

## Критическое сравнение различных версий пакета OpenFOAM на задаче моделирования водослива

А. Ы. КУРБАНАЛИЕВ<sup>1,\*</sup>, Б. Р. ОЙЧУЕВА<sup>1</sup>, А. Т. КАЛМУРЗАЕВА<sup>2</sup>,  
А. Ж. ЖАЙНАКОВ<sup>3</sup>, Т. Ч. КУЛТАЕВ<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Ошский государственный университет, 723500, Ош, Кыргызстан

<sup>2</sup>Баткенский государственный университет, 720100, Кызыл-Кыя, Кыргызстан

<sup>3</sup>Кыргызский государственный университет геологии, горного дела и освоения природных ресурсов им. акад. Усенгазы Асаналиева, 720001, Бишкек, Кыргызстан

\*Контактный автор: Курбаналиев Абдикерим Ырысбаевич, e-mail: kurbanaliev@rambler.ru

Поступила 13 октября 2020 г., доработана 2 марта 2021 г., принята в печать 9 марта 2021 г.

Приведены предварительные результаты численного моделирования двухфазного течения двух несжимаемых и несмешивающихся жидкостей через водослив трапецевидной формы. Целью работы была демонстрация возможностей решателя interFoam различных версий открытого пакета OpenFoam при моделировании рассматриваемого класса течений. Численные расчеты проведены с использованием входящего в состав OpenFoam руководства weirOverFlow. В пакете OpenFOAM6 коэффициент fvcDdtPhiCoeff для вычисления потоков массы на гранях ячеек изменен в целях улучшения устойчивости/точности и исключения осцилляций давления при высоких числах Куранта. Он вычисляется с использованием значений плотности и потока массы с предыдущего временного шага. Результаты численных расчетов показывают, что такие изменения вызывают чрезмерно быстрый переход от нестационарного течения к стационарному.

*Ключевые слова:* численное моделирование, метод объема жидкости, свободная граница, водослив, interFoam, interDyMFoam, weirOverFlow, OpenFOAM.

*Цитирование:* Курбаналиев А.Ы., Ойчуева Б.Р., Калмурзаева А.Т., Жайнаков А.Ж., Култаев Т.Ч. Критическое сравнение различных версий пакета OpenFOAM на задаче моделирования водослива. Вычислительные технологии. 2021; 26(2):44–57. DOI:10.25743/ICT.2021.26.2.004.

### Введение

Гидротехнические сооружения относятся к числу сложных инженерных объектов, эксплуатация которых может породить ряд социальных, экологических и технических проблем даже при штатном режиме работы. Возникновение внештатных ситуаций на таких сооружениях приводит, в частности, к таким авариям, как разрушение напорного фронта гидроузла и образование волны прорыва с катастрофическими последствиями: разрушением плотин, дамб, энергетических, промышленных и гражданских объектов, затоплением нижележащих территорий, человеческими жертвами.

Математическое моделирование течения воды через плотину с острым гребнем в дву- и трехмерном приближениях, выполненное с использованием пакета кода FLOW3D,

рассматривалось в работе [1], где, в частности, излагаются результаты разработки методов оценки коэффициента расхода прямоугольных плотин с острыми гребнями. Установлено, что полученные значения коэффициента расхода хорошо согласуются с приведенными в литературе данными с погрешностью  $\pm 3\%$ .

Исследование влияния геометрических форм остроконечной плотины на такие гидродинамические характеристики течения, как давление, скорость, профили уровня воды и коэффициенты расхода, описано в работе [2]. Пакет прикладных программ OpenFOAM использован для решения задач в трехмерном приближении наряду с RNG  $k - \epsilon$ -модели турбулентности и метода объема жидкости (volume of fluid) для определения положения свободной границы раздела. Максимальное значение коэффициента расхода получено для прямоугольной острой гребенчатой плотины, в то время как треугольная острая гребенчатая плотина имеет минимальный коэффициент расхода.

OpenFOAM — это бесплатное программное обеспечение с открытым исходным кодом для решения задач вычислительной гидродинамики (CFD), которое применяется во многих областях аэро- и гидродинамики. Благодаря открытости исходного кода на языке C++ многие полезные библиотеки и наборы решателей свободно доступны пользователям, что делает пакет OpenFOAM все более популярным в различных областях прикладной науки [3, 4]. В OpenFOAM можно найти множество заранее подготовленных решателей, предназначенных для численного моделирования широкого спектра задач — от турбулентного реагирующего течения жидкости с учетом теплопередачи и излучения до динамики твердого тела и электромагнетизма.

Одной из особенностей пакета является возможность его применения для изучения многофазных потоков, в основном с помощью решателя interFoam [5]. Однако этот многофазный решатель, использующий метод объема жидкости (volume of fluid) для определения положения свободной границы, не способен достаточно точно воспроизвести некоторые характеристики течений с резким изменением положения границы раздела между жидкостью и газом [6]. Поэтому на его базе разработан другой решатель — interDyMFoam, учитывающий движение расчетной сетки и дающий возможность динамического измельчения расчетной сетки в определенных областях. В течение долгого времени два решателя interFoam и interDyMFoam существовали отдельно, но с появлением версии OpenFOAM6 решатель interDyMFoam был включен в состав interFoam [7].

В настоящей работе обсуждаются результаты численного моделирования несжимаемого турбулентного перелива жидкости через водослив трапецевидной формы [8, 9]. Численное моделирование основано на трехмерных нестационарных уравнениях Навье – Стокса с учетом сильно изменяющейся свободной поверхности.

Целью работы является демонстрация возможностей решателя interFoam различных версий пакета OpenFOAM [10–13] при моделировании рассматриваемого класса течений. Все расчеты проводились с использованием значений параметров, указанных в руководстве weirOverFlow пакета OpenFOAM. Начальная высота водного столба задавалась равной 30 м. Это руководство входит в комплект OpenFOAM и содержит всю необходимую исходную информацию по моделированию рассматриваемой задачи.

## 1. Математическая модель

Геометрия рассматриваемой задачи приведена на рис. 1. Все размеры указаны в метрах, геометрическая пропорция не сохранена. Вода втекает в расчетную область слева

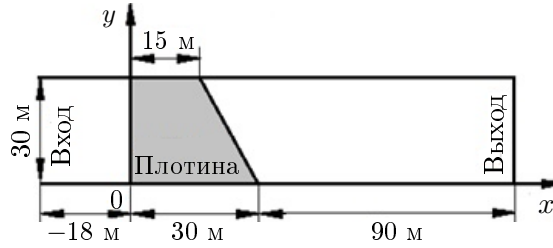


Рис. 1. Геометрия задачи  
Fig. 1. Problem geometry

с такой скоростью, которая соответствует среднему объемному расходу потока воды  $75 \text{ м}^3/\text{с}$ , и вытекает через открытую правую границу.

Моделью рассматриваемого класса течений является система усредненных по Рейнольдсу уравнений Навье–Стокса, в которую входят уравнения неразрывности и переноса импульса [14]:

$$\frac{\partial}{\partial x_i}(\rho u_i) = 0, \quad (1)$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho u_i) + u_j \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho u_i) = -\frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j}(\tau_{ij} + \tau_{tij}) + \rho g_i + f_{\sigma i}, \quad (2)$$

$$i = 1, 2, 3, \quad j = 1, 2, 3.$$

Здесь  $u_i$  — компоненты средней скорости;  $\rho$  — плотность;  $p$  — среднее давление;  $\tau_{ij}$  и  $\tau_{tij}$  — тензоры вязких напряжений, связанные с молекулярной  $\mu$  и турбулентной  $\mu_t$  вязкостью соответственно;  $f_{\sigma i}$  — компоненты силы поверхностного натяжения.

Замыкание системы уравнений (1), (2) основано на стандартной  $k - \varepsilon$ -модели турбулентности [14]:

$$\frac{\partial(\rho k)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u_i k)}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_i} \left( \mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_i} + P_k - \rho \varepsilon, \quad (3)$$

$$\frac{\partial(\rho \varepsilon)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u_i \varepsilon)}{\partial x_i} = C_{\varepsilon 1} P_k \frac{\varepsilon}{k} - \rho C_{\varepsilon 2} \frac{\varepsilon^2}{k} + \frac{\partial}{\partial x_i} \left( \frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_i}, \quad (4)$$

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 кинетической энергии турбулентности средним течением;  $\mu_t = \rho C_\mu k^2 / \varepsilon$  — турбулентная вязкость. Коэффициенты модели имеют следующие стандартные значения:

$$C_\mu = 0.09, \quad C_{\varepsilon 1} = 1.44, \quad C_{\varepsilon 2} = 1.92, \quad \sigma_k = 1.0, \quad \sigma_\varepsilon = 1.3.$$

Для отслеживания свободной границы раздела вода – воздух использован известный метод объема жидкости. Идея метода объема жидкости [14] заключается в том, что для каждой вычислительной ячейки определяется некоторая скалярная величина  $\alpha$ , представляющая собой степень заполнения этой же ячейки одной фазой, например водой:  $\alpha = \frac{\text{Объем воды}}{\text{Объем ячейки}}$ . В начальный момент времени задается распределение этой величины, и дальнейшая ее временная эволюция вычисляется как решение следующего транспортного уравнения [14]:

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

Положение свободной границы определяется уравнением  $\alpha(x, y, z, t) = 0.5$ , а физические свойства газожидкостной смеси вычисляются осреднением с соответствующим весовым коэффициентом:

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

Здесь индексы 1 и 2 соответствуют жидкой и газовой фазе.

Сила поверхностного натяжения моделируется следующим образом [14]:

$$f_{\sigma i} = \sigma \kappa \frac{\partial \alpha}{\partial x_i}.$$

Здесь  $\sigma$  — константа поверхностного натяжения, а  $\kappa$  — кривизна, определяемая как [14]

$$\kappa = -\frac{\partial n_i}{\partial x_i} = -\frac{\partial}{\partial x_i} \left( \frac{\partial \alpha / \partial x_i}{|\partial \alpha / \partial x_i|} \right).$$

Численные параметры использованного решателя `interFoam` соответствуют параметрам, приведенным в руководстве `weirOverflow` [10–13]. Расчетная сетка создана при помощи утилиты `blockMesh`, которая разделяет область расчета на контрольные объемы гексаэдральной формы.

### 1.1. Дискретизация основных уравнений

Дискретизация расчетной области выполняется методом контрольных объемов [14–16]. Противопоточная разностная схема первого порядка точности используется для дискретизации конвективных членов основных уравнений (1)–(5). При дискретизации диффузионных слагаемых применяется схема `Gauss linear corrected` — центрально-разностная схема с линейной интерполяцией с центров ячеек на центры граней, которая обеспечивает коррекцию по неортогональности расчетной сетки. Выбор такой схемы обусловлен наличием неортогональных участков сетки вблизи поверхности плотины. Эта схема имеет первый либо второй порядок точности в зависимости от локальных свойств расчетной сетки. Для дискретизации производной по времени используется явный метод Эйлера первого порядка.

В табл. 1 указаны схемы для дискретизации временных, конвективных и диффузионных членов каждого уравнения.

Т а б л и ц а 1. И использованные схемы дискретизации

Table 1. The used discretization schemes

Уравнение	Производная по времени	Конвективный член	Диффузионный член
Перенос импульса	Явный метод Эйлера	Против потока с линейной интерполяцией	Центрально-разностная схема с линейной интерполяцией
Объемная доля воды	То же	Ван Леер	То же
Кинетическая энергия турбулентности	«	Против потока с линейной интерполяцией	«
Скорость диссипации энергии	«	То же	«

## 1.2. 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 отсутствует. Давление тоже равно нулю. Кинетическая энергия турбулентности и скорость ее диссипации имеют некоторое малое значение, которое обеспечивает хорошую сходимость численного решения на первых шагах интегрирования:  $k = 4.14 \cdot 10^{-3m^2/c^2}$ ;  $\varepsilon = 4.39 \cdot 10^{-5m^2/c^3}$ . Начальное распределение объемной доли задается неоднородным, так как не все расчетные ячейки заполнены водой (рис. 2, заштрихованная область соответствует плотине).

## 1.3. Граничные условия

На твердых стенках расчетной области задано условие прилипания — равенство нулю всех компонент вектора скорости. Для давления и объемной доли воды задано условие непроницаемости — нулевой градиент по нормали, а для энергии турбулентности  $k$  и скорости ее диссипации  $\varepsilon$  граничные условия заданы при помощи аппарата пристеночных функций. При численном интегрировании уравнений вблизи твердых стенок расчетной области возникают определенные трудности. Попытка учесть большие градиенты зависимых переменных вблизи стенок требует измельчения расчетной сетки в этой области течения и значительных компьютерных затрат. Можно избежать чрезмерного измельчения расчетной сетки при помощи аппарата пристеночных функций [14, с. 298; 16, с. 275]. На свободной границе для давления задано условие с нулевым значением, для объемной доли воды задано условие с нулевым значением  $\alpha$ , а для всех компонент скорости задано условие с нулевым значением скорости. На выходе для всех переменных задан нулевой продольный градиент.

Значения параметров, определяющих физические свойства воздуха и воды, приведены в табл. 2.

Дискретизация уравнения сохранения приводит к системе линейных алгебраических уравнений для каждой неизвестной переменной. В табл. 3 приведены сведения о решателях, использованных в данной работе.

Объемная доля жидкости  $\alpha$  определяется из уравнения переноса (5) с помощью решателя MULES, использующего многомерный универсальный ограничитель для яв-

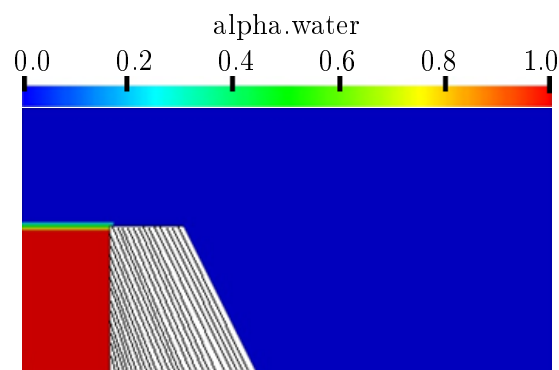


Рис. 2. Начальное распределение объемной доли воды  
Fig. 2. Initial distribution of the water volume fraction

Т а б л и ц а 2. Физические свойства воздуха и воды  
Table 2. Physical properties of air and water

Свойство	Вода	Воздух
Плотность, кг/м <sup>3</sup>	1000	1
Коэффициент кинематической вязкости, м <sup>2</sup> /с	$1.0 \cdot 10^{-6}$	$1.48 \cdot 10^{-5}$
Коэффициент поверхностного натяжения, Н/м	0.07	

Т а б л и ц а 3. Решатели уравнений для основных переменных  
Table 3. Equation solvers for basic variables

Переменная	Решатель	Точность
Коррекция давления	Метод сопряженных градиентов с предобуславливанием DIC, PCG	$10^{-10}$
Давление	То же	$10^{-7}$
Скорость	SmoothSolver с использованием symGaussSeidel	$10^{-8}$
Кинетическая энергия турбулентности	То же	$10^{-8}$
Скорость диссипации энергии	«	$10^{-8}$

ного решения и обеспечивающего ограниченность объемной доли фазы независимо от применяемой основной численной схемы, структуры сетки и т. п. [17].

Нестационарные уравнения, связанные через давление, численно решаются с помощью алгоритма PIMPLE с тремя этапами коррекции, т. е. на каждом шаге по времени уравнение коррекции давления необходимо решать три раза. Это обеспечивает устойчивость PIMPLE итерационного процесса для решения связанных через давление нелинейных уравнений [18]. Более подробную информацию об используемом решателе interFoam можно найти в работах [5, 6, 19–27].

## 2. Результаты численных расчетов

Для визуализации результатов численного моделирования использован пакет Paraview, входящий в состав OpenFOAM [10–13]. На рис. 3 представлено распределение объемной доли воды для моментов времени  $t = 0, 6, 10, 20, 30, 40$  и  $46$  с. Здесь красный цвет соответствует ячейкам, заполненным водой, а синий — ячейкам, где вода полностью отсутствует, а имеется только воздух. Разные оттенки цветов от красного до синего указывают на положение границы раздела вода–воздух (см. рис. 2).

При свободном доступе воздуха под струей на водосливе образуется свободная струя (рис. 3, а, б, г). При отсутствии доступа воздуха под струю (рис. 3, в) переливающаяся струя захватывает с собой пузырьки воздуха из области под струей в начале истечения. Воздух постепенно отсасывается, в результате под струей создается область разреженного давления. Результаты моделирования с помощью пакета OpenFOAM6 (рис. 3, в) показывают, что под действием внешнего повышенного давления струя воды поджимается к водосливу в самом начале движения. Таким образом, струя воды за водосливом становится поджатой, и вся область под струей заполняется водой.

При расчетах с использованием OpenFOAM19.06, OpenFOAM5 и OpenFOAM7 получается примерно одинаковая картина течения. После момента времени порядка 46 с

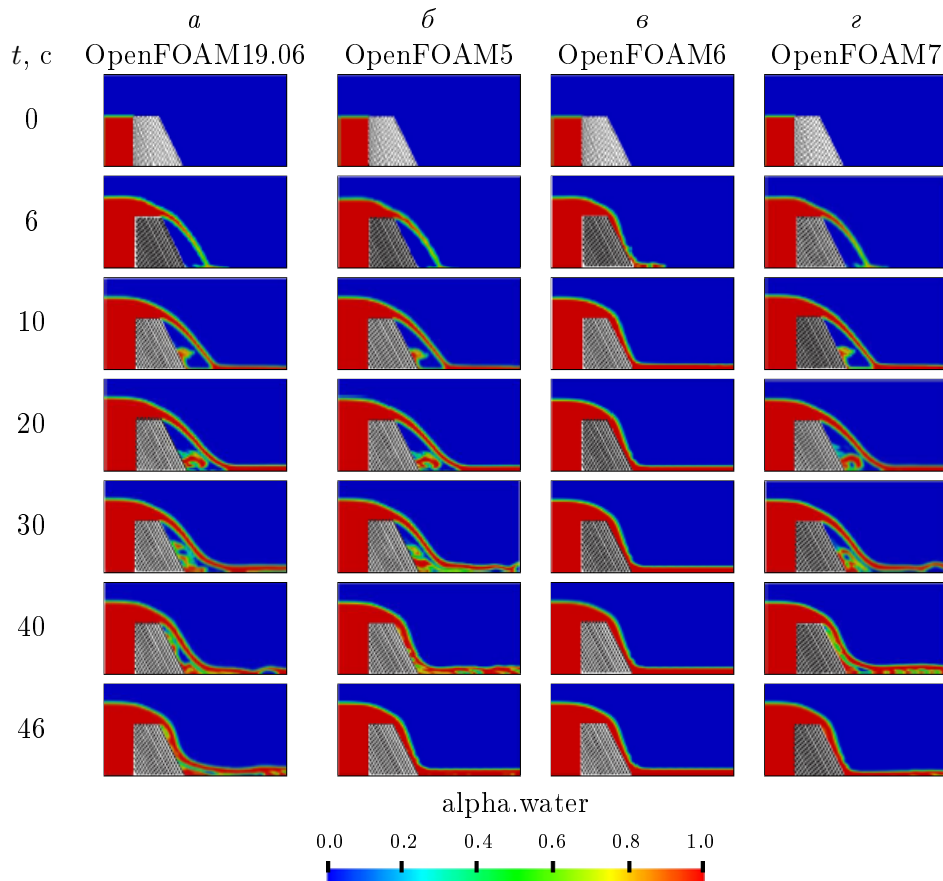


Рис. 3. Объемная доля воды в разные моменты времени  
 Fig. 3. Water volume fraction at different time moments

результаты, полученные с помощью каждого из рассмотренных вариантов решателя *interFoam* различных версий пакета *OpenFOAM*, демонстрируют одинаковую стационарную картину.

Также были проведены расчеты с использованием старой версии пакета *OpenFOAM4* [24] и более новых версий *OpenFOAM20.06* [25] и *OpenFOAM8* [26] (рис. 4). Анализ полученных результатов показал, что все рассмотренные версии воспроизводят примерно одинаковую картину течения, хотя результаты, полученные с помощью *OpenFOAM8*, показывают более замедленный переход нестационарного течения к стационарному. Некоторое небольшое различие результатов, соответствующих моменту времени  $t = 46$  с, объясняется тем, что в *OpenFOAM8* для реконструкции свободной границы применяется улучшенный полуявный алгоритм *MULES* второго порядка [27].

Дополнительные расчеты для разных значений входного объемного расхода воды (7.5, 37.5 и 150 м<sup>3</sup>/с) проведены для выяснения возможных причин прилипания струи воды к правой пологой поверхности водослива. Предполагалось, что исходное значение объемного расхода воды 75 м<sup>3</sup>/с в руководстве *weirOverflow* пакета *OpenFOAM6* близко к неустойчивому режиму течения. Результаты расчетов приведены на рис. 5. Видно, что при разных значениях входного объемного расхода воды струя воды все равно прилипает в правой пологой стенке водослива. Кроме того, систематические расчеты показали, что изменения числа Куранта и шага по времени, не нарушающие условия

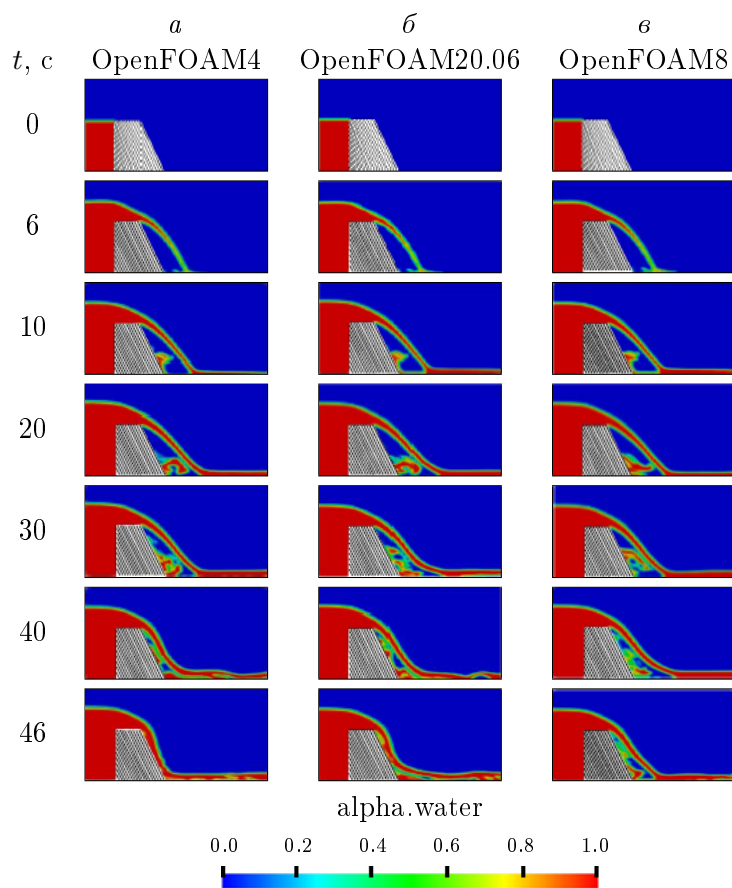


Рис. 4. Сравнение результатов OpenFOAM4, OpenFOAM20.06 и OpenFOAM8  
 Fig. 4. Comparison of the results of OpenFOAM4, OpenFOAM20.06 and OpenFOAM8

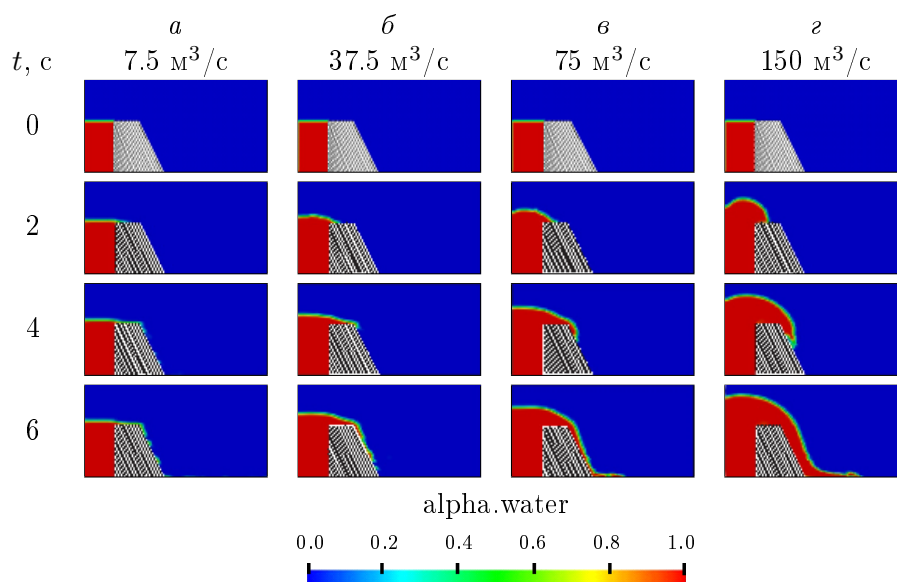


Рис. 5. Объемная доля воды в разные моменты времени при ее разных входных объемных расходах  
 Fig. 5. Water volume fraction at different time moments for it's different input volumetric flow rates



устойчивости алгоритмов, не меняют картину течения за водосливом — поток воды прилипает к пологой стенке.

Скорее всего, основная причина отличия численных результатов, полученных с помощью решателя `interFoam` пакета `OpenFOAM6`, от результатов, полученных при помощи того же решателя `interFoam` пакетов `OpenFOAM19.06`, `OpenFOAM20.06`, `OpenFOAM4` `OpenFOAM5`, `OpenFOAM7` и `OpenFOAM8`, заключается в следующем. Согласно [28], решатель `interFoam` пакета `OpenFOAM6` претерпел серьезные изменения. Во-первых, в пакете `OpenFOAM6` существовавший ранее отдельно решатель `interDyMFoam` с функцией локальной динамической адаптации сетки был объединен с решателем `interFoam` для повышения согласованности, удобства пользования, гибкости и легкости изменения решателя `interFoam`. Во-вторых, ручное сравнение решателя `interFoam` в `OpenFOAM5` и `OpenFOAM6` показывает, что в `OpenFOAM6` используемый при вычислении производной по времени и учитывающий поправку Рхи–Чоу на совмещенной сетке коэффициент `fvDdtPhiCoeff` для вычисления потоков массы на гранях ячеек был изменен в целях улучшения устойчивости/точности и исключения осцилляций давления при высоких числах Куранта [29]. А именно, в пакете `OpenFOAM5` при вычислении коэффициента `fvDdtPhiCoeff` значение плотности с текущего временного шага использовано наряду со значением потока массы с предыдущего временного шага, а в `OpenFOAM6` этот коэффициент вычисляется с использованием значений плотности и потока массы с предыдущего временного шага [29].

Результаты, полученные с помощью различных версий пакета, показывают, что различия в алгоритмах приводят к нереальному поведению струи после водослива при расчетах, проведенных в соответствии с указаниями руководства `weirOverflow`, входящего в состав пакета `OpenFOAM6`. Кроме того, в более новых версиях `OpenFOAM7` и `OpenFOAM8` используемый при вычислении производных по времени коэффициент `fvDdtPhiCoeff` был возвращен к старому, принятому в `OpenFOAM5` [30].

В целях дальнейшего исследования в этом направлении авторы считают целесообразным проведение аналогичных расчетов для других видов водослива с последующим сравнением полученных численных результатов с соответствующими экспериментальными данными.

## Выводы

Приведены результаты численного моделирования водослива через плотину трапециевидной формы. Для моделирования свободной границы использовался метод объема жидкости. Полученные вполне физически адекватные численные результаты демонстрируют возможности открытого пакета `OpenFoam` для моделирования рассматриваемого класса течений. Сравнение результатов, полученных с использованием различных версий пакета `OpenFOAM`, показывают, что объединение решателей `interFoam` и `interDyMFoam` и измененный способ вычисления коэффициента `fvDdtPhiCoeff` в пакете `OpenFoam6` приводят к неадекватному с физической точки зрения чрезмерно быстрому переходу нестационарного течения к стационарному по сравнению с другими версиями пакета `OpenFOAM`. В свою очередь, численные результаты, полученные с помощью `OpenFOAM19.06`, `OpenFOAM20.06`, `OpenFOAM4`, `OpenFOAM5`, `OpenFOAM7` и `OpenFOAM8`, дают примерно одинаковую картину течения сразу за водосливом (вода не прилипает к правой пологой стенке водослива), что соответствует принципу повторяемости результатов адекватного математического моделирования [31, 32].

**Благодарности.** Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства образования и науки Кыргызской Республики в рамках научно-исследовательского проекта “Математическое и компьютерное моделирование, прогнозирование и визуализация последствий крупномасштабных гидродинамических катастроф антропогенного характера (на примере плотин Нарынского каскада)”.

## Список литературы

- [1] **Reda M. Abd El-Hady Rady.** 2D-3D modelling of flow over sharp-crested weirs. *Journal of Applied Sciences Research*. 2011; 7(12):2495–2505.
- [2] **Shiva R., Mohammad M., Hamze E.** Three-dimensional simulation of flow over sharp crested weirs using volume of fluid method. *Journal of Applied Engineering Sciences*. 2020; 10(1):75–82.
- [3] **Weller H.G., Tabor G.R., Jasak H., Fureby C.** A tensorial approach to computational continuum mechanics using object-oriented techniques. *Computers in Physics*. 1998; 12(6):620–631.
- [4] **Hrvoje J.** OpenFOAM: Open source CFD in research and industry. *International Journal of Naval Architecture and Ocean Engineering*. 2009; 1(2):89–94.
- [5] **Ubbink O.** Numerical prediction of two fluid systems with sharp interfaces. Ph.D. Thesis. London, UK: University of London; 1997: 193.
- [6] **Lopes P.M.B.** Free-surface flow interface and air-entrainment modelling using OpenFOAM. Thesis Project in Hydraulic, Water Resources and Environment Doctoral Program in Civil Engineering. Coimbra, Portugal: University of Coimbra; 2013: 71.
- [7] OpenFOAM/OpenFOAM-6. Available at: <https://github.com/OpenFOAM/OpenFOAM-6/commit/46704f121b82bcd353a2b102cf0a05e8c98e5a83> (accessed 30.09.2020).
- [8] **Седов Л.И.** Механика сплошной среды. Т. 2. М.; 1970: 568.
- [9] **Спицын И.П., Соколова В.А.** Общая и речная гидравлика. Л.: Гидрометеиздат; 1990: 359.
- [10] OpenCFD release OpenFOAM v1906. Available at: <https://www.openfoam.com/releases/openfoam-v1906> (accessed 05.09.2020).
- [11] OpenFOAM 5.0. User’s guide. Available at: <https://cfd.direct/openfoam/user-guide-v5> (accessed 05.09.2020).
- [12] OpenFOAM 6.0. User’s guide. Available at: <https://cfd.direct/openfoam/user-guide-v6> (accessed 05.09.2020).
- [13] OpenFOAM 7.0. User’s guide. Available at: <https://cfd.direct/openfoam/user-guide-v7> (accessed 05.09.2020).
- [14] **Ferziger J.H., Peric M.** Computational methods for fluid dynamics. Berlin: Springer Verlag; 2002: 423.
- [15] **Patankar S.V.** Numerical heat transfer and fluid flow. N.Y.: Hemisphere Publishing Corporation; 1980: 197.
- [16] **Versteeg H.K., Malalasekera W.** An introduction to computational fluid dynamics: The finite volume method, 2nd edition. Pearson Education Limited; 2007: 503.
- [17] OpenFOAM 2.3.0: Multiphase modelling predictor-corrector semi-implicit MULES. Available at: <https://openfoam.org/release/2-3-0/multiphase> (accessed 05.09.2020).

- 
- [18] OpenFOAM guide/The PIMPLE algorithm in OpenFOAM. Available at: [https://openfoamwiki.net/index.php/OpenFOAM\\_guide/The\\_PIMPLE\\_algorithm\\_in\\_OpenFOAM](https://openfoamwiki.net/index.php/OpenFOAM_guide/The_PIMPLE_algorithm_in_OpenFOAM) (accessed 05.09.2020).
- [19] **Heyns J.A., Oxtoby O.F.** Modelling surface tension dominated multiphase flows using the VOF approach. 6th European Conference on Computational Fluid Dynamics. 2014. Available at: <http://congress.cimne.com/iacm-eccomas2014/admin/files/filePaper/p2006.pdf> (accessed 05.09.2020).
- [20] **Deshpande S.S., Anumolu L., Trujillo M.F.** Evaluating the performance of the two-phase flow solver interFoam. Computational Science and Discovery. 2012; 5(1):014016.
- [21] **Hill P.D.** The computer simulations of dispersed two-phase flows. Ph.D. Thesis. London, UK: University of London; 1998: 371.
- [22] **Rusche H.** Computational fluid dynamics of dispersed two-phase dynamics flows of at phase fractions. Ph.D. Thesis. London, UK: University of London; 2003: 333.
- [23] **Храбрый А.И.** Численное моделирование нестационарных турбулентных течений жидкости со свободной поверхностью. Диссертация на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук. Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования “Санкт-Петербургский государственный политехнический университет”. Санкт-Петербург, Российская Федерация; 2014: 154.
- [24] OpenFOAM4.0. User’s guide. Available at: <https://cfd.direct/openfoam/user-guide-v4> (accessed 05.09.2020).
- [25] OpenFOAM Release. OpenFOAM v2006 (20 06). Available at: <https://www.openfoam.com/releases/openfoam-v2006/index.php> (accessed 05.09.2020).
- [26] OpenFOAM 8.0 user’s guide. Available at: <https://cfd.direct/openfoam/user-guide-v8> (Accessed 05.09.2020).
- [27] Interface Capturing in OpenFOAM. Available at: <https://openfoam.org/release/2-3-0/multiphase> (accessed 05.09.2020).
- [28] OpenFOAM/OpenFOAM-6. Available at: <https://github.com/OpenFOAM/OpenFOAM-6/commits/master/applications/solvers/multiphase/interFoam> (accessed 05.09.2020).
- [29] OpenFOAM/OpenFOAM-6. Available at: <https://github.com/OpenFOAM/OpenFOAM-6/commit/da787200a6b208cf3fc4dfaa48b4438a3a038c1b> (accessed 05.09.2020).
- [30] OpenFOAM/OpenFOAM-dev. Available at: <https://github.com/OpenFOAM/OpenFOAM-dev/commit/b162c4818b9bbdb824db9e75baffef6ac7c5a7a0> (accessed 05.02.2021).
- [31] **Fehr J., Heiland J., Himpe C., Saak J.** Best practices for replicability, reproducibility and reusability of computer-based experiments exemplified by model reduction software. AIMS Mathematics. 2016; 1(3):261–281. DOI:10.3934/Math.2016.3.261.
- [32] **Самарский А.А.** Математическое моделирование и вычислительный эксперимент. Адрес доступа: <http://samarskii.ru/articles/1979/1979-002ocr.pdf> (дата обращения 28.02.2021).
-

**Critical comparison of the different versions of the OpenFOAM on the simulation of spillway**KURBANALIEV ABDIKERIM Y.<sup>1,\*</sup>, OICHUEVA BURULGUL R.<sup>1</sup>, KALMURSAEVA ANIPA T.<sup>2</sup>,  
ZHAINAKOV AMANBEK ZH.<sup>3</sup>, KULTAEV TOPCHUBAI CH.<sup>1</sup><sup>1</sup>Osh State University, 723500, Osh, Kyrgyzstan<sup>2</sup>Batken State University, 720100, Kyzyl-Kiya, Kyrgyzstan<sup>3</sup>Kyrgyz state University of Geology, Mining and Development of Natural Resources Named After Academician Usengazy Asanaliev, 720001, Bishkek, Kyrgyzstan

\*Corresponding author: Kurbanaliev Abdikerim Y., e-mail: kurbanaliev@rambler.ru

Received October 13, 2020, revised March 2, 2021, accepted March 9, 2021

**Abstract**

The results of numerical simulation for a two-phase flow of two incompressible and immiscible liquids through a trapezoidal spillway are presented. To simulate the free boundary, we used the method of fluid volume. The aim of the work was to demonstrate the capabilities of the various versions of interFoam solver of the OpenFOAM package for modelling the considered class of flows. Numerical calculations were performed using the OpenFOAM weirOverFlow tutorial. In order to improve the consistency, usability, flexibility and ease of modifying the interFoam solver, the existing interDyMFoam solver with the local dynamic mesh adaptation function was combined with the interFoam solver with a static computational mesh. In addition, in the OpenFOAM6 package, the fvcDdtPhiCoeff coefficient used for calculating the time derivative and taking into account the Rhie – Chow correction on the collocated grid for calculating mass fluxes on the cell faces was changed in order to improve stability/accuracy and eliminate pressure oscillations at high Courant numbers. The calculation of fvcDdtPhiCoeff coefficient in OpenFOAM5 requires the density value from the current time step along with the mass flow value from the previous time step, while in OpenFOAM6, both density and mass flow values are taken from the previous time step for calculation of the fvcDdtPhiCoeff coefficient. The results of numerical calculations of the OpenFOAM6 package show that such changes lead to an excessively fast transition of the transient flow to the stationary one in comparison with other versions of the OpenFOAM package.

*Keywords:* numerical simulation, volume of fluid, free surface, spillway, interFoam, interDyMFoam, weirOverFlow, OpenFOAM.

*Citation:* Kurbanaliev A.Y., Oichueva B.R., Kalmursaeva A.T., Zhainakov A.Zh., Kultaev T.Ch. Critical comparison of the different versions of the OpenFOAM on the simulation of spillway. Computational Technologies. 2021; 26(2):44–57. DOI:10.25743/ICT.2021.26.2.004. (In Russ.)

**Acknowledgements.** The work was funded by the Ministry of Education and Science of the Kyrgyz Republic within the framework of the scientific research project “Mathematical and computer modelling, forecasting and visualization of the consequences of large-scale hydrodynamic disasters of an anthropogenic nature (for example, the dams of the Naryn cascade)”.

**References**

1. **Reda M. Abd El-Hady Rady.** 2D-3D modelling of flow over sharp-crested weirs. Journal of Applied Sciences Research. 2011; 7(12):2495–2505.
2. **Shiva R., Mohammad M., Hamze E.** Three-dimensional simulation of flow over sharp crested weirs using volume of fluid method. Journal of Applied Engineering Sciences. 2020; 10(1):75–82.

3. **Weller H.G., Tabor G.R., Jasak H., Fureby C.** A tensorial approach to computational continuum mechanics using object-oriented techniques. *Computers in Physics*. 1998; 12(6):620–631.
4. **Hrvoje J.** OpenFOAM: Open source CFD in research and industry. *International Journal of Naval Architecture and Ocean Engineering*. 2009; 1(2):89–94.
5. **Ubbink O.** Numerical prediction of two fluid systems with sharp interfaces. Ph.D. Thesis. London, UK: University of London; 1997: 193.
6. **Lopes P.M.B.** Free-surface flow interface and air-entrainment modelling using OpenFOAM. Thesis Project in Hydraulic, Water Resources and Environment Doctoral Program in Civil Engineering. Coimbra, Portugal: University of Coimbra; 2013: 71.
7. OpenFOAM/OpenFOAM-6. Available at: <https://github.com/OpenFOAM/OpenFOAM-6/commit/46704f121b82bcd353a2b102cf0a05e8c98e5a83> (accessed 30.09.2020).
8. **Sedov L.I.** *Mekhanika splshnoy sredy*. T. 2. [Continuum mechanics. Vol. 2]. Moscow; 1970: 568. (In Russ.)
9. **Spitsyn I.P., Sokolova V.A.** *Obshchaya i rechnaya gidravlika* [General and River Hydrology]. Leningrad: Gidrometeoizdat; 1990: 359. (In Russ.)
10. OpenCFD release OpenFOAM v1906. Available at: <https://www.openfoam.com/releases/openfoam-v1906> (accessed 05.09.2020).
11. OpenFOAM 5.0. User's guide. Available at: <https://cfd.direct/openfoam/user-guide-v5> (accessed 05.09.2020).
12. OpenFOAM 6.0. User's guide. Available at: <https://cfd.direct/openfoam/user-guide-v6> (accessed 05.09.2020).
13. OpenFOAM 7.0. User's guide. Available at: <https://cfd.direct/openfoam/user-guide-v7> (accessed 05.09.2020).
14. **Ferziger J.H., Peric M.** *Computational methods for fluid dynamics*. Berlin: Springer Verlag; 2002: 423.
15. **Patankar S.V.** *Numerical heat transfer and fluid flow*. N.Y.: Hemisphere Publishing Corporation; 1980: 197.
16. **Versteeg H.K., Malalasekera W.** *An introduction to computational fluid dynamics: The finite volume method*, 2nd edition. Pearson Education Limited; 2007: 503.
17. OpenFOAM 2.3.0: Multiphase modelling predictor-corrector semi-implicit MULES. Available at: <https://openfoam.org/release/2-3-0/multiphase> (accessed 05.09.2020).
18. OpenFOAM guide/The PIMPLE algorithm in OpenFOAM. Available at: [https://openfoamwiki.net/index.php/OpenFOAM\\_guide/The\\_PIMPLE\\_algorithm\\_in\\_OpenFOAM](https://openfoamwiki.net/index.php/OpenFOAM_guide/The_PIMPLE_algorithm_in_OpenFOAM) (accessed 05.09.2020).
19. **Heyns J.A., Oxtoby O.F.** Modelling surface tension dominated multiphase flows using the VOF approach. 6th European Conference on Computational Fluid Dynamics. 2014. Available at: <http://congress.cimne.com/iacm-eccomas2014/admin/files/filePaper/p2006.pdf> (accessed 05.09.2020).
20. **Deshpande S.S., Anumolu L., Trujillo M.F.** Evaluating the performance of the two-phase flow solver interFoam. *Computational Science and Discovery*. 2012; 5(1):014016.
21. **Hill P.D.** The computer simulations of dispersed two-phase flows. Ph.D. Thesis. London, UK: University of London; 1998: 371.
22. **Rusche H.** Computational fluid dynamics of dispersed two-phase dynamics flows of at phase fractions. Ph.D. Thesis. London, UK: University of London; 2003: 333.
23. Chislenoe modelirovanie nestatsionarnykh turbulentnykh techeniy zhidkosti so svobodnoy poverkhnost'yu [Numerical modelling of unsteady turbulent fluid flows with a free surface]. *Dissertatsiya na soiskanie uchenoy stepeni kandidata fiziko-matematicheskikh nauk*. Sankt-Peterburg: Sankt-Peterburgskiy gosudarstvennyy politekhnicheskiiy universitet; 2014: 154. (In Russ.)
24. OpenFOAM4.0. User's guide. Available at: <https://cfd.direct/openfoam/user-guide-v4> (accessed 05.09.2020).
25. OpenFOAM Release. OpenFOAM v2006 (20 06). Available at: <https://www.openfoam.com/releases/openfoam-v2006/index.php> (accessed 05.09.2020).
26. OpenFOAM 8.0 user's guide. Available at: <https://cfd.direct/openfoam/user-guide-v8> (Accessed 05.09.2020).
27. Interface Capturing in OpenFOAM. Available at: <https://openfoam.org/release/2-3-0/multiphase> (accessed 05.09.2020).

28. OpenFOAM/OpenFOAM-6. Available at: <https://github.com/OpenFOAM/OpenFOAM-6/commits/master/applications/solvers/multiphase/interFoam> (accessed 05.09.2020).
29. OpenFOAM/OpenFOAM-6. Available at: <https://github.com/OpenFOAM/OpenFOAM-6/commit/da787200a6b208cf3fc4dfaa48b4438a3a038c1b> (accessed 05.09.2020).
30. OpenFOAM/OpenFOAM-dev. Available at: <https://github.com/OpenFOAM/OpenFOAM-dev/commit/b162c4818b9bbdb824db9e75baffef6ac7c5a7a0> (accessed 05.02.2021).
31. **Fehr J., Heiland J., Himpe C., Saak J.** Best practices for replicability, reproducibility and reusability of computer-based experiments exemplified by model reduction software. *AIMS Mathematics*. 2016; 1(3):261–281. DOI:10.3934/Math.2016.3.261.
32. **Samarskii A.A.** Matematicheskoe modelirovanie i vychislitelnyi eksperiment [Mathematical modelling and computational experiment]. Available at: <http://samarskii.ru/articles/1979/1979-002ocr.pdf> (accessed 28.02.2021). (In Russ.)