

**Кыргызский государственный технический университет
им. И. Раззакова
Кыргызско-российский славянский университет
им. Б. Ельцина**

Диссертационный совет Д. 01.22.652

На правах рукописи

УДК 532.546

Ойчуева Бурулгул Рахманбердиевна

**Трёхмерное математическое моделирование
процессов наводнения**

Специальность 01.02.05 – Механика жидкости, газа и плазмы

**Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук**

Бишкек- 2023

Работа выполнена на кафедре естественных наук и математики
Ошского государственного университета

Научный руководитель: доктор физико-математических наук, доцент
Курбаналиев Абдикерим Ырысбаевич Заведующий
кафедрой естественных наук и математики Ошского
государственного университета.

Официальные
оппоненты:

1. Доктор физико-математических наук,
профессор кафедры «Электроники и
теоретической физики» КНУ им. Ж.
Баласагына, Чечейбаев Байыш Чечейбаевич.
2. Доцент кафедры «Прикладная математика и
информатика» ИНИТ КГУСТА, к.ф.-м.н.,
Орозбекова Аида Кубанычбековна

Ведущая организация:

Кыргызский государственный университет им.
И. Арабаева, 720026, г. Бишкек, ул. Раззакова
51А.


Защита состоится « 17 » февраля 2023 г. в 14:00 часов на заседании
диссертационного совета Д 01.22.652 по защите диссертаций на
соискание ученой степени кандидат наук при Кыргызском
Государственном техническом университете им. И. Раззакова
Кыргызско-Российский Славянский университет им. Б.Ельцина по адресу:
720044, Кыргызская Республика, г. Бишкек, пр. Мира, 66. Ауд.1/259.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеках Кыргызского
Государственного технического университета им. И. Раззакова и
Кыргызско-Российский Славянский университет им. Б.Ельцина.

Автореферат разослан « 16 » февраля 2023 г.

Ученый секретарь

диссертационного совета,

кандидат физико-математических наук, доцент  Т.Т. Кожошов

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

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. Разнообразие явлений и возможных сценариев порождает множество подходов к их компьютерному моделированию. В качестве примера можно отметить моделирование океанических аномалий с помощью уравнений динамики океана, распространение цунами на основе уравнений мелкой воды, схода оползней и селевых потоков на основе различных модификаций уравнений гидродинамики, истечение лавы с помощью дискретных динамических систем, или схода снежной лавины, используя уравнения динамики гранулированных смесей.

В настоящей работе изучается подход, позволяющий моделировать многие из перечисленных выше событий и явлений, принимая в расчет их реальную физическую и геометрическую сложность. Кроме того, характеристики русла реки ниже по течению от плотины, а также наличие препятствий на пути прорыва плотины, таких как искусственные или естественные препятствия, такие как мосты, деревья и местные навски, влияют на динамику потока, что может привести к образованию гидравлических скачков и отражению волны наводнения. Соответственно, точное прогнозирование параметров наводнения, таких как время прибытия, профили свободной поверхности и профили скорости потока, имеет важное значение для снижения опасности.

Исследование начальной стадии прорыва плотины проведено в этой диссертационной работе [Saeid Esmaeeli Mohsenabadi Numerical Modeling of The Initial Stages of Dam-Break Problems, 2021] 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.

Исследования в этой задаче [Syamsuri, OpenFOAM Based Approach for the Prediction of the Dam Break with an Obstacle, 2020] оценка точности решателя для задач категории ударной волны на основе экспериментальных результатов предыдущих исследователей и других методов численного решения по сравнению с результатами этого решателя. Различные аспекты потока, такие как высота свободной поверхности до и после первоначального удара, наблюдались на глубине. Метод, используемый в этом исследовании, представляет собой

численное моделирование вычислений с использованием подхода OpenFOAM, преимущество которого заключается в более точном и быстром времени моделирования.

В следующем исследовании [Математическое моделирование внутренних и внешних одно- и двухфазных турбулентных течений на основе метода контрольных объемов. Курбаналиев Абдикерим Ырысбаевич, Кыргызстан, Ош, 2014.] иллюстрированы способы применения численного моделирования крупномасштабных гидродинамических расчетов процесса наводнения местностей вблизи плотин Андижанского и Папанского водохранилищ вблизи г. Ош, Кыргызстан.

Связь темы диссертации с крупными научными программами (проектами) или основными научно-исследовательскими работами. 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 горный местности Willow Greek, California, USA и вблизи посёлка Шамалды-Сай, Кыргызстан).

Задачи исследования:

- Верификация 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 работы.

- Показано, что при моделировании задачи водослива показывают, что 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 для момента времени $t=3.1\text{с}$, разница в максимальных значениях давления в точках P7 и P8 составила 6.34%, 18.5%, 16.37% и 3.26% 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.
- Впервые проведён расчёт возможного наводнения в горной местности Willow Greek, USA и около поселка Шамалды-Сай, Кыргызстан. Обнаружено, что для трёх различных начальных высот водного столба $H_0=20\text{м}$, 25м , 30м , 35м и 40м площади затопления имеют разные значения с ростом начальной высоты растёт площадь затопления в зависимости от топологии местности.
- Показано, что время распространения волны прорыва местности до определенной точки зависит от первоначальной высоты водного столба.

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 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, 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». ОшТУ, 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». ОшТУ, 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.**
- **5 th 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 12 научных статьях из них 2 авторских свидетельствах, в том числе в научных журналах за пределами Кыргызской Республики, которые входят в базы данных Scopus (3), РИНЦ (2).

Структура и объем диссертации. Диссертационная работа включает: введение, три главы основного текста и выводы, которые приведены на 148 страницах, список использованной литературы из 179 наименований, 28 рисунков, 20 таблицы и 3 приложений.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Во введении представлены краткие сведения об актуальности выбранной темы, связи диссертационной работы с тематическим планом научно- исследовательских работ, цели и задачах, научной новизне работы, практической значимости полученных результатов, основных положениях, выносимых на защиту, личном вкладе соискателя, апробации результатов исследования, данные о публикации результатов диссертации, ее объем и структуре.

В первой главе «Обзор литературы» рассмотрены современные методы моделирования турбулентных течений. Приведены

приближения уравнений Навье–Стокса для расчета турбулентных двухфазных течений, с учетом их возможностей и ограничений. Приведены наиболее известные модели турбулентности, предназначенные для замыкания усредненных по Рейнольдсу. Выбрана математическая модель, отвечающая поставленным требованиям.

Во второй главе «Методология и методы исследования» приведены способы применения метода контрольных объемов для дискретизации обобщенного уравнения переноса для обобщенной величины. Данные методы могут быть применены к любому уравнению, которое описывает перенос скалярной величины, например, кинетическая энергия турбулентности, температура, концентрация. Процедура дискретизации каждого члена обобщенного уравнения сохранения рассматривается по очереди. Приведены методы использования разностных схем для конвективно-диффузионной задачи, а также рассмотрены различные методы интерполяции для расчета скорости на грани.

Объектом исследования является двухфазные турбулентные течения несжимаемой жидкости и газа.

Предмет исследования заключается в моделировании процессов наводнения в реальных местностях.

В третьей главе «Трёхмерное математическое моделирование процессов наводнения» приведены результаты собственных исследований по тематике диссертационной работы.

Задача-1. Геометрия рассматриваемой задачи приведена на рисунке 3.1.

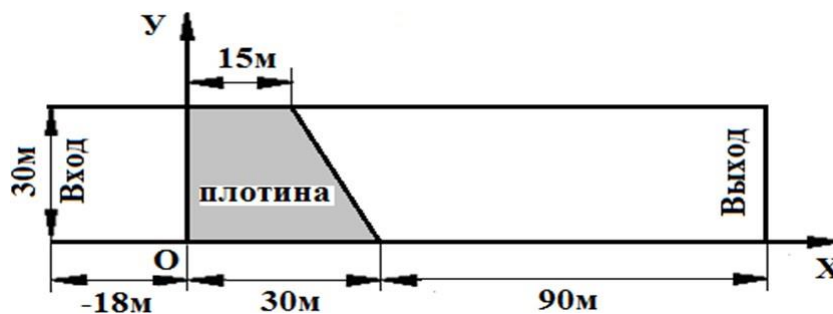


Рисунок 3.1- Геометрия задачи

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.

Целью работы была демонстрация возможностей решателя *interFoam* различных версий открытого пакета *OpenFOAM*.

В задачах моделирования внешних течений со свободной границей начальное распределение объемной доли воды *alpha. water* было неоднородным, поскольку часть расчетных ячеек заполнена водой. На неподвижных твердых стенках расчетной области задано условие прилипания, что определяет равенство нулю всех компонентов вектора

скорости. Для давления и объемной доли воды заданы условия непроницаемости – нулевой градиент по нормали этих величин; для кинетической энергии турбулентности k и скорости её диссипации ε граничные условия задавались при помощи аппарата пристеночных функций.

Для визуализации результатов численного моделирования использовался пакет Paraview. Представлено распределение объемной доли воды для моментов времени $t=0$ с, 6с, 20с, 30 и 46с. Здесь красный цвет соответствует ячейкам полностью водой, а синий цвет соответствует ячейкам, где вода полностью отсутствует, а присутствует только воздух. Разные оттенки цветов от красного до синего показывают положение границы раздела вода-воздух. На рисунке 3.4 показана объемная доля воды в разные моменты времени.

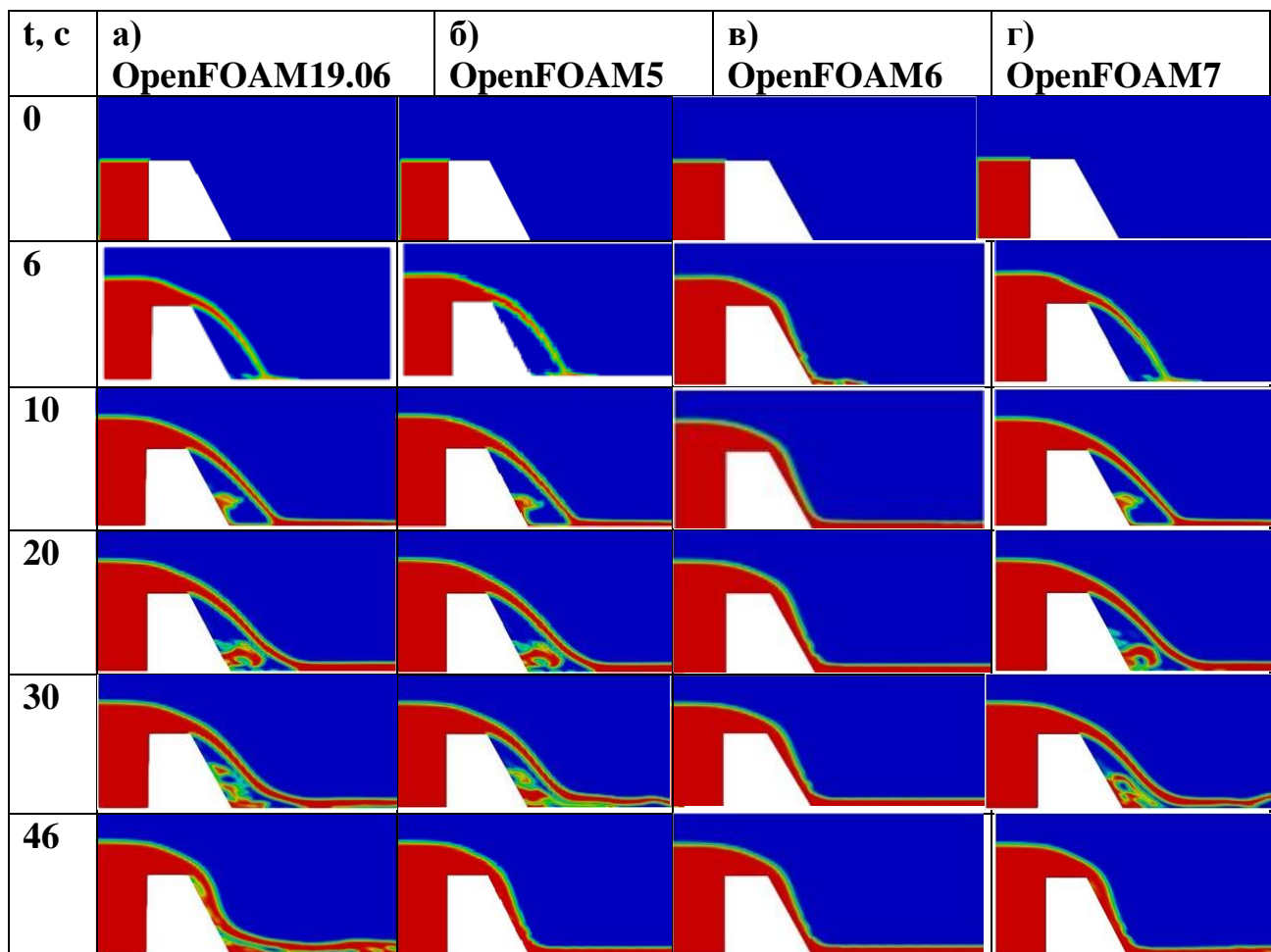
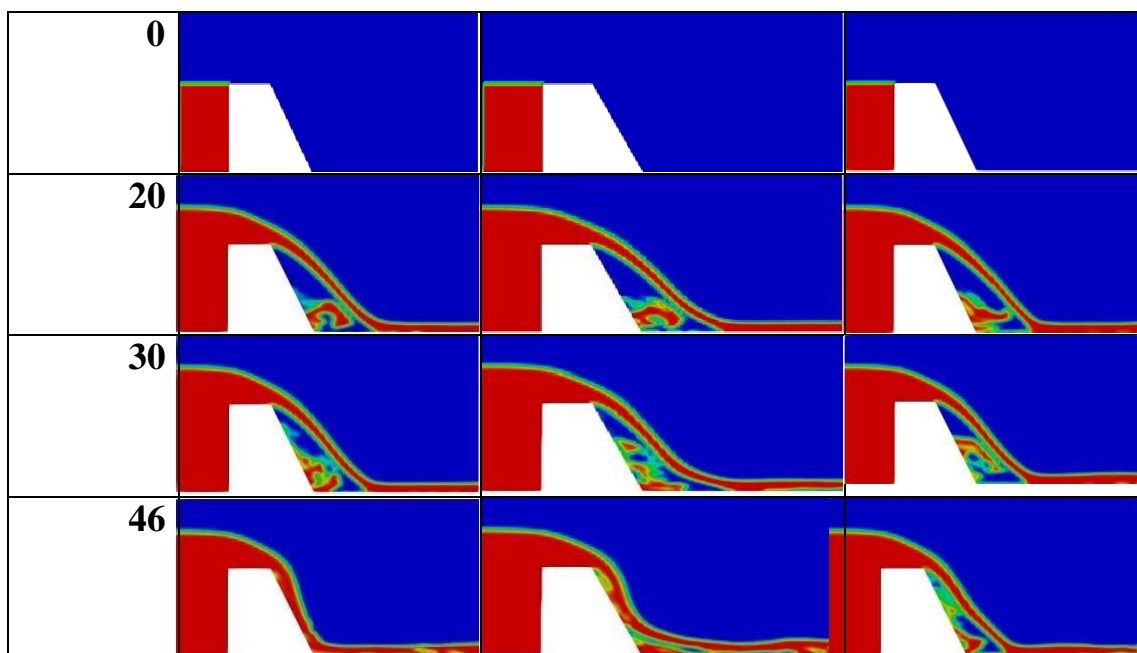


Рисунок 3.4 - Объемная доля воды в разные моменты времени

Кроме того, проведены расчеты с использованием более старой OpenFOAM4 и более новых OpenFOAM20.06 и OpenFOAM8 версий (см. рисунок 3.5).

t, с	а) OpenFOAM4	б) OpenFOAM20.06	в) OpenFOAM8
---------	--------------	------------------	--------------



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

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. Расчеты 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 заключается в следующем. Во-первых, в пакете OpenFOAM6, существовавший ранее отдельный 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 Рунге-Кутты на совмещенной сетке коэффициент `fvDdtPhiCoeff` для вычисления потоков массы на гранях ячеек был изменен в целях улучшения стабильности/точности и исключения осцилляций давления при высоких числах Куранта. А именно, в пакете OpenFOAM5 при вычислении коэффициента `fvDdtPhiCoeff` значение плотности с текущего временного шага использовано наряду с значением потока массы с предыдущего временного шага, а в OpenFOAM6 коэффициент `fvDdtPhiCoeff` вычисляется с использованием значений плотности и потока массы с предыдущего временного шага.

Наши расчеты 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.

В целях дальнейшего исследования в этом направлении необходимо проведение аналогичных расчетов для других видов водослива.

Задача-2. Моделирование наводнения в модели городской местности. Рассматривается задача моделирования симметричного разрушения дамбы в прямоугольном канале [Fraccarollo, L., Toro, E. F. , (1995)]. Расположенный слева резервуар, имеющий размеры **1м×2м×0.8м** заполнен водным столбом высотой **0.6м**. Нарисунке 3.7. показана геометрия рассматриваемой задачи.

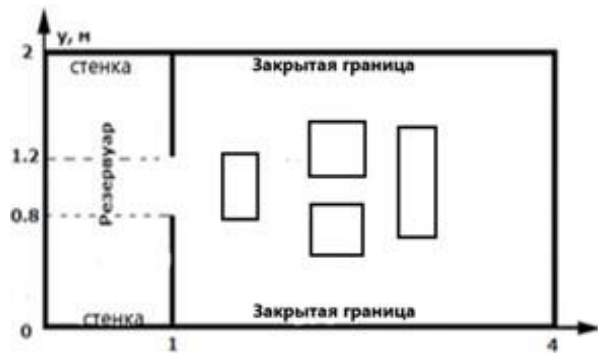
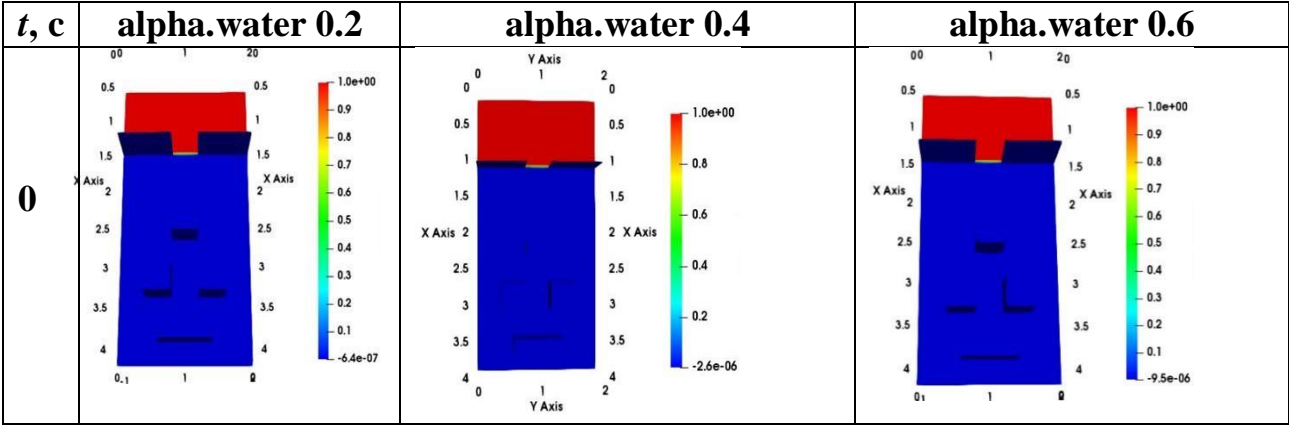


Рисунок 3.7 – Геометрия рассматриваемой задачи (вид сверху).

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



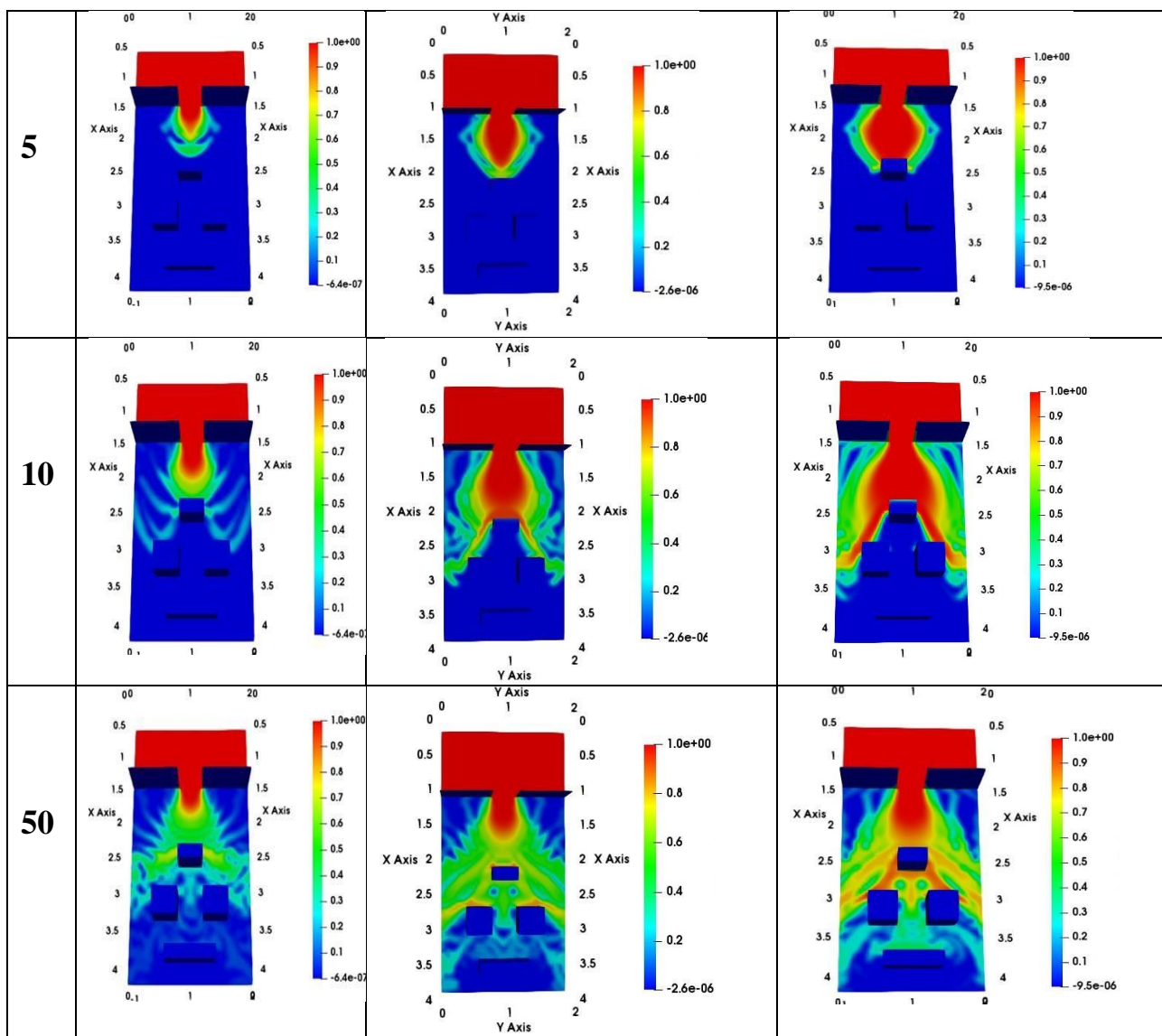


Рисунок 3.9 - Распределение объемной доли воды

На рисунке 3.10а-в приведены поле распределения модуля скорости, где отчетливо видны зоны возвратных, рециркуляционных течений после зданий.

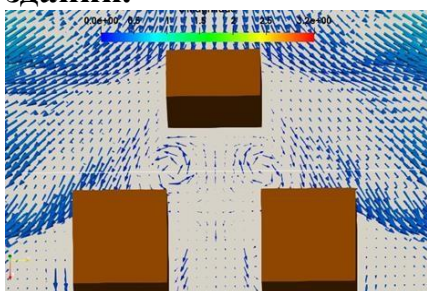


Рисунок 3.10а - Поле модуля скорости после первого здания

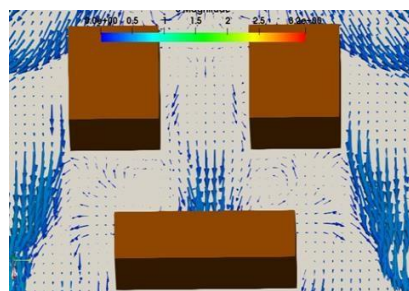


Рисунок 3.10б - Поле модуля скорости после второго ряда зданий

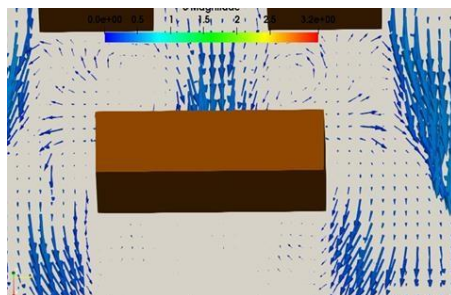


Рисунок 3.10в - Поле модуля скорости около третьего здания

На рисунке 3.12 показаны графики численных результатов высоты потока воды (сплошная линия) и соответствующих экспериментальных данных (маркеры).

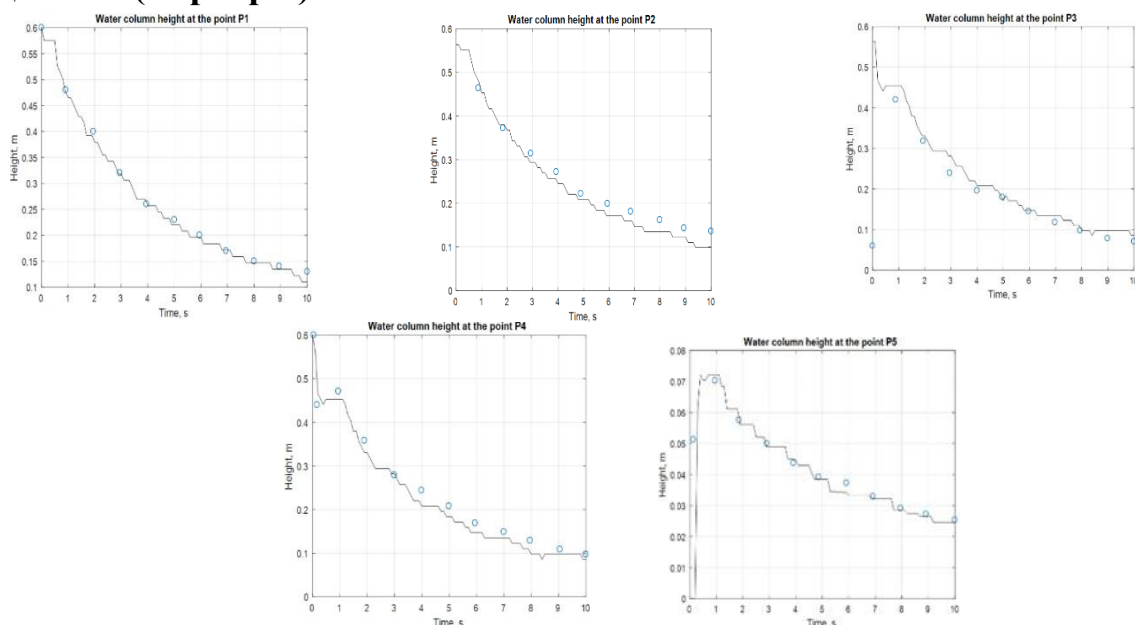
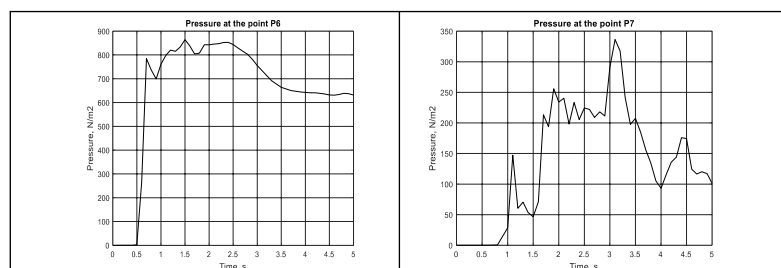


Рисунок 3.12 - Изменения во времени высоты водного потока в точках P1, P2, P3, P4 и P5

На рисунках 3.13. 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 $H=0.2\text{м.}$ и $H=0.4\text{м.}$ Передний фронт волны прорыва достигает первое здание в течении 0.5 с и давление достигает значения около 800 Н/м^2 .



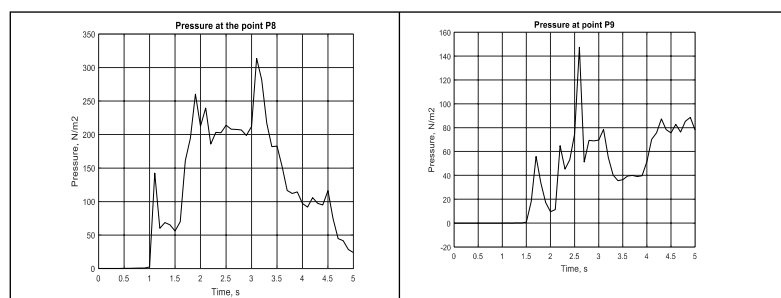


Рисунок 3.13а - Изменение давления в точках P6, P7, P8 и P9. H=0.2м

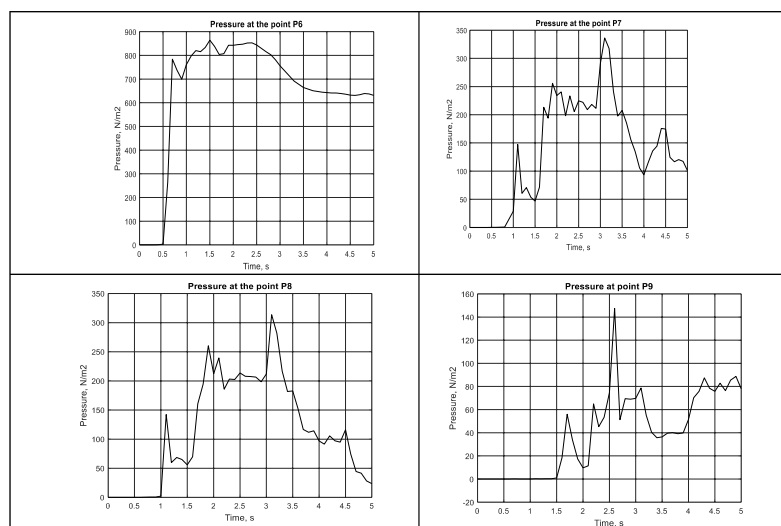


Рисунок 3.13б - Изменение давления в точках P6, P7, P8 и P9. H=0.4м

Обнаружено, для момента времени $t=3.1$ с, разница в максимальных значениях давления в точках P7 и P8 составила 6.34% и 18.5%, для начальных высот $H=0.2$ м и $H=0.4$ м соответственно.

Задача-3. Моделирование процесса распространения волны прорыва горной местности Willow Creek, California, USA. 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.

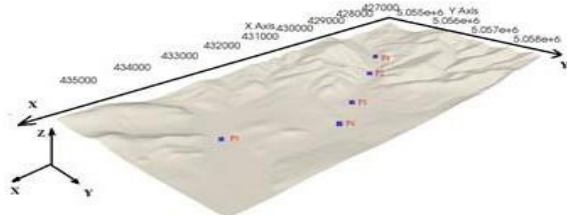


Рисунок 3.14-Местность Willow Creek.

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 процессанаводнения. Конечное общее количество вычислительных ячеек после использования утилиты snappyHexMesh равно 450705.

Распределения объемной доли воды для начальной высоты водного столба $H=20\text{м}$ в разные моменты времени представлены на рисунках 3.15аг.

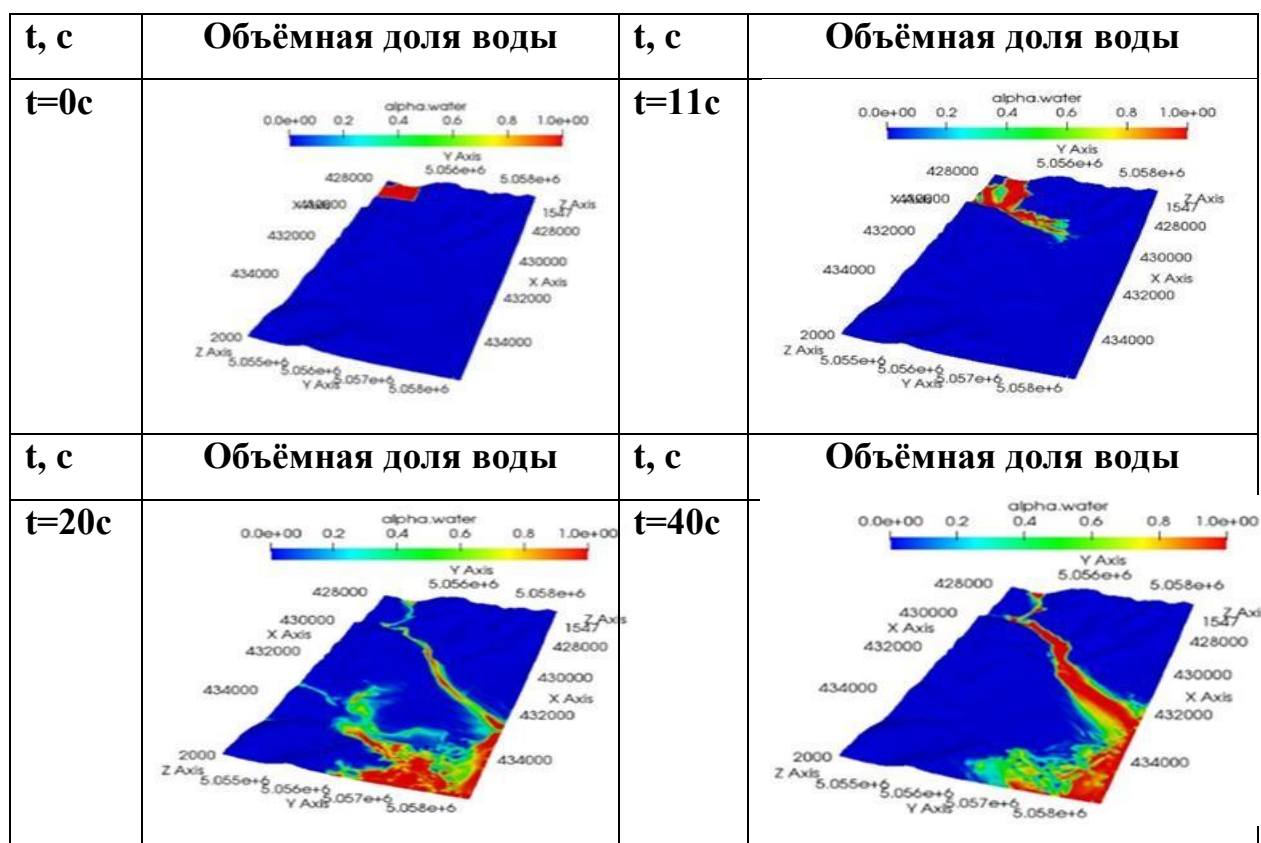
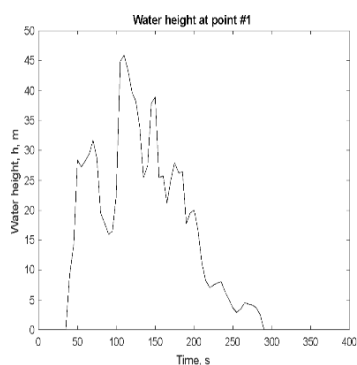


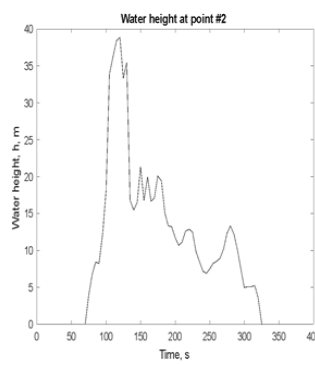
Рисунок 3.15 - Объёмная доля воды в разные моменты времени

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

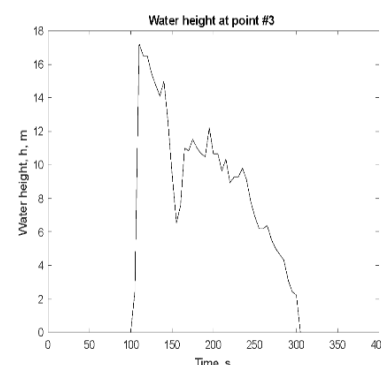
Изменения высоты потока воды в разных точках P1-P5 представлены на следующих рисунках 3.16.



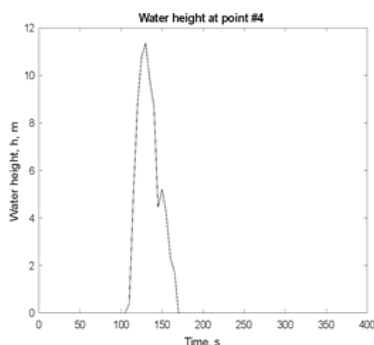
Высота водного потока в точке P1



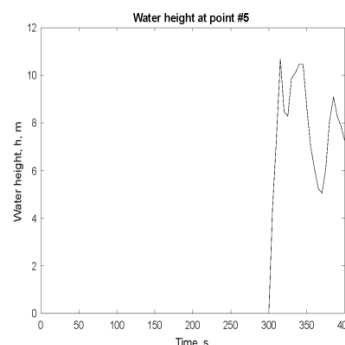
Высота водного потока в точке P2



Высота водного потока в точке P3



Высота водного потока в точке P4



Высота водного потока в точке P5

Рисунок 3.16 - Высота водного потока в разных точках P1-P5

Задача-4. Математическое моделирование и визуализация последствий крупномасштабного наводнения вблизи поселка Шамалды-Сай, Кыргызстан.

Эффективность применяемых моделей и компьютерных технологий иллюстрируется на примере наводнения вблизи поселка Шамалды-Сай, Кыргызстан, рельеф местности которого представлен на рисунке 3.18.

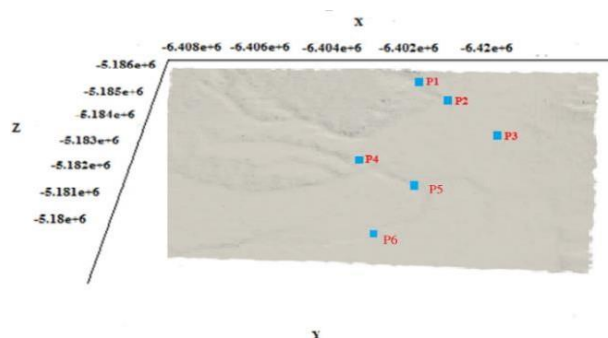


Рисунок 3.18 - Трехмерная расчетная область, Шамалды-Сай

Координаты 6 реперных точек приведены в табл. 3.16.

Таблица 3.16. – Координаты 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 рисунках 3.19.

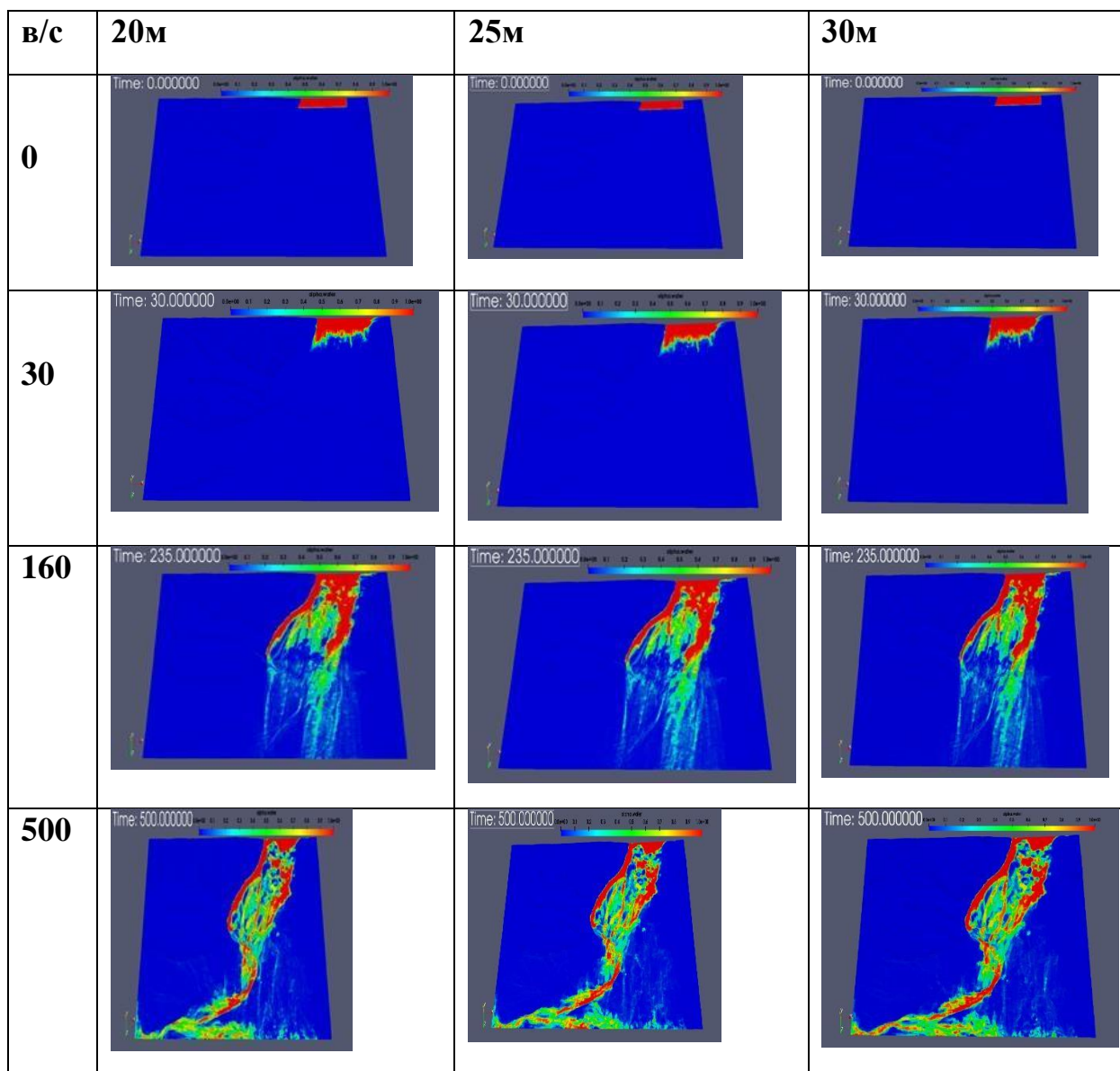


Рисунок 3.19 - Распределения объемной доли воды в разные моменты времени

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-P6 представлены на рисунке 3.20.

	20м	25м	30м
--	-----	-----	-----

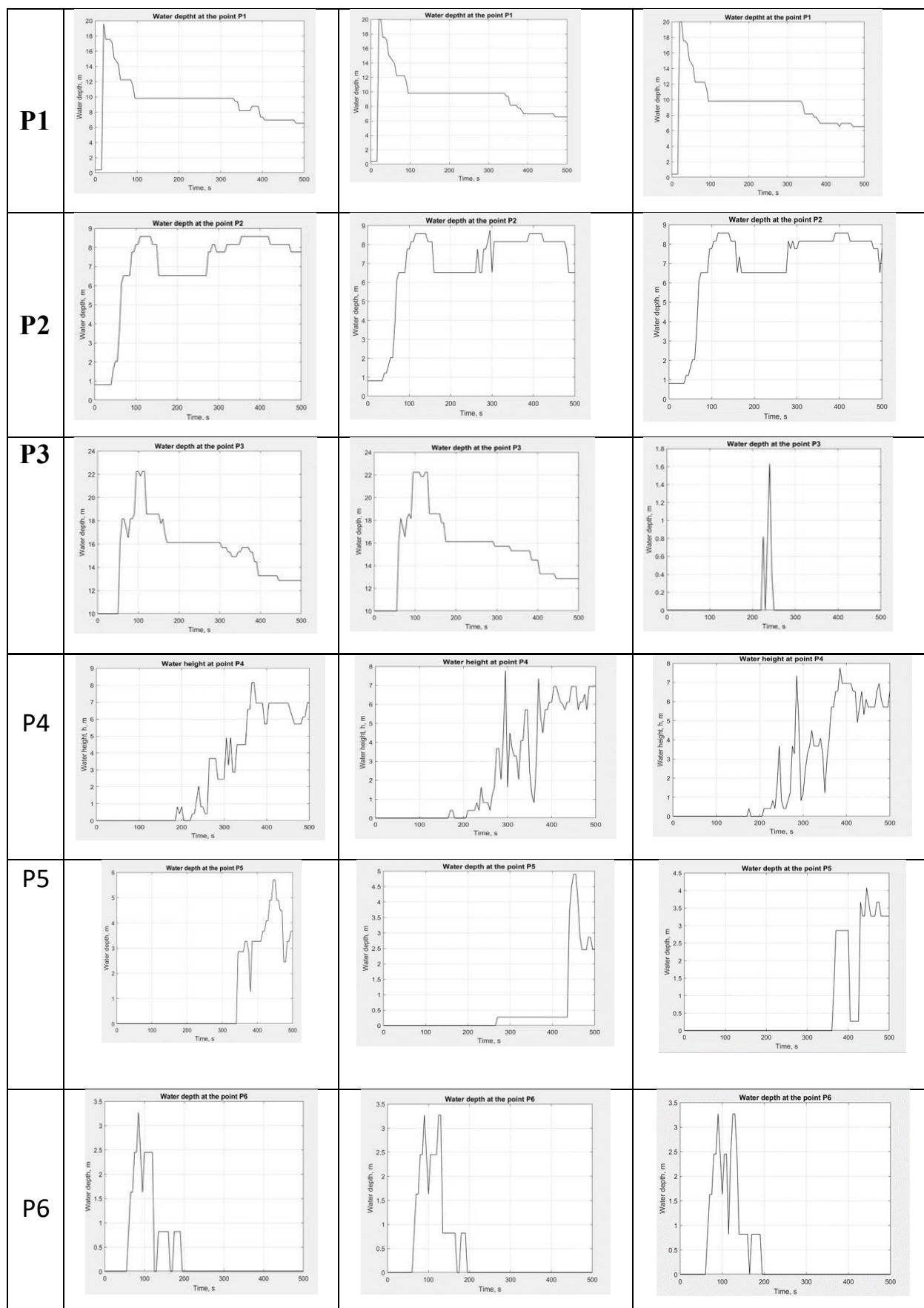


Рисунок 3.20 - Изменения высоты потока воды в разных точках P1-P6

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.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Основные результаты и выводы диссертационной работы состоят в следующих моментах:

1. Показано, что при моделировании задачи водослива показывают, что 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 стразу за водосливом (вода не прилипает к правой, пологой стенке водослива), что соответствует принципу повторяемости результатов адекватного математического моделирования.
2. Обнаружено, что при моделирование наводнения в модели городской местности для момента времени $t=3.1\text{с}$, разница в максимальных значениях давления в точках P7 и P8 составила 6.34%, 18.5%, 16.37% и 3.26% 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.
3. Впервые проведён расчет возможного наводнения в горной местности Willow Greek, USA и около поселка Шамалды-Сай, Кыргызстан. Обнаружено, что для пять различных начальных высот водного столба $H_0= 20\text{ м}$, 25 м , 30 м , 35 м и 40 м площади затопления имеет разные значения - с ростом начальной высоты растет площадь затопления в зависимости от топологии местности.
4. Показано, что время распространения волны прорыва местности до определенной точки зависеть от первоначальной высоты водного столба.

СПИСОК ОПУБЛИКОВАННЫХ РАБОТ

1. Ойчуева Б.Р. Using openFoam multiphase solver `interFoam` for large scale modeling [Текст] /Курбаналиев А. Ы., Ойчуева Б.Р. ,Максутов А.Р.,Ободоева Г.С.//Proceeding of the World Congress on Engineering and Computer Science, San Francisco, USA, 22-24 October, 2019. То же: [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.scopus.com/authid/detail.uri?authorId=55973158400>
2. Ойчуева Б.Р. Моделирование процесса наводнения в пакете `OpenFoam` [Текст] / Б.Р.Ойчуева, А.Ы.Курбаналиев, А.Ж. Жайнаков. // Материалы XV международной азиатской школы-семинара «Проблемы оптимизации сложных систем», 26-30-

- августа 2019 г., Академгородок, Новосибирск, Россия. Сайт семинара: <http://conf.nsc.ru/opcs2019>. То же: [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=41540169&pff=1>
3. Ойчуева Б.Р. Моделирование водослива методом контрольного объема [Текст] / Курбаналиев А. Ы., Ойчуева Б. Р., Марс кызы Т. // ОшМУ Вестник, Илимий-методикалык журнал ISSN 1694-7452 Стр.32-37, 2020. То же: [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://elibrary.ru/item.asp?id=43068358>
 4. Ойчуева Б.Р. Критическое сравнение различных версий пакета OPENFOAM на задаче моделирования водослива [Текст] / Курбаналиев А. Ы., Ойчуева Б. Р., Калмурзаева А.Т., Жайнаков А.Ж., Култаев Т.Ч. // Вычислительные технологии. 2021 г. Т. 26. ст. 44-57. То же: [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://elibrary.ru/item.asp?id=45668393>
 5. Ойчуева Б.Р. Моделирования течения над широкими плотинами в двумерном и трехмерном приближении. [Текст] / Ойчуева Б. Р., // Горный журнал КГГУ им. академика У.Асаналиева, 2021/10/8, том-1. То же: [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://elibrary.ru/item.asp?id=47387112>
 6. Ойчуева Б.Р. Численное моделирование двух фазного течения [Текст] / Ойчуева Б. Р., // Вестник КГУСТА, 2021. То же: [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://vestnikksucta.kg/2021-2/>
 7. Ойчуева Б.Р. Turbulent Flow Modelling using open source packages OpenFOAM and Paraview [Текст] / Курбаналиев А. Ы., Ойчуева Б. Р., Калмурзаева А.Т., Турганбаева А.Б. // 5 th International Journal of Science Education and Technology. 2021. То же: [Электронный ресурс]. – Режим доступа: https://drive.google.com/file/d/1AoYVR21NPOSyfHvnCILs2_Mb3048UBu7/view
 8. Ойчуева Б.Р. Numerical Simulation of the Turbulent One and Two Phase Flows [Текст] / Курбаналиев А. Ы., Ойчуева Б. Р., Калмурзаева А.Т., Акназарова С.С. // Международного конгресса тюркского мира по естественным наукам и медицине (firstcongress.oshsu.kg), 21 апреля 2019 год, Записи молодых ученых, стр.254-255. firstcongress.oshsu.kg. То же: [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://firstcongress.oshsu.kg/assets/documents/info.pdf>
 9. Ойчуева Б.Р. Mathematical Modeling and Visualization of Large- Scale Flooding in the Flood Plain of Naryn River Using OpenFOAM Lecture Notes in Networks and Systems. – 2022. V.503. – P. 357–365. То же: [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.scopus.com/authid/detail.uri?authorId=55973158400>
 10. Ойчуева Б.Р. Комплекс программ подготовки данных для математического моделирования и визуализаций последствий

- крупномасштабного наводнения в пойме реке Нарын, Кыргызстан. [Текст] /Курбаналиева А. Ы., Ойчуева Б. Р.// Кыргыз патент. Авторское свидетельство. Программа для ЭВМ. 2022г., №735, 15.03.2022. То же: [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://new2.patent.kg/wp-content/uploads/2022/08/%D0%98%D0%9C-62022.pdf>
11. Ойчуева Б.Р. Программа для создания трёхмерной расчетной сетки с учётом сложной топологии реальной местности при помощи утилиты snappyHexMesh пакета OpenFOAM, р. Нарын, Кыргызстан. [Текст] /Курбаналиева А. Ы., Ойчуева Б. Р.// Кыргыз патент. Авторское свидетельство. Программа для ЭВМ. 2022г., №736, 15.03.2022. То же: [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://new2.patent.kg/wp-content/uploads/2022/08/%D0%98%D0%9C-62022.pdf>
 12. Ойчуева Б.Р. Моделирование турбулентного течения с использованием пакета OpenFOAM [Текст]. Ойчуева Б.Р.- 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. То же: [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www2.bigpi.biysk.ru/wwwsite/doc/Proceedings Science and Edu 2022.pdf>

Ойчуева Бурулгүл Рахманбердиевна

01.02.05 - суюктуктун, газдын жана плазманын механикасы адистиги боюнча физика-математика илимдеринин кандидаты окумуштуулук даражасын изденип алууга жазган «Сел кубулуштарын үч өлчөмдүү математикалык моделдөө» аттуу темадагы диссертациясынын РЕЗЮМЕСИ

Ачкыч сөздөр: математикалык моделдештирүү, компьютердик моделдештирүү, суюктуктардын эсептөө динамикасы, Навье-Стокстун теңдемеси, стационардык эки фазалуу агым, эркин чек ара, суюктуктун

көлөмү ыкмасы, сел, OpenFOAM, interFoam, Шамалды-Сай, Willow Greek.

Изилдөөнүн объектиси кысылбай турган суюктуктун жана газдын эки фазалуу турбуленттик агымдары.

Изилдөөнүн предмети. Математикалык моделдөө, эсептөө гидродинамикасынын теңдемелерин сандык чечүү, персоналдык компьютерлерди колдонуу менен эсептөө эксперименти.

Бул диссертациялык иштин максаты. OpenFOAM ачык программалык пакетинин жардамы менен туруктуу жана так сандык чечимдерди алууга мүмкүндүк берген математикалык моделдердин, колдонмо программалардын жана геомаалыматтык системалардын комплексин өнүктүрүү болуп саналат. (АКШнын Калифорния штатындагы Willow Greek тоолуу аймагында жана Кыргызстандагы Шамалды-Сай айылына жакын жайгашкан сел толкундарын моделдөө мисалында).

Изилдөө ыкмалары жана жабдуулары: Стационардык эмес Навье-Стокстун теңдемелер системасын OpenFOAM пакетинин жардамында чечүү.

Алынган натыйжалар жана алардын жаңылыгы.

- Суу агымдарын моделдөөдө OpenFoam6 пакетиндеги interFoam жана interDyMFoam чечүүчүлөрдү бириктирүү физикалык көз караштан адекваттуу эмес сандык натыйжаларга алып келери көрсөтүлгөн. Ал эми OpenFOAM19.06, OpenFOAM20.06, OpenFOAM4 OpenFOAM5, OpenFOAM7 жана OpenFOAM8 аркылуу алынган сандык натыйжалар суунун агымына болжол менен бирдей эле сүрөтүн берет.
- Баштапкы бийиктиктери $H=0.2$ м, $H=0.4$ м, $H=0.6$ м жана $H=0.8$ м болгондо, $t=3.1$ с убакытта шаар аймагындагы селди моделдөөдө P7 жана P8 чекиттериндеги басымдын максималдуу маанилеринин айырмасы 6.34%, 18.5%, 16.37% жана 3.26%ти түздү.
- Биринчи жолу АКШнын Willow Creek тоолуу аймагында жана Кыргызстандын Шамалды-Сай айылына жакын жерде суу ташкыны боюнча эсептөөлөр жүргүзүлдү. $H_0 = 20$ м, 25м, 30м, 35м жана 40м суу мамычасынын беш түрдүү баштапкы бийиктиги үчүн сел аянты ар кандай мааниге ээ экендиги аныкталган - баштапкы бийиктиктин өсүшү менен топологияга жараша сел аянты көбөйөт.
- Белгилүү бир чекитке рельефтик толкундун таралуу убактысы суу мамысынын баштапкы бийиктигинен көз каранды экени көрсөтүлгөн.

Колдонуу даражасы же колдонуу боюнча сунуштар. Изилдөөнүн натыйжалары суу ташкындарынын кесепеттерин болжолдоодо колдонулушу мүмкүн.

Колдонуу чөйрөсү. Изилдөөнүн натыйжалары КР ӨКМнин Нарын каскадындагы суу сактагычтардан пландуу жана пландан тышкаркы сезондук агызууларды уюштуруу боюнча ишмердүүлүгүнө киргизилди.

РЕЗЮМЕ

**диссертации Ойчуевой Бурулгүл Рахманбердиевны 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.**

Ключевые слова: математическое моделирование, вычислительная гидродинамика, уравнение Навье-Стокса, нестационарное двухфазное течение, свободная граница, метод объема жидкости, наводнение, OpenFOAM, interFoam, Шамалды-Сай, Willow Greek.

Объектом исследования является двухфазные турбулентные течения несжимаемой жидкости и газа.

Предмет исследования заключается в моделировании процессов наводнения в реальных местностях.

Целью работы является создание комплекса математических моделей, прикладных программ и геоинформационных систем, позволяющих получать с помощью открытого пакета OpenFOAM устойчивые и достаточно точные численные решения.

Методы исследования и аппаратура. математическое моделирование, численное решение уравнений вычислительной гидродинамики, вычислительный эксперимент с применением персональных ЭВМ.

Полученные результаты и их новизна.

- Показано, что при моделировании задачи водослива показывают, что объединение решателей interFoam и interDyMFoam в пакете OpenFoam6 приводит к не адекватному, с физической точки зрения, численным результатам. А численные результаты, полученные с помощью других версий OpenFoam, дают примерно одинаковую картину течения сразу за водосливом (вода не прилипает к правой, пологой стенке водослива)
- Обнаружено, что при моделировании наводнения в модели городской местности для момента времени $t=3.1c$, разница в максимальных значениях давления в точках P7 и P8 составила 6.34%, 18.5%, 16.37% и 3.26% для начальных высот $H=0.2$ м, $H=0.4$ м, $H=0.6$ м и $H=0.8$ м соответственно.
- 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 $H_0= 20m, 25m, 30m, 35m$ и $40m$ площади затопления имеет разные значения с ростом начальной высоты растет площадь затопления

Степень использования или рекомендации по использованию. Результаты исследования могут быть применены при разработке берегозащитных инженерно-технических сооружений и прогнозировании последствий при наводнениях.

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

SUMMARY

of the dissertation of Oychuyeva Burulgul Rahmanberdievna on the topic: "Three-dimensional mathematical modeling of flooding processes" for the degree of Candidate of Physical and mathematical Sciences, specialty 01.02.05 - mechanics of liquid, gas and plasma.

Keywords: mathematical modeling, computational fluid dynamics, Navier-Stokes equation, unsteady two-phase flow, free boundary, volume of fluid method, flooding, OpenFOAM, interFoam, Shamaldy-Say, Willow Greek.

The object of the study is two-phase turbulent flows of incompressible liquid and gas.

The subject of the study is the modeling of flood processes in real areas.

The aim of the work is to create a complex of mathematical models, application programs and geoinformation systems that allow obtaining stable and sufficiently accurate numerical solutions using the OpenFOAM package.

Research methods and equipment. mathematical modeling, numerical solution of computational fluid dynamics equations, computational experiment using personal computers.

The results obtained and their novelty:

- It is shown that when modeling the spillway problem, it is shown that combining the interFoam and interDyMFoam solvers in the OpenFoam6 package leads to numerical results that are not adequate from a physical point of view. And the numerical results obtained with the help of other versions of OpenFOAM give approximately the same picture of the flow of rhinestones behind the spillway (water does not stick to the right, sloping wall of the spillway)

- It was found that when modeling flooding in an urban area model for time $t = 3.1s$, the difference in maximum pressure values at points P7 and P8 was 6.34%, 18.5%, 16.37% and 3.26% for initial heights $H = 0.2$ m, $H = 0.4$ m, $H = 0.6$ m and $H = 0.8$ m, respectively.

- For the first time, a possible flood was calculated in the mountainous area of Willow Greek, USA and near the village of Shamaldy-Sai, Kyrgyzstan. It was found that for three different initial heights of the water column $H_0 = 20m, 25m, 30m, 35m$ and $40m$, the flooding area has different values with increasing initial height, the flooding area increases.

Degree of use or recommendations for use. The results of the research can be applied in the development of coastal protection engineering structures and forecasting the consequences of floodings.

Scope of application. The results of the study were introduced into the activities of the Ministry of Emergency Situations of the Kyrgyz Republic for the organization of planned and unscheduled seasonal discharges from reservoirs of the Naryn cascade.