

**МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ
КЫРГЫЗСКОЙ РЕСПУБЛИКИ
ОШСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ**

На правах рукописи

УДК 532. 546

Ойчуева Бурулгүл Рахманбердиевна

Трёхмерное математическое моделирование процессов наводнения

01.02.05 – Механика жидкости, газа и плазмы

Диссертация на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Научный руководитель:

доктор физико-математических
наук, доцент

Курбаналиев А. Ы.

Ош -2023

СОДЕРЖАНИЕ

ПЕРЕЧЕНЬ СОКРАЩЕНИЙ И ОБОЗНАЧЕНИЙ	4
ВВЕДЕНИЕ.....	5
ГЛАВА 1. ОБЗОР ЛИТЕРАТУРЫ.....	
1.1. Исследования потока при прорыве плотины.....	13
1.2. Модели течения при прорыве плотины для стационарных пластов.....	14
1.3. Модели течения при прорыве плотины для подвижных пластов	18
1.4. Методы отслеживания водной поверхности	20
1.5. Моделирование процесса наводнения	25
ВЫВОДЫ К ГЛАВЕ 1.....	26
ГЛАВА 2. МЕТОДОЛОГИЯ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ.....	28
2.1. Метод объема жидкости.....	35
2.2. Обзор методов дискретизации в пакете OpenFOAM.....	36
2.3. Дискретизация области решения.....	36
2.4. Определение сетки OpenFOAM.....	40
2.5. Дискретизация уравнения.....	42
2.6. Граничные условия.....	49
2.6.1. Физические граничные условия.....	51
2.7. Реализация метода решения в пакете OpenFOAM.....	51
2.7.1. Пакет программ OpenFOAM.....	51
2.7.2. Алгоритм PISO.....	55
2.7.3. Методы решения СЛАУ.....	56
ВЫВОДЫ К ГЛАВЕ 2.....	56
ГЛАВА 3. ТРЁХМЕРНОЕ МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ НАВОДНЕНИЯ.....	57
3.1. Моделирование двухфазных течений	57

3.1.1.	Математическая модель.....	57
3.1.2.	Моделирование свободной поверхности.....	58
3.1.3.	Граничные и начальные условия	60
3.1.4.	Методы дискретизации основных уравнений и методы решения СЛАУ.....	60
3.2.	Критическое сравнение различных версий пакета OpenFoam на задаче моделирования водослива.....	62
3.3.	Моделирование процесса наводнения в городские постройки...	73
3.4.	Моделирование процесса распространения волны прорыва горной местности Willow Greek, California, USA.....	84
3.5.	Математическое моделирование и визуализация последствий крупномасштабного наводнения вблизи поселка Шамалды- Сай, Кыргызстан.....	94
	Выводы к главе 3	107
	ЗАКЛЮЧЕНИЕ.....	109
	ПРАКТИЧЕСКИЕ РЕКОМЕНДАЦИИ	110
	СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ.....	111
	ПРИЛОЖЕНИЕ 1	125
	ПРИЛОЖЕНИЕ 2	131
	ПРИЛОЖЕНИЕ 3	135
	ПРИЛОЖЕНИЕ 4	138

ПЕРЕЧЕНЬ СОКРАЩЕНИЙ И ОБОЗНАЧЕНИЙ

- СЛАУ – система линейных алгебраических уравнений
- CFD- Computational Fluid Dynamics- вычислительная гидродинамика
- DNS –Direct Numerical Simulation – прямое численное моделирование
- DES – Detached Eddy Simulation - моделирование отсоединенных вихрей
- FVM - finite volume method -метода конечных объемов
- LES – Large Eddy Simulation – моделирование крупных вихрей
- OpenFOAM – Open Field of Operation and Manipulation -открытая интегрируемая платформа для численного моделирования задач механики сплошных сред
- RANS- Reynolds-averaged Navier–Stokes- осреднённые по Рейнольдсу уравнения Навье — Стокса
- URANS- Unsteady Reynolds Averaged Navier Stokes- осреднённые по Рейнольдсу нестационарные уравнения Навье — Стокса
- RNG- Random Number Generators- генераторы случайных чисел
- SAS- Statistical Analysis System- система статистического анализа
- stl – stereolithography— формат файла, используемый для хранения трёхмерных моделей объектов
- VOF – volume of fluid – метод объёма жидкости

ВВЕДЕНИЕ

Актуальность темы диссертации. Математическое и компьютерное моделирование является эффективным инструментом предсказания сценариев и последствий различных техногенных катастроф и природных явлений. При этом особое место занимает моделирование масштабных гидродинамических событий таких, как прорыв плотин, набеганные волн цунами, сход оползня, селевого потока, снежных лавин, истечение лавы.

Исследование начальной стадии прорыва плотины проведено в данной диссертационной работе [1] с учётом оценки эффективности различных моделей турбулентности при прогнозировании и оценке потоков при прорыве плотины и связанных с ними положительных и отрицательных характеристик паводковых волн в различных условиях.

Производительность разных осредненных по Рейнольдсу уравнений Навье-Стокса (RANS) - модели турбулентности были исследованы, а стандартный $k - \varepsilon$, RNG $k - \varepsilon$, реализуемых $k - \varepsilon$, $k - \omega$ SST и $v^2 - f$ модели турбулентности были изучены с использованием программного обеспечения OpenFOAM. Прорывы плотин моделировались с использованием метода объема жидкости (VOF) с использованием метода конечных объемов (FVM). Для оценки пригодности различных моделей турбулентности были проведены как качественные, так и количественные сравнения численного моделирования с лабораторными экспериментами. Результаты первого исследования показали, что модель RNG $k - \varepsilon$ продемонстрировала лучшую производительность при захвате профилей свободной от паводковых волн поверхности как в условиях сухого, так и во влажном русле ниже по течению, в то время как из второго исследования был сделан вывод, что модель $k - \omega$ SST способна точно предсказывать формирование и распространение отраженных волн от донного

препятствия с точки зрения профилей свободной поверхности и отрицательных скоростей распространения по скважине.

Явление воздействия потока на вертикальную стену в результате прорыва плотины моделировано с помощью OpenFOAM в работе [2] с добавлением препятствий различных размеров. Целью этого исследования является оценка точности решателя для задач в категории ударных волн на основе экспериментальных результатов предыдущих исследователей и других методов численного решения по сравнению с результатами этого решателя. Различные аспекты потока, такие как возвышение свободной поверхности до и после первоначального удара, наблюдались на глубине. Метод, использованный в этом исследовании, представляет собой моделирование численных вычислений с подходом OpenFOAM, преимуществом которого является более точное и быстрое моделирование. Вариации размеров препятствия в данном исследовании составляли $b/h = 0.25$, $b/h = 0.5$ и $b/h = 1.0$. Из данных моделирования установлено, что численный подход был подтвержден посредством количественных сравнений с экспериментальными измерениями. Расчетные положения передней кромки обрушившейся толщи воды совпадают с экспериментальными данными. Разница между экспериментом и этим численным решением составляет менее 2%.

В работе [3] проведено численное моделирование крупномасштабных гидродинамических процессов наводнения в местностях плотин Андижанского и Папанского водохранилищ вблизи г. Ош, Кыргызстан. Здесь не учитывалось взаимодействие потока воды с растительностью русла реки и различными строениями, которые заметно изменяют общую картину течения, приводя к увеличению зон затопления. Проведенные методические расчеты путем последовательного измельчения расчетной сетки при отслеживании воздушных капель показывают, что при чрезмерном измельчении ухудшается сходимость численного решения, и общее время расчета неоправданно увеличивается вне зависимости от способа получения мелкой сетки, получаются неправдоподобные значения скорости воздуха вблизи свободной границы.

В работе [4] показаны некоторые потенциальные риски у плотин, одним из которых является прорыв плотины. Прорыв плотины может привести к серьезной катастрофе в нижнем течении. Следовательно, основной целью данной статьи является моделирование и имитация разрушения плотины, а также определение зон опасности наводнения. Для моделирования проблемы прорыва плотины применяется программное обеспечение OpenFOAM. OpenFOAM - это платформа для разработки исполняемых файлов приложений, которые используют упакованные функциональные возможности, содержащиеся в коллекции из примерно 100 библиотек C++. В качестве примера была выбрана плотина Shahar Chau в Иранской провинции Западный Азербайджан. 2D модель потока при прорыве плотины с использованием двухфазного алгоритма, основанного на объеме жидкости (VOF) был разработан метод, в котором для определения относительной объемной доли двух фаз, или фазовой доли α , в каждой вычислительной ячейке используется уравнение переноса вида. Эта модель используется для моделирования выброса прорывающей плотину паводка из водохранилища и его продвижения вниз по течению. При моделировании учитываются различные продолжительности прорыва плотины, потоки вверх по течению и уровни воды перед плотиной, и эти проанализированы факторы, влияющие на поток при прорыве плотины. Наконец, точность модели демонстрируется с помощью нескольких тестовых примеров. Вышеприведенный краткий обзор определяет актуальность темы диссертации.

Связь темы диссертации с приоритетными научными направлениями, крупными научными программами (проектами), основными научно-исследовательскими работами, проводимыми образовательными и научными учреждениями. Определённая часть работы выполнена в рамках научно-исследовательского проекта «Математическое и компьютерное моделирование, прогнозирование и визуализация последствий крупномасштабных гидродинамических катастроф антропогенного характера

(на примере плотин Нарынского каскада)», финансируемого за счет Министерства образования и науки Кыргызской Республики за 2019-2022 гг.

Цель исследования. Целью данной диссертационной работы является создание комплекса математических моделей, прикладных программ и геоинформационных систем, позволяющих получать с помощью открытого пакета OpenFOAM устойчивые и достаточно точные численные решения (на примере моделированию волны прорыва в горной местности Willow Greek, California, USA и вблизи посёлка Шамалды-Сай, Кыргызстан).

Задачи исследования:

- Показать использованного открытого пакета OpenFOAM7, установленного в операционной системе Ubuntu 20.04 LTS на различных задачах вычислительной гидродинамики.
- Развитие математических моделей в виде дифференциальных уравнений в частных производных нелинейного типа, построение начальных и граничных условий для моделей, адекватно отражающих физическую картину исследуемых объектов.
- Разработка программного кода для построения неструктурированной трёхмерной расчетной сетки с учетом сложной топологии горной местности Willow Greek, USA.
- Моделирование процесса распространения волны прорыва дамбы в горной местности Willow Greek, USA и вблизи посёлка Шамалды-Сай, Кыргызстан при разных начальных высотах водного столба.

Научная новизна полученных результатов.

- Показано, что при моделировании задачи водослива объединение решателей interFoam и interDyMFoam в пакете OpenFoam6 приводит к не адекватному, с физической точки зрения, численным результатам. А численные результаты, полученные с помощью OpenFOAM19.06, OpenFOAM20.06, OpenFOAM4

OpenFOAM5, OpenFOAM7 и OpenFOAM8 дают примерно одинаковую картину течения струи за водосливом (вода не прилипает к правой, пологой стенке водослива), что соответствует принципу повторяемости результатов адекватного математического моделирования.

- Обнаружено, что при моделировании наводнения в модели городской местности разница в максимальных значениях давления в точках P7 и P8 составила 6.74%, 16.3%, 16.3% и 17.2% для начальных высот $H=0.2$ м, $H=0.4$ м, $H=0.6$ м и $H=0.8$ м соответственно. С ростом высоты водного столба растет площадь затопления дна канала.
- Впервые проведён расчет возможного наводнения в горной местности Willow Greek, USA и около поселка Шамалды-Сай, Кыргызстан. Обнаружено, что для трёх различных начальных высот водного столба $H = 20$ м, 25м, 30м, 35м и 40м площади затопления имеют разные значения с ростом начальной высоты растет площадь затопления.
- Показано, что время достижения волны прорыва до определенной точки местности зависит от первоначальной высоты водного столба: с ростом высоты водного столба время достижения уменьшается.

Практическая значимость полученных результатов. Результаты исследования внедрены в деятельность Министерства чрезвычайных ситуаций Кыргызской Республики для организации плановых и внеплановых сезонных сбросов с водохранилищ Нарынского каскада.

Часть материалов диссертации включена в учебный процесс факультета математики и информационной технологий в качестве специального курса «Методы компьютерного моделирования физических процессов» для студентов старших курсов, магистрантов и аспирантов специальностей 510100 Математика, 510200 Прикладная математика и информатика, 710300 Прикладная информатика, 710100 Информатика и вычислительная техника, 710200 Информационные системы и технологии Ошского государственного

университета. Данная работа позволит слушателям освоить навыки решения актуальных проблем науки и техники с использованием современных программных пакетов и информационных технологий.

Основные положения диссертации, выносимые на защиту:

1. Разработанный метод построения трёхмерной расчетной сетки с точностью необходимой для моделирования процесса наводнения местности со сложной естественной топографией.
2. Результаты моделирования процесса распространения волны прорыва в горной местности Willow Greek, California, USA и около посёлка Шамалды-Сай, Кыргызстан.

Достоверность полученных результатов, полученных в диссертации, обеспечивается: использованием математических моделей, основанных на фундаментальных законах сохранения механики жидкости и газа; детальным физическим анализом полученных результатов и сравнением этих результатов с экспериментальными данными и результатами численного моделирования.

Личный вклад соискателя. Диссертация является результатом законченных самостоятельных исследований, выполненных диссертантом. Личный вклад автора состоит в постановке и определении цели работы, выборе методов достижения поставленной цели, проведении численных исследований, анализе полученных результатов и формулировке выводов, публикации статей. В обсуждении результатов принимали участие научный руководитель, д.ф.–м.н., доцент А. Ы. Курбаналиев, академик НАН КР, д.ф.–м.н., профессор А. А. Жайнаков, д.ф.–м.н., к.ф.-м.н., с.н.с. Дж. О. Усенканов.

Апробация результатов исследования. Результаты выполненных исследований докладывались на следующих конференциях и семинарах:

- Международная научная конференция «Экология и природопользование: актуальные вопросы науки, практики и образования». ОшГУ, 15 ноября 2018 года. Ош, Кыргызстан.
- Конгресс «The Turkic World on Health and Natural Sciences». ОшГУ, 21-22 апреля 2019 года. Ош, Кыргызстан.

- Научно-практическая конференция «Актуальные проблемы науки, техники и образования». ОшГУ, 27 июня 2019 года. Ош, Кыргызстан.
- Международная научно-практическая конференция “Актуальные вопросы образования и науки в условиях развития регионов и цифровизации страны” посвященной 80-летию ОшГУ. ОшГУ, 28 мая 2020 года. Ош, Кыргызстан.
- 5th international conference on advances in natural and applied sciences, 21-23 Eylül / September 2021 Ağrı İbrahim Çeçen University, Ağrı – Turkey.
- IV Международная научно-практическая конференция «Информационной технологии в научно-техническом и образовательном пространстве». КГУСТА им. Н.Исанова, 17 сентября 2021 года. Бишкек, Кыргызстан.
- Международная научная конференция «Информационные технологии математическое моделирование в науке и горно-техническом образовании», посвященной 80-летию академика Национальной академии наук Кыргызской Республики, лауреата Государственной премии Кыргызской Республики в области науки и техники, Заслуженного деятеля науки Кыргызской Республики, Народного учителя Кыргызской Республики, лауреата Академической премии имени И. К. Ахунбаева, профессора, доктора физико-математических наук Жайнакова Аманбека и 25-летию кафедры «Информационные технологии и математическое моделирование имени академика Жайнакова Аманбека», Бишкек, Кыргызстан, 06 – 08 октября 2021 года.
- XXIV Международной научно-практической конференции молодых ученых и студентов «Наука и образование: проблемы и перспективы», 15 апреля 2022 года на платформе GoogleMeet, Алтайский край, г. Бийск – наукоград Российской Федерации.
- 11th Computer Science On-line Conference 2022.CSOC2022 conference <https://www.springer.com/series/15179>. 26-30 апреля 2022 года. г. Злин, Чехия.

Полнота отражения результатов диссертации в публикациях:
основные результаты исследований опубликованы в 10 научных статьях, 2

авторских свидетельствах, в том числе в научных журналах за пределами Кыргызской Республики, которые входят в базы данных Scopus (3), РИНЦ (6).

Структура и объем диссертации. Диссертация состоит из введения, 3 глав, заключения, практических рекомендаций, библиографии и приложений. Работа содержит 134 страниц текста, 33 рисунка, 18 таблиц, 105 библиографических ссылок и 4 приложений.

Работа выполнена на кафедре естественных наук и математики Ошского государственного университета.

Пользуясь случаем, автор искренно выражает свою глубокую признательность своему научному руководителю, д.ф.-м.н., доценту Абдикериму Ырысбаевичу Курбаналиеву за постановку задачи, постоянное внимание и ряд важных замечаний в ходе выполнения работы.

На различных конференциях и семинарах автор имел возможность общаться с докторами физико-математических наук, профессорами Жайнаковым А. Ж., А. И. Сопуевым, Сатыбаевым А. Ж. благодарен им за ряд замечаний и многочисленные и полезные обсуждения.

Автор с благодарностью примет любые пожелания и замечания по электронному адресу oichuevab@gmail.com.

ГЛАВА 1. ОБЗОР ЛИТЕРАТУРЫ

В этой главе представлен всесторонний обзор существующих моделей течения при прорыве плотины. Кратко описаны основные теории и численные методы, используемые в моделях. В последних разделах также представлены подходы к отслеживанию интерфейса.

1.1. Исследования потока при прорыве плотины

Исследования, связанные с потоками при разрушении плотин, были интересной темой для инженеров-экологов и гидротехников и исследователей в течение нескольких десятилетий. Были предприняты значительные усилия для понимания и моделирования механизма прорывных потоков плотин. Хотя самое раннее исследование Риттера [5] было основано на аналитическом решении упрощенной задачи разрушения плотины, сложность управляющих уравнений заставила исследователей проявлять больший интерес к экспериментальным и численным подходам.

В последние десятилетия стало доступно компьютерное моделирование, и многие исследователи посвятили свои исследования численному моделированию и прогнозированию потоков при разрушении плотин и их последствий. Численные модели моделируют и вычисляют характеристики наводнения, вызванного разрушением плотины, используя методы конечных разностей, конечного объема или конечных элементов. Рассчитанные данные, включая уровень поверхности воды, скорость, давление, силы и т.д., используются для определения и прогнозирования районов, где существует опасность затопления и потерь.

Хотя большинство естественные водохранилища содержат значительный объем накопленных отложений, ранние разработанные модели моделировали потоки при разрушении плотин по неэродируемым слоям без расчетов переноса отложений. С другой стороны, когда плотина выходит из строя, накопленные отложения в водохранилище вымываются высвобожденным паводком и оседают в нижнем течении. Следовательно, высвобожденный паводок из водохранилища

разрушенной плотины может вызвать на землях ниже по течению значительную эрозию дна и берегов и/или осаждение.

Морфологические изменения реки могут сильно повлиять на гидродинамическое поведение паводка при прорыве плотины. Таким образом, взаимодействие между потоком и переносом наносов вызвало сильную мотивацию к изучению потоков, разрушающих плотины, по подвижным пластам. В последующих разделах представлен обзор разработанных численных моделей для моделирования течения при прорыве плотины на неподвижных пластах.

1.2 Модели течения при прорыве плотины для стационарных пластов.

Численные модели, разработанные для моделирования течения при прорыве плотины на неподвижных пластах, предполагают, что слой не подвержен эрозии и, следовательно, процесс переноса наносов незначителен. В зависимости от целей разработки этих моделей, они решают 1-D, 2-D и 3-D управляющие уравнения несжимаемых потоков.

Одномерные модели течения при прорыве плотины решают уравнения Сен-Венана, которые представляют собой набор нелинейных гиперболических уравнений, полученных путем интегрирования 3-мерных уравнений непрерывности и импульса (Навье-Стокса) по поперечному сечению в предположении о распределении гидростатического давления. Следовательно, управляющие уравнения решаются в направлении потока канала без учета деталей течения по поперечному сечению.

Двумерные модели могут быть разделены на горизонтальные и вертикальные модели. Двумерные горизонтальные модели решают уравнения мелководья в горизонтальной плоскости, тогда как двумерные вертикальные модели решают уравнения Навье-Стокса в продольное и вертикальное направления. Уравнения мелководья получены на основе интегрирования по глубине трехмерных уравнений непрерывности и импульса. Полученные уравнения справедливы там, где вертикальная шкала длины пренебрежимо мала по сравнению с горизонтальной шкалой длины. При этом условии вертикальная составляющая

скорости жидкости незначительна, а вертикальный градиент давления является гидростатическим.

Уравнения Сен-Венана и мелкой воды были решены с помощью многочисленных подходов, но наиболее широко используемыми из них являются схемы захвата удара, такие как приближенные решатели Римана и схемы уменьшения общей вариации (TVD). Автор работы [6] предложил трехмерную математическую модель, основанную на диффузионных схемах и схемах Лакса-Вендроффа для сильно неперизматичных каналов. Катоподес и Ву [7] разработали трехмерную явную конечно-элементную модель, которая была второго порядка точности во времени и четвертого порядка в пространстве. Беллос и Саккас [8] изучили 1-мерную волну наводнения при прорыве плотины в широком прямоугольном канале, используя алгоритм конечных разностей Маккормака. Савич и Холли [9] рассмотрели волну разрушения плотины как режим течения с сильными толчками таким образом, что 1-D управляющие уравнения были решены с помощью двух методов Годунова, основанных на линейных и кусочно-параболических интерполяциях. Хикс и др. [10] разработали трехмерную модель, которая разрешала консервативные и неконсервативные формы уравнения Сен-Венана с использованием характеристического диссипативного метода конечных элементов Галеркина (CDG) и четырехточечного неявного или коробочного метода конечных разностей (BFD). Јha и др. [11] разработали модель для исследования точности схемы Рунге первого порядка и ее расширения второго порядка, основанную на численном потоке Лакса-Вендроффа, MUSCLE и модифицированном потоковом подходе для задач о прорыве плотины. Ван и др. [12] разработали модель, основанную на гибридном типе схемы TVD второго порядка для задач разрушения плотин. Предлагаемая схема сочетает в себе схемы первого порядка против ветра и второго порядка Лакса-Вендроффа с оптимально выбранным ограничителем.

Их схема состояла из первоначально разработанный для 1-D задач и расширение для 2-D уравнений мелкой воды было представлено методом

операторного расщепления. Ин и др. [13] предложили численный метод для решения уравнений Сен-Венана. Они разработали модель, основанную на предложенной схеме, в которой использовалась консервативная схема с подветренной стороны с подходом средневзвешенного градиента водной поверхности. Ин и Ван [14] разработали модель, которая решала уравнения Сен-Венана, используя предложенные ими схемы, основанные на приближенном решателе Римана HLL для обработки разрывов волн, разрушающих плотину. Куири и др. [15] решили уравнения мелкой воды, используя метод конечных объемов над треугольными ячейками. Диффузией импульса из-за вязкости и турбулентности пренебрегли, и поток жидкости через ячейку был аппроксимирован с использованием приближенного решателя Римана Роу. Алтынакар и др. [16] разработали две современные модели, называемые DSS-WISE и WGFEM, для моделирования прорыва плотины /дамбы / прорывных наводнений и / или речных паводков на сложной топографии. Они решили двумерные уравнения мелководья, используя схему конечного объема с захватом ударов, которая принимала регулярные сетки на основе DEM. Их модели были распараллелены с использованием OpenMP и графического процессора для ускорения вычислений.

Из-за допущений, используемых в одномерных и горизонтальных двумерных моделях потока при прорыве плотины, эти модели неадекватны для моделирования потоков, включающих значительные изменения глубины потока, скорости и давления в вертикальном направлении, таких как поток при прорыве плотины вблизи сооружений в потоке. Моделирование этих сложных потоков должно основываться на вертикальных 2-D или 3-D моделях, которые решают уравнения RANS. Хотя вертикальные 2-D модели применимы там, где боковые изменения потока незначительны, 3-D модели подходят для изучения потоков при прорыве плотины с быстрыми изменениями в горизонтальном и вертикальном направлениях. Мохпатра и др. [17] разработали вертикальную 2-D модель для несжимаемых невязких потоков при разрушении плотины в вертикальной плоскости. Они использовали решатель Навье-Стокса GENSMAC

и метод VOF для решения управляющих уравнений и отслеживания свободной поверхности, соответственно. Управляющие уравнения были дискретизированы с использованием конечно-разностного подхода на шахматной сетке. В их модели эффектами турбулентности и трения в слое пренебрегали. Клифсман и др. [18] исследовали воздействие воды и загрузку зеленой водой с использованием трехмерной модели. Уравнения RANS были решены на фиксированной декартовой сетке в шахматном порядке с использованием метода конечных объемов, а для отслеживания изменений водной поверхности был применен метод VOF с функцией высоты. Поверхностное натяжение учитывалось путем вычисления общей кривизны свободной поверхности. Уравнение давления Пуассона было решено с использованием метода SOR. Феррари и др. [19] разработали 2-мерную модель разрушения плотины, основанную на предположениях о мелководье, а также 3-мерную модель, основанную на подходе гидродинамики гладких частиц (SPH). Их трехмерная модель SPH учитывала слабо сжимаемые уравнения Навье-Стокса, которые позволили модели использовать уравнение состояния Тейта вместо соотношения Пуассона для определения давления. Модели были протестированы на экспериментальном потоке при прорыве плотины, выпущенном из частичного отверстия, чтобы воспроизвести обрушение плотины в открытой долине. Сравнения показали, что результаты, рассчитанные с помощью 3-D модели SPH, превосходят результаты, рассчитанные с помощью 2-D модели мелководья. Янг и др. [20] изучили потоки при прорыве плотины, разработав трехмерную модель, которая решала уравнения непрерывности и RANS с использованием метода конечных разностей в декартовой шахматной сетке. Они применили метод VOF для отслеживания поверхности воды и модель $k-\epsilon$ для замыкания турбулентности уравнений RANS. Связь давления и скорости в определяющих уравнениях была достигнута с помощью двухэтапного метода проектирования. Марсули и др. [21] разработали вертикальную 2-D модель для потоков, разрушающих плотины. Их модель решала двумерные уравнения RANS в продольном и вертикальном направлениях с использованием метода конечных разностей на декартовой

шахматной сетке. Модель подсети Смагоринского использовалась для замыкания уравнений RANS на турбулентность, а свободная поверхность отслеживалась с помощью метода VOF.

1.3 Модели течения при прорыве плотины для подвижных пластов

Моделирование потока при прорыве плотины над подвижными пластами гораздо сложнее, чем над неподвижными пластами. Одна из проблем, возникающих в случае подвижного слоя, заключается в том, что нагрузка на наносы, переносимая волной разрушения плотины, настолько высока, а слой изменяется так быстро, что влияние переноса наносов и изменения слоя на поток нельзя игнорировать. Другая проблема заключается в том, что перенос наносов в режиме более высокого потока, таком как поток при прорыве плотины, мало изучен, и существующие формулы переноса наносов могут быть неприменимы [22, стр. 363]. В таких регионах предположение о равновесной способности переноса наносов нарушается, и перенос наносов находится в неравновесном состоянии.

Капарт и Янг [23] разработали трехмерную модель мелководья для течения при прорыве плотины по подвижным пластам. Они рассмотрели неравновесный перенос наносов и влияние наносов на расчеты расхода. Фракаролло и Капарт [24] предложили 1-мерную модель течения при прорыве плотины над подвижными пластами, основанную на подходе к мелководью. Их модель разделила толщу воды на два слоя, в которых прозрачная вода находится в верхнем слое, а смесь осадка и воды - в нижнем слое. Они предположили, что концентрация осадка в слое смеси равна концентрации материала слоя в слое, что может завышать концентрацию осадка. Капарт и Янг [25] и Спиневайн [26] разработали одномерные двухслойные модели с переменной концентрацией в слое смеси.

Цао и др. [27] разработали модель течения при разрушении плотины над эродируемыми пластами. Они решили одномерные уравнения массы и импульса

водно-осадочной смеси для канала с прямоугольными поперечными сечениями постоянной ширины над подвижными слоями, покрытыми однородными и некогезионными отложениями. Численная схема, используемая для аппроксимации потоков, представляла собой версию метода взвешенного среднего потока второго порядка с уменьшением общей вариации (TVD) в сочетании с HLLC приближенный решатель Римана и ограничитель SuperBE. Ву и Ван [28] создали трехмерную модель для моделирования речных процессов при прорыве плотины по подвижным пластам. Они рассмотрели взаимодействие стока, переноса наносов и изменения русла, решив 1-D нестационарный поток, нагруженный наносами, в реках. 1-мерные уравнения мелководья были получены путем секционного интегрирования 3-мерных уравнений мелководья с изменяющейся в продольном направлении плотностью потока. Влияние концентрации наносов и изменения слоя было учтено путем использования плотности смеси воды и наносов в определяющих уравнениях и включения скорости изменения слоя в уравнение непрерывности. Неравновесный перенос донного груза и взвешенного груза использовался при расчетах переноса наносов. Пропускная способность слоя и концентрация взвешенных веществ вблизи слоя в уравнениях переноса осадка были оценены путем введения поправочного коэффициента в формулах Ван Рейна [29, 30]. Они заменили плотность воды плотностью потока и смеси наносов вблизи дна, чтобы сделать эти формулы применимыми к ситуациям с высоким переносом наносов. Уравнения переноса потока и осадка были решены явным методом конечных объемов с использованием схемы восходящего ветра первого порядка. 1-Мерная модель конечного объема была разработана Чжаном и др. [31] для моделирования неравновесного переноса наносов в потоках, разрушающих плотины.

Ся и др. [32] предложили 2D морфодинамическую модель для прогнозирования потоков при прорыве плотины по подвижным пластам. Их модель решала уравнения переноса мелководья и неравновесных отложений на основе метода конечных объемов на неструктурированных треугольных сетках.

Их модель решала уравнения переноса взвешенного груза и нагрузки на кровать отдельно. Они также рассмотрели влияние концентрации наносов и эволюции русла на распространение паводковой волны. Ву и др. [33] разработали усредненную по глубине 2D-модель для моделирования течения, переноса наносов и морфологических изменений, вызванных разрушением насыпи. Модель решила руководящую уравнения с использованием метода конечных объемов с приближенным решателем Римана HLL на структурированных прямоугольных сетках. Их модель учитывает неравновесный перенос некогезионных отложений при общей нагрузке.

Трехмерное численное моделирование потока во время прорыва плотины через подвижные пласты является более сложной задачей, чем 1-D и 2-D моделирование. В трехмерной модели, поскольку эрозия и осаждение происходят с течением времени, вычислительная сетка должна быть специально обработана для отслеживания временной эволюции границы поверхности слоя. Насколько известно автору, до сих пор не сообщалось ни о каком успешном численном исследовании трехмерного течения при прорыве плотины над подвижными образованиями. Эта диссертация может быть первым исследованием по трехмерному численному моделированию потоков при разрушении плотин над подвижными образованиями.

1.4 Методы отслеживания водной поверхности

В вертикальных 2-D и 3-D моделях течения при прорыве плотины глубина воды явно не учитывается ни в уравнениях импульса, ни в уравнении непрерывности, и поэтому необходимо приложить усилия для отслеживания границы свободной поверхности. Чтобы отслеживать движение свободной поверхности, необходимо использовать метод отслеживания границы раздела жидкость-жидкость. Фактически, для отслеживания движущихся границ использовались два класса методологий, называемых методами отслеживания поверхности и методами отслеживания объема. В методах отслеживания

поверхности интерфейс определяется упорядоченным набором маркерных точек. Как показано на рисунке 1.1, маркерные точки могут быть представлены либо функцией высоты, либо отрезками линий (параметрическая функция).

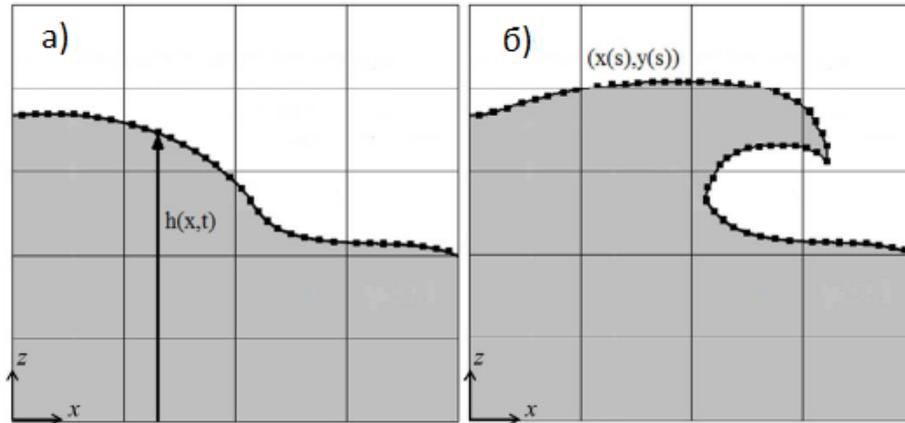


Рисунок 1.1 - Маркерные точки на интерфейсе: а) функция высоты; б) отрезки линий.

Метод функции высоты представляет интерфейс путем определения его расстояния от плоскости отсчета. Временная эволюция функции высоты $h = f(x, y, t)$ определяется следующим кинематическим уравнением, выражающим тот факт, что поверхность движется вместе с жидкостью, Хиртом и Николсом [34]:

$$\frac{\partial h}{\partial t} + u \frac{\partial h}{\partial x} + v \frac{\partial h}{\partial y} = w \quad (1.1)$$

где t - время, x и y - горизонтальные координаты, а u , v и w - компоненты скорости в направлениях x , y и z соответственно. Обратите внимание, что этот метод не работает для многозначных поверхностей, таких как разрушающая волна, показанная на рисунке 1.1б, которые имеют более одного значения h для данной точки плоскости отсчета.

Подход с использованием линейных сегментов, Николс и Хирт [35] использует цепочки коротких линейных сегментов, или, другими словами, точек, соединенных линейными сегментами.

Этот метод не ограничивается однозначными поверхностями, но требует большего объема памяти, поскольку координаты для каждой точки должны быть сохранены, и для точности лучше ограничить расстояние между соседними

точками меньшим, чем минимальный размер сетки. Временная эволюция отрезков линии может быть достигнута простым перемещением каждой точки с локальной скоростью жидкости. Этот метод неудобен, когда две поверхности пересекаются или, поверхность складывается сама на себя. В этом случае цепочки сегментов должны быть переупорядочены, возможно, с добавлением или удалением некоторых цепочек. Обнаружение пересечений, изменение порядка сегментов линии и расширение подхода линейного сегмента на трехмерные поверхности не является тривиальным (Хирт и Николс, [34]).

В методах отслеживания объемов домен разделяется на непересекающиеся области решения таким образом, что границей между ними является интерфейс. Поскольку этот подход следует за областями, а не за поверхностями, все логические проблемы, связанные с пересекающимися поверхностями, устраняются. Области могут быть выделены либо маркерными точками, такими как метод маркера и ячейки (MAC), либо функцией фракции, такой как метод объема жидкости (VOF), и могут быть расширены во времени с использованием вспомогательного кинематического уравнения. Метод MAC, предложенный Харлоу и Уэлчем [36], был самым ранним методом отслеживания объема. В этом методе частицы маркера первоначально распределяются в вычислительных ячейках и конвектируются с локальной скоростью жидкости. Распределение частиц определяет конфигурацию интерфейса, как показано на рисунке 1.2а.

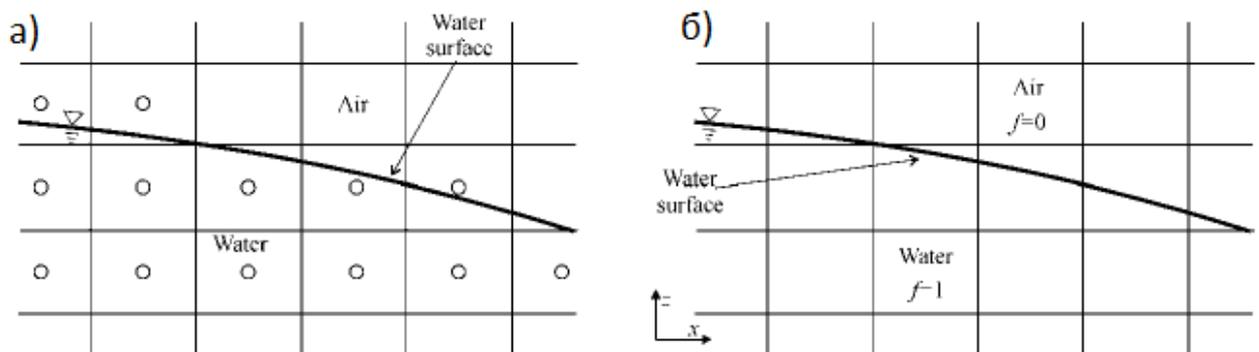


Рисунок 1.2 - Настройка сетки для методов отслеживания объема: а) MAC и б) VOF

Основным недостатком метода МАС является то, что для точной оценки границы раздела требуется огромное количество частиц, распределенных по всей области. Это привело бы к дорогостоящим вычислительным затратам, особенно для крупномасштабных и трехмерных случаев.

Метод VOF обеспечивает ту же гипотезу, что и в методе МАС, но для этого требуется только одна переменная хранилища. Метод VOF обрабатывает границу раздела жидкость-флюид путем введения ступенчатой функции $F(x, y, t)$, которая определяется как единица в любой точке, занятой конкретной жидкостью, и ноль в точках, занятых другой жидкостью. При усреднении по ячейкам вычислительной сетки среднее значение F в ячейке равно долевого объему ячейки, занимаемому каждой жидкостью, и называется просто F -функцией. Поэтому, например, рассмотрим два разных типа жидкости A и B , ячейка, заполненная жидкостью A , имеет единичное значение F , тогда как нулевое значение F указывает на ячейку, заполненную жидкостью B . Ячейки со значением F от нуля до единицы содержат границу раздела жидкостей A и B . В задачах о поверхностных водах воду можно считать жидкостью A , а воздух - жидкостью B .

Для несжимаемого потока эволюция F -функции во времени вычисляется с использованием следующее уравнение адвекции:

$$\frac{\partial F}{\partial t} + u \frac{\partial (u_i F_i)}{\partial x_i} = 0 \quad (1.2)$$

Поскольку F -функция является ступенчатой функцией, которая резко изменяется от нуля до единицы, обычные методы адвекции не могут быть использованы, поскольку ошибки численной диффузии и дисперсии разрушают четкий характер распределения F -функции и быстро размазывают и рассеивают поверхность.

Поэтому необходимо проявлять особую осторожность при определении его производных. Широкое исследование было посвящено определению схемы адвекции таким образом, чтобы сохранялось четкое определение поверхности жидкости и избегались ошибки диффузии. В основном, схемы адвекции подразделяются на методы отслеживания интерфейса и захвата интерфейса.

В методах отслеживания интерфейса интерфейс реконструируется в каждой вычислительной ячейке и перемещается на основе локальной скорости лагранжевым способом. Точность этих методов сильно зависит от реконструированного интерфейса в каждой отдельной вычислительной ячейке. Было разработано несколько кусочно-постоянных и кусочно-линейных методов восстановления интерфейса. В кусочно-постоянных алгоритмах предполагается, что интерфейс внутри каждой ячейки параллелен одному из координат локальной сетки. Метод SLIC Но и Вудворда [37] реконструирует границу раздела с использованием кусочно-постоянного метода. Кусочно-линейные методы реконструируют интерфейс путем оценки наклона и пересечения интерфейса в каждой вычислительной ячейке. Эти методы можно назвать методами PLIC (Piecewise Linear Interface Calculation). Среди методов PLIC следует отметить методы Янга [38, 39]. Однако в литературе сообщалось о многих дополнениях к ранней работе Янга. Например, Коте и др. [40] расширили метод Янга к неструктурированным сеткам. Пиллиод и Пакетт [41] представили два 2-D метода определения вектора нормали, которые являются второго порядка и называются LVIRA (основанный на наименьший квадратный объем жидкости алгоритм восстановления интерфейса) и ELVIRA (основанный на эффективный объем жидкости по методу наименьших квадратов алгоритм восстановления интерфейса). Оба метода основаны на создании линейного интерфейса, который минимизирует ошибку объемной доли в соседних ячейках и имеет нулевую ошибку в центральной ячейке.

В методах захвата интерфейса точная форма интерфейса в каждой вычислительной ячейке не обязательно требуется, и при вычислении F-функции на гранях ячейки необходимо проявлять основную осторожность. Как правило,

эти методы используют стратегию переключения между схемой сжатия и схемой высокого разрешения для сохранения разрешения интерфейса. Функция переключения основана на угле между интерфейсом и ориентацией сетки. В первом методе VOF, представленном Хиртом и Николсом [34], получившем название SOLA-VOF, для улучшения F-функции использовалась комбинация донорно-акцепторного состава. Торей и др. [42] модифицировали схему адвекции, чтобы сделать ранее предложенный метод VOF более консервативным по массе. Музаферия и Перич [43] и Музаферия и др. [44] представили схему захвата интерфейса с высоким разрешением (HRIC), которая была основана на стратегии смешивания между ограниченными схемами дифференцирования с подветренной и восходящей сторон. Схема захвата интерфейса сжатия для произвольных сеток (CISCAM), предложенная Уббунк и Исса [45], представляет собой схему захвата интерфейса, основанную на схемах HYPER-C и ULTIMATE-QUICKEST (UQ).

Кроме того, несколько других методов отслеживания интерфейса, таких как метод установки уровня и SPH, могут быть применены для управления сложными потоками при прорыве плотины. Метод установки уровня использует скалярную функцию с противоположными знаками по обе стороны интерфейса и нулевым значением на интерфейсе, Ошер и Сетиан, [46]. Метод SPH, который был введен Люси [47] и Гинголдом и Монаганом [48], решает управляющие уравнения без использования вычислительной сетки, заменяя жидкость набором частиц, которые движутся вместе с движением потока, и, таким образом, может моделировать эволюцию свободной поверхности.

1.5. Моделирование процесса наводнения

Математическое моделирование процесса наводнения проведено в работах [49, 50]. Авторы приводят результаты математического моделирования крупномасштабных течений в местностях со сложным топографическим рельефом. Основу трехмерного нестационарного моделирования составляют

осредненные по Рейнольдсу уравнения Навье-Стокса. Для отслеживания положения свободной границы применяется известный метод объема жидкости, имплементированный в решатель `interFoam` открытого пакета `OpenFOAM1.7.1`. Адекватность математической модели проверяется путем сравнения с экспериментальными данными. Эффективность примененной технологии иллюстрируется на примере моделирования прорыва плотин Папанского (Кыргызстан) и Андижанского (Узбекистан) водохранилищ вблизи города Ош (Кыргызстан).

В работе [51] представлен 3D-численный анализ структуры поля потока в лабораторном масштабе при прорыве плотины с применением численного кода `OpenFOAM`, основанного на методе конечных объемов (FVM). В численной модели турбулентность обрабатывается с помощью методологии RANS, а метод VOF (метод объема жидкости) используется для захвата свободной поверхности воды. Численные результаты кода сравниваются с экспериментальными данными. Измерения глубины воды и давления используются для проверки численной модели. Результаты демонстрируют, что 3D-цифровой код удовлетворительно воспроизводит временное изменение этих переменных.

В диссертационной работе [52] проведено тестирование численных схем для решения системы уравнений метода VOF и программная реализация разработанного численного алгоритма проводились путем расширения возможностей гидродинамического программного кода `SINF/Flag-S` (далее по тексту просто `Flag-S`), разрабатываемого на кафедре гидроаэродинамики СПбПУ и исходно не предназначавшегося для расчета течений со свободной поверхностью. Авторской версии кода, ориентированной на расчет течений со свободной поверхностью, присвоено название `Flag-FS` (`Flag - Free Surface`).

Проведенный обзор литературы по тематике диссертации показывает, что среди вышеупомянутых методов отслеживания границы раздела метод VOF является одним из наиболее зрелых и широко используемых методов для вертикального 2-D и 3-D моделирования потока при прорыве плотины. Поэтому,

в настоящем диссертационном исследовании, для отслеживания границы раздела между двумя фазами выбран метод объема жидкости - VOF.

ВЫВОДЫ К ГЛАВЕ 1

1. Проведен литературный обзор по тематике диссертации на основе, которого было установлено, что при нынешнем уровне развития вычислительных систем, численное моделирование трехмерных нестационарных многофазных течений с ориентацией полученных результатов на решение прикладных инженерно–технических задач, основывается в основном на усредненных по Рейнольдсу систем уравнений Навье–Стокса с использованием той или иной модели турбулентности.

2. В результаты проведенного литературного обзора следует, что в целом методы численного решения задачи со свободными границами делятся на две группы. Большая часть разработанных численных алгоритмов основана на процедуре явного выделения межфазных границ. При этом, в процессе решения задачи, расчетная сетка неизменно перестраивается в согласии с новыми положениями и формами межфазной границы. Это в свою очередь приводит к сильному усложнению метода определения границы, например, при разделении и объединении занятых одной фазой подобластей.

3. Проведенный обзор литературы по тематике диссертации показывает, что среди вышеупомянутых методов отслеживания границы раздела метод VOF является одним из наиболее зрелых и широко используемых методов для вертикального 2-D и 3-D моделирования потока при прорыве плотины. Поэтому, в настоящем диссертационном исследовании, для отслеживания границы раздела между двумя фазами выбран метод объема жидкости - VOF

ГЛАВА 2. МЕТОДОЛОГИЯ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Объектом исследования являются двухфазные турбулентные течения несжимаемой жидкости и газа.

Предметом исследования являются математическое моделирование, численное решение уравнений вычислительной гидродинамики, вычислительный эксперимент с применением персональных ЭВМ.

2.1. Метод контрольных объемов

Методы дискретизации разнообразных консервативных уравнений на дна основаны на методе контрольных объемов [53, с. 24, 54, с. 71]. В этом методе, область, внутри которого решается уравнение, делится на множество не пересекающихся контрольных объемов (см. рисунков 2.1–2.3).

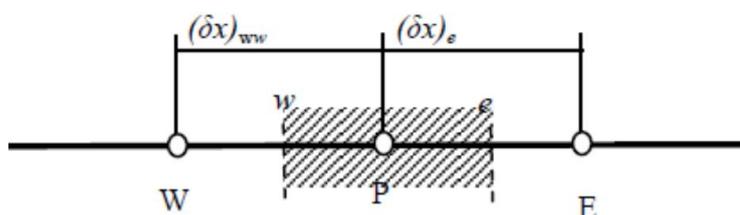


Рисунок 2.1- Одномерный контрольный объем

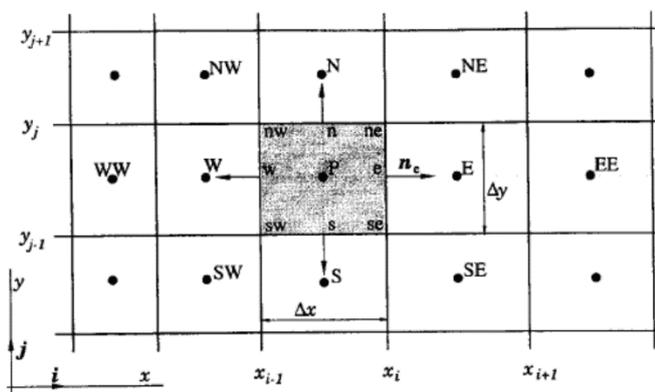


Рисунок 2.2- Двухмерный контрольный объем.

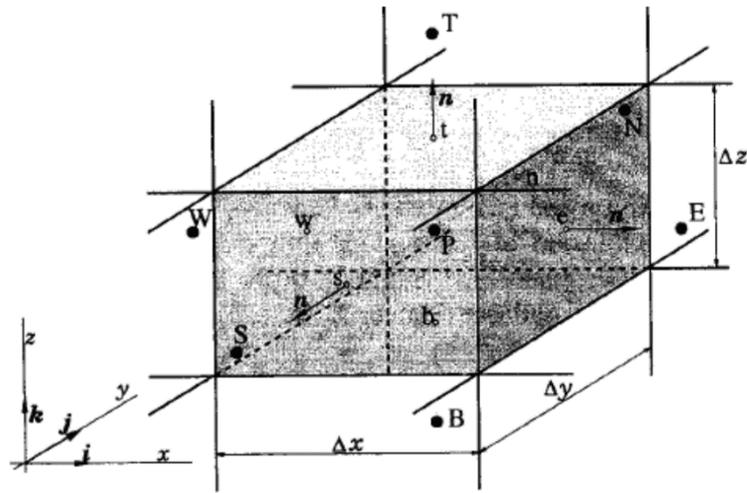


Рисунок 2.3- Трехмерный контрольный объем

Так как интегральная формулировка основных законов сохранения метод объема применима о произвольной формы, контрольного контрольных объемов пригоден дискретизации уравнений структурированных и неструктурированных сетках с произвольной формой расчетных ячеек. Это, конечно, в принципе, позволяет частично решить проблему моделирования течений со сложной геометрией границ расчетной области. Однако, следует заметить, что в алгоритмическом отношении использование неструктурированных сеток является довольно сложным, трудоемким и при проведении расчетов ресурсоемким, в особенно в случае трехмерных задач. Это связано с многообразием вероятных форм расчетных ячеек сетки и необходимостью применения более сложных соответствующих без систем алгоритмов решения линейных алгебраических уравнений определенной структуры.

Поэтому, с точки зрения эффективного использования компьютерных ресурсов, более приемлемым является разбиение всей расчетной области на несколько относительно простых подобластей со своей структурированной сеткой. Это позволяет для каждой подобласти эффективно использовать всей алгоритмы структурированных сеток, а для расчетной области в контрольный объем, времени, и ищется решение, которое обращает каждый такой интеграл в нуль. При этом необходимо делать некоторые предположения

относительно изменений между узлами величин, входящих в уравнение. Для каждого контрольного объема это приводит к линейному необходимо соответствующим образом организовать обмен данными между соседними соприкасающимися подобластями. Более того, методология разбиения вычислительной задачи на отдельные относительно независимые части, вписывается в общую концепцию параллельных вычислений на многопроцессорных вычислительных системах.

Внутри каждого такого контрольного объема располагается только один узел (см. рисунков 2.1–2.3). Множество таких узлов образуют конечное число точек, в которых ищутся значения величины ϕ .

2.2. Обзор методов дискретизации в пакете OpenFOAM

Термин дискретизация означает аппроксимацию (приближение) непрерывной задачи на дискретном множестве значений. Метод контрольных объемов (FOV) и некоторые другие, такие, как метод конечных элементов и конечных разностей, все они дискретизируют задачу следующим образом:

Пространственная дискретизация

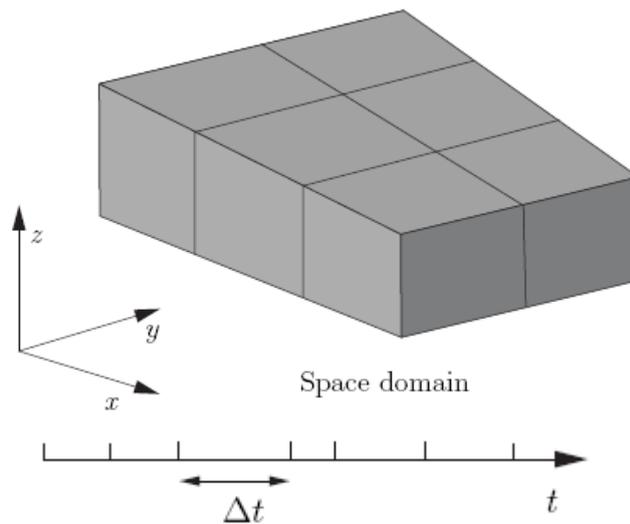
Определение области решения через систему точек, которые заполняют и ограничивают область пространства при соединении;

Временная дискретизация

Разделение временного интервала (области значений) на конечное число временных интервалов или шагов (для нестационарных задач);

2.3. Дискретизация области решения

Дискретизация области решения показана на рисунке 2.4.



Временная область

Рисунок 2.4 - Дискретизация области решения по пространству и времени

Область пространства дискретизирована в вычислительную сетку, на которой впоследствии дискретизирована система дифференциальных уравнений в частных производных (PDE). Дискретизация по времени, если это потребуется, проста: полный интервал временной оси разбивается на систему временных шагов Δt , которая может изменяться в процессе численного моделирования (например, при уменьшении шага вычислений), что возможно потребуется, в зависимости от некоторых условий (устойчивости) вычисления во время моделирования.

При более подробном рассмотрении дискретизация пространства требует представления области решения в виде набора ячеек или контрольных объемов. Эти ячейки смежны, т.е. они не перекрывают одна другую и в сумме полностью заполняют область. Типичная ячейка показана на рисунке 2.5.

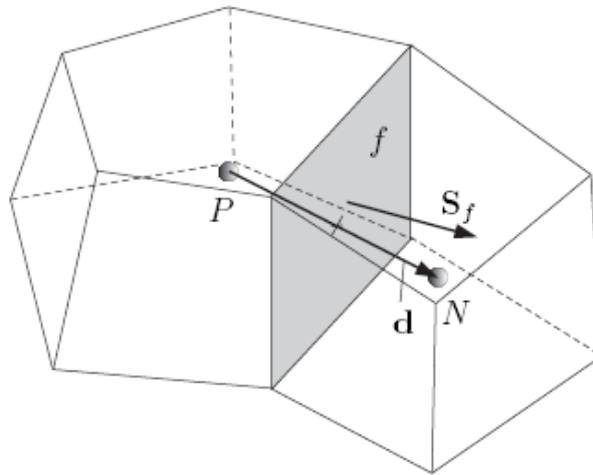


Рисунок 2.5 - Параметры при дискретизации в методе контрольных объемов

Зависимые переменные и другие свойства хранятся главным образом в ячейке в центре масс P (*centroid*), хотя могут храниться на внешних ограничивающих (лицевых) поверхностях или в вершинах многогранников. Ячейка ограничена системой плоских лицевых поверхностей, которые обозначим как f . В OpenFOAM нет ограничений ни на число таких поверхностей, ограничивающих каждую ячейку, ни на совмещение каждой поверхности. Такой тип сетки часто называется “произвольно неструктурированным” для отличия от сеток, в которых лицевые поверхности ячеек имеют заранее определенное расположение по отношению к осям координат. Коды “произвольно неструктурированных” сеток предоставляют большую свободу при создании сетки и манипуляциях в ней, особенно когда геометрия области является сложной или изменяется (перемещается) со временем. В то время как большинство свойств определено в ячейке в центре масс, некоторые находятся на лицевых поверхностях ячеек. Имеется два типа лицевых поверхностей ячеек.

Внутренние поверхности. Это поверхности, соединяющие две ячейки (всегда только парами и никогда больше чем две). Для каждой внутренней лицевой поверхности в OpenFOAM назначается одна соединяющаяся поверхность ячейки, которая обозначена как “хозяин” (*owner*), в то время как вторая поверхность, прилегающая к ячейке, называется “сосед” (*neighbour*);

Граничные лицевые поверхности. Это поверхности принадлежат одной ячейке, так как они совпадают с границами всей расчетной области. Эти поверхности включают в себя ячейку “хозяин”.

2.4. Определение сетки в OpenFOAM

В OpenFOAM имеются описания сеток на разных уровнях сложности, начиная с наиболее общего класса, называемого **polyMesh**, так как он базируется на многоугольниках. Сетка **polyMesh** построена с использованием минимума информации, требуемой для определения геометрии сетки, описанной ниже и представленной на рисунке 2.6.

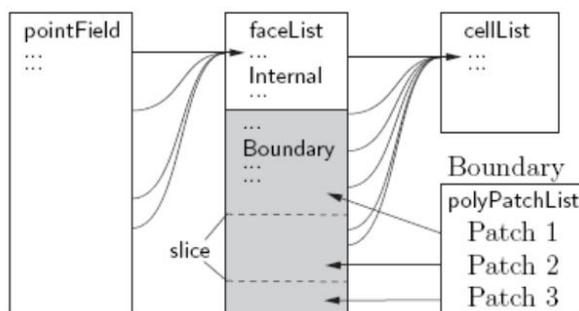


Рисунок 2.6 - Схематичное представление базовой сетки в OpenFOAM

Точки. Таблица (список) координат векторов вершин точек ячейки (vertex point), т.е. **vectorField**, который переименовывает **pointField** используя декларации **typedef**;

Поверхности. Таблица лицевых поверхностей ячеек **List<face>**, или **faceList**, где класс **face** поверхностей определяется таблицей всех ее вершин, соответствующих **pointField**;

Ячейки. Таблица ячеек **List<cell>**, или **cellList**, где класс ячеек **cell** определяется таблицей числа поверхностей, соответствующих **faceList**, описанных выше.

Границы. **PolyBoundaryMesh**, представляется в виде списка «патчей» (patches), **polyPatchList** на список частей поверхности, представляющих различные области границы. Граница разбивается на поверхности таким образом, чтобы можно было задать различные граничные условия на различных участках в

процессе решения задачи. Все поверхности любой **polyPatch** сохраняются как отдельный блок **faceList**, так что его поверхности легко доступны при использовании класса **slice**, в котором хранятся ссылки на первую и последнюю поверхность этого блока. Каждая **polyPatch** в свою очередь сконструирована (состоит) из:

- **slice** (часть массива данных);
 - **word** (слово, присваивающее имя). На рисунке 2.7. представлены точки, лицевые поверхности, ячейки, границы.

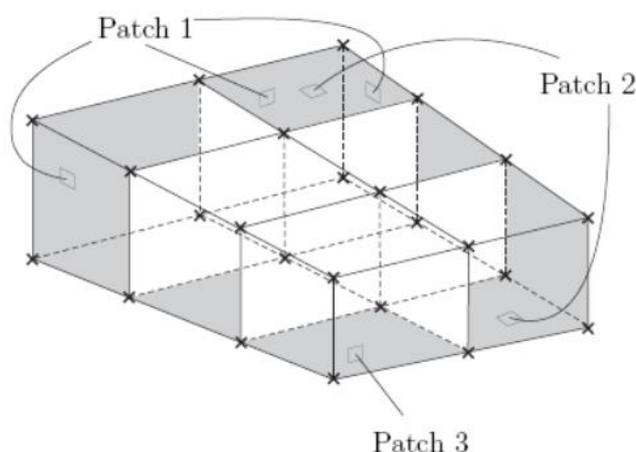


Рисунок 2.7 - Точки, лицевые поверхности, ячейки, границы

Конечно — объемная дискретизация (FOV) использует особые данные, получаемые из геометрии сетки, хранящейся в **polyMesh**. Таким образом, OpenFOAM расширяет класс **polyMesh** до **fvMesh**, который накапливает дополнительные данные, необходимые для FV дискретизации. **fvMesh** строится из **polyMesh** и содержит данные в табл. 2.1, которая может обновляться во время работы программы в случаях, когда сетка движется, когда измельчается и т.д.

Таблица 2.1. – Данные, сохраняемые в **fvMesh**

Класс	Описание	Символ	Функция доступа
volScalarField	Объемы ячеек	V	V()
surfaceVectorField	Векторы площади поверхности	S_f	Sf ()
surfaceVectorField	Модули площади поверхности	$ S_f $	magSf ()
volVectorField	Центры ячеек	C	C ()

surfaceVectorField	Центры поверхностей	C_f	Cf ()
surfaceVectorField	Потоки движения по поверхности	\bar{u}_g	Phi ()

2.5. Дискретизация уравнения

Преобразует уравнения в частных производных в алгебраические системы уравнений, чтобы дискретизировать уравнение, и они обычно выражаются в матричной форме:

$$[A] [x] = [b] \quad (2.27)$$

где $[A]$ – квадратная матрица, $[x]$ – вектор-столбец неизвестных (зависимой переменной), а $[b]$ – источниковый вектор. Описание $[x]$ и $[b]$ как ‘векторов’ заимствовано из терминологии матриц и вряд ли будет точным определением того, чем они действительно являются: списком (таблицей) значений, определяемых на геометрических местах, т.е. **geometricField<Type>**, или более конкретно **volField<Type>** при использовании FV дискретизации.

$[A]$ является таблицей коэффициентов системы (линеаризованных) алгебраических уравнений и не может быть описана как **geometricField<Type>**. Поэтому для них существует собственный класс: **fvMatrix**. Класс **fvMatrix<Type>** создан посредством дискретизации **geometric<Type>Field** и поэтому включает **<Type>**. Он поддерживает много стандартных алгебраических операций с матрицами, сложение +, вычитание – и умножение *.

Каждый компонент уравнения в частных производных (PDE) индивидуально представлен кодом OpenFOAM с использованием классов статических функций **finiteVolumeMethod** (метод контрольных объемов) и **finiteVolumeCalculus** (метод конечных вычислений), сокращенно обозначаемых как **fvm** и **fvc** соответственно. **fvm** и **fvc** содержат статические функции, представляющие дифференциальные операторы ∇^2 , $\nabla \cdot$ и $\partial/\partial t$, которые дискретизируют **geometricField<Type>**. Целью определения этих функций в двух классах **fvm** и **fvc**, а не в одном, является распознавание следующего:

- функций `fvm`, которые вычисляют неявные производные и возвращают `fvMatrix<Type>`
- некоторые функции `fvc`, которые вычисляют явные производные и выполняют другие явные вычисления, возвращая `geometricField<Type>`.

Рисунок 2.5. показывает `geometricField<Type>`, определенный на сетке с 2 пограничными частями и иллюстрирует явные операции простой трансформации одного поля в другое, упрощенно представленных в 2D геометрии.

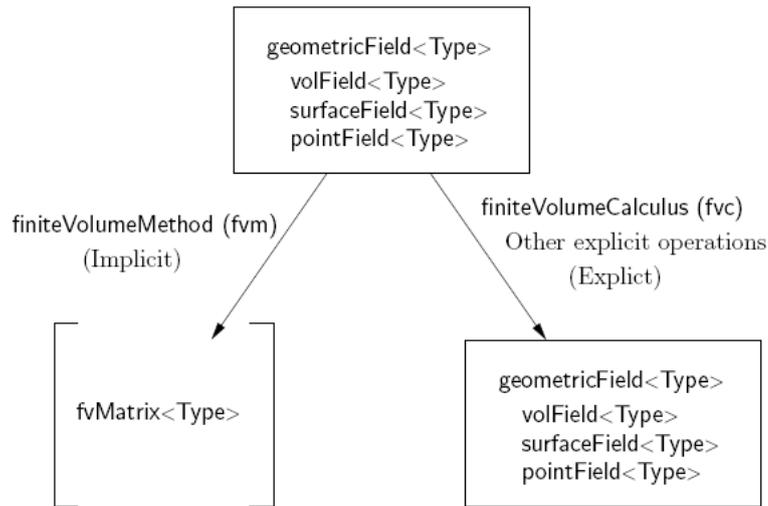


Рисунок 2.5 - Шаблон `geometricField<Type>` и его операторы

Табл. 2.2. включает основные функции в `fvm` и `fvc` для дискретизации компонентов, которые могут быть найдены в PDE.

Таблица 2. 2. – Дискретизация членов PDE в OpenFOAM

Описание компонента	Неявный/явный	Выражение в символах	Функции <code>fvm::/fvc::</code>
Лапласиан	неявный/явный	$\nabla^2 \phi$ $\nabla \cdot \Gamma \nabla \phi$	<code>laplacian(phi)</code> <code>laplacian(Gamma, phi)</code>
Производная по времени	неявный/явный	$\frac{\partial \phi}{\partial t}$ $\frac{\partial \rho \phi}{\partial t}$	<code>ddt(phi)</code> <code>ddt(rho, phi)</code>
Вторая производная по времени	неявный/явный	$\frac{\partial}{\partial t} \left(\rho \frac{\partial \phi}{\partial t} \right)$	<code>d2dt2(rho, phi)</code>
Конвекция	неявный/явный	$\nabla \cdot (\psi)$	<code>div(psi, scheme)*</code>

		$\nabla \cdot (\psi\phi)$	div(psi, phi, word)* div(psi, phi)
Дивергенция	явный	$\nabla \cdot x$	div(chi)
Градиент	явный	$\nabla \cdot x$	grad(chi)
		$\nabla \cdot \phi$	gGrad(phi)φ lsGrad(phi) snGrad(phi) snGradCorrection(phi)

Дискретизацией FV каждого компонента является первое интегрирование этого компонента по объему ячейки V . Большая часть компонент уравнений с пространственными производными затем преобразуется с помощью теоремы Гаусса в интегралы по поверхностям ячейки S , ограничивающих объем:

$$\int_V \nabla * \phi dV = \int_S dS * \phi \quad (2.28)$$

где S – вектор площади поверхности, ϕ может являться любым тензорным полем, обозначение звездочкой $*$ представляет любое тензорное произведение – скалярное, прямое, векторное и соответствующие производные: дивергенцию $\nabla \cdot \phi$, градиент $\nabla \phi$ и $\nabla \times \phi$. Интегралы по объему и поверхности затем линеаризуются с помощью соответствующих схем, которые описаны для каждого компонента уравнения в следующих разделах. Некоторые компоненты FDE всегда дискретизируются по одной схеме, выбор схем для дискретизации других компонентов предлагается в OpenFOAM. Этот выбор производится либо прямой спецификацией кода, либо может быть считан из входного файла во время работы и сохранен в классе объектов **fvSchemes**.

Функция fvm: SuSp источника дискретизируется неявно или явно в зависимости от знака rho.

Явный источник можно интерпретировать просто как **vol<Type>Field**, например, rho*phi.

Аргументы функции могут следующих классов:

phi: **vol<Type>Field**

Gamma: скаляр **volScalarField**, **surfaceScalarField**, **volTensorField**, **surfaceTensorField**.

rho: скаляр, **volScalarField**

psi: **surfaceScalarField**.

chi: **surface<Type>Field, vol<Type>Field**.

Лапласиан в FDE

Компонент PDE лапласиан интегрируется по контрольному объему и линейризуется следующим образом:

$$\int_V \nabla \cdot (\Gamma \nabla \phi) dV = \int_S dS \cdot (\Gamma \nabla \phi) = \sum_f \Gamma_f S_f \cdot (\nabla \phi)_f \quad (2.29)$$

Дискретизация градиента поверхности является неявной, когда вектор длины **d** между центром рассматриваемой ячейки P и центром соседней ячейки N ортогонален к плоскости поверхности, т.е. параллельно отношению к **Sf**:

$$S_f (\nabla \phi)_{f=} / S_f \frac{\phi_N - \phi_P}{|d|} \quad (2.30)$$

В случае неортогональных сеток вводится дополнительный явный компонент, который получается интерполированием градиентов центра ячейки, сами же они вычисляются центральным дифференцированием значений центра ячейки.

Конвекция

Конвективный компонент PDE уравнения интегрируется по контрольному объему и линейризуется следующим образом:

$$\int_V \nabla \cdot (\rho U \phi) dV = \int_S dS \cdot (\rho U \phi) = \sum_f S_f \cdot (\rho U)_{f\phi f} = \sum_f F \phi_f \quad (2.31)$$

Поле поверхности ϕ_f может быть получено с использованием следующих схем:

Центральные разности (CD) (Central Differencing) – точность второго порядка, но не ограничено:

$$\phi_{f=} = f_x \phi_P + (1 - f_x) \phi_N \quad (2.32)$$

$$\text{Где } f_x \equiv \overline{fN} / \overline{PN} ,$$

\overline{fN} - расстояние между f и центром ячейки N ,

\overline{PN} - расстояние между центрами ячеек P и N .

Дифференцирование против потока (UD) – (Upwind Differencing)

определяет ϕ_f из направления потока и ограничено за счет точности:

$$\phi_f = \begin{cases} \phi_P \text{ for } F \geq 0 \\ \phi_N \text{ for } F < 0 \end{cases} \quad (2.33)$$

Смешанное дифференцирование (BD) – (Blended Differencing)

объединяет схемы UD и CD для сохранения ограниченности с разумной точностью:

$$\phi_f = (1 - \gamma)(\phi_f)_{UD} + \gamma(\phi_f)_{CD} \quad (2.34)$$

В OpenFOAM выполняются несколько схем с весами для выбора весового коэффициента γ , но имеются и другие известные схемы, такие как VanLeer, SuperBee, MinMod и т.д.

Первая производная по времени.

Первая производная по времени $\partial/\partial t$ интегрируется по контрольному объему следующим образом:

$$\frac{\partial}{\partial t} \int_V \rho \phi dV \quad (2.35)$$

Этот компонент дискретизируется простым дифференцированием по времени, используя следующее:

новые значения $\phi^n \equiv \phi(t + \Delta t)$ на временном шаге, который мы определяем;

прежние значения $\phi^0 \equiv \phi(t)$, которые сохраняются на предшествующем временном шаге;

прежние-прежние значения $\phi^\infty \equiv \phi(t - \Delta t)$ которые сохраняются на временном шаге, предшествующем последнему вычисленному.

Неявная схема Эйлера, timeScheme EulerImplicit – имеет первый порядок точности по времени:

$$\frac{\partial}{\partial t} \int_V \rho \phi dV = \frac{(\rho \phi_P V)^n - (\rho \phi_P V)^0}{\Delta t} \quad (2.36)$$

Схема обратного дифференцирования, timeScheme BackwardDifferencing – имеет второй порядок точности по времени, сохраняя прежние-прежние значения, и поэтому хранит больший объем данных, чем **EulerImplicit**:

$$\frac{\partial}{\partial t} \int_V \rho \phi dV = \frac{3(\rho_r \phi_r V)^n - 4(\rho_r \phi_r V)^o + (\rho_r \phi_r V)^{oo}}{2\Delta t} \quad (2.37)$$

Вторая производная по времени

Вторая производная по времени интегрируется по контрольному объему и линеаризуется следующим образом:

$$\frac{\partial}{\partial t} \int_V \rho \frac{\partial \phi}{\partial t} dV = \frac{(\rho_r \phi_r V)^n - 2(\rho_r \phi_r V)^o + (\rho_r \phi_r V)^{oo}}{\Delta t^2} \quad (2.38)$$

Это представление имеет первый порядок точности по времени

Дивергенция

Компонент дивергенция, рассматриваемый в этом разделе, является строго явным компонентом в отличие от компонента конвекции, т.е. он не является дивергенцией произведения скорости и зависимой переменной. Этот компонент интегрируется по контрольному объему и линеаризуется следующим образом:

$$\int_V \nabla \cdot \phi dV = \int_S dS \cdot \phi = \sum_f S_f \cdot \phi_f \quad (2.39)$$

В качестве аргумента `fvc:div` функции может быть либо `surface<Type>Field`, и в этом случае ϕ_f определяется прямо, либо `vol<Type>Field`, который интерполируется по поверхности с помощью центрального дифференцирования.

Градиент

Градиент является явным компонентом и может быть получен различными способами. Схема определяется либо выбором частной функции градиента дискретизационной схемы, например, `fvc: gGrad`, `fvc: lsGrad` и т.д.,

либо использованием функции fvc::grad вместе с соответствующим ключом timeScheme во входном файле.

Временная дискретизация

Для временная дискретизация необходимо рассмотреть, как обращаться с пространственными производными в нестационарной задаче. Обозначим все пространственные компоненты как $A\phi$, где A – любой пространственный оператор, например, лапласиан. Затем мы можем выразить переходное уравнение в частных производных (PDE) в интегральной форме:

$$\int_t^{t+\Delta t} \left[\frac{\partial}{\partial t} \int_V \rho\phi dV + \int_V A\phi dV \right] dt = 0 \quad (2.40)$$

Используя неявный метод Эйлера из уравнения 2.21, первый компонент можно записать как:

$$\begin{aligned} \int_t^{t+\Delta t} \left[\frac{\partial}{\partial t} \int_V \rho\phi dV \right] dt &= \int_t^{t+\Delta t} \frac{(\rho\phi pV)^n - 2(\rho\phi pV)^o}{\Delta t} dt \\ &= \frac{(\rho\phi pV)^n - 2(\rho\phi pV)^o}{\Delta t} \Delta t \end{aligned} \quad (2.41)$$

а второй компонент как:

$$\int_t^{t+\Delta t} \left[\int_V A\phi dV \right] dt = \int_t^{t+\Delta t} A^* \phi dt \quad (2.42)$$

где A^* – пространственная дискретизация A . интеграл по времени можно дискретизировать тремя способами:

Неявный метод Эйлера – использует неявную дискретизацию пространственных компонентов, таким образом, возьмем текущие значения ϕ^n .

$$\int_t^{t+\Delta t} A^* \phi dt = A^* \phi^n \Delta t \quad (2.43)$$

Это будет точность первого порядка по времени, гарантирует ограниченность и стабильность при любых условиях.

Явный метод– использует явную дискретизацию пространственных компонентов, таким образом возьмем прежние значения ϕ^o .

$$\int_t^{t+\Delta t} A^* \phi dt = A^* \phi^o \Delta t \quad (2.44)$$

Это будет иметь точность первого порядка по времени и неустойчиво, если число Куранта C_o больше 1. Число Куранта определяется как:

$$C_o = \frac{U_f \cdot d}{|d|\Delta t} \quad (2.45)$$

где U_f – характеристическая скорость, например, скорость фронта волны, скорость потока.

Метод Кранка-Николсона – использует правило трапеции для дискретизации пространственных компонентов, таким образом, возьмем средние текущие значения ϕ^n и прежние значения ϕ^0 .

$$\int_t^{t+\Delta t} A^* \phi dt = A^* \left(\frac{\phi^n + \phi^0}{2} \right) \Delta t \quad (2.46)$$

Это будет точность второго порядка по времени, стабильно при любых условиях, но не гарантирует ограниченность.

2.6. Граничные условия

Граничные условия требуются для задания условий однозначности решения задачи. Поэтому нам необходимо определить граничные условия на всех граничных поверхностях. Граничные условия можно подразделить на 2 типа:

Условие Дирихле (условие первого рода) задает значение зависимой переменной на границе и в этом руководстве называется ('fixed value') 'фиксированным значением';

Условие Неймана задает градиент переменной, нормальный к границе, и в этом руководстве называется 'фиксированным градиентом'.

Когда мы выполняем дискретизацию компонентов, которые включают сумму по поверхностям \sum_f , нам нужно рассмотреть, что происходит, когда одна из поверхностей является граничной.

Фиксированное значение. Обозначим фиксированное значение на границе как ϕ_b .

- Мы можем просто подставить ϕ_b в случаях, когда для дискретизации требуются значения на граничной поверхности, например, в компонент конвекции уравнения 2.16.
- в компонентах, где требуется градиент поверхности, например, в лапласиане, вычисления проводятся со значением на граничной поверхности и в центре ячейки:

$$S_f \cdot (\Delta\phi)_f = |S_f| \frac{\phi_b - \phi_P}{|d|} \quad (2.47)$$

Фиксированный градиент. (Fixed gradient) Граничное условие фиксированного градиента J_b является обозначением скалярного произведения градиента и единичной нормали к границе, или:

$$J_b = \left(\frac{S}{|S|} \cdot \nabla\phi \right)_f \quad (2.48)$$

- когда для дискретизации требуются значения на граничной поверхности ϕ_f , мы должны интерполировать значение в центре ячейки на границу следующим образом:

$$\phi_f = \phi_P + d \cdot (\nabla\phi)_f = \phi_P + |d| \cdot (g)_b \quad (2.49)$$

- можно просто подставить ϕ_b в случаях, когда для дискретизации требуется получить градиент поверхности:

$$S_f \cdot (\nabla\phi)_f = |S_f| g_b \quad (2.50)$$

2.6.1. Физические граничные условия.

Обозначение граничных условий обычно является инженерной интерпретацией реального поведения физических величин. Реальные граничные условия, в общем, скорее определяются некоторыми физическими атрибутами, чем численным описанием, как это было в предыдущем разделе. Для несжимаемой жидкости существуют следующие физические граничные условия:

Inlet (Вход). Поле скорости на входе задано и, для согласованности, граничное условие по давлению является нулевым градиентом.

Outlet (Выход). Поле давления на выходе и граничное условие нулевого градиента по скорости заданы.

No-slip impermeable wall (Нескользящая несмачиваемая стенка). Скорость среды равна скорости самой стенки, т.е. может быть задано условие фиксированного значения. Давление задано нулевым градиентом т.к. поток через стенку равен нулю.

В задаче, для которой область решения и граничные условия симметричны относительно плоскости, нужно моделировать только половину области по одну сторону плоскости симметрии. Граничное условие на плоскости симметрии может быть задано в соответствии со следующим условием.

2.7. Реализация метода решения в пакете OpenFOAM

2.7.1. Пакет программ OpenFOAM.

OpenFOAM— свободно распространяемый инструментальный вычислительной гидродинамики для операций с полями (скалярными, векторными и тензорными). На сегодня является одним из «законченных» и известных приложений, предназначенных для конечно-объемных вычислений. Код OpenFOAM, разработан в Великобритании в компании OpenCFD, Limited, и используется многими промышленными предприятиями более 12 лет. Свое название и идеологию построения код берет от предшественника FOAM (Field Operation And Manipulation), который является закрытым и продолжает развиваться параллельно с OpenFOAM. Первоначально, программа предназначалась для прочностных расчетов и в результате многолетнего академического и промышленного развития на сегодняшний момент имеет следующие возможности:

- Метод контрольного объема на базе многогранных ячеек с поддержкой подвижных сеток;
- URANS/LES/DNS моделирование;

- SIMPLE/PISO/PIMPLE алгоритмы для связи уравнений скорости и давления;
- Несжимаемые/сжимаемые и стационарные/нестационарные потоки;
- Однофазные, двухфазные и многофазные потоки;
- Лагранжева модель для расчета движения частиц;
- Модели турбулентности: k-ε, k-ω, k-ω SST, SA, LES, DES. Всего 15 моделей;
- Модели теплообмена, испарения, горения, распыливания топлива;
- Различные термо-физические свойства среды, учет реальных свойств газов;
- Сопряженные задачи (жидкость – тело); • Решение уравнений движения тела с 6 степенями свободы;
- Решение задач динамики разряженного газа;
- Многоблочная сетка и декомпозиция расчетной области (Metis, Scotch);
- Параллельная версия (до 2000 ядер), поддержка версий MPI;
- Поддержка структурированной/неструктурированной сетки;
- Импорт сеток из различных коммерческих и открытых пакетов

На рисунке 2.9 представлена примерная схема компонентов OpenFOAM

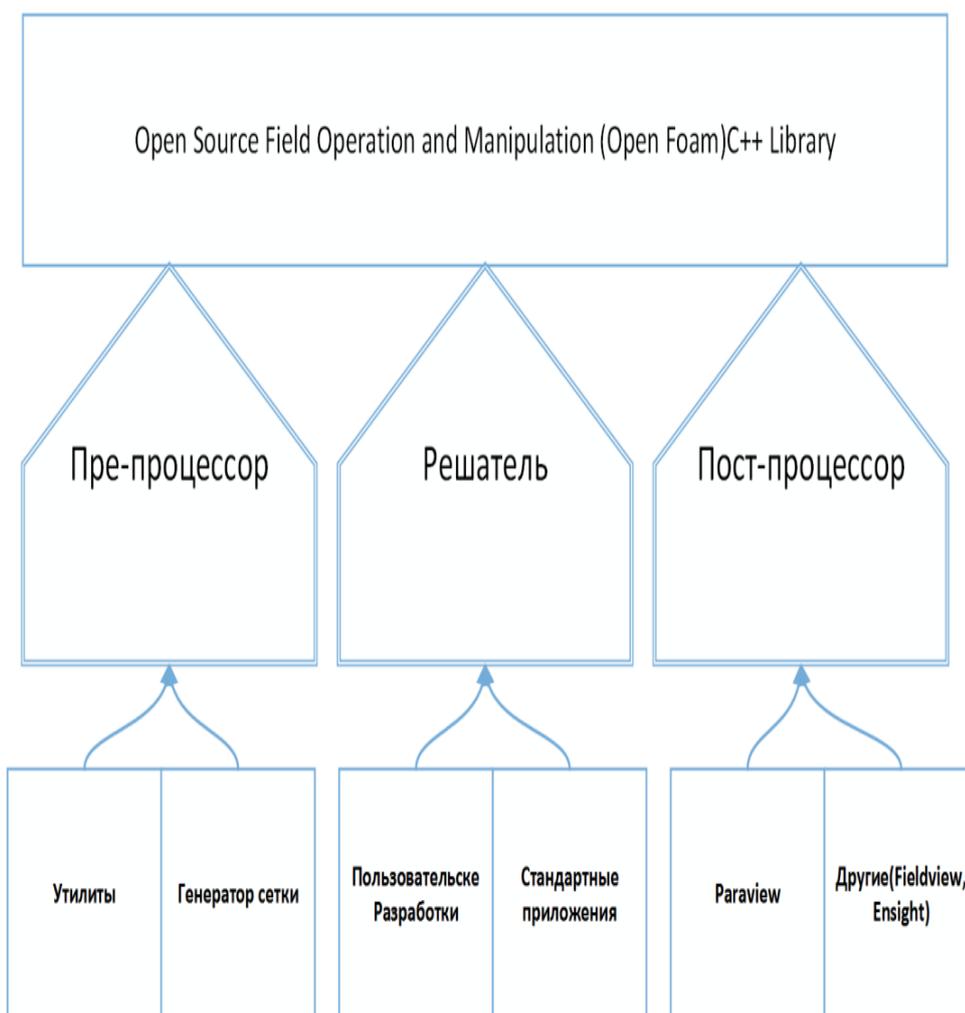


Рисунок 2.9 - схема компонентов OpenFOAM.

В основе кода лежит набор библиотек, предоставляющих инструменты для решения систем дифференциальных уравнений в частных производных как в пространстве, так и во времени. Рабочим языком кода является ООП С++. В терминах данного языка большинство математических дифференциальных и тензорных операторов в программном коде (до трансляции в исполняемый файл) уравнений может быть представлено в удобочитаемой форме, а метод дискретизации и решения для каждого оператора может быть выбран уже пользователем в процессе расчёта. Таким образом, в коде полностью инкапсулируются и разделяются понятия расчетной сетки (метод дискретизации), дискретизации основных уравнений и методов решения алгебраических уравнений. Вместе с кодом поставляется набор программ-«решателей», в которых реализованы различные математические модели

механики сплошных сред. Фактически OpenFOAM, состоит из двух частей: это, во-первых, библиотека классов для многих операций, необходимых при численном моделировании, и во-вторых, библиотека программ («решателей»), использующих эти классы и позволяющих решать конкретные задачи моделирования.

На рисунке 2.10 представлены основные этапы и модули решения задач вычислительной гидродинамики в среде OpenFOAM.

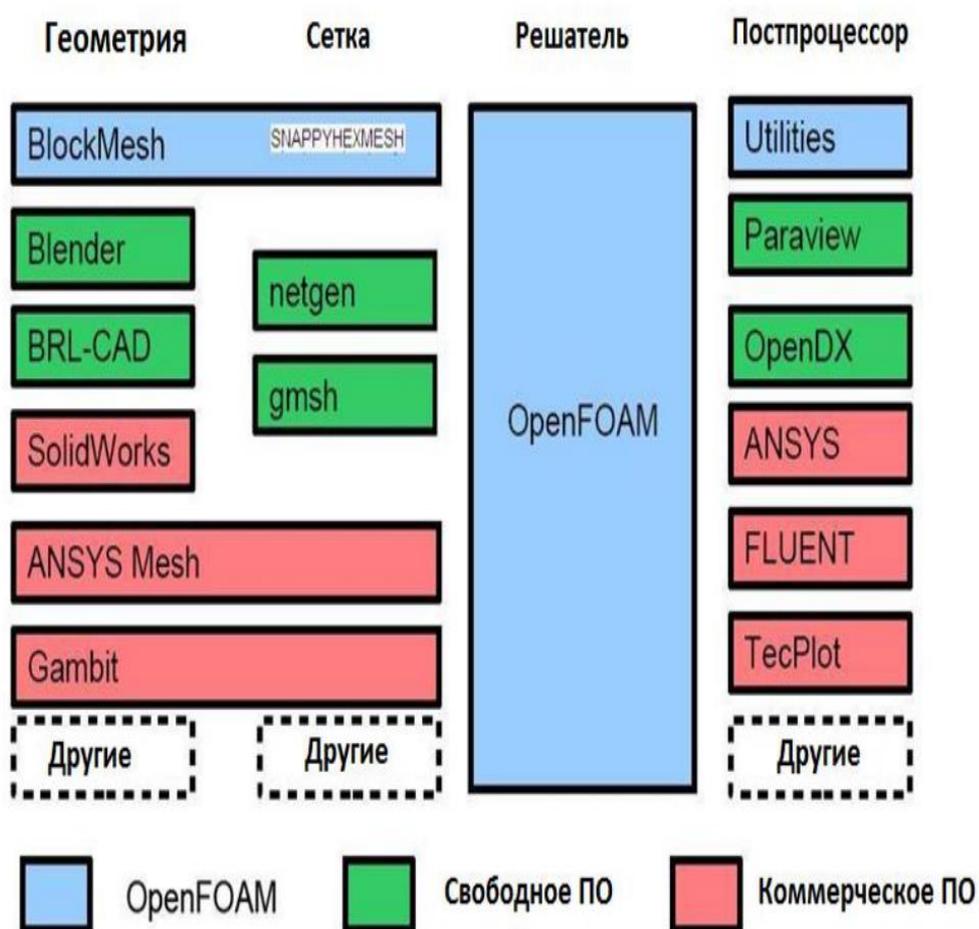


Рисунок 2.10 - Основные этапы и модули решения задач в OpenFOAM

2.7.2. Алгоритм PISO

На рисунке 2.11 представлены алгоритм PISO

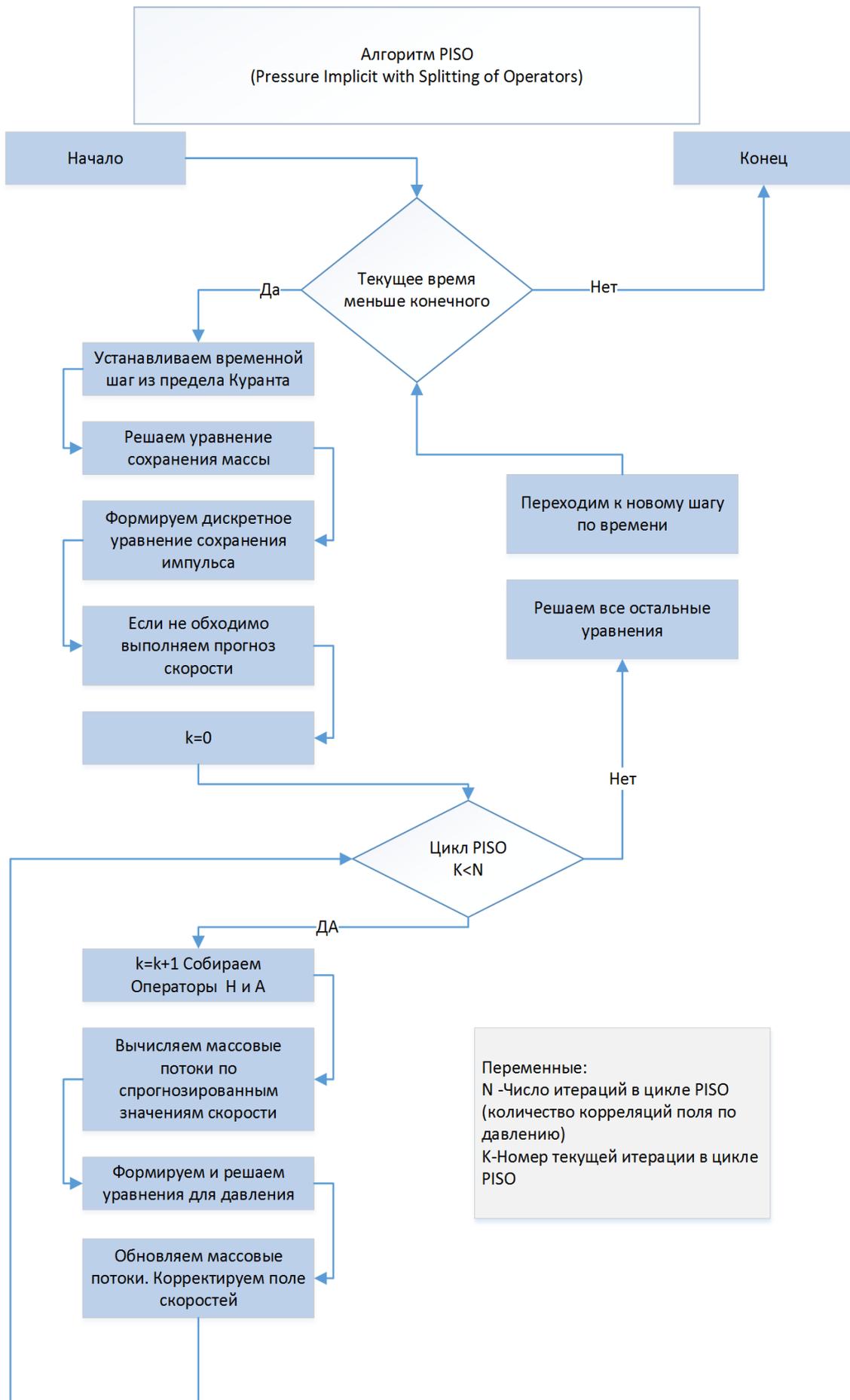


Рисунок 2.11 -Алгоритм PISO

2.7.3. Методы решения СЛАУ

Система дифференциальных уравнений, описывающих рассматриваемый класс течений путем их дискретизации на основе метода контрольных объемов на совмещенной расчетной сетке, сводится к системе линейных алгебраических уравнений (СЛАУ). В пакете OpenFOAM реализованы следующие методы решения СЛАУ:

1. Метод сопряженных градиентов с предобуславливанием (PCG).
 2. Метод бисопряженных градиентов (PBiCG) с предобуславливанием.
- Вышеприведенные методы решения СЛАУ относятся к классу итерационных методов.

ВЫВОДЫ К ГЛАВЕ 2

1. Во второй главе отражены методология и методы исследования, охарактеризованы объект и предмет исследования.
2. Последовательно рассмотрены методы дискретизации каждого члена в основных уравнениях для течений несжимаемой жидкости и газа в рамках метода контрольных объемов.
3. Даны сведения о современных пакетах прикладных программ вычислительной гидродинамики, рассмотрена структура использованного пакета OpenFOAM, приведены методы пре-процессинга и пост-процессинга.

ГЛАВА 3. ТРЁХМЕРНОЕ МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ НАВОДНЕНИЯ

В данной главе представлены результаты собственных исследований по моделированию процессов наводнения. Моделирование основано на трёхмерных нестационарных, усредненных по Рейнольдсу уравнениях Навье – Стокса. Для определения межфазной границы раздела между двумя несмешивающимися фазами – водой и воздухом использовался хорошо известный метод объёма жидкости. Численное решение систем уравнений Навье – Стокса проводилось при помощи нестационарного многофазного решателя *interFoam* пакета *OpenFOAM*. Адекватность математической модели проверяется путем сравнения с соответствующими экспериментальными данными. Возможности используемой технологии моделирования показаны на примере наводнения в горной местности *Willow Greek, USA* и вблизи посёлка *Шамалды-Сай, Кыргызстан*.

3.1. МОДЕЛИРОВАНИЕ ДВУХФАЗНЫХ ТЕЧЕНИЙ

Наводнение, связанное с прорывом дамбы, приводит к большим человеческим и имущественным потерям. Численное моделирование позволяет оценить время появления передней волны прорыва в определенной точке местности, глубины водного потока и другие характеристики наводнения. Использованное в расчетах открытое программное обеспечение *OpenFOAM* предназначено для численного моделирования широкого класса задач механики сплошных сред, особенно связанных с течением жидкости и переносом тепла. Оно содержит написанный на языке *C++* широкий набор решателей и необходимое количество библиотек [55].

3.1.1. Математическая модель

Трёхмерная математическая модель турбулентного несжимаемого течения основана на осредненных по Рейнольдсу уравнениях Навье – Стокса [56, стр.293]:

$$\frac{\partial}{\partial x_i}(\rho u_i) = 0 \quad (3.1)$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho u_i) + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho u_i u_j + \overline{\rho u_i' u_j'}) = -\frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial \tau_{ij}}{\partial x_j} \quad (3.2)$$

где u_i – компоненты средней скорости, ρ – плотность, p – среднее давление,

$\tau_{ij} = \mu \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right)$ – средний тензор вязких напряжений, μ – динамическая

вязкость. Осреднение производится по времени, а штрих означает флуктуационную часть. При наличии внешних сил, например, силы тяжести, эти уравнения необходимо дополнить соответствующими членами.

Обычно замыкание систем уравнений (1-2) базируется на стандартной $k-\varepsilon$ – модели турбулентности. Для течений общего вида, введенная Буссинеском турбулентная вязкость, связывающая напряжения Рейнольдса с градиентами осредненного течения, может быть записана в следующей форме [2, стр. 294]:

$$\overline{\rho u_i u_j} = \mu_t \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) - \frac{2}{3} \rho \delta_{ij} k \quad (3.3)$$

Кинетическая энергия турбулентности k и скорость ее диссипации ε определяются из следующих транспортных уравнений [2, стр. 295-296]:

$$\frac{\partial(\rho k)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u_j k)}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] + P_k - \rho k \quad (3.4)$$

$$\frac{\partial(\rho \varepsilon)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u_j \varepsilon)}{\partial x_j} = C_{\varepsilon 1} P_k \frac{\varepsilon}{k} - \rho C_{\varepsilon 2} \frac{\varepsilon^2}{k} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right] \quad (3.5)$$

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, а коэффициенты модели имеют следующие стандартные значения:

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

3.1.2. Моделирование свободной поверхности

Одним из наиболее эффективных методов моделирования свободной поверхности в газожидкостных течениях является метод объёма жидкости — Volume of Fluid [2, стр.384]. В методе объёма жидкости предполагается, что две или более жидкости являются не смешиваемыми. Каждой добавляемой в модель

дополнительной фазе сопоставляется объёмная доля фазы в каждом контрольном объёме. При этом в каждом контрольном объёме, объёмные доли всех фаз нормируются на единицу.

В данной работе обе фазы моделируются как одна, свойства которой вычисляются путем осреднения следующим образом [2, стр.385]:

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

где индексы 1, 2 обозначают жидкую и газовую фазы соответственно, а α – объёмная доля жидкой фазы в данной ячейке. При таком подходе поверхность раздела жидкость и газ не рассматривается как граница, для которой не требуются определения граничных условий. В примененном методе объёма жидкости для вычисления потоков жидкости через границу раздела газожидкостной смеси использовалась схема геометрической реконструкции. Согласно идее этой схемы, поверхность раздела между водой и воздухом восстанавливается путем применения кусочно-линейной аппроксимации. При этом, используя значение объёмной доли жидкости и ее производной в ячейке, на первом шаге вычисляется положение линейной поверхности раздела относительно центра каждой частично заполненной ячейки.

Используя линейную аппроксимацию поверхности раздела и значения нормальной и тангенциальной составляющих скорости на плоскости, на втором шаге вычисляется количество жидкости, переносимое через каждую плоскость. На третьем шаге вычисляется объёмная доля воды для каждой ячейки из следующего уравнения переноса

$$\frac{\partial \alpha}{\partial t} + \frac{\partial(\alpha u_i)}{\partial x_i} = 0 \quad (3.6)$$

Для решения этого уравнения для объёмной доли жидкости α применяется созданный в компании OpenCFD Limited решатель MULES, использующий многомерный универсальный ограничитель для явного решения, обеспечивающий ограниченность объёмной доли фазы, независимой от применяемой основной численной схемы, структуры сетки и т. д. [1, стр. U-61].

3.1.3. Граничные и начальные условия

Для решения уравнений математической модели (1-5) газожидкостного течения необходимо определить, как начальные условия и так граничные условия на всех границах расчетной области. На твердых стенках для скорости задавалось условие прилипания, согласно которому все компоненты вектора скорости равны нулю. Для кинетической энергии турбулентности k и скорости ее диссипации ε граничные условия задавались при помощи аппарата пристеночных функций [2, стр. 298-299]. На открытых границах давление считалось равным атмосферному давлению. Для скорости задавался нулевой градиент.

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.

3.1.4. Методы дискретизации основных уравнений и методы решения СЛАУ

Для получения, численного решения систем уравнений (1-5) необходимо произвести процедуру дискретизации, целью которой является преобразование исходных дифференциальных уравнений в частных производных в систему линейных алгебраических уравнений. Решение этой системы определяет некоторый набор величин, имеющие определенное отношение к решению исходных дифференциальных уравнений в некоторых точках пространства и времени. Общая процедура дискретизации состоит из двух этапов: пространственная дискретизация и дискретизация уравнений.

Пространственная дискретизация осуществляется на основе метода контрольных объемов [3, с. 24]. Согласно основной идее этого метода,

пространственная дискретизация задачи получается путем разбиения расчетной области на конечное число соприкасающихся объемов. В центре каждого контрольного объема находится только одна точка «привязки» численного решения. В большинстве разработок, ориентированных на решение трехмерных задач для областей сложной геометрии, в качестве контрольного объема используются ячейки расчетной сетки: узлы сетки располагаются в вершинах многогранника, сеточные линии идут вдоль его ребер, а значения искомых величин приписываются геометрическому центру ячейки.

Система дифференциальных уравнений линеаризуется и дискретизируется для каждого контрольного объема. Для вычисления объемных интегралов по контрольному объему использовалась общая процедура Гаусса, согласно которой интеграл по объему представляется через интеграл по поверхности ячейки, а значение функции на поверхности интерполируется из значений функций в центроидах соседних ячеек.

В качестве схемы дискретизации производной по времени использовалась явная схема Эйлера первого порядка с разностями назад.

Для связанного расчета поля скорости и давления использовалась процедура PISO с числом корректоров 3 [2, стр.178]. Для решения полученной системы линейных алгебраических уравнений (СЛАУ) использовались итерационные солверы PCG для симметричных матриц [2, стр.107] и PBiCG метод (би-)сопряженных градиентов с предобусловливанием для асимметричных матриц [2, стр.110]. В качестве предобусловливателя были выбраны процедуры DIC предобусловливатель основанный на упрощенной схеме неполной факторизации Холецкого для симметричных матриц и DILU предобусловливатель основанный на упрощенной неполной LU факторизации для асимметричных матриц.

Более детальную информацию о граничных и начальных условиях, методах дискретизации и решения систем алгебраических уравнений можно найти в [1, 5, 6].

3.2. Критическое сравнение различных версий пакета

OpenFoam на задаче моделирования водослива

В этом параграфе рассматривается задача численного моделирования двухфазного течения двух несжимаемых и несмешивающихся жидкостей через водослив трапециевидной формы. Для моделирования свободной границы использовался метод объема жидкости.

Гидротехнические сооружения относятся к числу сложных инженерных объектов, эксплуатация которых может породить целый ряд экологических и природопользовательских 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 - разрушениями плотин, дамб, энергетических, промышленных и гражданских объектов, затоплению нижележащих территорий, человеческим жертвам.

Исследование влияния геометрических форм остроконечной плотины на такие гидродинамические характеристики течения как давление, скорость, профили уровня воды и коэффициенты расхода проводилось в работе [2]. Пакет прикладных программ OpenFOAM был использован в трёхмерном приближении наряду с RNG $k - \epsilon$ моделью 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.

Целью работы [48] является демонстрация возможностей решателя interFoam различных версий открытого пакета OpenFOAM [10]-[13] при моделировании рассматриваемого класса течений. Во всех расчетах использовался одно и то же руководство weirOverFlow пакета OpenFOAM, с начальной высотой водного столба 30 м. Данное руководство входит в комплект

OpenFOAM и содержит всю необходимую исходную информацию по моделированию рассматриваемой задачи.

Геометрия рассматриваемой задачи приведена на рисунке 3.1.

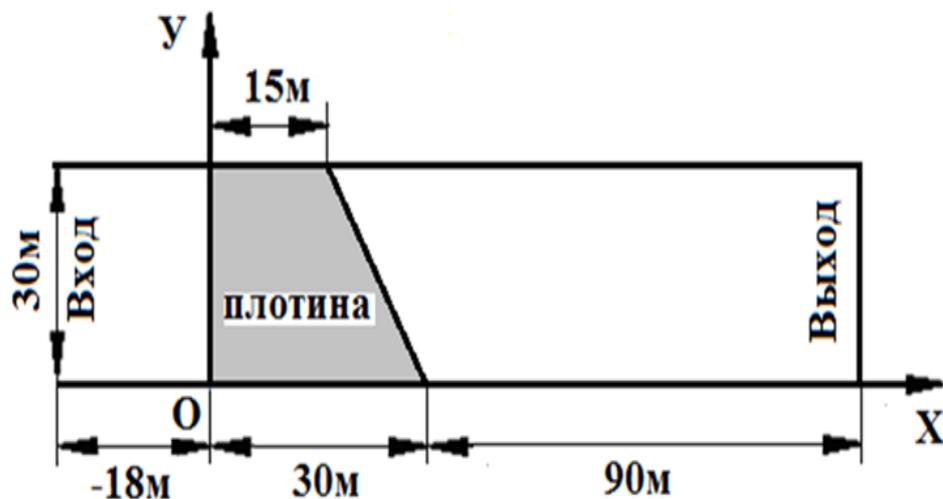


Рисунок 3.1 - Геометрия задачи

Все размеры указаны в метрах, геометрическая пропорция не сохранена. Вода втекает в расчетную область слева 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 (смотрите уравнения (3.1-3.2)).

Численная модель. Численные параметры использованного решателя `interFoam` соответствуют параметрам руководства `weirOverflow`, который включен в каждую версию пакета OpenFOAM [10]-[13].

Расчетная сетка. Расчетная сетка была создана при помощи утилиты `blockMesh`, которая разделяет область расчета на контрольные объемы гексаэдральной формы.

Простота формы вычислительной области позволяет разделить ее на контрольные объемы гексаэдрической формы. Для этой цели была использована стандартная утилита `blockMesh` пакета OpenFOAM, которая разбивает расчетную область на трехмерные гексаэдрические 5 блоков. Расчетные ячейки каждого блока имели размеры $0.04 \times 0.06 \times 0.04 \text{ м}$ и приведены на рисунках 3.2.

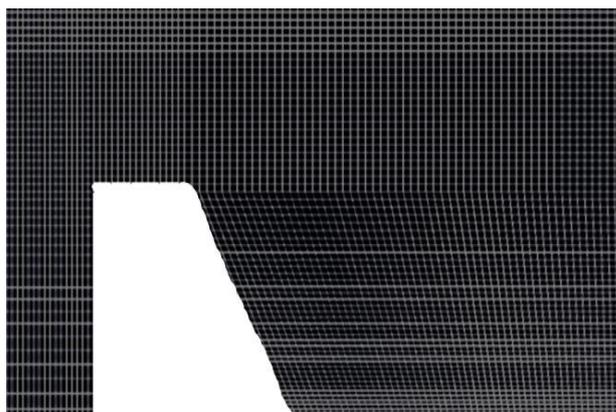


Рисунок 3.2а - Расчетная сетка

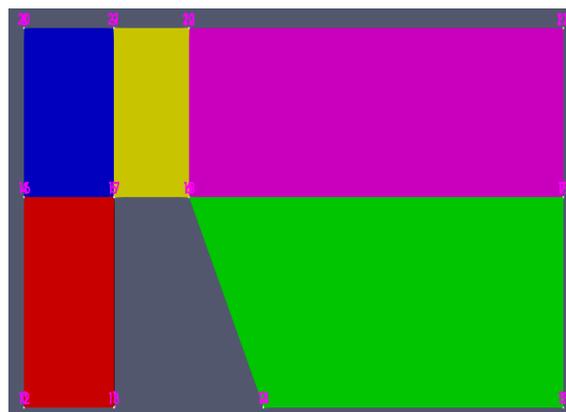


Рисунок 3.2б - Блочная структура

Дискретизация основных уравнений. Дискретизация расчетной области выполняется методом контрольных объемов [14]-[16]. Противопоточная разностная схема первого порядка точности использовался для дискретизации конвективных членов основных уравнений (1) - (5). При дискретизации диффузионных слагаемых применялась 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. 3.1. указаны схемы для дискретизации временных, конвективных и диффузионных членов каждого уравнения (3.1-3.5).

Таблица 3.1. – Используемые схемы дискретизации

Уравнение	Производная по времени	Конвективный член	Диффузионный член
Момент импульса	Явный метод Эйлер	Против потока с линейной интерполяцией	Центрально-разностная схема с линейной интерполяцией

Объемная доля жидкости	Явный метод Эйлер	Ван Лир	Центрально-разностная схема с линейной интерполяцией
Кинетическая энергия турбулентности, k	Явный метод Эйлер	Против потока	Центрально-разностная схема с линейной интерполяцией
Скорость диссипации энергии, ϵ	Явный метод Эйлер	Против потока	Центрально-разностная схема с линейной интерполяцией

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. рисунок 3.3).

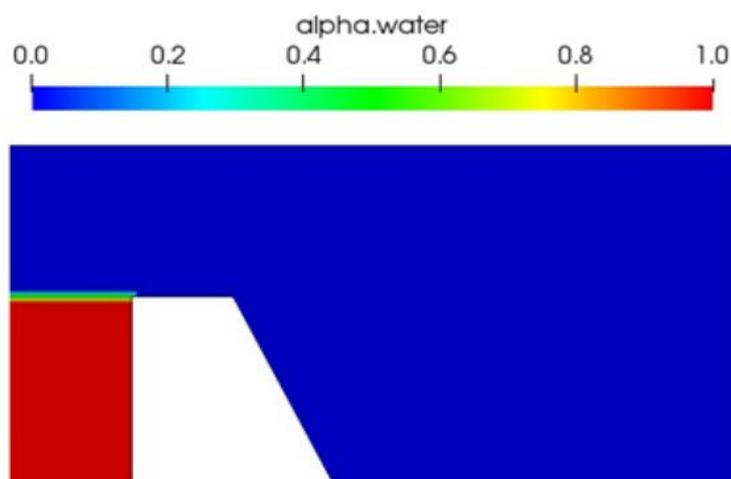


Рисунок 3.3 - Начальное распределение объемной доли воды

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 условие непроницаемости – нулевой градиент по нормали, а для энергии турбулентности k и скорости ее диссипации ε граничные условия задавались 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 давления, для объемной доли воды задано условие с нулевым значением α , а для всех компонент скорости задано условие с нулевым значением скорости. На выходе для всех переменных задан нулевой продольный градиент. Используемые граничные условия приведены в табл. 3.2.

Таблица 3.2. – Используемые граничные условия

Перем. Грань	alpha water	ε	k	nut	p_rgh	U
inlet	variableHeightFlowRate	fixedValue	fixedValue	calculated	zeroGradient	variableHeightFlowRate inletVelocity
outlet	zeroGradient	inletOutlet	inletOutlet	calculated	zeroGradient	zeroGradient
lowelWall	zeroGradient	epsilonWallFunction	kqRWallFunction	nutkWallFunction	fixedFluxPressure	noSlip
atmosphere	inletOutlet	inletOutlet	inletOutlet	calculated	totalPressure	pressureInletOutletVelocity
defaultFaces	empty	empty	empty	empty	empty	empty

Дискретизация уравнения сохранения приводит к системе линейных алгебраических уравнений для каждой неизвестной переменной. В табл. 3.3 приведены сведения о решателях, использованных в данной задаче.

Таблица 3. 3. – Решатели уравнений для основных переменных

Уравнение	Решатель	Точность
Коррекция давления	Метод сопряженных градиентов с предобуславливанием DIC, PCG	10^{-10}
Давление	Метод сопряженных градиентов с предобуславливанием DIC, PCG	10^{-7}
Скорость	smoothSolver с использованием symGaussSeidel	10^{-8}
Кинетическая энергия турбулентности, k	smoothSolver с использованием symGaussSeidel	10^{-8}
Скорость диссипации энергии, ϵ	smoothSolver с использованием symGaussSeidel	10^{-8}

Значения параметров, определяющих физические свойства воздуха и воды приведены в табл. 3.4.

Таблица 3.4. – Физические свойства воздуха и воды

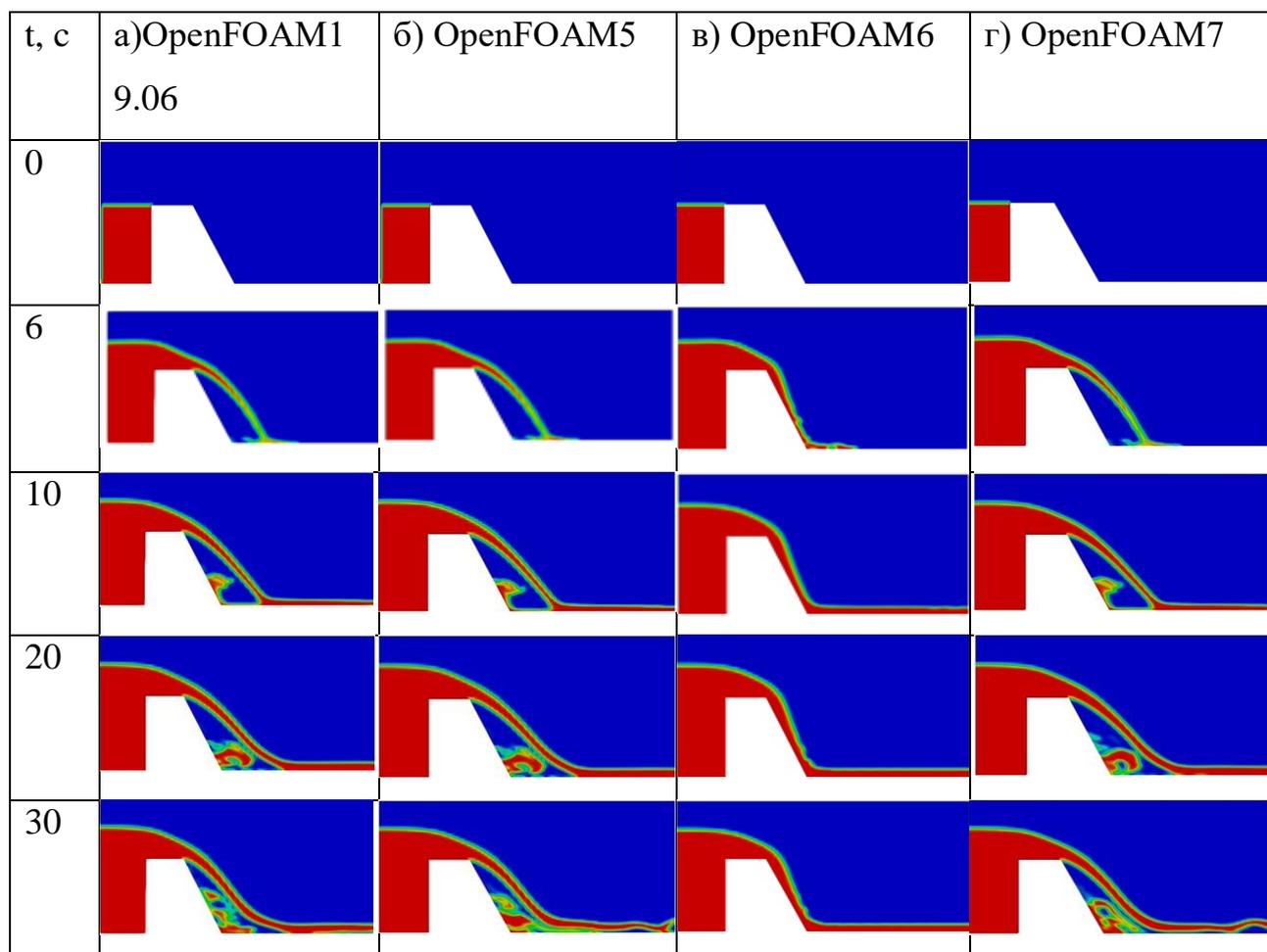
Свойство	Вода	Воздух
Плотность, кг/м^3	1000	1
Коэффициент кинематической вязкости, $\text{м}^2/\text{с}$	1.0×10^{-6}	1.48×10^{-5}
Коэффициент поверхностного натяжения, Н/м	0.07	

Для решения уравнения переноса (5) для объемной доли жидкости α применялся решатель MULES, использующий многомерный универсальный ограничитель для явного решения и обеспечивающий ограниченность объемной доли фазы, независимой от применяемой основной численной схемы, структуры сетки и т. д.[17].

Численное решение связанных через давление нестационарных уравнений основывалось на алгоритме PIMPLE, с числом корректоров 3. Здесь число

корректоров 3 означает, что на данном шаге по времени необходимо решать уравнение коррекции давления 3 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]. [5],[6], [19]-[27].

Результаты численных расчетов. Для визуализации результатов численного моделирования использовался пакет Paraview, входящего в состав OpenFOAM [10]-[13]. На рисунке 3.4. представлено распределение объемной доли воды для моментов времени $t=0$ с, 6с, 10с, 20с, 30, 40с и 46с. Здесь красный цвет соответствует ячейкам заполненным водой, а синий цвет соответствует ячейкам, где вода полностью отсутствует, а присутствует только воздух. Разные оттенки цветов от красного до синего указывают на положение границы раздела вода-воздух (см. рис. 3.4).



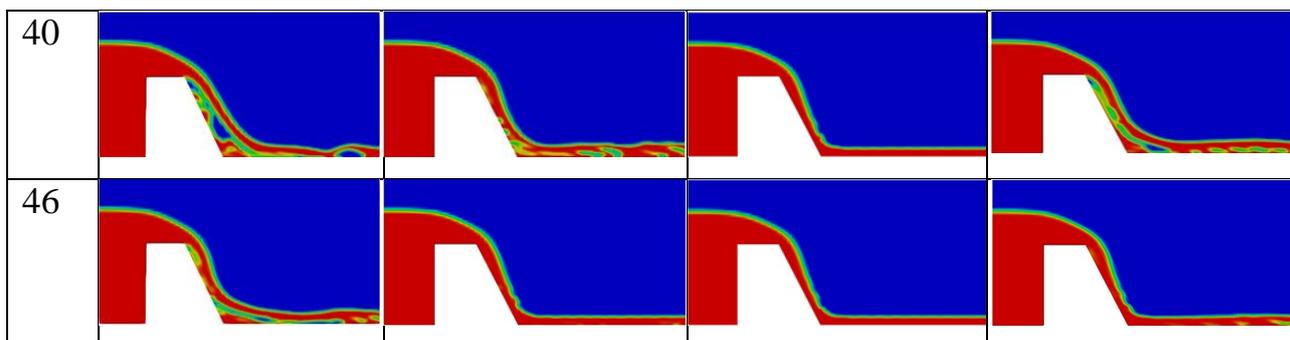
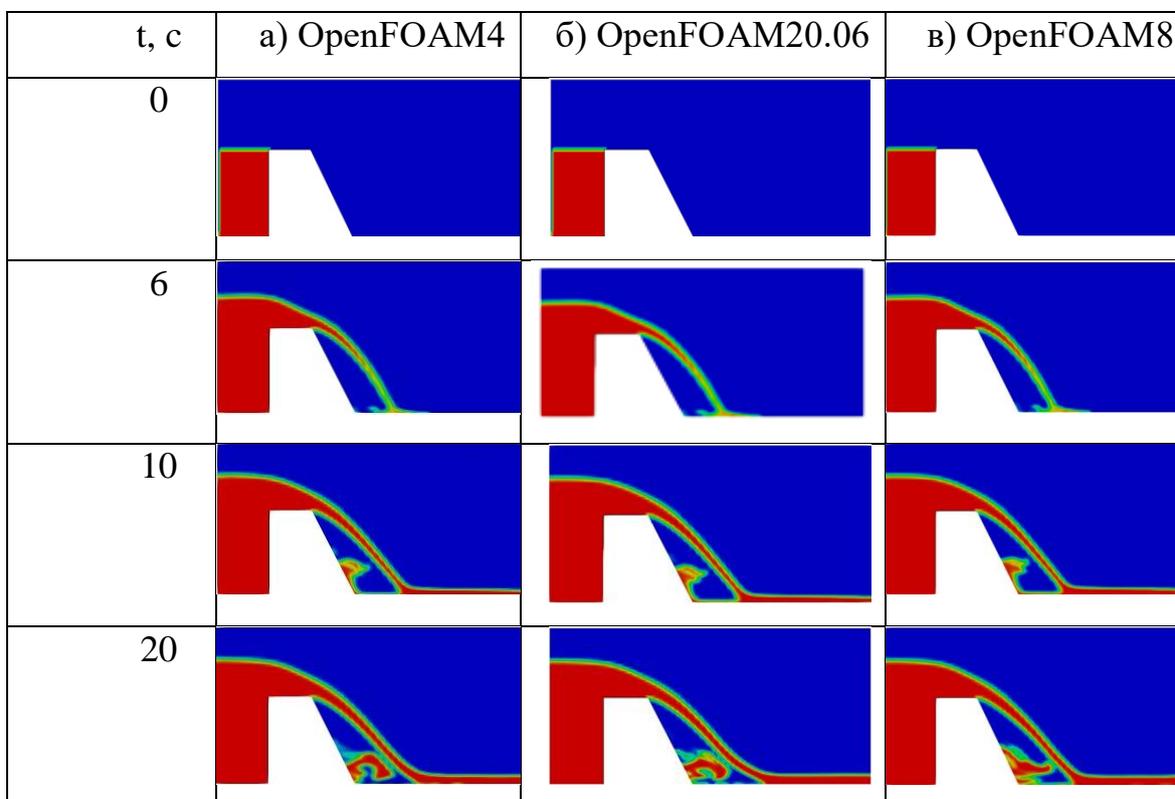


Рисунок 3.4 - Объемная доля воды в разные моменты времени

Таким образом, при расчете водослива в пакете OpenFOAM6 струя воды за водосливом является поджатой, вся область под струей заполняется водой. При расчетах, проведенных с использованием OpenFOAM19.06, OpenFOAM5 и OpenFOAM7 получается примерно одинаковая картина расчета. После момента времени порядка 46с, все рассмотренные варианты решателя interFoam различных версий пакета OpenFOAM дает одинаковую стационарную картину.

Кроме того, проведены расчеты с использованием более старой OpenFOAM4 [24] и более новых OpenFOAM20.06 [25] и OpenFOAM8 [26] версий (рисунок 3.5).



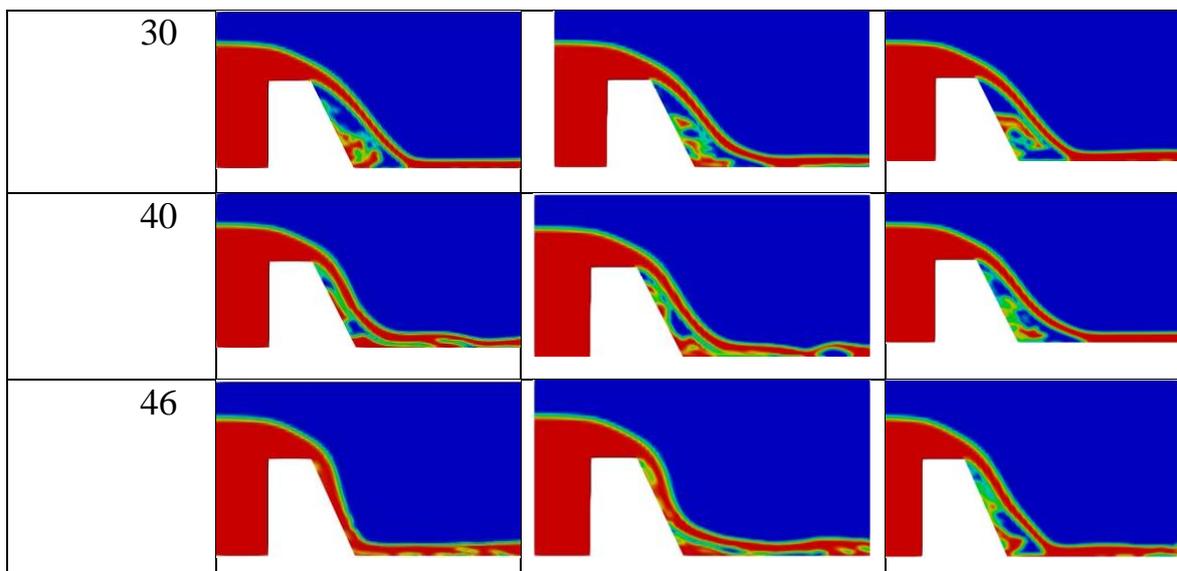
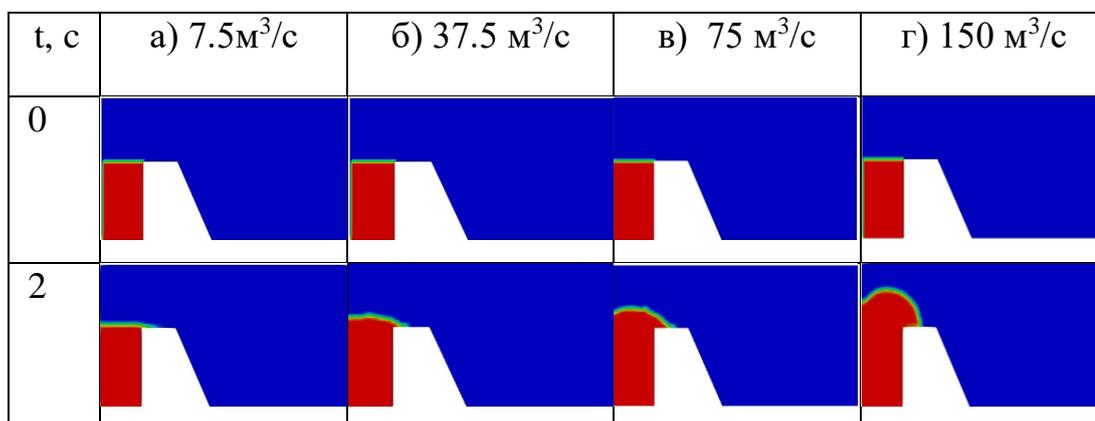


Рисунок 3.5 - Сравнение результатов OpenFOAM4, OpenFOAM20.06 и OpenFOAM8

При этом, все рассмотренные три версии дают примерно одинаковую картину течения, хотя OpenFOAM8 дает более замедленный переход нестационарного течения к стационарному течению. Сравнительное небольшое отличие OpenFOAM8 от других версий при $t = 46$ с объясняется тем, что в OpenFOAM8 для реконструкции свободной границы применяется улучшенный полаявный алгоритм MULES второго порядка [27].

Для выяснения возможных причин прилипания струи воды к правой, пологой поверхности водослива, проведены дополнительные расчеты для разных значений $7.5 \text{ м}^3/\text{с}$, $37.5 \text{ м}^3/\text{с}$ и $150 \text{ м}^3/\text{с}$ входного объемного расхода воды. При этом предполагалось, что исходное значение объемного расхода воды $75 \text{ м}^3/\text{с}$ в руководстве weirOverFlow пакета OpenFOAM8 было близко к неустойчивому режиму течения. Результаты таких расчетов приведены на рисунке 3.6.



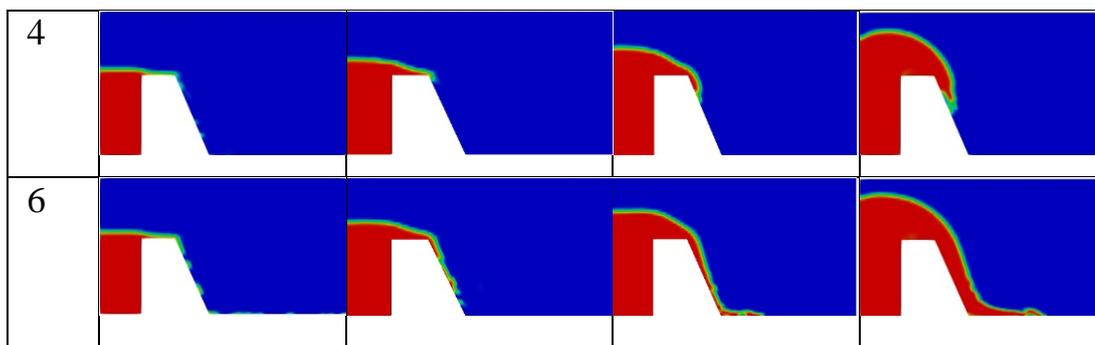


Рисунок 3.6 - Объемная доля воды в разные моменты времени при разных входных объемных расходах воды

Как видно из рисунка 3.6 при разных значениях входного объемного расхода воды, струя воды все равно прилипает в правой, пологой стенке водослива. Кроме того, систематические расчеты при разных значениях числа Куранта и шага по времени не меняет картину течения за водосливом – поток воды прилипает к пологой стенке.

Нам кажется, что основная причина отличия численных результатов, полученных с помощью решателя `interFoam` пакета `OpenFOAM6`, 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 `fvcDdtPhiCoeff` для вычисления потоков массы на гранях ячеек был изменен в целях улучшения стабильности/точности и исключения осцилляций давления при высоких числах Куранта [29]. А именно, в пакете `OpenFOAM5` при вычислении коэффициента `fvcDdtPhiCoeff` значение плотности с текущего временного шага использовано наряду с значением потока массы с предыдущего временного шага, а в `OpenFOAM6` коэффициент

$fvcDdtPhiCoeff$ вычисляется с использованием значений плотности и потока массы с предыдущего временного шага [29].

Наши расчеты, проведенные с различными версиями пакета, показывают, что такие изменения приводят к нереальному поведению струи после водослива при расчетах, проведенных с помощью руководства `weirOverFlow`, входящий в состав пакета OpenFOAM6. Более того, в последующих, более новых версиях OpenFOAM7 и OpenFOAM8, используемый при вычислении производных по времени коэффициент $fvcDdtPhiCoeff$ был возвращен к старому, принятому в OpenFOAM5 методу вычисления этого коэффициента [30].

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

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 для моделирования рассматриваемого класса течений. Сравнение численных результатов, полученных с различными версиями пакета OpenFOAM показывают, что объединение решателей `interFoam` и `interDyMFoam` и изменённый способ вычисления коэффициента $fvcDdtPhiCoeff$ в пакете OpenFoam6 приводит к неадекватному, с физической точки зрения, к 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.

3.3. Моделирование наводнения в модели городской местности

Рассматривается задача моделирования симметричного разрушения дамбы в прямоугольном канале [93]. Расположенный справа резервуар, имеющий размеры $1\text{ м} \times 2\text{ м} \times 0.8\text{ м}$ заполнен водным столбом высотой 0.6 м . На рисунке 3.7. показана геометрия рассматриваемой задачи.

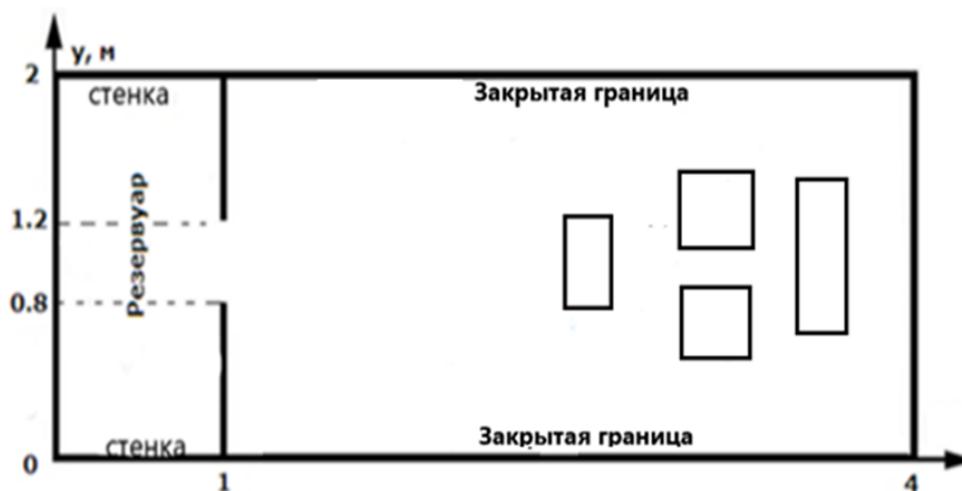


Рисунок 3.7 - Геометрия рассматриваемой задачи (вид сверху)

В эксперименте для измерения высоты водного потока были использованы девять датчиков, координаты которых приведены в табл. 3.5.

Таблица 3.5. – Координаты измерительных датчиков

Датчик	P1	P2	P3	P4	P5
х, м	0.18	0.48	1.0	1.0	1.722
у, м	1.0	0.4	1.16	1.0	1.0
Датчик	P6	P7	P8	P9	
х, м	2.09	2.69	2.69	3.49	
у, м	1.0	0.6	1.4	1.0	
z, м	0.05	0.05	0.05	0.05	

Простота формы вычислительной области позволяет разделить ее на контрольные объемы гексаэдрической формы. Для этой цели была использована стандартная утилита blockMesh пакета OpenFOAM, которая разбивает расчетную область на трехмерные 6 гексаэдрические блоки. Расчетные ячейки каждого блока имели размеры $1.02 \times 0.03 \times 0.02$ м. и приведены на рисунках 3.8а.

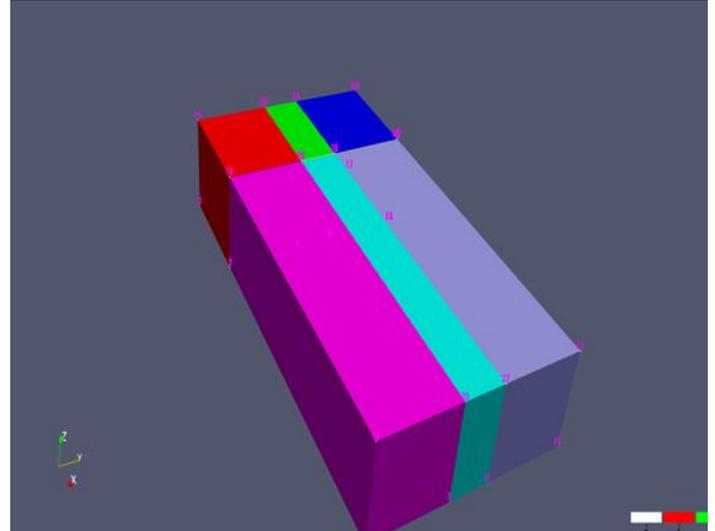
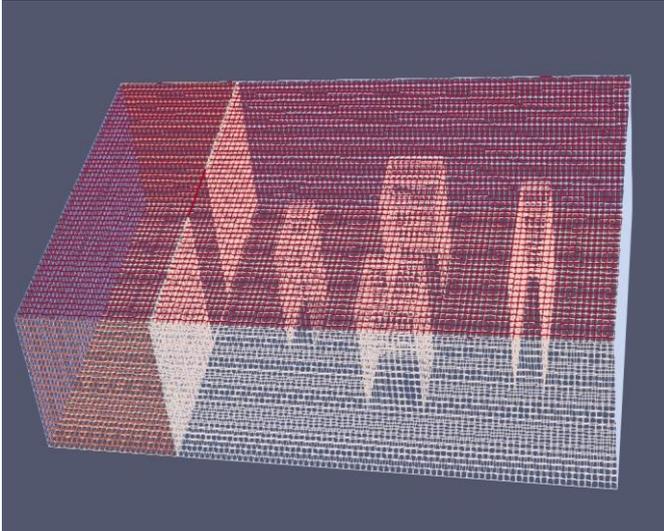


Рисунок 3.8а - Расчетные ячейки

Рисунок 3.8б - Блочная структура

Использованные в данной работе граничные условия приведены в табл. 3.6.

Таблица 3.6. – Используемые граничные условия

Переменная Граница	α_w	ϵ	k	nut	p_rgh	U
left	zeroGradient	epsilonWallFunction	kqRWallFunction	nutkWallFunction	fixedFluxPressure	fixedValue
out	zeroGradient	zeroGradient	zeroGradient	calculated	fixedValue	zeroGradient
front	zeroGradient	epsilonWallFunction	kqRWallFunction	nutkWallFunction	fixedFluxPressure	fixedValue
back	zeroGradient	epsilonWallFunction	kqRWallFunction	nutkWallFunction	fixedFluxPressure	fixedValue
lower	zeroGradient	epsilonWallFunction	kqRWallFunction	nutkWallFunction	fixedFluxPressure	fixedValue

atmosphere	inletOutlet	inletOutlet	inletOutlet	calculated	totalPressure	PressureInletOutletVelocity
------------	-------------	-------------	-------------	------------	---------------	-----------------------------

Использованные схемы дискретизации и методы решения систем линейных уравнений в табл. 3.7 и табл. 3.8.

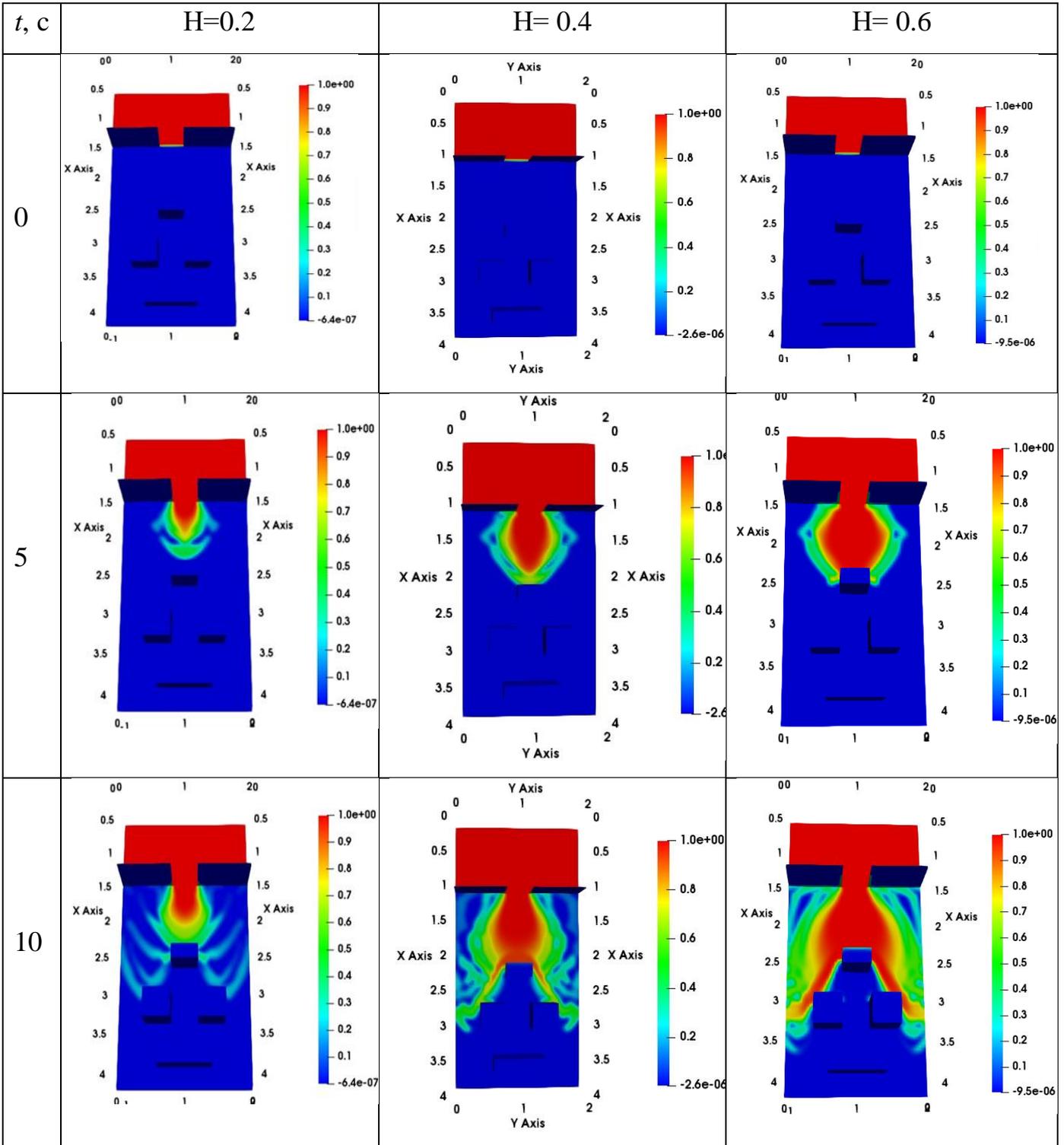
Таблица 3.7. – Использованные схемы дискретизации

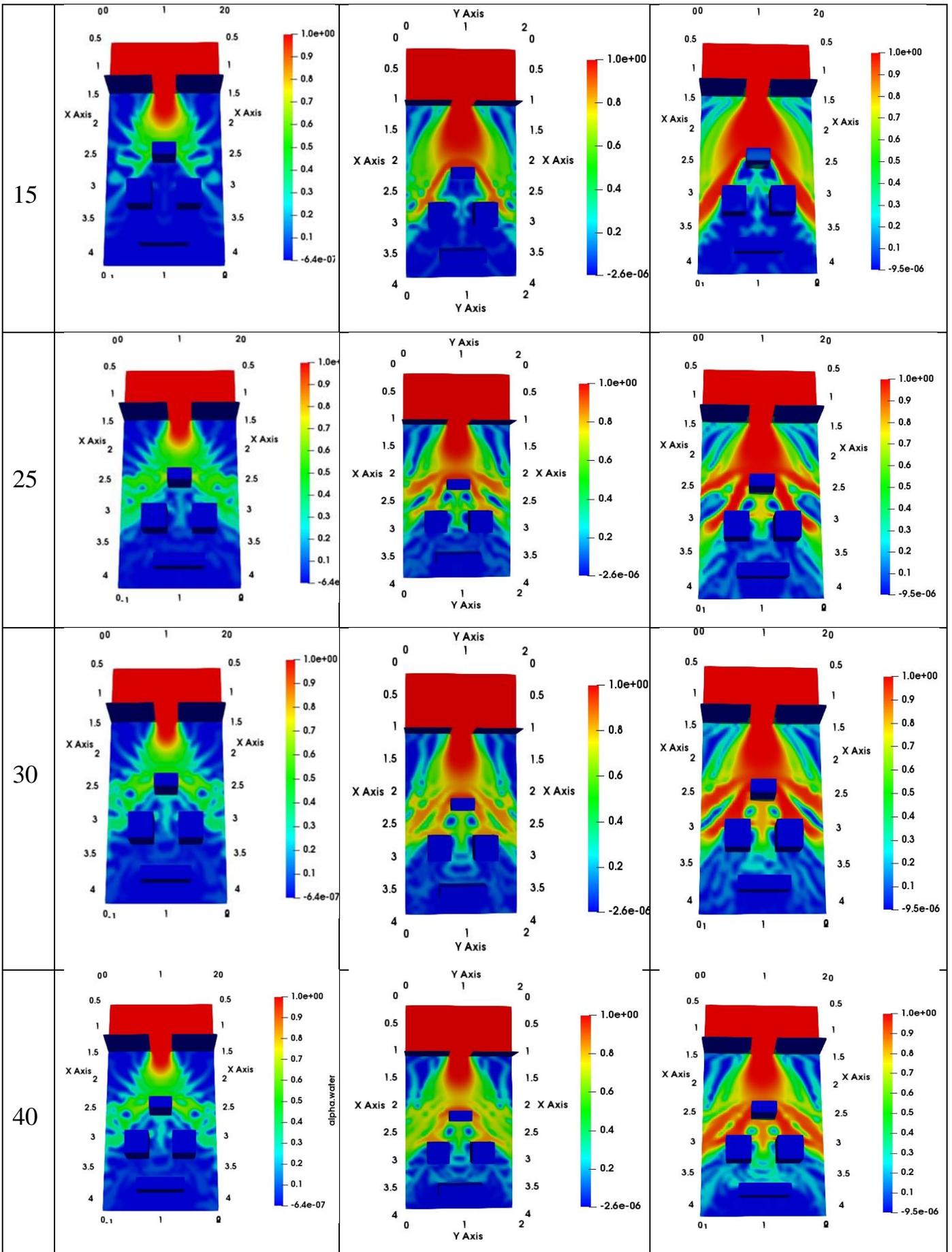
Слагаемое	Схема	Порядок схемы
Производная по времени ddtSchemes	Euler	Первый
Градиент gradSchemes	Gauss linear	Второй
Конвекция Скорость alpha k, ε divSchemes	Gauss linear upwind grad(U) Gauss vanLeer Gauss linear Gauss upwind Gauss upwind	Второй Второй Второй Первый Первый
Лапласиан interpolationSchemes	Gauss linear corrected linear	Второй Первый
snGradSchemes	corrected	Первый

Таблица 3.8. – Решатели уравнений для основных переменных

Переменная	Решатель	Точность
alpha.water	smoothSolver с использованием глаживателем symGaussSeidel	1e ⁻⁸
pcorr.	Метод сопряженных градиентов PCG с использованием preconditioner DIC	1e ⁻⁵
p_rgh	Метод сопряженных градиентов PCG с использованием preconditioner DIC	1e ⁻⁷
U, k, ε	smoothSolver с использованием глаживателем symGaussSeidel	1e ⁻⁶

Распределение объемной доля воды при разных значениях водного столба в резервуаре приведены на рисунке 3.9.





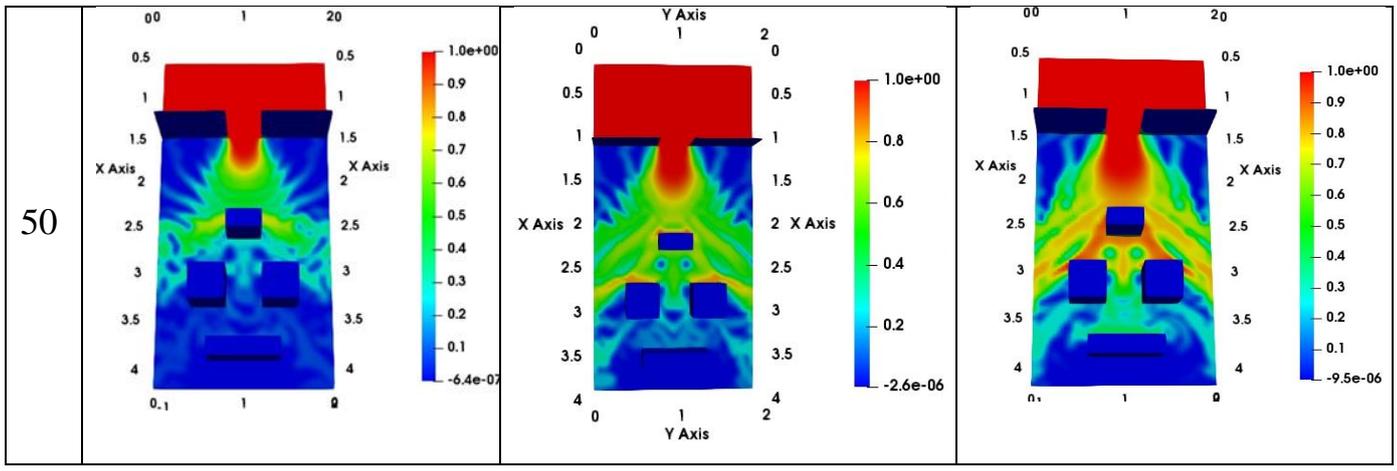


Рисунок 3.9 - Распределение объемной доли воды

На следующих рисунках приведены поле распределения модуля скорости, где отчетливо видны зоны возвратных, рециркуляционных течений после первого здания (см. рис. 3.10).

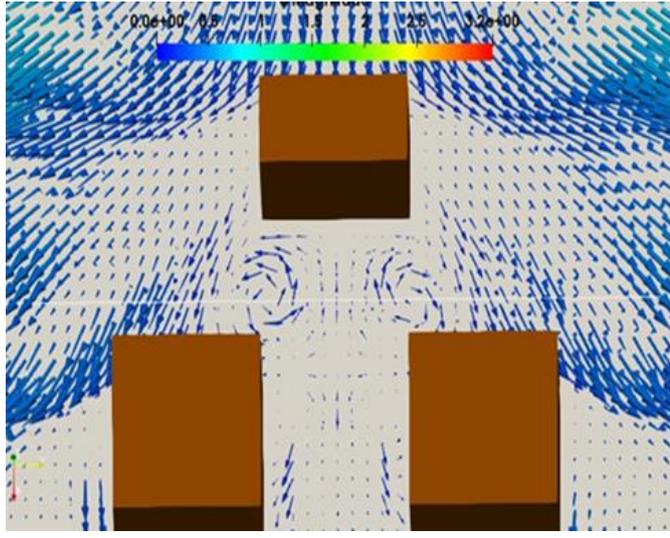


Рисунок 3.10а - Поле модуля скорости после первого здания

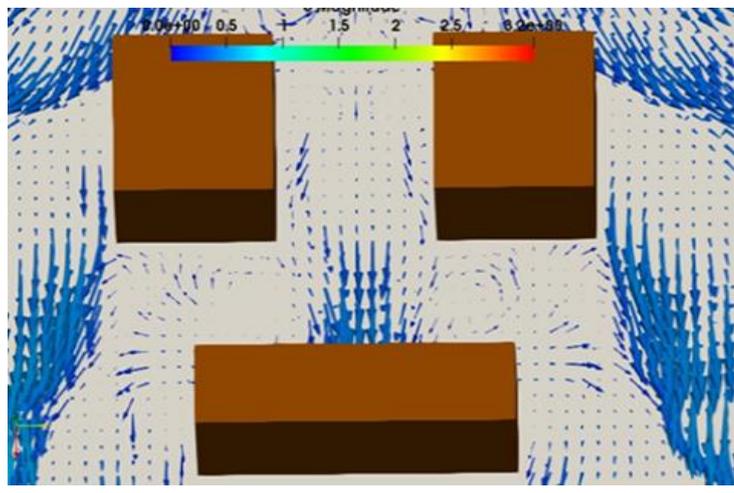


Рисунок 3.10б - Поле модуля скорости после второго ряда зданий

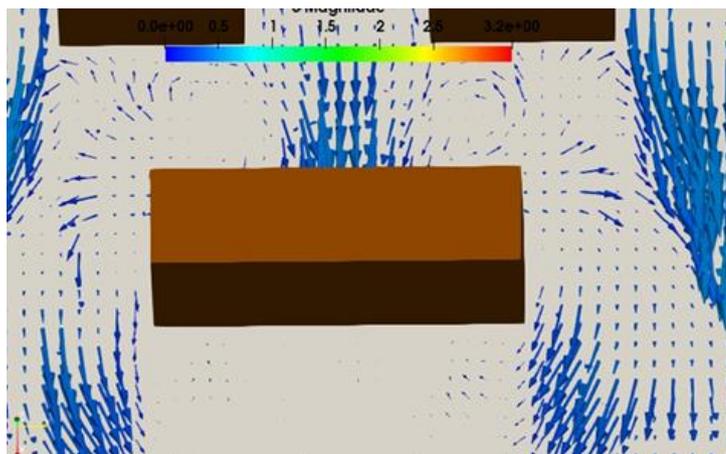


Рисунок 3.10в - Поле модуля скорости около третьего здания

Далее на рисунке 3.11. приведены поперечные профили скорости U_x и объемной доли воды $\alpha.\text{water}$ вдоль линии.

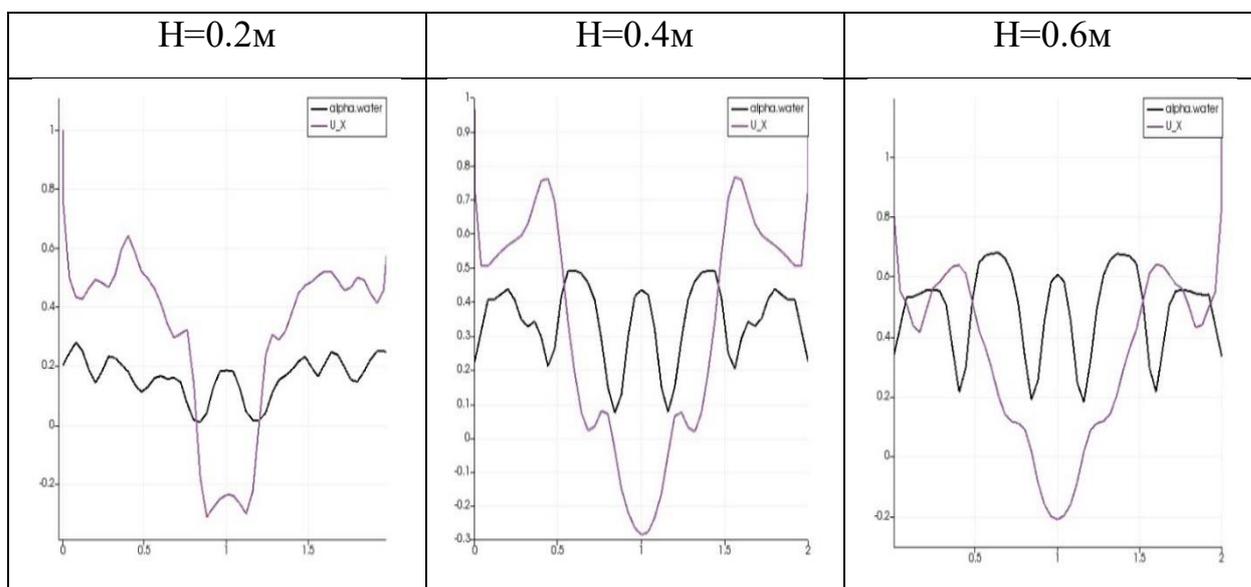


Рисунок 3.11 - Поперечные профили U_x и $\alpha.\text{water}$

По полученным результатам обнаружено, то существует корреляционная связь между объемной долей воды $\alpha.\text{water}$ и доминирующей составляющей скорости U_x , а именно минимуму скорости U_x соответствует максимум распределения объемной доли воды $\alpha.\text{water}$.

На рисунке 3.12 показаны график численных результатов высоты потока воды (сплошная линия) и соответствующий экспериментальные данные (маркеры).

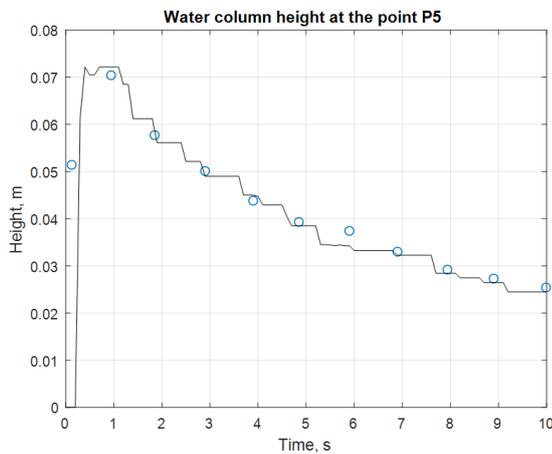
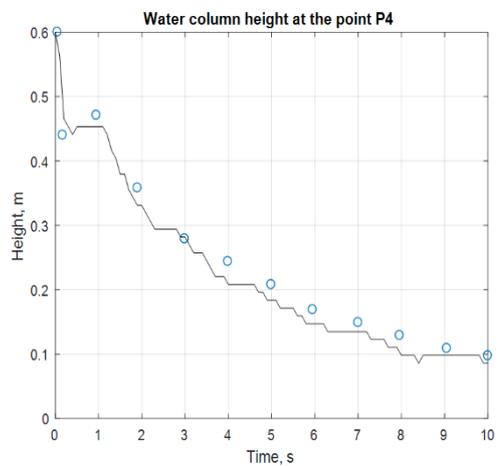
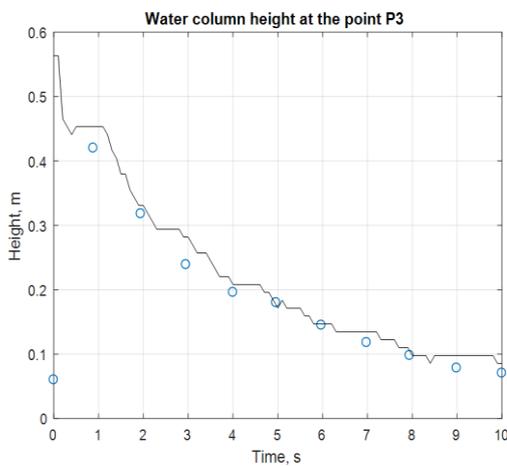
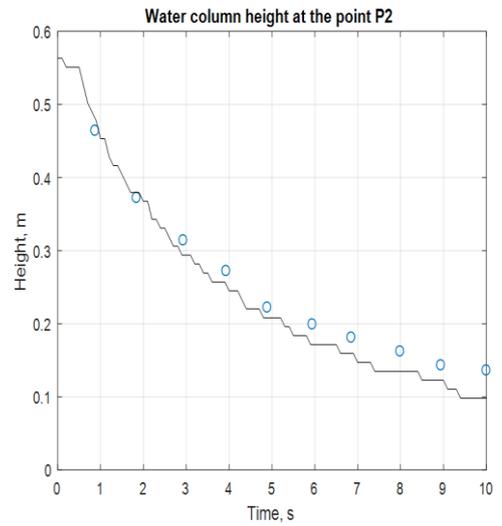
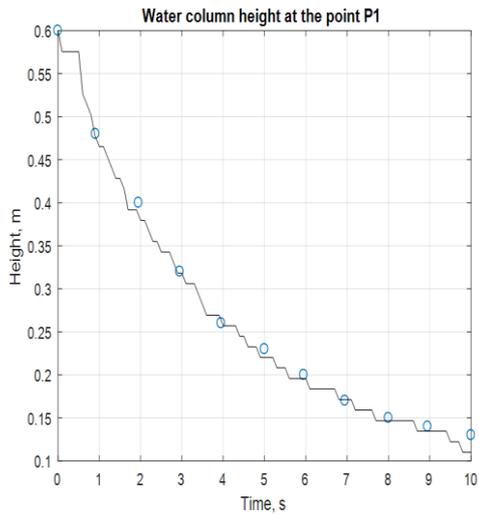


Рисунок 3.12 - Изменения во времени высоты водного потока в точках P1, P2, P3, P4 и P5

На следующих рисунках приведена временная эволюция давления в точках P6, P7, P8 и P9 расположенных непосредственно перед моделями зданий для случая, когда начальная высота водного столба в резервуаре была равна $H=0.2\text{м}$.

Передний фронт волны прорыва достигает первое здание в течении 0.5 с и давление достигает значения около 800 Н/м². На рисунках 3.13аг. показана давления в точках P6, P7, P8 и P9.

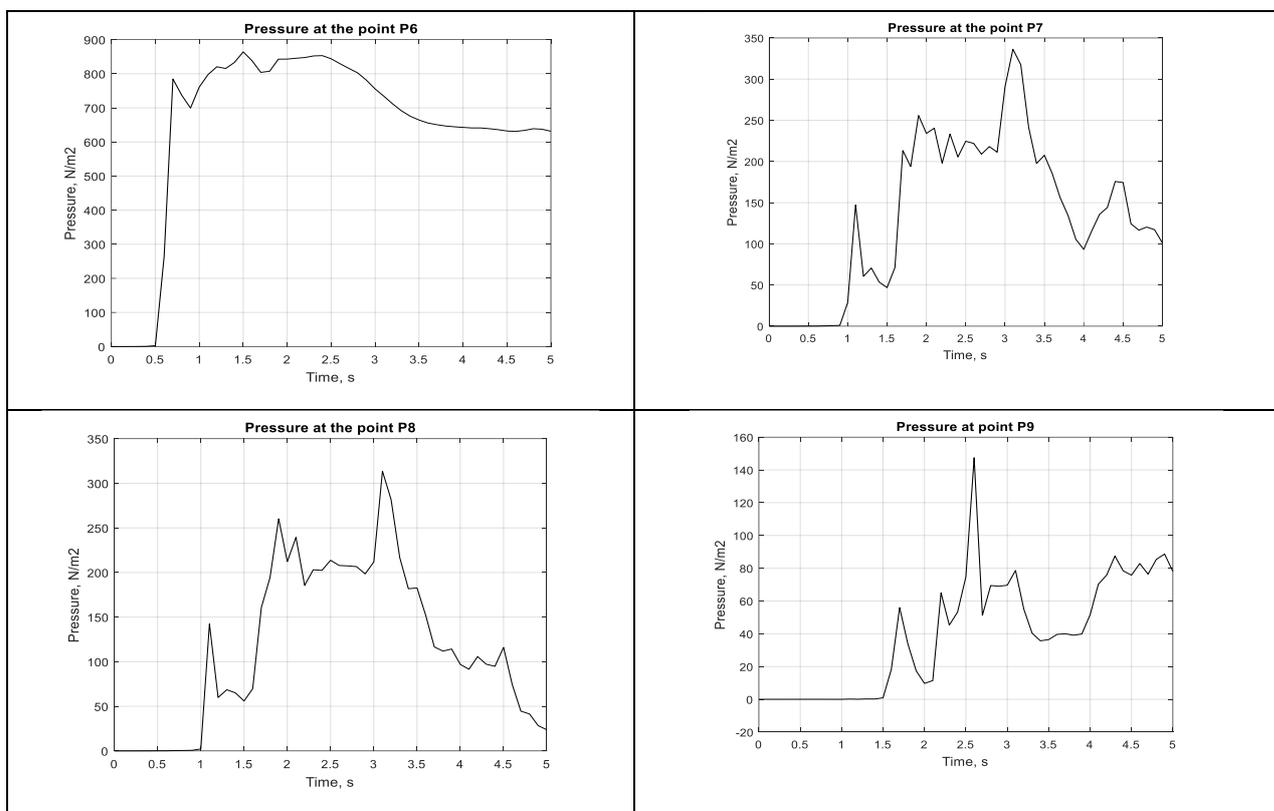
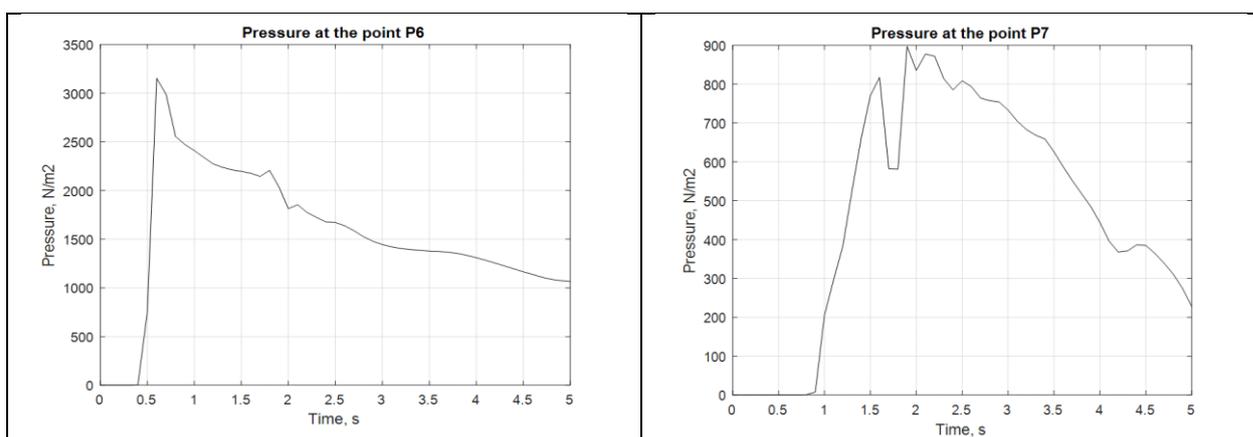


Рисунок 3.13а - Изменение давления в точках P6, P7, P8 и P9. H=0.2м



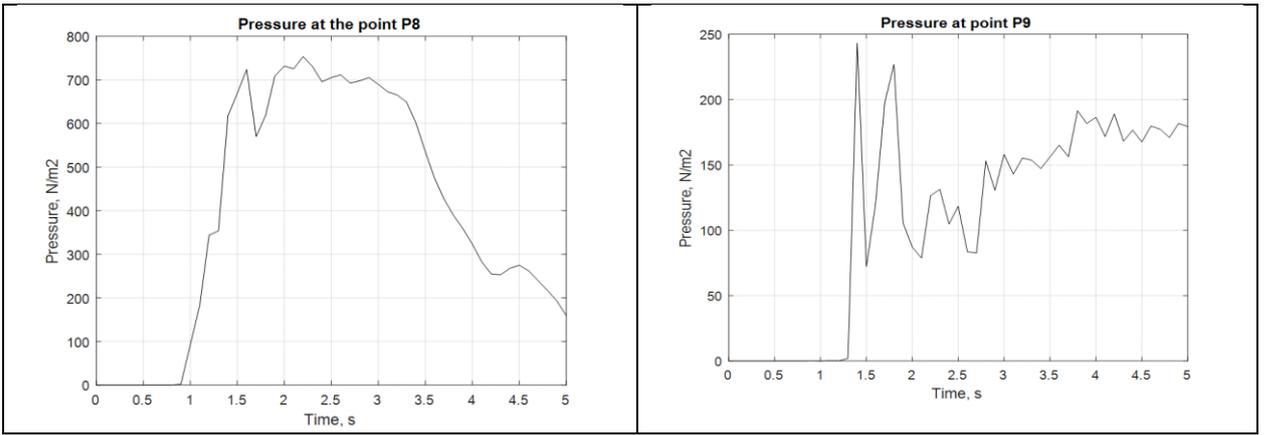


Рисунок 3.13б - Изменение давления в точках P6, P7, P8 и P9. H=0.4м

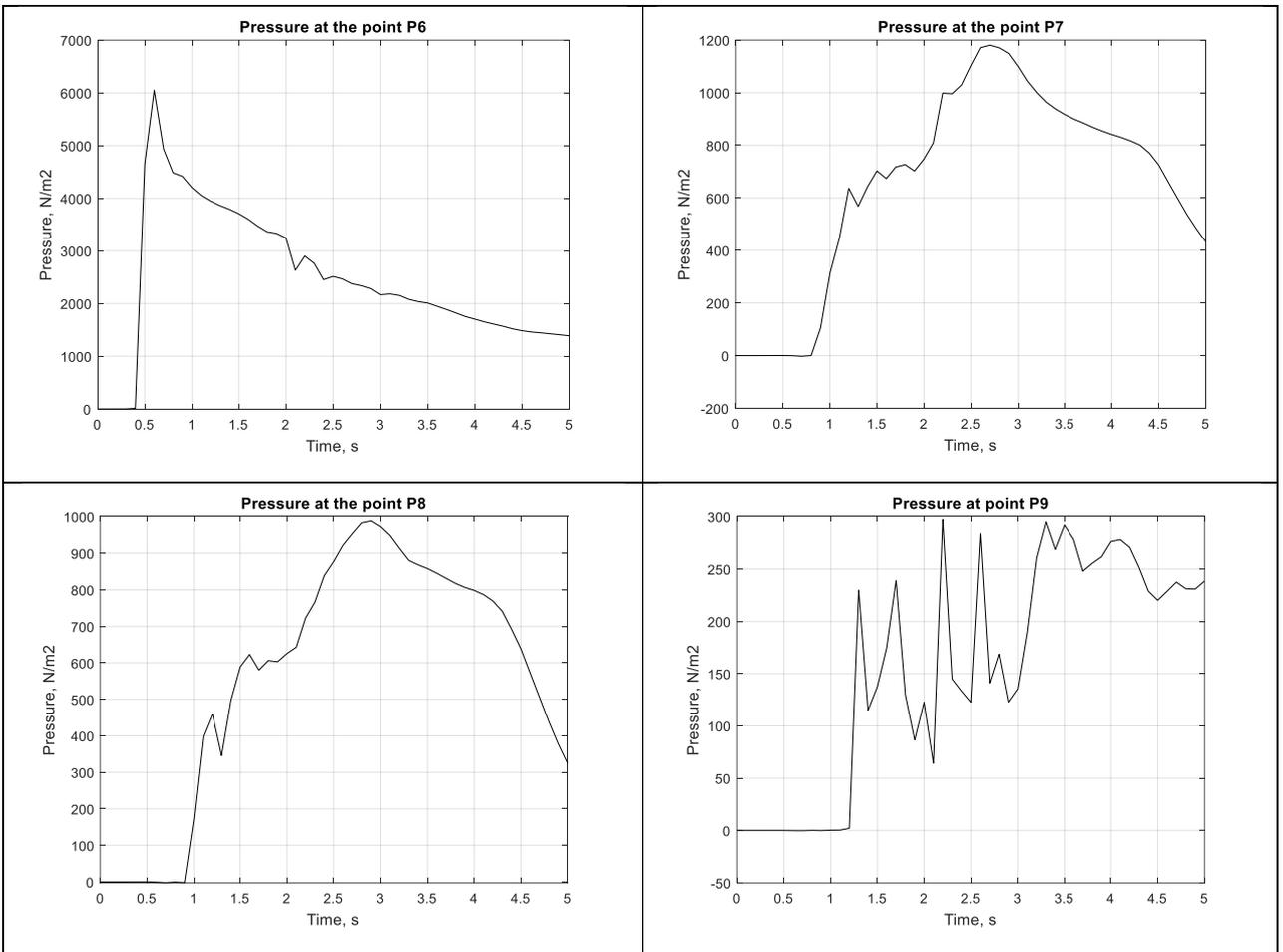


Рисунок 3.13в - Изменение давления в точках P6, P7, P8 и P9. H=0.6м

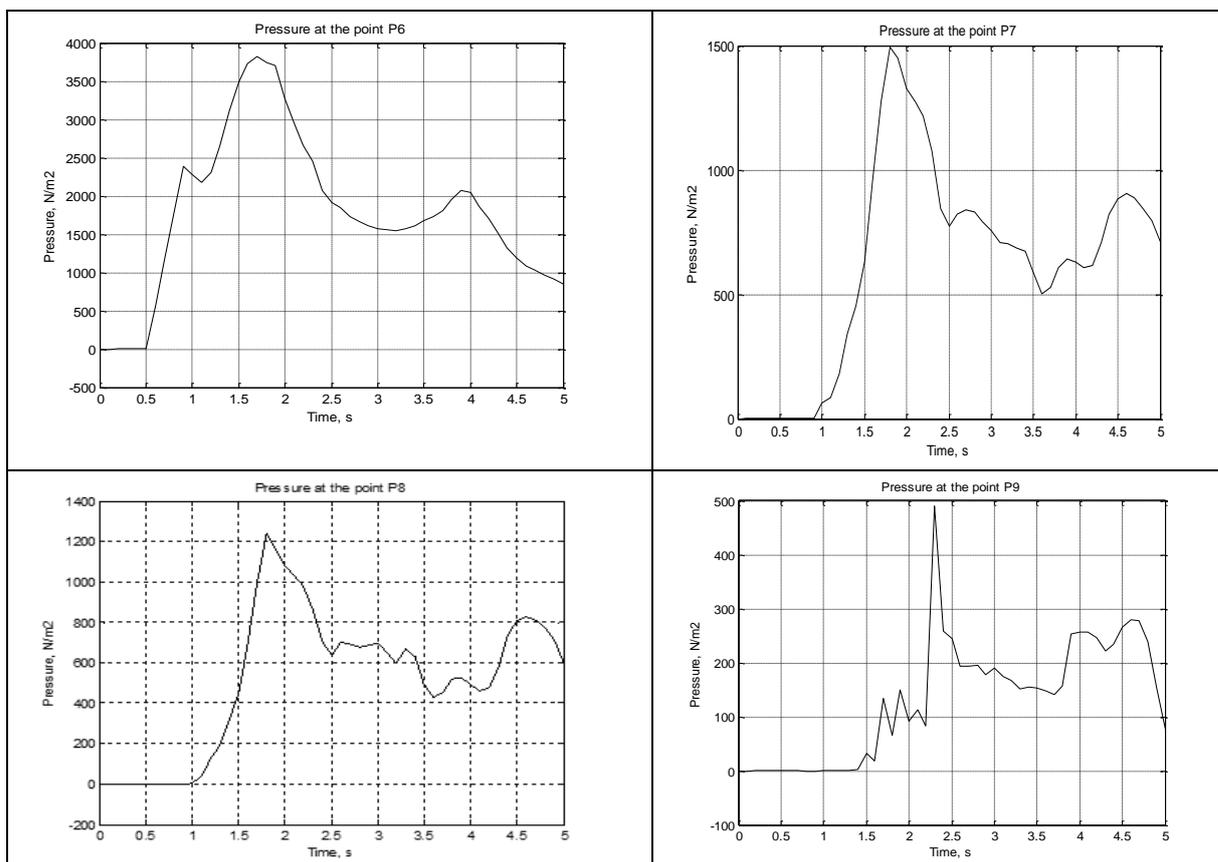


Рисунок 3.13 г. - Изменение давления в точках P6, P7, P8 и P9. H=0.8 м

Обнаружено, для момента времени $t=3.1\text{c}$, разница в максимальных значениях давления в точках P7 и P8 составила 6.74%, 16.3%, 16.3% и 17.2% для начальных высот $H=0.2\text{ м}$, $H=0.4\text{ м}$, $H=0.6\text{ м}$ и $H=0.8\text{ м}$ соответственно.

Сравнение результатов численного моделирования с соответствующими экспериментальными данными показывает достаточно хорошее согласие между ними. Небольшое колебание численных данных в начальный момент времени в точке 0 вероятно связано с влиянием граничных условий на твердых стенках резвуара и конечной величиной скорости убирания перегородки. При численном моделировании считается, что перегородка убирается мгновенно, т.е. скорость бесконечная. На самом деле в эксперименте эта скорость имеет некоторое конечное значение.

Наводнение, связанное с прорывом дамбы, приводит к большим человеческим и имущественным потерям. Численное моделирование позволяет оценить время появления передней волны прорыва в определенной точке местности, глубины водного потока и другие характеристики наводнения.

В этой работе представлены результаты математического моделирования сложного гидродинамического явления на основе нестационарных трехмерных уравнений Навье – Стокса, описывающих динамику газожидкостной смеси со свободной границей. Адекватность применяемой модели проверена на примере классической задачи частичного прорыва дамбы. Особое внимание уделено на точность расчета уровня потока воды в различных точках резервуара. Показано, что использованный многофазный решатель `interFoam` открытого пакета `OpenFOAM 7` описывает рассмотренную задачу с приемлемой точностью.

3.4. Моделирование процесса распространения волны прорыва горной местности Willow Greek, California, USA.

Изучение гидродинамики речного стока имеет большое практическое значение для решения инженерных задач защиты берегов и прогнозирования последствий возможных паводковых потоков при прорыве плотины. Одной из основных целей прогнозирования математического моделирования является определение области распространения волны разрушения плотины, для чего используются различные существующие методы моделирования всего процесса затопления. На основе математического моделирования, в принципе, можно сделать прогноз распространения волн прорыва плотины, рассчитать возможные границы зоны затопления, скорости течения паводков и уровни воды в различных точках в районе нижнего течения. На основе данных численных расчетов можно определить параметры необходимых инженерных берегозащитных сооружений, а также оценить экономические потери при затоплении и разработку необходимых мер против затопления. До недавнего времени большая часть работ по математическому моделированию проблемы прогнозирования волн прорыва плотины основывалась на численном решении уравнений Сен-Венана или мелководья [1, 2].

Большинство из них были выполнены в 1D или 2D приближении, но есть несколько работ, которые были выполнены в 3D-моделировании [3- 5]. Здесь

было выполнено трехмерное нестационарное моделирование для имитации такого рода проблем затопления с использованием пакета OpenFOAM с открытым исходным кодом [6]. OpenFOAM предназначен для численного моделирования широкого спектра задач, связанных с потоком жидкости и теплопередачей. Он содержит написанный на C++ широкий спектр важнейших и необходимых количеств библиотек.

Математическая модель. Трехмерная математическая модель турбулентного несжимаемого потока без внешних сил тела основана на усредненных по Рейнольдсу уравнениях Навье-Стокса [7, с. 29]

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

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho u_i) + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho u_i u_j + \overline{\rho u_i' u_j'}) = -\frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial \tau_{ij}}{\partial x_j}$$

где u_i - компоненты средней скорости, μ - молекулярная динамическая вязкость, ρ - плотность, $\tau_{ij} = \mu \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right)$ - средние компоненты тензора вязких напряжений и $\overline{\rho u_i' u_j'}$ - являются тензор напряжений Рейнольдса. Усреднение выполняется по времени, и простое число обозначает флуктуационную часть скорости. При наличии сил внешнего тела необходимо дополнить эти уравнения соответствующими членами. Турбулентная вязкость, которая относится к градиентам средней скорости потока, может быть записана в следующей форме модели вихревой вязкости [7, с. 294]:

$$\overline{\rho u_i u_j} = \mu_t \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) - \frac{2}{3} \rho \delta_{ij} k$$

$$\frac{\partial(\rho k)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u_j k)}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] + P_k - \rho k$$

$$\frac{\partial(\rho \varepsilon)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u_j \varepsilon)}{\partial x_j} = C_{\varepsilon 1} P_k \frac{\varepsilon}{k} - \rho C_{\varepsilon 2} \frac{\varepsilon^2}{k} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right]$$

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, а коэффициенты модели имеют следующие пять стандартные значения:

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

Захват фазового интерфейса. Потoki со свободными поверхностями - это очень сложные потоки с подвижными границами. Как обычно, местоположение границы известно только в начале времени, и ее положение в более поздние моменты времени должно быть определено как часть численного решения.

Метод определения границы раздела между двумя несмешивающимися фазами - водой и воздухом - занимает особое место при моделировании многофазного потока. Согласно основной идее метода объема жидкости (VOF) [7, с. 384], для каждой вычислительной ячейки определяется скалярный количество, которое представляет степень заполнения ячейки одной фазой, например, водой. Если это количество равно 0, вычислительная ячейка пуста; если это количество равно 1, то вычислительная ячейка заполнена полностью. Если его значение лежит между 0 и 1, то можно сказать, соответственно, что эта ячейка содержит свободную (межфазную) границу. Другими словами, объемная доля воды α определяется как отношение объема воды в ячейке к общему объему данной ячейки. Величина $1 - \alpha$ представляет, соответственно, объемную долю второй фазы — воздуха в данной ячейке. В начальный момент времени задается распределение поля этой величины, и его дальнейшие временные и пространственные эволюции вычисляются из следующего уравнения переноса [7, с. 384]:

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

Суть метода VOF, реализованного в решателе `interFoam` пакета `OpenFOAM` [1], заключается в том, что граница раздела между двумя фазами не вычисляется явно, а определяется, в некоторой степени, как свойство поля объемной доли воды. Поскольку значения объемной доли находятся в диапазоне от 0 до 1, межфазная граница определяется неточно, однако она занимает некоторую область, где поблизости должна существовать резкая межфазная граница.

Генерация сетки. Хорошо известно, что очень важной проблемой предварительной обработки является генерация соответствующей сетки. Поток,

рассматриваемый в этой статье, является достаточно сложным и оптимальное решение потребует сортировки сетки. В целом, области с наибольшим сдвигом особенно критичны, требуя более тонкой сетки, чем в областях с низким сдвигом. Для этой цели мы используем полную возможность сортировки сетки с помощью утилит blockMesh и snappyHexMesh из OpenFOAM.

Для регионов со сложными топографическими данными Digital Terrain Elevation Data используются топографические данные цифровых данных рельефа местности [8] были использованы в вычислениях, которые впоследствии были преобразованы в формат стереолитографии (STL). Прежде всего, простым использованием blockMesh необходимо создать фон - шестигранную фоновую сетку, которая заполняет всю область внутри внешней границей. Чем утилита snappyHexMesh, используемая для автоматического создания 3D- сетки, содержащей шестиугольники и разделенные шестиугольники, из трехмерных поверхностей в формате STL. Сетка приблизительно соответствует поверхности путем итеративного уточнения исходной фоновой сетки и преобразования результирующей шестнадцатеричной сетки в поверхность в формате STL. Необязательный этап приведет к уменьшению результирующей сетки и вставке слоев ячеек. Спецификация уровня очистки сетки очень гибкая, а обработка поверхности надежная с заранее заданным конечным качеством сетки [6].

Начальные условия. Для нестационарной задачи необходимо указать начальные значения для всех зависимых переменных. Значения, всех составляющих скорости равны нулю, поскольку в соответствии с начальным условием задачи движение отсутствует до момента времени $t = 0$. Гидродинамическое давление также равно нулю, поскольку используемый решатель – interFoam вычисляет гидродинамическое давление [6]. Кинетическая энергия турбулентности и скорость ее диссипации имеют некоторое небольшое значение, что обеспечивает хорошую сходимость численного решения на первых этапах интегрирования. Начальные значения для k и ϵ устанавливаются с использованием расчетной флуктуирующей составляющей скорости U' и шкалы

длины турбулентности. Начальное распределение фазовой доли воды α неоднородно, поскольку не все вычислительные ячейки заполнены водой.

Граничные условия. Условие прилипания задается на сплошных стенках расчетная область, которая дает нулевые компоненты вектор скорости. Условия Неймана заданы для объемная доля воды: $\frac{\partial \alpha}{\partial n} = 0$. У всех сплошная стена границы, граничное условие `fixedFluxPressure` применительно к полю давления (гидродинамического давления), которое регулирует градиент давления так, чтобы граничный поток соответствует граничному условию скорости для решателей, которые включают объемные силы, такие как сила тяжести и поверхностное натяжение [6]. Граничные условия для кинетической энергии турбулентности k и скорость его диссипации ε задавались с помощью пристеночные функции [7, с.298]. Выполнены систематические расчеты в этой работе показывают, что минимальное значение безразмерного расстояние y^+ для всех сплошных стен больше 25, поэтому мы можем использовать техника стеновых функций.

Во всех потоках, рассматриваемых в этой статье, интересует только моделирование внутренней области. Особой необходимости в разрешении вязкого слоя нет. Использование пристеночных функций удобно в этом плане, поскольку позволяет избежать дополнительного измельчения сетки вблизи твердых стенок и снизить вычислительные затраты [7, с. 298].

В работе не учитывалось влияние сил поверхностного натяжения между твердой стенкой и газожидкостной смесью.

Верхняя граница свободна для атмосферы, поэтому необходимо обеспечить как отток, так и приток в соответствии с внутренним потоком. Вот почему необходимо использовать комбинацию граничных условий для давления и скорости, которая делает это при сохранении устойчивости. Используемые граничные условия приведены в табл. 3.9.

Таблица 3.9. – Используемые граничные условия

Перем. Грань	alpha water	ε	k	nut	p_rgh	U
left	zeroGradient	epsilonWallFunction	kqRWallFunction	nutkWallFunction	fixedFluxPressure	fixedValue
right	zeroGradient	epsilonWallFunction	kqRWallFunction	nutkWallFunction	fixedFluxPressure	fixedValue
front	zeroGradient	epsilonWallFunction	kqRWallFunction	nutkWallFunction	fixedFluxPressure	fixedValue
back	zeroGradient	epsilonWallFunction	kqRWallFunction	nutkWallFunction	fixedFluxPressure	fixedValue
lowel	zeroGradient	epsilonWallFunction	kqRWallFunction	nutkWallFunction	fixedFluxPressure	fixedValue
atmosphere	inletOutlet	inletOutlet	inletOutlet	calculated	totalPressure	pressureInletOutletVelocity
Willow Greek	zeroGradient	epsilonWallFunction	kqRWallFunction	nutkWallFunction	fixedFluxPressure	fixedValue

Методы дискретизации и решение системы линейных уравнений. Для численного решения системы уравнений (1-2) необходимо выполнить процедуру дискретизации, целью которой является преобразование системы дифференциальных уравнений в частных производных (1-2) в систему линейных алгебраических уравнений. Решение этой системы определяет определенный набор величин, которые имеют особое отношение к решению исходных дифференциальных уравнений в определенных точках пространства и времени. Общая процедура дискретизации состоит из двух этапов: пространственной дискретизации и дискретизации уравнений.

Пространственная дискретизация осуществляется на основе метода контрольного объема [8, с. 30]. Согласно основной идее этого метода, пространственная дискретизация задачи достигается путем разделения вычислительной области на конечное число смежных объемов. В центре каждого контрольного объема находится только одна точка “привязки” численного

решения. В большинстве разработок, ориентированных на решение трехмерных задач для областей сложной геометрии, ячейки вычислительной сетки используются в качестве управляющего объема: узлы сетки расположены в вершинах многогранника, линии сетки проходят по его краям, а значения желаемых величин присваиваются геометрическому центру из камеры.

Система дифференциальных уравнений линейризуется и выбирается для каждого контрольного объема. Для вычисления интегралов по объему по контрольному объему использовалась общая теорема Гаусса, согласно которой интеграл по объему представляется через интеграл по поверхности ячейки, а значение функции на поверхности интерполируется из значений функции в центроидах соседних ячеек.

Использованные схемы дискретизации и методы решения систем линейных уравнений в табл. 3.10 и табл. 3.11.

Таблица 3.10. – Использованные схемы дискретизации

Слагаемое	Схема	Порядок схемы
Производная по времени	Euler	Первый
Градиент	Gauss linear	Второй
Конвекция	Gauss linear upwind grad(U)	Второй
Скорость	Gauss vanLeer	Второй
alpha	Gauss linear	Второй
k, ε	Gauss upwind	Первый
divSchemes	Gauss upwind	Первый
Лапласиан	Gauss linear corrected	Второй
interpolationSchemes	linear	Первый
snGradSchemes	corrected	Первый

Таблица 3. 11. – Решатели уравнений для основных переменных

Переменная	Решатель	Точность
alpha water	smoothSolver с использованием глаживателем symGaussSeidel	1e ⁻⁸
Pcorr.	Метод сопряженных градиентов PCG с использованием preconditioner DIC	1e ⁻⁵
p_rgh	Метод сопряженных градиентов PCG с использованием preconditioner DIC	1e ⁻⁷

U, k, ε	smoothSolver с использованием глаживателем symGaussSeidel	1e ⁻⁶
---------	--	------------------

Моделирование потока при прорыве плотины в реальной местности.

Для иллюстрации методов применения численного моделирования крупномасштабных гидродинамических вычислений рассмотрим задачу расчета процесса наводнения в горном районе Willow Creek, США, рельеф местности которого представлен на рисунке 3.14.

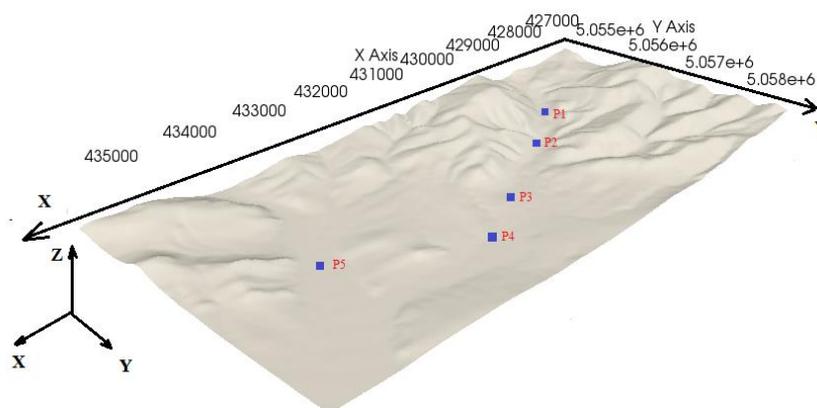


Рисунок 3.14-Местность Willow Creek

Координаты пяти зондов приведены в таблице 3.12.

Таблица 3.12. – Расположение реперных точек

Реперные точки #	X, м	Y, м	Z, м
P1	428728.80	5055327.90	1750.85
P2	429675.63	5055941.98	1700.0
P3	431142.22	5056648.30	1656.0
P4	432056.65	5057154.00	1615.0
P5	433876.18	5056278.40	1596.8

Здесь следует подчеркнуть, что ситуация реального прорыва плотины и затопления районов на нижнем уровне здесь не моделируется, но демонстрируется принципиальная возможность использования вышеуказанной технологии при наличии необходимых топографических данных. Данные топографии Willow Creek, использованные в этих расчетах, были взяты из Геологической службы США и впоследствии преобразованы в формат stl.

Шестигранная фоновая сетка, созданная с помощью утилит blockMesh и snappyHexMesh пакета OpenFOAM, была преобразована в трехмерную поверхность, которая используется для моделирования процесса наводнения. Конечное общее количество вычислительных ячеек после использования утилиты snappyHexMesh равно 450705. В данном случае вычисления проводились на компьютере с процессором Intel® Core i5-8250U с частотой 1.60 ГГц и установленной оперативной памятью 8 Гб. Общее время моделирования на этом компьютере занимает 17934 секунды, что составляет почти 5 часов.

Распределения объемной доли воды в разные моменты времени представлены на рисунках 3.15аг.

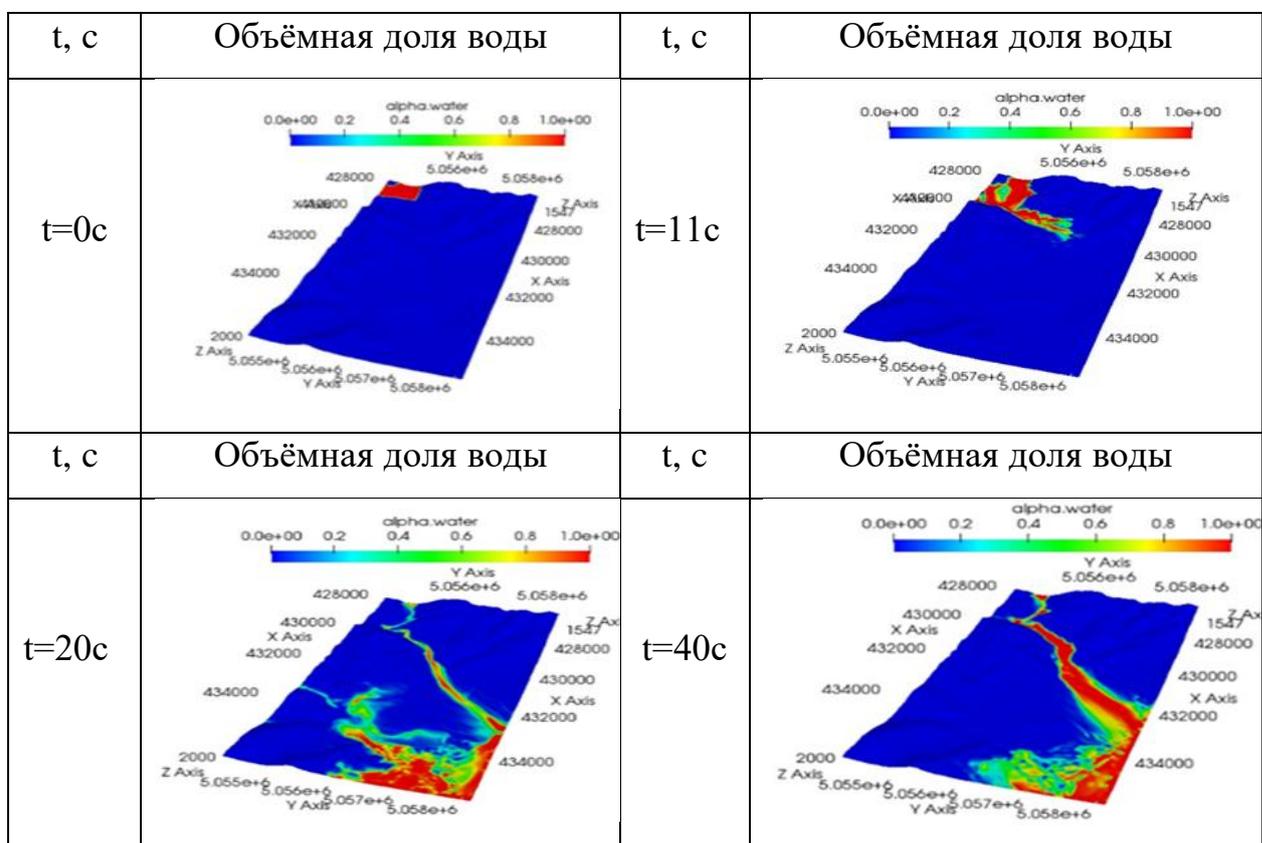
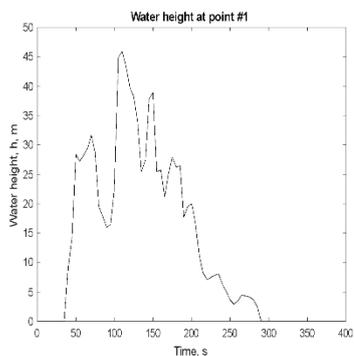
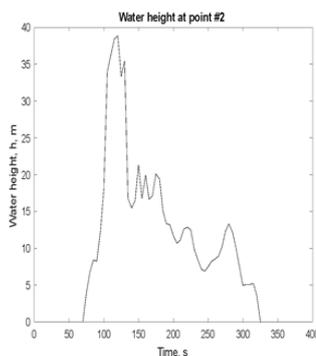


Рисунок 3.15 - Объёмная доля воды в разные моменты времени

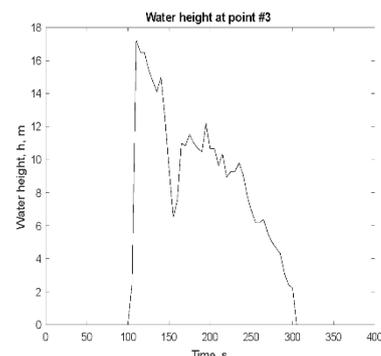
Здесь красный цвет соответствует потоку чистой воды, а синий цвет соответствует потоку воздуха (в синих областях нет потока воды). Изменения высоты потока воды в разных точках P1-P5 представлены на следующих рисунках 3.16а-д.



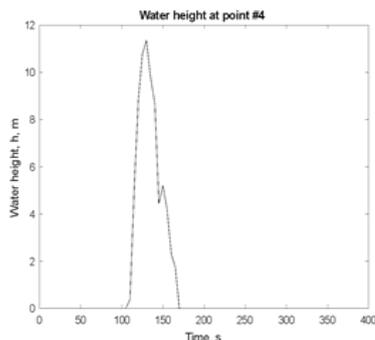
Высота водного потока в точке P1



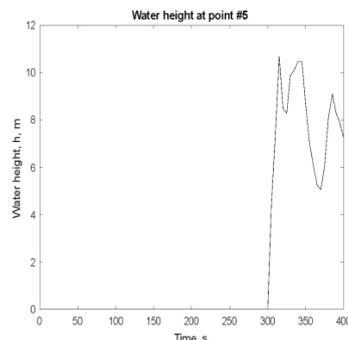
Высота водного потока в точке P2



Высота водного потока в точке P3



Высота водного потока в точке P4



Высота водного потока в точке P5

В настоящей работе не учитывается взаимодействие водного потока с флорой русла реки и различными структурами, которые существенно изменяют общую картину течения, приводя к увеличению зоны затопления.

Здесь представлены численные результаты исследования распространения волны разрушения плотины на начальных этапах в 3D реальном горном районе Willow-Greec, California, USA. Для численного моделирования использовался межпенный решатель открытого программного обеспечения OpenFOAM. Нестационарный трехмерный Уравнения Навье—Стокса, описывающие динамику газожидкостной смеси со свободной границей, легли в основу математического моделирования сложных крупномасштабных гидродинамических явлений. Необходимо особо отметить, что из-за ограничений вычислительных ресурсов компьютера размер вычислительной сетки был выбран относительно грубо. Поэтому представленные результаты вычислений следует рассматривать как оценочные, они нуждаются в проверке на более мелкой сетке.

3.5. Математическое моделирование и визуализация последствий крупномасштабного наводнения вблизи поселка Шамалды-Сай, Кыргызстан.

Изучение гидродинамики речного стока имеет большое практическое значение при решении инженерных задач защиты берегов рек и прогнозировании последствий возможного прорыва плотин паводковыми потоками. Одной из основных целей прогнозирования математического моделирования является определение области распространения волны прорыва плотины, в которой используются различные существующие методы моделирования всего процесса затопления [1]. На основе математического моделирования, в принципе, можно сделать прогноз распространения волн прорыва плотины, рассчитать возможные границы зоны затопления, скорости течения паводков и уровни воды в различных точках нижнего течения реки. На основании данных численных расчетов можно определить параметры необходимых инженерных сооружений для защиты берегов реки, а также оценить экономические потери при наводнении и разработать необходимые меры против затопления. До недавнего времени многие работы по математическому моделированию задачи прогнозирования волн прорыва плотины была основана на численном решении уравнений Навье-Стокса [2-3]. Большинство из них были выполнены в 1D или 2D приближении, но есть несколько работ, которые были выполнены в 3D-моделировании [4-6]. Здесь было выполнено трехмерное нестационарное моделирование для моделирования такого рода проблем затопления с использованием пакета OpenFOAM с открытым исходным кодом [7]. OpenFOAM предназначен для численного моделирования широкого спектра задач, связанных с потоком жидкости и теплопередачей. Он содержит написанный на C++ широкий спектр важнейших и необходимых количеств библиотек.

Как известно, на реке Нарын построен каскад гидроэлектрических станций, расположенных в зонах высокой сейсмологической активности. Гидротехнические сооружения относятся к числу сложных инженерных

объектов, создающих целый ряд экологических, и природа 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.

Математическая модель. Трехмерная математическая модель турбулентного несжимаемого потока без внешних сил тела основана на усредненных по Рейнольдсу уравнениях Навье-Стокса (см. уравнения (3.1. -3.2.)).

В данной работе замыкание систем уравнений (3.1. -3.2.) основано на стандартной k - ω -модели турбулентности. Кинетическая энергия турбулентности и рассчитываются по следующим уравнениям переноса:

Уравнение для кинетической энергии турбулентности:

$$\frac{\partial k}{\partial t} + \rho u_j \frac{\partial k}{\partial x_j} = \tau_{ij} \frac{\partial u_i}{\partial x_j} - \beta^* \rho k \omega + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[(\mu + \sigma_k \mu_t) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] \quad (3.7)$$

Уравнение для удельной скорости диссипации:

$$\rho \frac{\partial \omega}{\partial t} + \rho u_j \frac{\partial \omega}{\partial x_j} = \gamma \frac{\omega}{k} \tau_{ij} \frac{\partial u_i}{\partial x_j} - \beta \rho \omega^2 + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[(\mu + \sigma_\omega \mu_t) \frac{\partial \omega}{\partial x_j} \right] + 2(1-F_1) \rho \sigma_\omega \frac{1}{\omega} \frac{\partial k}{\partial x_j} \frac{\partial \omega}{\partial x_j} \quad (3.8)$$

Динамическая вихревая вязкость вычисляется по следующей формуле:

$$\mu_t = \rho k / \omega \quad (3.9)$$

Турбулентные напряжения Рейнольдса определяется согласно следующей формуле (см. урав. 3.3).

Здесь в качестве примера проведено моделирование возможного наводнения в местности поймы реки Нарын, Кыргызстан (рисунок 3.17).

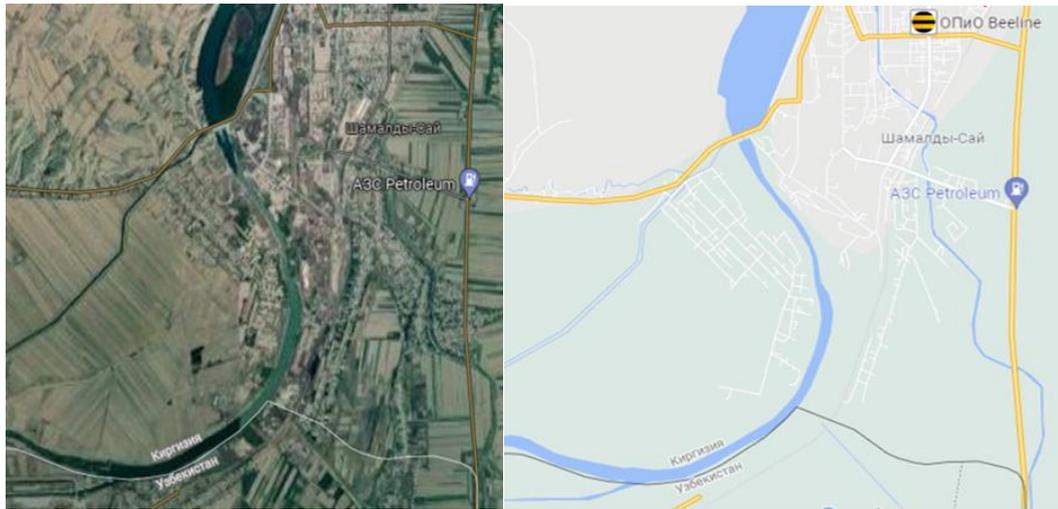


Рисунок 3.17- Спутниковое изображение (слева) и карта местности.

Начальная условия. Для нестационарной задачи необходимо указать начальные значения для всех зависимых переменных. Значения, всех составляющих скорости равны нулю, поскольку в соответствии с начальным условием задачи до момента времени $t = 0$ движение отсутствует. Гидродинамическое давление также равно нулю, так как решатель –interFoam вычисляет гидродинамическое давление [8]. Кинетическая энергия турбулентности и скорость ее диссипации имеют некоторое небольшое значение, что обеспечивает хорошую сходимость численных решений на первых этапах интеграции. Начальные значения для k и ϵ задаются с использованием расчетной флуктуирующей составляющей скорости U' и шкалы длины турбулентности. Начальное распределение фазовой доли воды α неравномерно, поскольку не все вычислительные ячейки заполнены водой.

Граничные условия. Условие отсутствия скольжения задается на сплошных стенках вычислительной области, что дает нулевые компоненты вектора скорости. Условия Неймана заданы для объемной доли воды. На всех границах сплошных стенок к полю давления (гидродинамического давления) применяется граничное условие `fixedFluxPressure`, которое регулирует градиент давления таким образом, чтобы граничный поток соответствовал граничному условию скорости для решателей, которые включают массовые, такие как гравитация и поверхностное натяжение [8]. Граничные условия для кинетической энергии турбулентности k и скорости ее диссипации ϵ были определены с

помощью пристеночных функций. Систематические расчеты, выполненные в этой работе, показывают, что минимальное значение безразмерного расстояния y^+ для всех сплошных стен больше 25, поэтому мы можем использовать метод пристеночных функций. Во всех потоках, рассмотренных в этой статье, один заинтересован только в моделировании внутренней области. Нет особой необходимости в устранении вязкого слоя. Использование пристеночных функций стенок удобно в этом контексте, чтобы избежать дополнительного уточнения сетки вблизи сплошных стен и снизить вычислительные затраты [8]. Влияние сил поверхностного натяжения между твердой стенкой и газожидкостной смесью в данной работе не учитывалось. Верхняя граница является атмосферой, поэтому необходимо разрешить как отток, так и приток в соответствии с внутренним потоком. В данной работе граничные условия приведены в табл. 3.13.

Таблица 3.13. – Используемые граничные условия

Переменная	Скорость	α	k	ω
Граница				
left	zeroGradient	zeroGradient	kqRWallFunction	omegaWallFunction
right	zeroGradient	zeroGradient	kqRWallFunction	omegaWallFunction
out	zeroGradient	zeroGradient	kqRWallFunction	omegaWallFunction
back	zeroGradient	zeroGradient	kqRWallFunction	omegaWallFunction
atmosphere	pressureInletOutletVelocity	zeroGradient	inletOutlet	omegaWallFunction
naryn River	zeroGradient	zeroGradient	kqRWallFunction	omegaWallFunction

Методы дискретизации и решение системы линейных уравнений. Для численного решения системы уравнений (3.1. - 3.4.) необходимо выполнить процедуру дискретизации, целью которой является преобразование системы

уравнений в частных производных (3.1. - 3.4.) в систему линейных алгебраических уравнений. Решение этой системы определяет определенный набор величин, которые имеют особое значение для решения начальных дифференциальных уравнений в определенных точках пространства и времени. Общая процедура дискретизации состоит из двух этапов: пространственная дискретизация и дискретизация уравнений. Пространственная дискретизация осуществляется на основе метода контрольного объема [8, 10, 11]. Согласно основной идее этого метода, пространственная дискретизация задачи достигается путем разделения вычислительной области на конечное число смежных объемов. В центре каждого контрольного объема находится только одна точка “привязки” численного решения. В большинстве разработок, ориентированных на решение трехмерных задач для областей сложной геометрии, в качестве управляющего объема используются ячейки вычислительной сетки: узлы сетки расположены в вершинах многогранник, линии сетки проходят по его краям, а значения нужных величин присваиваются геометрическому центру ячейки. Система дифференциальных уравнений линеаризуется и отбирается для каждого контрольного объема. Для вычисления интегралов объема по контрольному объему использовалась общая теорема Гаусса, согласно которой интеграл объема представляется через интеграл по поверхности ячейки, а значение функции на поверхности интерполируется из значений функции в центроидах соседних ячеек. В качестве схемы дискретизации производной по времени использовалась явная схема Эйлера первого порядка. Для соответствующего расчета полей скорости и давления, использовалась процедура PISO с числом корректоров 3 [8,11]. Для решения полученной системы линейных алгебраических уравнений использовались итерационные решатели PCG для симметричных матриц [8,11] и метод PBiCG (bi-) сопряженных градиентов с предварительной подготовкой для асимметричных матриц [8,11]. В качестве пред об условия были выбраны процедуры предобуславливателя DIC на основе упрощенной схемы неполной факторизации Холески для симметричных матриц и предобуславливателя DILU

на основе упрощенной неполной факторизации LU для асимметричных матриц. Используемые схемы дискретизации и методы решения систем линейных уравнений в табл. 3.14. и табл. 3.15.

Таблица 3.14. – Используемые схемы дискретизации

Слагаемое	Схема	Порядок схемы
Производная по времени	Euler	Первый
Градиент	Gauss linear	Второй
Конвекция	Gauss linear upwind grad(U)	Второй
Скорость	Gauss linear	Второй
alpha	Gauss vanLeer	Второй
k	Gauss upwind	Первый
ω	Gauss upwind	Первый
Лапласиан	Gauss linear corrected	Второй

Таблица 3.15. – Решатели уравнений для основных переменных

Переменная	Решатель	Точность
Давления	метод сопряженных градиентов PCG с использованием preconditioner DIC	$1e^{-6}$
U, k, ω , α	smoothSolver с использованием глаживателем symGaussSeidel	$1e^{-5}$

Для иллюстрации методов применения численного моделирования крупномасштабных гидродинамических вычислений проверяется путем сравнения с доступными в открытой научной литературе экспериментальными данными. Эффективность применяемых моделей и компьютерных технологий иллюстрируется на примере наводнения поймы реки Нарын, Кыргызстан, рельеф местности которого представлен на рисунке 3.18.

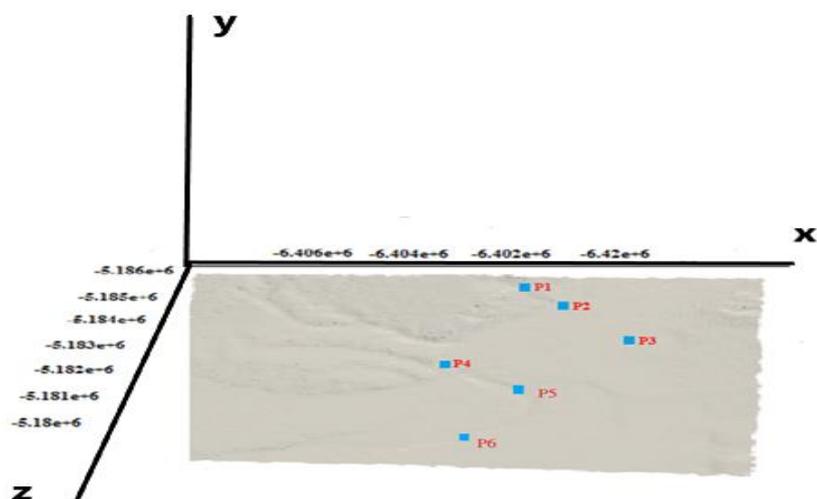


Рисунок 3.18 -Трехмерная расчетная область, Шамалды- Сай

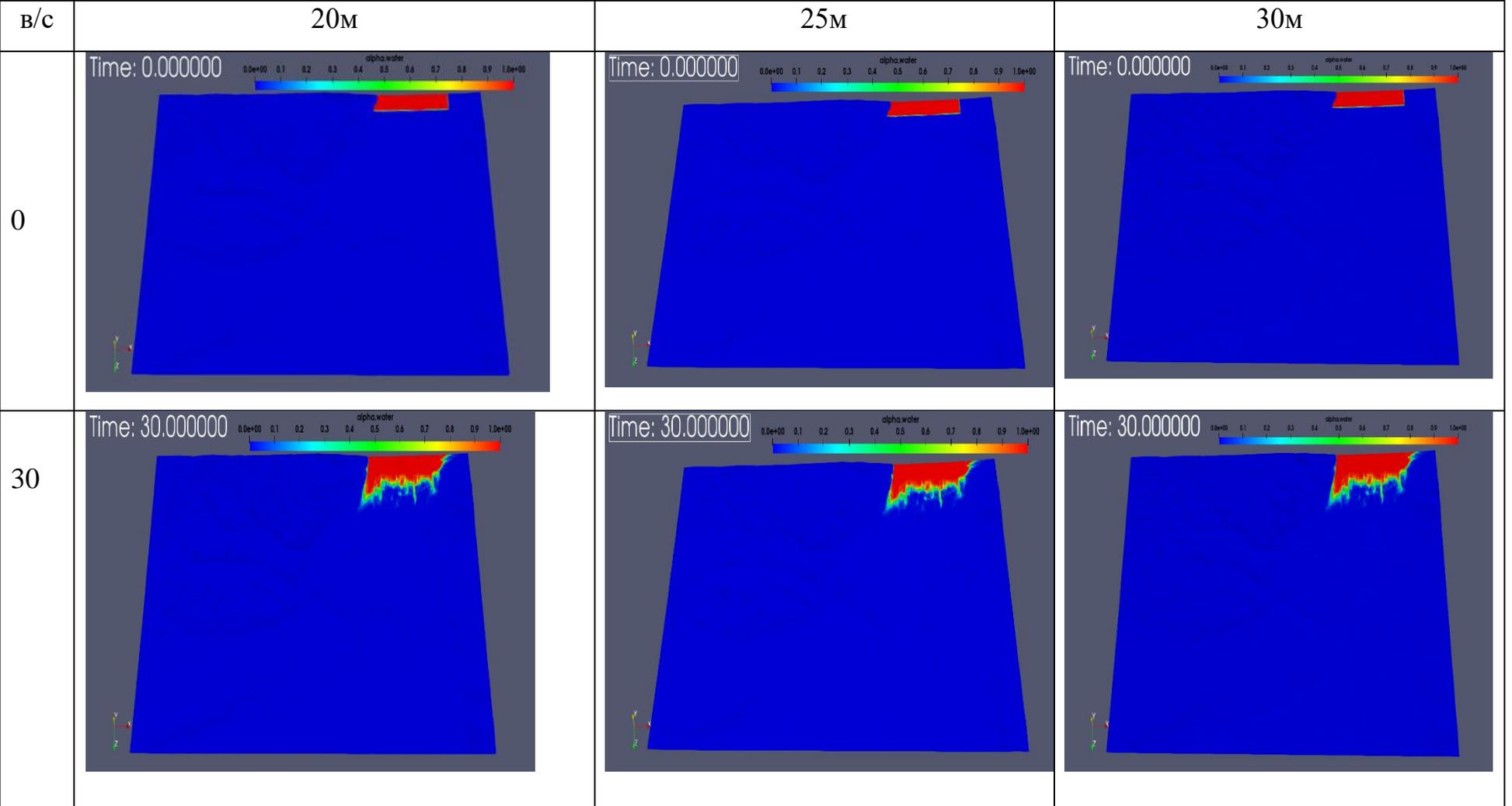
Координаты 6 реперных точек приведены в табл. 3.16.

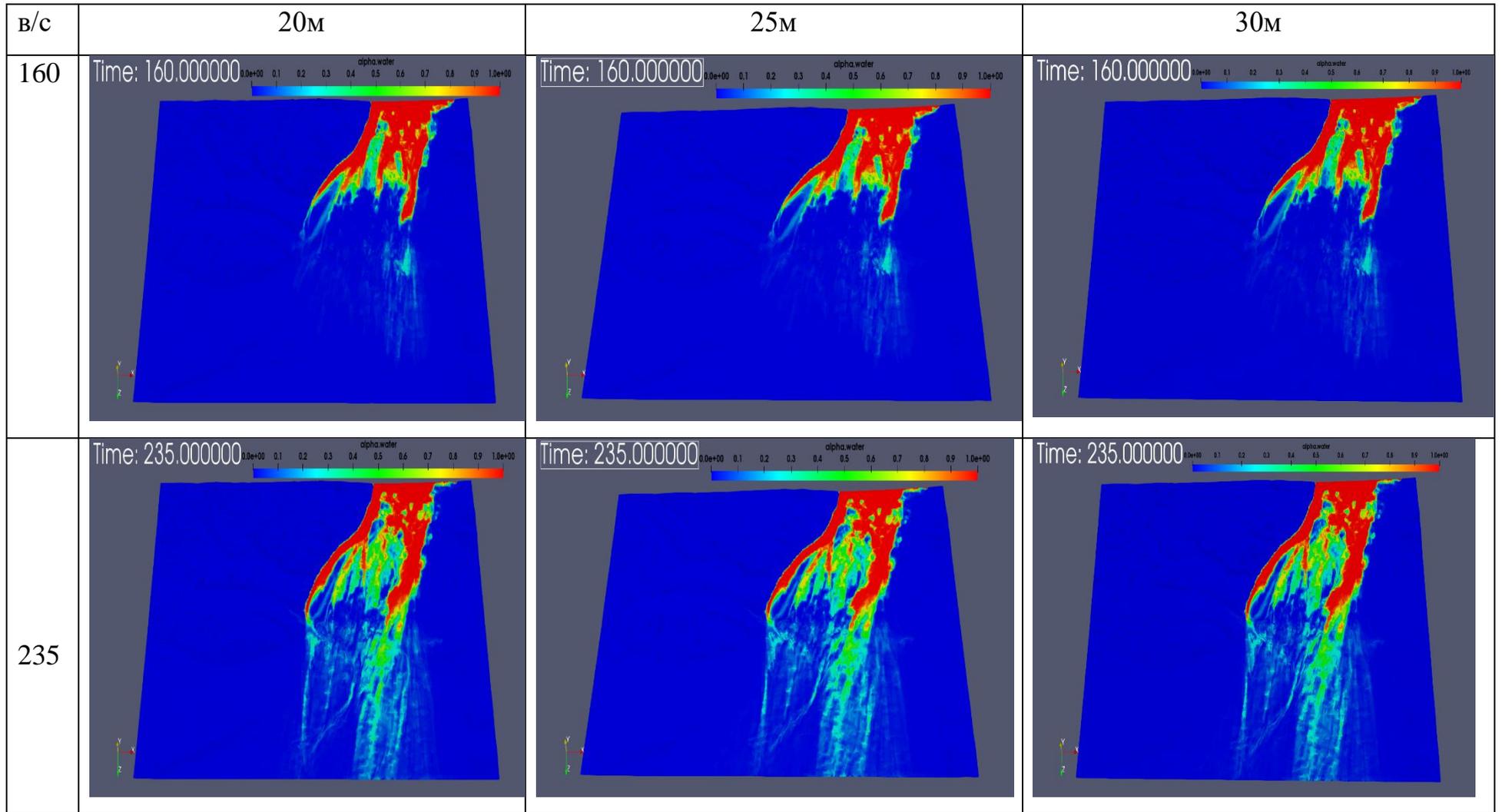
Таблица 3.16. – Расположение реперных точек

P #	X, м	Y, м	Z, м
P1	-6402567.7174	1231.22	-5185829.9539
P2	-6402878.2414	1232	-5185015.4648
P3	-6401595.5308	1236	-5183863.4583
P4	-6404659.4161	1232	-5183162.5515
P5	-6407039.6656	1196	-5180415.7243
P6	-6402524.4158	1235	-5184008.1862

Распределения объемной доли воды в разные моменты времени представлены на рисунке 3.19.

Здесь красный цвет соответствует потоку чистой воды, а синий цвет соответствует потоку воздуха (в синих областях нет потока воды)





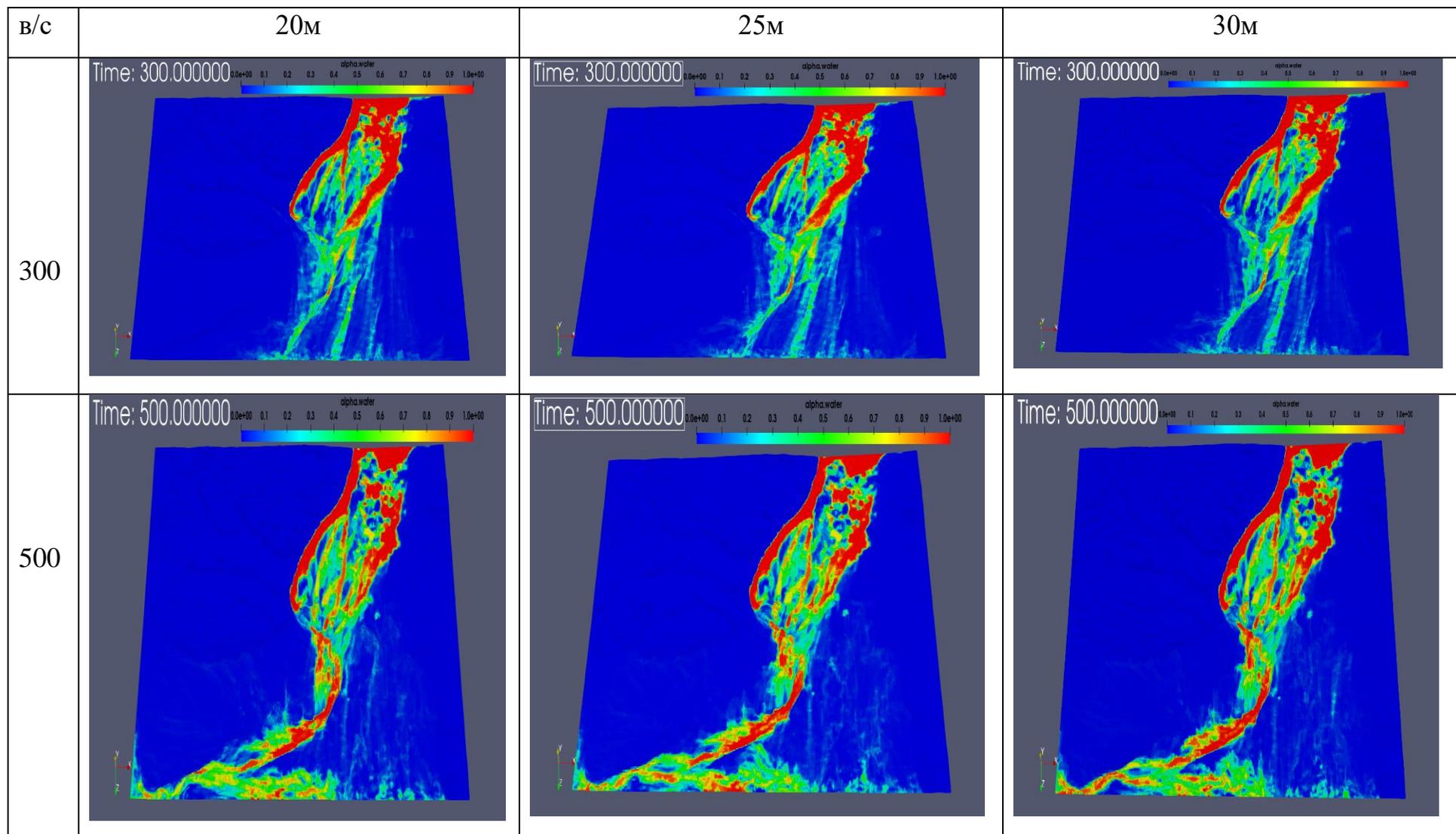
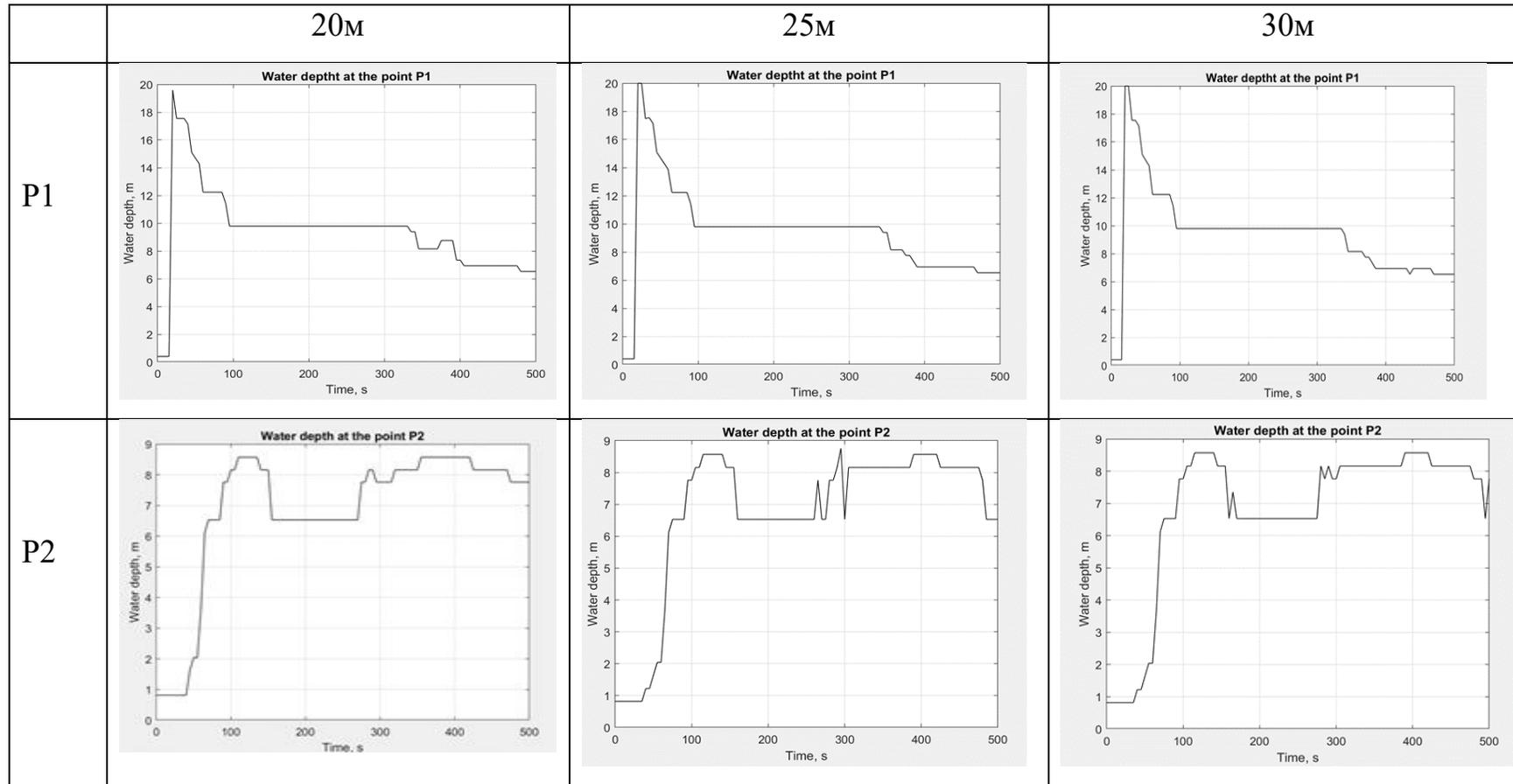
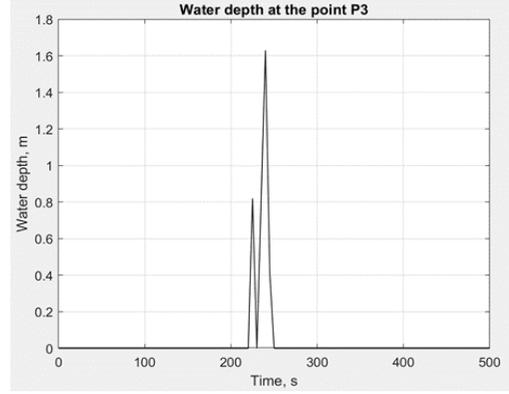
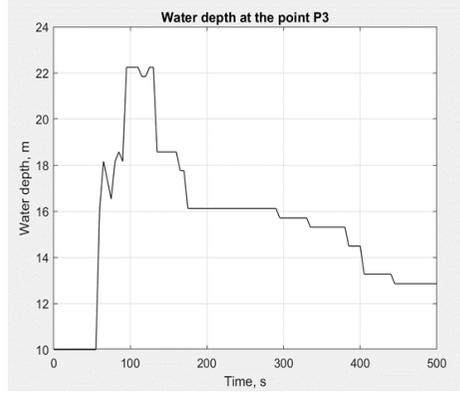
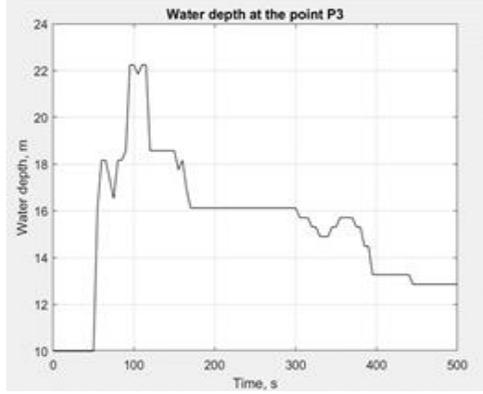


Рисунок 3.19 - Распределения объемной доли воды в разные моменты времени

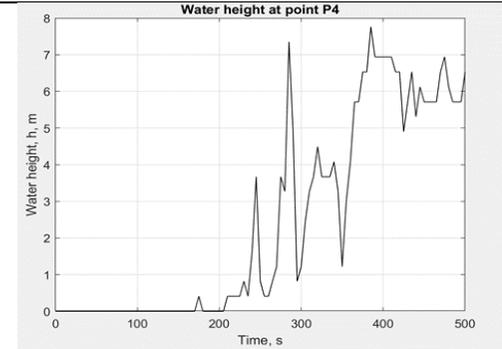
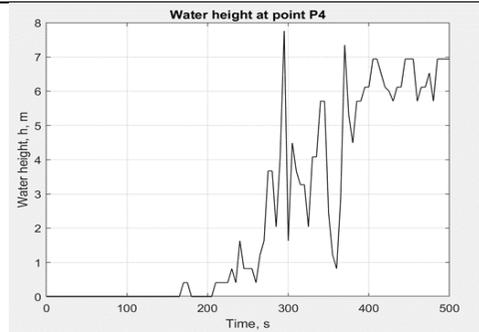
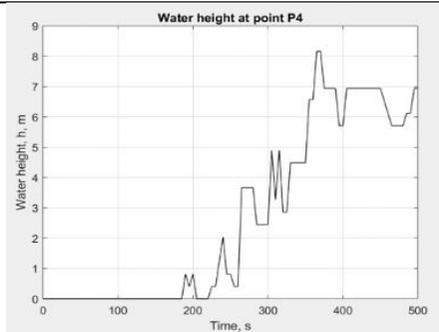
Изменения высоты потока воды в разных точках P1-P6 представлены на рисунках 3.20.



P3



P4



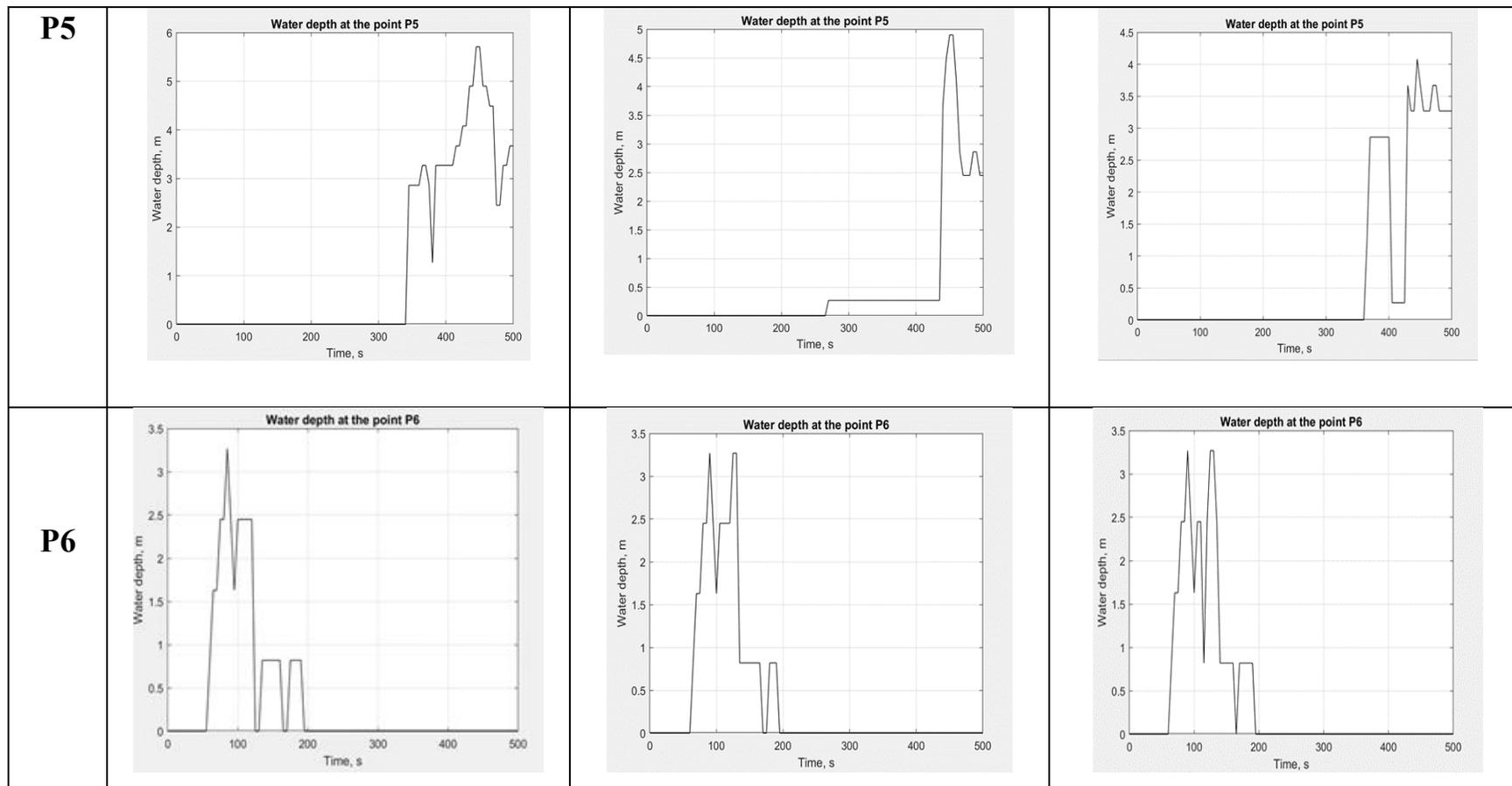


Рисунок 3.20 - Изменения высоты потока воды в разных точках P1-P6

В данной работе не учитывается взаимодействие водного потока с растительностью русла реки и различными структурами, которые существенно изменяют общую картину течения, приводя к увеличению зоны затопления и представлено численное исследование распространения волны прорыва плотины в местности поймы реки Нарын, Кыргызстан. Для численного моделирования использовался `interFoam` решатель открытого программного обеспечения `OpenFOAM`.

Нестационарные трехмерные уравнения Навье—Стокса, описывающие динамику газожидкостной смеси со свободной границей, легли в основу математического моделирования сложных крупномасштабных гидродинамических явлений.

Необходимо особо отметить, что из-за ограничений вычислительных ресурсов компьютера размер вычислительной сетки был выбран относительно грубым. Поэтому представленные результаты вычислений следует рассматривать как оценочные, они нуждаются в проверке на более мелкой сетке.

ВЫВОДЫ К ГЛАВЕ 3

1. Рассмотрена задача численного моделирования водослива через плотину трапециевидной формы. Сравнение численных результатов, полученных с различными версиями пакета `OpenFOAM` показывают, что объединение решателей `interFoam` и `interDyMFoam` и изменённый способ вычисления коэффициента `fvcDdtPhiCoeff` в пакете `OpenFoam6` приводит к неадекватному, с физической точки зрения, к 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.

2. Рассмотрена задача моделирования наводнения в модели городской местности, позволяющих проводить верификацию выбранного пакета OpenFOAM7 на различных задачах вычислительной гидродинамики. Обнаружено образование зон обратных течений около моделей зданий.
3. Предложен метод автоматического построения трёхмерной неструктурированной расчетной сетки для задачи моделирования процесса наводнения в реальной местности Willow Creek, USA.
4. Впервые проведён расчет возможного наводнения вблизи посёлка ШамалдыСай, Кыргызстан. Обнаружено, что для трёх различных начальных высот водного столба $H_0 = 20\text{м}$, 25м и 30м площади затопления имеют разные значения - с ростом начальной высоты растёт площадь затопления в зависимости от топологии местности.
5. Показано, что время распространения волны прорыва местности до определенной точки от первоначальной высоты водного столба.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Основные результаты и выводы диссертационной работы состоят в следующих моментах:

- Показано, что при моделировании задачи водослива объединение решателей `interFoam` и `interDyMFoam` в пакете `OpenFoam6` приводит к не адекватному, с физической точки зрения, численным результатам. А 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.
- Обнаружено, что при моделировании наводнения в модели городской местности разница в максимальных значениях давления в точках P7 и P8 составила 6.74%, 16.3%, 16.3% и 17.2% для начальных высот $H=0.2$ м, $H=0.4$ м, $H=0.6$ м и $H=0.8$ м соответственно. С ростом высоты водного столба растет площадь затопления дна канала.
- Впервые проведён расчет возможного наводнения в горной местности Willow Greek, USA и около поселка Шамалды-Сай, Кыргызстан. Обнаружено, что для трёх различных начальных высот водного столба $H = 20$ м, 25м, 30м, 35м и 40м площади затопления имеет разные значения с ростом начальной высоты растет площадь затопления.
- Показано, что время достижения волны прорыва до определенной точки местности зависит от первоначальной высоты водного столба: с ростом высоты водного столба время достижения уменьшается.

ПРАКТИЧЕСКИЕ РЕКОМЕНДАЦИИ

Результаты исследования внедрены в деятельность Министерства чрезвычайных ситуаций Кыргызской Республики для организации плановых и внеплановых сезонных сбросов с водохранилищ Нарынского каскада.

Часть материалов диссертации включена в учебный процесс факультета математики и информационной технологий в качестве специального курса «Методы компьютерного моделирования физических процессов» для студентов старших курсов, магистрантов и аспирантов специальностей 510100 Математика, 510200 Прикладная математика и информатика, 710300 Прикладная информатика, 710100 Информатика и вычислительная техника, 710200 Информационные системы и технологии Ошского государственного университета. Данная работа позволит слушателям освоить навыки решения актуальных проблем науки и техники с использованием современных программных пакетов и информационных технологий.

В целях дальнейшего развития хотелось бы рассмотреть следующие задачи, представляющие собой актуальные проблемы современной науки математического моделирования:

- Расчет внутренних турбулентных течений на основе гибридных и LES моделей турбулентности.
- Проведение параллельных расчетов с использованием MPI с учетом растительности и взаимодействия потока с различными инженерными сооружениями.
- Моделирование оползня и снежных лавин в горных районах Кыргызской Республики.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ИСТОЧНИКОВ

1. Saeid E. M. //Numerical Modeling of The Initial Stages of Dam-Break Problems./Thesis Submitted to the University of Ottawa in Partial Fulfillment of the Requirements for the Degree of Master of Applied Science in Civil Engineering. –2021.
2. Syamsuri.// OpenFOAM Based Approach for the Prediction of the Dam Break with an Obstacle. / Engineering and Technology Quarterly Reviews, Vol.3 No.2 (2020)
3. Курбаналиев А.Ы. Моделирование внутренних и внешних турбулентных течений. Монография. - Бишкек, 2013. – 153с.
4. Komeil S. // Shahar Chay Dam-Break simulation using OpenFOAM. / 6th International Conference on Civil, Architectural & Environmental Science, 2019.
5. Ritter, A. (1892). Die Fortpflanzung der Wasserwellen. Vereine Deutscher Ingenieure Zeitswchrift, 36(2), 33, pp. 947-954 (in German).
6. Rajar, R. (1978). Mathematical simulation of dam-break flow. Journal of the Hydraulics Division, Vol. 104(7), pp. 1011-1026.
7. Katopodes, N. D. and Wu, C. (1986). Explicit computation of discontinuous channel flow. Journal of Hydraulic Engineering, Vol. 112(6), pp. 456-474.
8. Bellos, C. V. and Sakkas, J. G. (1987). 1-D dam-break flood-wave propagation on dry bed. Journal of Hydraulic Engineering, Vol. 113(12), pp. 1510-152
9. Savic, Lj., and Holly Jr, F. M. (1993). Dambreak flood waves computed by modified Godunov method. Journal of Hydraulic Research, Vol. 31(2), pp. 187–204.
10. Hicks, F. E., Steffler, P. M., and Yasmin, N. (1997). One-dimensional dam-break solutions for variable width channels. Journal of Hydraulic Engineering, Vol. 123(5), pp 464-468.
11. Jha, A. K., Akiyama, J., and Ura, M. (1995). First- and second-order flux difference splitting schemes for dam-break problem. Journal of Hydraulic Engineering, Vol. 121(12), pp.877-884

12. Wang, J. S., Ni, H. G., and He, Y. S. (2000). "Finite-difference TVD scheme for computation of dam-break problems." *Journal of Hydraulic Engineering*, Vol. 126(4), pp. 253-262.
13. Ying, X., Khan, A. A., and Wang, S. S. Y. (2004). "Upwind conservative scheme for the Saint -Venant equations." *Journal of Hydraulic Engineering*, Vol. 130(10), pp. 977-987.
14. Ying, X. and Wang, S. S. Y. (2008). Improved implementation of the HLL approximate Riemann solver for one-dimensional open channel flows. *Journal of Hydraulic Research*, Vol. 46(1), pp. 21-34
15. Kuiry, S. N., Pramanik, K. and Sen, D. (2008). Finite volume model for shallow water equations with improved treatment of source terms. *Journal of Hydraulic Engineering*, Vol. 134(2), pp 231-242.
16. Altinakar, M. S., McGrath, M. Z., Ramalingam, V. P., Singh, J., Ding, Y., and Inman, M. (2012). Advances in 2D flood modeling and mapping technology for dam and levee safety. *Proceedings of the 10th International Congress on Advances in Civil Engineering*.
17. Muzaferija, S. and Peric, M. (1998). Computation of free-surface flows using interface tracking and interface-capturing methods. in O. Mahrenholtz and M. Markiewicz (eds.), *Nonlinear water wave interaction*, Computational Mechanics Publications, Southampton, UK., pp. 59-100.
18. Kleefsman, K. M. T., Fekken, G., Veldman, A. E. P., Iwanowski, B. and Buchner, B. (2005). A volume-of-fluid based simulation method for wave impact problems. *Journal of Computational Physics*, Vol. 206(1), pp. 363-393.
19. Ferrari, A., Fraccarollo, L., Dumbser, M., Toro, E.F., and Armanini, A. (2010). Three dimensional flow evolution after a dam break. *Journal of Fluid Mechanics*, Vol. 663, pp.456-477.
20. Yang, C., Lin. B., Jiang, C., and Liu, Y. (2010). Predicting near-field dam-break flow and impact force using a 3D model. *Journal of Hydraulic Research*, Vol. 48(6), pp. 784-792.

21. Marsooli, R., Zhang, M., and Wu, W. (2011). Vertical and horizontal two-dimensional numerical modeling of dam-break flow over fixed beds. Proceedings of World Environmental and Water Resources Congress, ASCE, Palm Springs, CA., U.S.A.
22. Wu, W. (2007). Computational River Dynamics., Taylor & Francis, London, UK
23. Capart, H., and Young D. L. (1998). Formation of jump by the dam-break wave over a granular bed. Journal of Fluid Mechanics, Vol. 372, pp 165-187.
24. Fraccarollo, L. and Capart, H. (2002). Riemann wave description of erosional dam break flows. Journal of Fluid Mechanics, Vol. 461, pp 183-228.
25. Capart, H., and Young D. L. (2002). Two-layer shallow water computations of torrential flows. Proceedings of River flow, Vol. 2, pp 1003-1012.
26. Spinewine, B. (2005). Two-layer flow behavior and the effects of granular dilatancy in dam break induced sheet-flow. PhD Thesis, University Catholique de Louvain-la-Neuve, Belgium.
27. Cao, Z., Pender, G., Wallis, S., and Carling, P. (2004). Computational Dam-Break Hydraulics over Erodible Sediment Bed. Journal of Hydraulic Engineering, Vol. 130(7), pp. 689-703.
28. Wu, W. and Wang, S. S. Y. (2007). One-Dimensional Modeling of Dam-Break Flow over Movable Beds. Journal of Hydraulic Engineering, Vol. 133(1), pp. 48-58.
29. Van Rijn, L. C. (1984a). Sediment transport. Part I: Bed load transport. Journal of Hydraulic Engineering, Vol. 110(10), pp. 1431-1456.
30. Van Rijn, L. C. (1984b). Sediment transport. Part II: suspended load transport. Journal of Hydraulic Engineering, Vol. 110(11), pp. 1613-1641.
31. Zhang, S., Duan, J., and Strelkoff, T. (2013). Grain-scale nonequilibrium sediment-transport model for unsteady flow. Journal of Hydraulic Engineering, Vol. 139(1), pp 22-36.
32. Xia, J., Lin. B., Falconer, A., and Wang, G. (2010). Modeling dam-break flows over mobile beds using a 2D coupled approach. Advances in Water Resources, Vol. 33(2), pp. 171-183.

33. Wu, W., Marsooli, R., and He, Z. (2012). A depth-averaged two-dimensional model of unsteady flow and sediment transport due to non-cohesive embankment break/breaching. *Journal of the Hydraulic Engineering*, Vol. 138(6), pp. 503-516.
34. Nichols, B. D. and Hirt, C. W. (1971). Improved free surface boundary conditions for numerical incompressible-flow calculations. *Journal of Computational Physics*, Vol. 8(3), pp. 434-448.
35. Hirt, C. W. and Nichols, B. D. (1981). Volume of fluid (VOF) method for the dynamics of free boundaries. *Journal of Computational Physics*, Vol. 39(1), pp. 201-225.
36. Harlow, F. H. and Welch, J. E. (1965). Numerical calculation of time-dependent viscous incompressible flow of fluid with free surface. *Physics of Fluids*, Vol. 8(12), pp. 2182-2189.
37. Noh, W. F., and Woodward, P. (1976). SLIC (Simple Line Interface Calculation). *Proceedings of the Fifth International Conference on Numerical Methods in Fluid Dynamics*, Vol. 59, pp. 330-340.
38. Youngs, D. L. (1982). Time-Dependent multi-material flow with large fluid distortion. *Numerical Methods for Fluid Dynamics*, K.W. Morton and M.J. Baines (eds.), New York. Academic Press, pp. 273-285.
39. Youngs, D. L. (1984). An Interface Tracking Method for a 3D Eulerian Hydrodynamics Code. Technical Report 44/92/35, AWRE.
40. Kothe, D. B., Rider, W. J., Mosso, S. J., Brock, J. S., and Hochstein, J. I. (1996). Volume tracking of interfaces having surface tension in two and three dimensions. Technical report AIAA 96-0859 , Los Alamos, NM.
41. Pilliod Jr., J. E. and Puckett, E. G. (2004). Second-order accurate volume-of-fluid algorithms for tracking material interfaces. *Journal of Computational Physics*, Vol. 199(2), pp. 465-502.
42. Torey, M. D., Cloutman, L. D., Mjolsness, R.C., and Hirt, C. W. (1985). NASA-VOF2D: A computer program for incompressible flows with free surfaces. Los Alamos National Laboratory Report, LA-10612-MS.
43. Muzaferija, S. and Peric, M. (1998). Computation of free-surface flows using interface tracking and interface-capturing methods. in O. Mahrenholtz and M. Markiewicz (eds.),

Nonlinear water wave interaction, Computational Mechanics Publications, Southampton, UK., pp. 59-100.

44. Muzaferija, S., Peric, M., Sames, P., and Schellin, P. (1998). A two-fluid Navier Stokes solver to simulate water entry. Twenty-Second Symposium on Naval Hydrodynamics, Washington, DC, pp. 638–649.
45. Ubbink, O. and Issa, R.I. (1999). A method for capturing sharp fluid interfaces on arbitrary meshes. *Journal of Computational Physics*, Vol. 153(1), pp. 26-50.
46. Osher, S. and Sethian, J.A. (1988). Fronts propagation with curvature-dependent speed: algorithms based on Hamilton-Jacobi formulation. *Journal of Computational Physics*, Vol. 79(1), pp. 12-49.
47. Lucy, L. B. (1977). A numerical approach to the testing of the fission hypothesis. *Astronomical Journal*, Vol. 82, pp. 1013-1024.
48. Gingold, R. A. and Monaghan, J. J. (1977). Smoothed particle hydrodynamics: Theory and application to non-spherical stars. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, Vol. 181, pp. 375-389.
49. Жайнаков А.Ж., А.Ы. Курбаналиев. Верификация открытого пакета OpenFOAM на задачах прорыва дамб. *Теплофизика и аэромеханика / Институт теплофизики СО РАН*, - Новосибирск, 2013. Т. 20, №4, с. 461-472.
50. Жайнаков А.Ж., А.Ы. Курбаналиев. Математическое моделирование задачи прорыва дамбы. *Вычислительные технологии*. - Новосибирск, 2013. Т. 18, №3, с. 12-21.
51. Sánchez-Cordero E., Gómez M., Bladé E. Three-dimensional numerical analysis of a dam-break using OpenFOAM. *Trudy ISP RAN/Proc. ISP RAS*, vol. 29, issue 6, 2017. pp. 311-320.
52. Храбрый А. И. Численное моделирование нестационарных турбулентных течений жидкости со свободной поверхностью: диссертация ... кандидата физико-математических наук: 01.02.05 / Храбрый Александр Иосифович [Место защиты: Санкт-Петербургский государственный политехнический университет].- Санкт-Петербург, 2014.- 154 с.

53. Патанкар С.В. Численные методы решения задач теплообмена и динамики жидкости: Пер. с англ. –М.: Энергоатомиздат, 1984. – 152с.
54. Ferziger J. H., Peric M. Computational Methods for Fluid Dynamics. Berlin: Springer Verlag, 2002. –423p.
55. Reda M. Abd El-Hady Rady 2D-3D Modeling of Flow Over Sharp-Crested Weirs. Journal of Applied Sciences Research, 2011. 7(12): 2495-2505.
56. Rezazadeh Shiva, Manafpour Mohammad, Ebrahimnejadian Hamze Three- dimensional simulation of flow over sharp crested weirs using volume of fluid method. Journal of applied engineering sciences, 2020. 10(1), pp.75-82.Критическое сравнение различных версий пакета OPENFOAM 11.
57. Weller, H.G., Tabor, G.R., Jasak, H., and Fureby, C. A tensorial approach to computational continuum mechanics using object-oriented techniques. Computers in Physics, 1998. 12 (6), pp. 620–631.
58. Jasak Hrvo je OpenFOAM: Open source CFD in research and industry. International Journal of Naval Architecture and Ocean Engineering, 2009. 1(2), pp.89-94.
59. Ubbink, O. Numerical Prediction of Two Fluid Systems with Sharp Interfaces. Ph.D. Thesis, University of London, London, UK, 1997.
60. 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. University of Coimbra, Coimbra, Portugal, 2013.
61. <https://github.com/OpenFOAM/OpenFOAM6/commit/46704f121b82bcd353a2b102cf0a05e8c98e5a83>. Official OpenFOAM Repository. Access data 30.09.2020.
62. Седов, Л. И. Механика сплошной среды. Москва. Т.2, 1970. 568 с.
63. Спицын, И.П., Соколова, В.А. Общая и речная гидравлика. Ленинград: Гидрометео- издат. 1990. 359 с.
64. <https://www.openfoam.com/documentation/user-guide/index.php/>.OpenFOAM19.06. User’s Guide. Access data 05.09.2020.
65. <https://www.openfoam.com/documentation/user-guide/index.php/>.OpenFOAM19.06. User’s Guide. Access data 05.09.2020.

66. <https://www.openfoam.com/documentation/user-guide/index.php/.OpenFOAM19.06>. User's Guide. Access data 05.09.2020.
67. <https://cfd.direct/openfoam/user-guide-v5/>. OpenFOAM 5.0. User's Guide. Access data 05.09.2020.
68. <https://cfd.direct/openfoam/user-guide-v6/>. OpenFOAM 6.0. User's Guide. Access data 05.09.2020.
69. <https://cfd.direct/openfoam/user-guide-v7/>. OpenFOAM 7.0 User's Guide. Access data 05.09.2020.
70. Patankar, S.V. Numerical heat transfer and fluid flow. Hemisphere Publishing Corporation, New York, 1980.
71. Versteeg H. K., Malalasekera W. An Introduction to Computational Fluid Dynamics: The Finite Volume Method, 2nd Edition. Pearson Education Limited, 2007, 503p.
72. <https://openfoam.org/release/2-3-0/multiphase/>. OpenFOAM 2.3.0: Multiphase Modelling Predictor-Corrector Semi-Implicit MULES.
73. https://openfoamwiki.net/index.php/OpenFOAM_guide/The_PIMPLE_algorithm_in_OpenFOAM. OpenFOAM guide/ The PIMPLE algorithm in OpenFOAM. Access data 05.09.2020.
74. Heyns, Johan A., and Oliver, F. Oxtoby Modelling surface tension dominated multiphase flows using the VOF approach. 6th European Conference on Computational Fluid Dynamics.2014.
75. Deshpande, S. S., Anumolu, L., and Trujillo, M. F. Evaluating the performance of the two-phase flow solver interFoam. Computational science and discovery, 2012. 5(1), 014016.
76. Hill P.D. The computer simulations of dispersed two-phase flows. Ph.D. Thesis, University of London, London, UK, 1998.
77. Rusche, H. Computational Fluid Dynamics of Dispersed Two-Phase Dynamics Flows of At Phase Fractions. Ph.D. Thesis, University of London, London, UK, 2003.12A.

78. <https://cfd.direct/openfoam/user-guide-v5/>. OpenFOAM 4.0. User's Guide. Access data 05.09.2020.
79. <https://www.openfoam.com/documentation/user-guide/index.php/>. OpenFOAM20.06. User's Guide. Access data 05.09.2020.
80. <https://cfd.direct/openfoam/user-guide-v8/>. OpenFOAM 8.0 User's Guide. Access data 05.09.2020.
81. <https://cfd.direct/openfoam/free-software/multiphase-interface-capturing/>. Interface Capturing in OpenFOAM. Access data 05.09.2020.
82. <https://github.com/OpenFOAM/OpenFOAM/commits/master/applications/solvers/multiphase/interFoam>. History for OpenFOAM-6/applications/solvers/multiphase/interFoam. Access data 05.09.2020.
83. <https://github.com/OpenFOAM/OpenFOAM-6/commit/da787200a6b208cf3fc4dfaa48b4438a3a038c1b>. OpenFOAM/OpenFOAM6/ddtScheme::fvcDdtPhiCoeff: Improved formulation providing better stability/accuracy balance. Access data 05.02.2021.
84. <https://github.com/OpenFOAM/OpenFOAM-dev/commit/b162c4818b9bbdb824db9e75baffef6ac7c5a7a0>. OpenFOAM/OpenFOAM-dev. ddtScheme::fvcDdtPhiCoeff: Reverted to previous flux-normalised scheme. Access data 05.02.2021.
85. W. Lai, A. Khan. 2018. Numerical solution of the Saint-Venant equations by an efficient hybrid finite-volume/finite-difference method. *Journal of Hydrodynamics*. 30(4), (2018) DOI: 10.1007/s42241-018-0020-y.
86. X. Ying, J. Jorgenson, S. S. Y. Wang. 2008. Modelling Dam-Break Flows Using Finite Volume Method on Unstructured Grid. *Journal of Engineering Application of Computational Fluid Mechanics*. 3:2, 184-194, <https://doi.org/10.1080/19942060.2009.11015264>.
87. R. Issa, D. Vouleau. 2006. 3D dambreaking. SPH European Research Interest Community SIG, Test case 2; March, 2006. Available from: http://app.spheric-sph.org/sites/spheric/files/SPHERIC_Test2_v1p1.pdf. [Accessed: 2019-04-15].

88. A. Zh. Zhainakov, A.Y. Kurbanaliev. 2013. Verification of the open package OpenFOAM ob dam break problems. Thermophysics and Aeromechanics . 20(4), (2013) DOI: 10.1134/S0869864313040082.
89. A. Lindsey, J. Imran, M. Chfudhry. 3D numericka simulation of partial breach dam-break flow using the LES and k- ϵ - turbulence models. New CreekUSA Hydraulic Research. (2013).Publ.CA 2012.Creek,Journal of <https://doi.org/10.1080/00221686.2012.734862>.
90. OpenFOAM Foundation. 2018. Available from: <https://openfoam.org/> [Accessed: 2019-03-30].
91. H. Ferziger and M. Peric, Computational Methods for Fluid Dynamics. 3rd Edition. Springer Verlag, Berlin, 2002. DOI: 10.1007/978-3-642-56026-2.
92. S.V. Patankar, Numerical Heat Transfer and Fluid Flow, Hemisphere York, 1980.
93. Willow <https://doi.org/10.1002/cite.330530323>. Corp., https://en.wikipedia.org/wiki/Willow_Creek,_California, [Accessed: 2019-02-20].
94. United States Geological Survey United States Topo 7.5-minute map California, <https://www.sciencebase.gov/catalog/item/58260258e4b01fad86e73226> , [Accessed: 2019-02-20].
95. Logvinovich, G.V.: Hydrodynamics of Flows with Free Boundaries, p. 215. Naukova Dumka, Kiev (1969)
96. Lai, W., Khan, A.A.: Numerical solution of the Saint-Venant equations by an efficient hybrid finite-volume/finite-difference method. J. Hydrodyn. 30(2), 189–202 (2018). <https://doi.org/10.1007/s42241-018-0020-y>.
97. Ying, X., Jorgenson, J., Wang, S.S.Y.: Modeling dam-break flows using finite volume method on unstructured grid. J. Eng. Appl. Comput. Fluid Mech. 3(2), 184–194 (2008). <https://doi.org/10.1080/19942060.2009.11015264>

98. Zhainakov, A.Zh., Kurbanaliev, A.Y.: Verification of the open package OpenFOAM ob dam break problems. Thermophys. Aeromech. 20(4) (2013). <https://doi.org/10.1134/S0869864313040082>.
99. Kurbanaliev, A.Y., Oichueva, B.R., Kalmurzaeva, A.T., Zhainakov, A.Zh., Kultaev, T.Ch.: Critical comparison of different versions of the OpenFOAM package on the spillway modeling problem. Comput. Technol. 26(2), 44–57 (2021). <https://doi.org/10.25743/ICT>. 2021.26.2.004
<http://www.ict.nsc.ru/jct/annotation/2026?l=eng>
100. Kurbanaliev, A.Y., Oichueva, B.R., Using OpenFOAM Multiphase Solver interFoam for Large Scale Modeling. http://www.iaeng.org/publication/WCECS2019/WCECS2019_pp366-370.pdf. Accessed 21 Feb 2021
101. OpenFOAM7 User Guide. <https://cfd.direct/openfoam/user-guide-v7/>. Accessed 10 Jan 2022.
102. Ferziger, J.H., Peric, M.: Computational Methods for Fluid Dynamics, p. 423. Springer, Heidelberg (2002). <https://doi.org/10.1007/978-3-642-56026-2>
103. USGS. <https://earthexplorer.usgs.gov/>
104. Versteeg, H.K., Malalasekara, W.: An Introduction to Computational Fluid Dynamics. The Finite Volume Method, 2nd edn., p. 520. Pearson Education Limited, Edinburgh (2007)
105. Patankar, S.V.: Numerical Heat Transfers and Fluid Flow. Hemisphere Publishing Corporation, New York (1980)

ПРИЛОЖЕНИЯ

Приложение 1

Листинг программы расчета для моделирования процесса распространения местности наводнения поймы реки Нарын, Кыргызстан.

```
/*-----*- C++ -*-----*\
===== |
\\ / Field | OpenFOAM: The Open Source CFD Toolbox
\\ / Operation | Website: https://openfoam.org
\\ / and | Version: 7
\\ / Manipulation |
/*-----*/

FoamFile
{
  Version 2.0;
  Format ASCII;
  Class volScalarField;
  Location "0";
  Object alpha.water;
}

// *****

Dimensions [0 0 0 0 0 0];
InternalField uniform 0;
BoundaryField
{
  MaxY
  {
    Type inletOutlet;
    InletValue uniform 0;
    value uniform 0;
  }
}
```

```

minX
{
    type        zeroGradient;
}
maxX
{
    type        zeroGradient;
}
minZ
{
    type        zeroGradient;
}
maxZ
{
    type        zeroGradient;
}
narynRiver
{
    type        zeroGradient;
}
}
// ***** //
/*-----*- C++ -*-----*\
|=====          |
|\  / Field      | OpenFOAM: The Open Source CFD Toolbox    |
| \| / Operation  | Version: 7                                |
| \| / And        | Web:   http://www.OpenFOAM.org           |
| \| \ Manipulation |                                         |
\*-----*/
FoamFile

```

```

{
  version 2.0;
  format  ascii;
  class   volScalarField;
  object  p_rgh;
}
// * * * * *

```

```

dimensions [1 -1 -2 0 0 0 0];

```

```

internalField uniform 0;

```

```

boundaryField

```

```

{
  maxY
  {
    type      totalPressure;
    p0        uniform 0;
    U         U;
    phi       phi;
    rho       rho;
    psi       none;
    gamma     1;
    value     uniform 0;
  }

```

```

minX
{
  type      zeroGradient;
  value     uniform 0;

```

```

}

maxX
{
    type        zeroGradient;
    value       uniform 0;
}
minZ
{
    type        zeroGradient;
    value       uniform 0;
}
maxZ
{
    type        zeroGradient;
    value       uniform 0;
}

narynRiver
{
    type        zeroGradient;
    value       uniform 0;
}

}

// *****
//
/*-----*- C++ -*-----*\
|=====|
|\ / Field | OpenFOAM: The Open Source CFD Toolbox |

```

```

| \ / Operation | Version: 7.0 |
| \ / And | Web: http://www.OpenFOAM.org |
| \ / Manipulation |
\*-----*/

```

```
FoamFile
```

```

{
  version 2.0;
  format  ascii;
  class   volVectorField;
  location "0";
  object  U;
}
// *****
dimensions [0 1 -1 0 0 0];
internalField uniform (0 0 0);
boundaryField
{
  maxY
  {
    type      pressureInletOutletVelocity;
    value     uniform (0 0 0);
  }
  minX
  {
    type      fixedValue;
    value     uniform (0 0 0);
  }
  maxX
  {
    type      fixedValue;

```

```
    value    uniform (0 0 0);
}
minZ
{
    type     fixedValue;
    value    uniform (0 0 0);
}
maxZ
{
    type     fixedValue;
    value    uniform (0 0 0);
}
narynRiver
{
    type     fixedValue;
    value    uniform (0 0 0);
}
}
// ***** //
```

КЫРГЫЗ РЕСПУБЛИКАСЫ



КЫРГЫЗПАТЕНТ

ЭЭМ үчүн программага

КУБӨЛҮК

№ 735

Аталышы: *Нарын дарыясынын (Кыргызстан) жайылмасындагы ири масштабдуу суу ташкынынын кесепеттерин математикалык моделдештирүү жана визуалдаштыруу үчүн маалыматтарды даярдоо программаларынын топтому*

Автору (авторлору): *Курбаналиев Абдикерим Ырысбаевич
Ойчужева Бурулгүл Рахманбердиевна (KG)*

Укук ээси (ээлери): *Курбаналиев Абдикерим Ырысбаевич,
Ойчужева Бурулгүл Рахманбердиевна (KG)*

KYRGYZPATENT

Алгачкы жарыяланган датасы, орду: 26.01.2022-ж., KG

Өтүнмөнүн № 20220012.6

Кыргыз Республикасынын ЭЭМ үчүн программаларынын мамлекеттик реестринде катталган: 15.03.2022-ж.



Директор

Р. Керимбаева

КЫРГЫЗСКАЯ РЕСПУБЛИКА



КЫРГЫЗПАТЕНТ

СВИДЕТЕЛЬСТВО

на программу для ЭВМ

№ 735

Название: *Комплекс программ подготовки данных для математического моделирования и визуализаций последствий крупномасштабного наводнения в пойме реки Нарын, Кыргызстан*

Автор(ы): *Курбаналиев Абдикерим Ырысбаевич
Ойчуева Бурулгул Рахманбердиевна (KG)*

Правообладатель(и): *Курбаналиев Абдикерим Ырысбаевич
Ойчуева Бурулгул Рахманбердиевна (KG)*

КЫРГЫЗПАТЕНТ

Дата и место первого опубликования: 26.01.2022 г., KG

Заявка № 20220012.6

Зарегистрировано в Государственном реестре программ для ЭВМ Кыргызской Республики: 15.03.2022 г.

КЫРГЫЗСКАЯ РЕСПУБЛИКА



КЫРГЫЗПАТЕНТ

СВИДЕТЕЛЬСТВО

на программу для ЭВМ

№ 736

Название: *Программа для создания трехмерной расчетной сетки с учётом сложной топологии реальной местности при помощи утилиты snappyHexMesh пакета OpenFOAM, река Нарын, Кыргызстан*

Автор(ы): *Курбаналиев Абдикерим Ырысбаевич
Ойчуева Бурулгул Рахманбердиевна (КГ)*

Правообладатель(и): *Курбаналиев Абдикерим Ырысбаевич,
Ойчуева Бурулгул Рахманбердиевна (КГ)*

КЫРГЫЗПАТЕНТ

Дата и место первого опубликования: 22.01.2022 г., КГ

Заявка № 20220013.6

Зарегистрировано в Государственном реестре программ для ЭВМ Кыргызской Республики: 15.03.2022 г.

КЫРГЫЗ РЕСПУБЛИКАСЫ



КЫРГЫЗПАТЕНТ

ЭЭМ үчүн программага
КУБӨЛҮК

№ 736

Аталышы: *Нарын дарыясынын (Кыргызстан) ОрепFOAM пакетинин snарруHexMesh утилиты-кызматынын жардамы менен реалдуу жердин татаал топологиясын эске алуу менен үч өлчөмдүү эсептик торду түзүү үчүн программа*

Автору (авторлору): *Курбаналиев Абдикерим Ырысбаевич
Ойчуева Бурулгүл Рахманбердиевна (KG)*

Укук ээси (ээлери): *Курбаналиев Абдикерим Ырысбаевич
Ойчуева Бурулгүл Рахманбердиевна (KG)*

KYRGYZPATENT

Алгачкы жарыяланган датасы, орду: *22.01.2022-ж., KG*

Өтүнмөнүн № *20220013.6*

Кыргыз Республикасынын ЭЭМ үчүн программаларынын мамлекеттик реестринде катталган: *15.03.2022-ж.*



Директор

Р. Керимбаева

КЫРГЫЗ РЕСПУБЛИКАСЫНЫН
ӨЗГӨЧӨ КЫРДААЛДАР
МИНИСТРЛИГИ
КЫРГЫЗ РЕСПУБЛИКАСЫНЫН
ӨЗГӨЧӨ КЫРДААЛДАР
МИНИСТРЛИГИНЕ КАРАШТУУ
«СЕЛ жана СУУ ТАШКЫНДАРЫНАН
КОРГОО» КЫЗМАТЫ



ОШ ОБЛУСТУК СЕЛ ЖАНА СУУ
ТАШКЫНДАРЫНАН КОРГОО
БӨЛҮМҮ

714000, Ош ш., Муминова көч.11
тел: факс: (03222) 5-69-12
email: Alymbek1954@mail.ru

МИНИСТЕРСТВО
ЧРЕЗВЫЧАЙНЫХ СИТУАЦИЙ
КЫРГЫЗСКОЙ РЕСПУБЛИКИ
СЛУЖБА «СЕЛЬВОДЗАЩИТА»
ПРИ
МИНИСТЕРСТВЕ
ЧРЕЗВЫЧАЙНЫХ СИТУАЦИЙ
КЫРГЫЗСКОЙ РЕСПУБЛИКИ

ОШСКИЙ ОБЛАСТНОЙ ОТДЕЛ
«СЕЛЬВОДЗАЩИТА»

714000, г.Ош ул. Муминова-11
тел: факс: (03222) 5-69-12
email: Alymbek1954@mail.ru

13.04.2022 № 01-11/23

Диссертационному совету

Акт о внедрении результатов диссертационной работы

1. Ойчуева Бурулгул Рахманбердиевна
2. Диссертации на соискание учёной степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.02.05-Механика жидкости, газа и плазмы на тему «Трёхмерное математическое моделирование процессов наводнения»
3. Краткая аннотация: В данной работе получены следующие результаты:
 - Разработана цифровая база поймы реки Нарын, используемая при построении расчетной сетки для предсказания последствий наводнения местностей, расположенных ниже по течению.
 - Метод автоматического построения трёхмерной расчетной сетки с помощью snappyHexMesh для задач обтекания модели здания и реальной местности поймы реки Нарын около посёлка Шамалды- Сай.
 - Проведён трёхмерный расчет возможного наводнения в посёлки Шамалды- Сай в пойме реки Нарын, Кыргызстан.
- 4.Эффект от внедрения: Использование результатов научной работы позволяет составить карту затопления нижележащих местностей в посёлки Шамалды-Сай в пойме реки Нарын, Кыргызстан, уменьшить человеческие и технико-экономические потери.
- 5.Место и время внедрения: г. Ош, ул. Муминова-11, 714000, Ошский областной отдел службы «Сельводзащита» при МЧС КР, 13.04.2022.
6. Форма внедрения: Результаты диссертационной работы

Начальник



Курманбеков А.



«Утверждаю»

ОшГУ, профессор

К.Г. Кожобеков

К.Г. Кожобеков 2022г.

**Акт внедрения результатов научно-исследовательских,
научно-технических работ, (или) результатов научной и (или) научно
технической деятельности
результатов диссертационной работы Ойчуевой Бурулгул Рахманбердиевны
в учебный процесс**

1. Ойчуева Бурулгул Рахманбердиевна
2. Диссертация на тему «Трёхмерное математическое моделирование процессов наводнения» на соискание учёной степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.02.05 «Механика жидкости, газа и плазмы»
3. В данной работе разработана цифровая база поймы реки Нарын, Кыргызстан и горной местности Willow Greek, USA, используемая в по следующем при построении расчетной сетки для предсказания последствий наводнения этих местностей. При помощи утилиты snappyHexMesh создан метод автоматического построения трёхмерной расчетной сетки в рамках пакета OpenFOAM для реальной местности. Впервые проведён трёхмерный расчет возможного наводнения в горной местности Willow Greek, California, USA и в пойме реки Нарын около посёлка Шамалды-Сай, Кыргызстан.
4. **Эффект от внедрения.** Внедрение в учебный процесс факультета математики и информационной технологий в качестве специального курса для студентов старших курсов, магистрантов и аспирантов специальностей 510100 Математика, 510200 Прикладная математика и информатика, 710300 Прикладная информатика, 710100 Информатика и вычислительная техника, 710200 Информационные системы и технологии позволить слушателям освоит навыки решения актуальных проблем науки и техники с использованием современных программных пакетов и информационных технологий.
5. Место и время внедрения г. Ош, Ленина 331, ОшГУ, ФМИТ, 16.01.22, 14:00.

6. Форма внедрения

№ п/п	Название работы	Вид проведения
1.	Трёхмерное математическое моделирование процессов наводнения	Лекция
2.	Тестовые задачи моделирование двухфазных течений	Лабораторная работа

Декан факультета
математики и информационной
технологии к.ф.-м.н., доцент:



У. А. Сопуев

Аспирант
Подписи заверяю начальник отдела
кадров к.ф.-м.н., доцент:




Б. Р. Ойчуева



Г. Турдубаева

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ КЫРГЫЗСКОЙ РЕСПУБЛИКИ



ОШСКИЙ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ
ИМЕНИ М.М. АДЫШЕВА



Сертификат

выдан 2-йсе Гулрулай Рахманбердиевде

за активное участие в работе Международной
научно-практической конференции

**«ЭКОЛОГИЯ И ПРИРОДОПОЛЬЗОВАНИЕ:
АКТУАЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ НАУКИ, ПРАКТИКИ И
ОБРАЗОВАНИЯ»,**
посвященной Году развития регионов в Кыргызской
Республике и 20-летию юбилею кафедры
«ЭКОЛОГИЯ И ОХРАНА ОКРУЖАЮЩЕЙ СРЕДЫ»

Ректор ОшТУ, профессор

Проректор по НИОшТУ, профессор



Абидов А.О

Шамшиев Б.Н.

г. Ош, 2018г.

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ КЫРГЫЗСКОЙ РЕСПУБЛИКИ
ОШСКИЙ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ
имени академика М.М.АДЫШЕВА



СЕРТИФИКАТ

выдан Бурчуну Рамазбердиеву!
за активное участие в работе Международной научно-практической конференции

“АКТУАЛЬНЫЕ ПРОБЛЕМЫ НАУКИ, ТЕХНИКИ И ОБРАЗОВАНИЯ”,
посвященной 65-летию со дня рождения академика инженерной академии
Кыргызской Республики, д.т.н., профессора **Сейтова Болотбека Мукаевича.**



Ректор ОшГУ, профессор
Абидов А.О.

Ош-2019



КЫРГЫЗ РЕСПУБЛИКАСЫНЫН БИЛИМ БЕРУУ ЖАНА
ИЛИМ МИНИСТРЛИГИ
ОШ МАМЛЕКЕТТИК УНИВЕРСИТЕТИ



СЕРТИФИКАТ

2019-жылдын 13-15-июнунда ОшМУнун “Ак-Буура” эс алуу аймагында өткөрүлгөн Жаш окумуштуулардын жайкы мектебинин

“**Илимий-изилдөө иштеринин методологиясы**” деген

темадагы тренинг-семинарына
активдүү катышкандыгы үчүн

*Ойчуева Бурулча Рахманбердиевна*га

берилет.



/ ОшМУнун ректору,
филол.-и.-а., профессор

К.А. Исаков



МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ
КЫРГЫЗСКОЙ РЕСПУБЛИКИ
ОШСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ
МЕЖДУНАРОДНЫЙ МЕДИЦИНСКИЙ ФАКУЛЬТЕТ

ДИПЛОМ

І СТЕПЕНИ

IV МЕЖДУНАРОДНАЯ НАУЧНАЯ КОНФЕРЕНЦИЯ
«МЕДИЦИНСКАЯ НАУКА И ИССЛЕДОВАНИЕ»

НАГРАЖДАЕТСЯ

ОЙЧУЕВА БУРУЛГУЛ РАХМАНБЕРДИЕВНА

аспирант 4-курса международного медицинского факультета ОшГУ
автор научного доклада

«ТРЕХМЕРНОЕ МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ
ПРОЦЕССОВ НАВОДНЕНИЯ»

Декан международного
медицинского факультета ОшГУ, профессор:



А.А.Алимов Р.К.

Ош – 2022



MINISTRY OF EDUCATION AND SCIENCE OF THE KYRGYZ REPUBLIC
 OSH STATE UNIVERSITY
 INTERNATIONAL HIGH SCHOOL OF MEDICINE



CERTIFICATE

is awarded to

Dichuova Burulai Rahmanberdievna

for active participation in the International Scientific Conference on
 "Innovations in the field of Medical Education and Science" (6 hours)
 May 27, 2022



Rector of Osh State University,
 Professor Nozhozbekov K.G.

Rector of JHSM,
 Professor Akhyrbayev S.M.



Osh - 2022

МИНИСТЕРСТВО ПРОСВЕЩЕНИЯ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО
ОБРАЗОВАНИЯ «АЛТАЙСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ГУМАНИТАРНО-ПЕДАГОГИЧЕСКИЙ
УНИВЕРСИТЕТ ИМЕНИ В.М. ШУКШИНА»
ХОВДСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ
ТАЛАССКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ



СЕРТИФИКАТОМ УЧАСТНИКА



*XXIV Международной научно-практической конференции молодых
ученых и студентов*

**«НАУКА И ОБРАЗОВАНИЕ:
ПРОБЛЕМЫ И ПЕРСПЕКТИВЫ»,**

15 апреля 2022 года, наукоград Бийск, Алтайский

край награждается

Ойчуева Бурулгул Рахманбердиевна Ректор



Л.А. Мокрецова