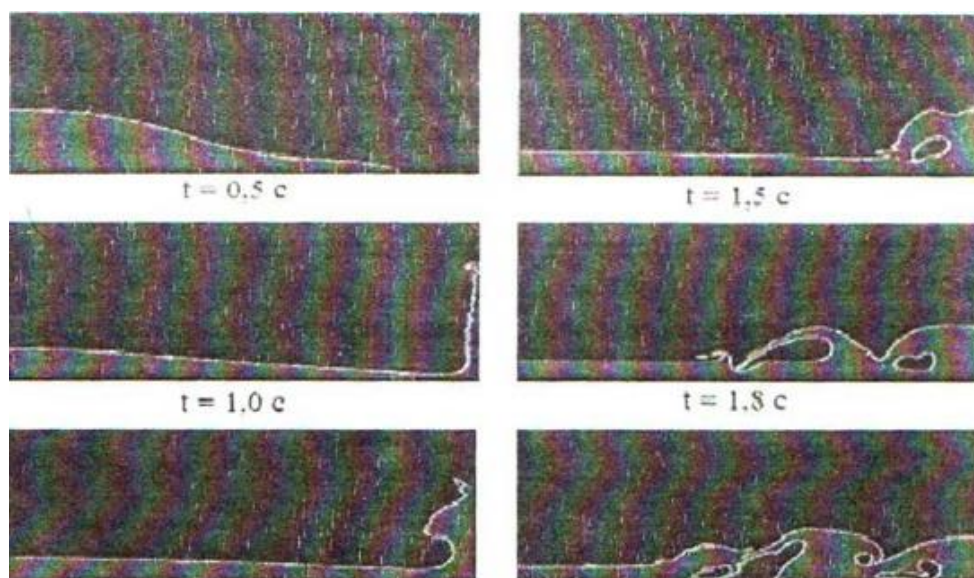


Рис.2. Движение столбы воды в различные моменты времени

Построение свободной границы

Известно, что последовательное измельчение расчетной сетки должно обеспечить получение более или менее правдоподобного положения свободной границы. Проведенные методические расчеты свидетельствуют, что более

мелкая расчетная сетка эффективно отслеживает воздушные капли - пузырь в воде. Однако при этом имеют место две проблемы, связанные измельчением расчетной сетки. Во-первых, чрезмерное измельчение приводит к ухудшению сходимости решения. Во-вторых, независимо от способа получения мелкой сетки получаются неправдоподобные значения скорости воздуха вблизи свободной границы. Более того, измельчение расчетной сетки более определенного предела не приводит к существенному улучшению разрешения свободной границы, и, как говорилось выше, общее время расчета неоправданно увеличивается.

На рис. 3 представлены численные и соответствующие экспериментальные данные по высоте водного столба в сечениях координатами $x_1 = 2,725$ м и $x_2 = 2,228$ м. Совпадение между этими данными достаточно удовлетворительное до момента времени около $t = 1,5$ с для сечений $x_1 = 2,725$ м (рис. 3, а).

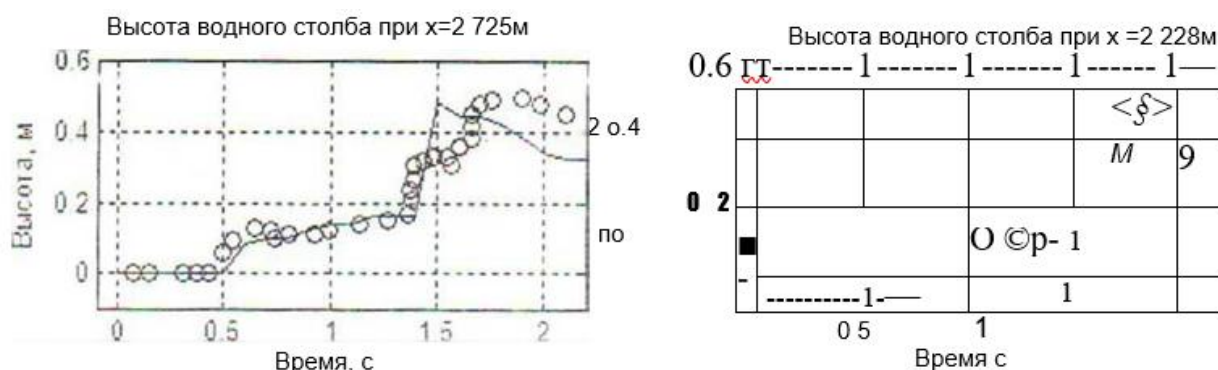


Рис. 3. Высота водного столба при различных сечениях

После этого времени обратная волна, движущаяся против основного потока, ударяется о свободную поверхность и создает определенные неточности как в численных, так и в экспериментальных данных. Разногласия такого рода также наблюдались в работе /4/, в которой для численного моделирования использовался известный коммерческий пакет FLUENT. Результаты этих авторов приведены на рис. 4.

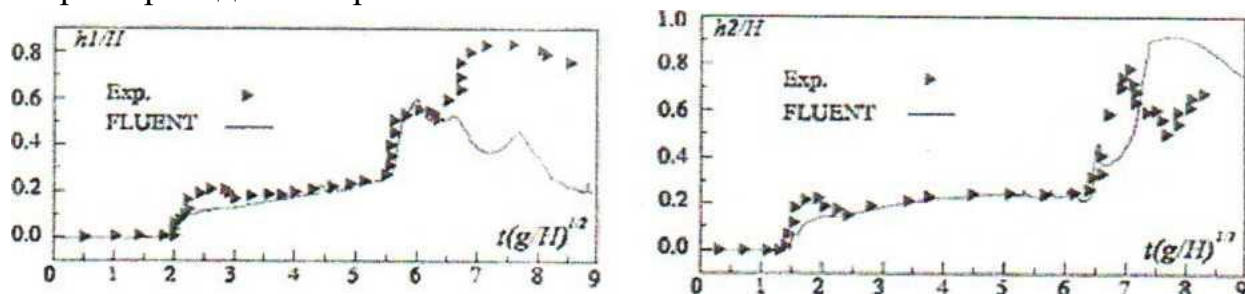


Рис. 4. Высота водного столба работы /4/

Здесь высота водного столба разделена на величину H , а время представлено в безразмерной форме $\tau = t(g/H)^{0.5}$, где $g = 9.81$ м/с² - ускорение свободного падения, $H = 0,6$ м - первоначальная высота водного столба. Из этих

рисунков можно заключить, что в данной работе уровни свободной поверхности в двух различных сечениях предсказаны точнее.

Давление на стенку

При решении нестационарных задач со свободной поверхностью, в частности, при взаимодействии образующихся волн с различными преградами очень важной является задача определения давления P на эту преграду.

На рис. 5 представлены численные результаты давления жидкости на правую стенку в точке Р с координатами ($x=3,2$; $y=0,16$) и соответствующие экспериментальные данные. Точное значение давления в точке Р не может быть измерено, так как датчики давления имеют конечный размер - круг диаметром около 90 мм.

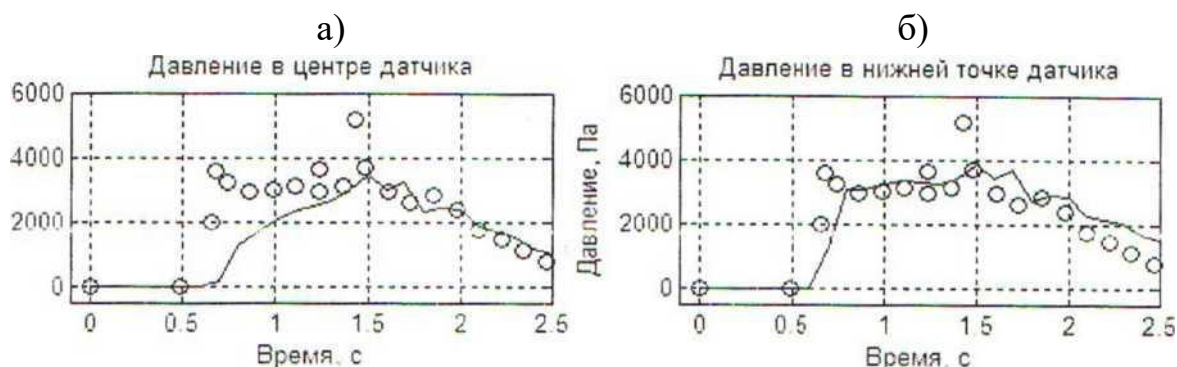


Рис. 5. Изменение давления в точке Р

Расчетное давление в центре датчика давления (см. рис. 5, а) с течением времени медленно возрастает, однако после момента времени $t=1,5$ с или после второго максимума совпадение экспериментальных данных с численными результатами улучшается. Характер изменения расчетного давления в нижней точке датчика (см. рис. 5, б) достаточно хорошо повторяет соответствующий характер изменения экспериментальных данных, однако максимальные значения несколько занижены.

Подобное поведение расчетного давления показано на рис. 6, заимствованном из работы [5]. На рис. 6, а показано давление в центре, а справа - в нижней точке датчика.

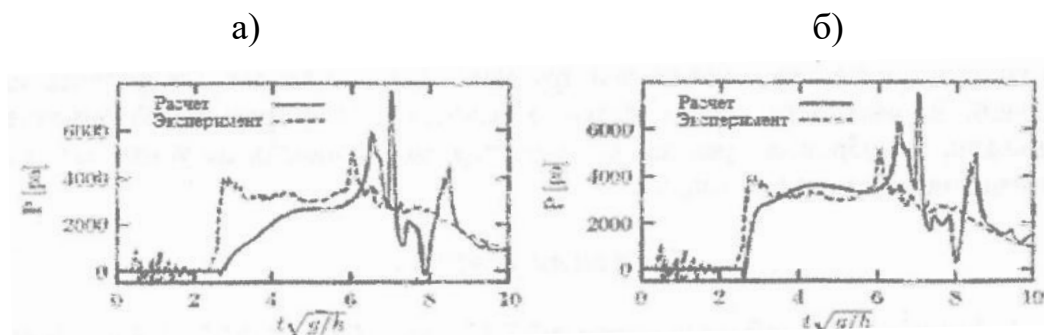


Рис. 6. Расчетные данные работы [5]

Как говорилось выше, в центре датчика давление возрастает медленно, а в нижней точке датчика - быстрее. Однако, в отличие от настоящей работы, после второго пика проявляются не обнаруженные в эксперименте колебания численного давления.

Обсуждение численных результатов

При численном моделировании предлагается, что перегородка убирается мгновенно, т.е. вертикальная скорость перегородки бесконечна. С другой стороны, могут быть и другие физические условия, которые трудно учесть в численном моделировании. Детальный анализ условий проведения эксперимента показывает, что эта скорость имеет конечное значение. Проверочные экспериментальные данные при одинаковых условиях дают разные, не совпадающие друг с другом результаты /3/. Об этом частично свидетельствуют хаотические колебания давления в точке Р до момента времени $t = 0,5$ с или до безразмерного момента времени $t = t(g/H)^{0,5} < 2$ (см. рис. 6). В этот момент времени вода еще не дошла до правой стенки (см. рис. 2), но датчик регистрирует колебания давления благодаря движению потока воздуха.

Кроме этого, вышеприведенные расхождения между расчетом и экспериментом после момента безразмерного времени $t = t(g/H)^{0,5} > 6$, как нам кажется, можно объяснить двумерностью используемой модели. Возможно, в некоторых точках расчетной области течение приобретает трехмерный характер.

Сравнивая данные этой работы (см. рис. 3) и работы /4/ (см. рис. 4), можно утверждать, что численные результаты моделирования рассматриваемой задачи, полученные при помощи бесплатного пакета OpenFOAM, более близки к экспериментальным данным, чем результаты, полученные с помощью коммерческого пакета FLUENT.

Выводы

Рассмотрена классическая задача прорыва плотины с последующим вычислением давления потока на стенку резервуара. Решатель interFoam пакета OpenFOAM в целом дает более хорошие результаты, чем коммерческий пакет FLUENT, для рассматриваемого класса течений. Имеющиеся расхождения между численными и экспериментальными данными можно объяснить неточностью начальных условий и трудностью учета некоторых физических условий. В частности, после удара о правую стенку резервуара течение, возможно, приобретает трехмерный характер, что, конечно, не учитывается в примененной двумерной модели.

Список литературы

1. <http://www.openfoam.Org/archive/1.7.1/docs/>. OpenFOAM 1.7.1 User's Guide.
2. Патанкар С. Численные методы решения задач теплообмена и динамики жидкости. -М.: Энергоатомиздат, 1984.

3. Zhou, Z. Q., Kat, J. O. D. and Buchner, B., A nonlinear 3-D approach to simulate green water dynamics on deck, 7th International Conference on Numerical Ship Hydrodynamics, Nantes, France , 1999.
4. Abdolmaleki K., Thiagarajan K. P. and Morris-Thomas M. T. Simulation of the dam break problem and impact flows using a navier-stokes solver. 15th Australasian Fluid Mechanics Conference, The University of Sydney, Sydney, Australia, 13-17 December 2004.
5. Nielsen K. B., Numerical prediction of green water loads on ships, Ph.D. thesis, Technical University Of Denmark, Lyngby, Denmark, 2003.