

**Кыргызский государственный университет  
имени И. Арабаева**

**Кыргызский государственный технический университет  
имени И. Раззакова**

Диссертационный совет Д 05.23.689

На правах рукописи  
**УДК 681.5**

**Калмурзаева Анипа Ташбаевна**

**Анализ вычислительных погрешностей  
метода контрольных объёмов**

05.13.16 - применение вычислительной техники, математического  
моделирования и математических методов в научных исследованиях

Автореферат диссертации на соискание ученой степени  
кандидата физико-математических наук

Бишкек – 2024

**Работа выполнена** на кафедре естественно-математического образования Кызыл-Кийского гуманитарно-педагогического института им. М. М. Тайирова Баткенского государственного университета

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

**Официальные оппоненты:** Скляр Сергей Николаевич, доктор физико-математических наук, профессор, руководитель программы (кафедры) «Прикладная математика и информатика», Американский Университет Центральной Азии

Султанов Райымбек Касымович, кандидат физико-математических наук, доцент, руководитель Отделения компьютерной инженерии, Кыргызско-Турецкий университет Манас

**Ведущая организация:** Кафедра Программного обеспечения вычислительной техники и автоматизированных систем факультета Кибернетики и информационных технологий Ошского технологического университета имени акад. М. М. Адышева (723503, г.Ош, ул. Н. Исанова - 81)

Защита диссертации состоится 29 марта 2024 года в 16.00 часов на заседании диссертационного совета Д 05.23.689 по защите диссертаций на соискание ученой степени доктора (кандидата) технических наук и кандидата физико-математических наук при Кыргызском государственном университете имени И. Арабаева и Кыргызском государственном техническом университете имени И. Раззакова по адресу: 720026, г. Бишкек, ул. Раззакова 51-А, конференц-зал КГУ им. И. Арабаева.

Идентификационный код онлайн трансляции защиты диссертации:

<https://vc.vak.kg/b/d05-xy8-8iw-xsw>

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеках Кыргызского государственного университета им. И. Арабаева (720026, г. Бишкек, ул. И. Раззакова, 51-А) и Кыргызского государственного технического университета им. И. Раззакова (720044, г. Бишкек, пр. Ч. Айтматова 66) и на сайте НАК Кыргызской Республики (<https://vak.kg>).

Автореферат разослан 28- февраля 2024 года

Ученый секретарь  
диссертационного совета,  
к.ф.-м.н.

Асанбекова Н.О.

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**Актуальность темы диссертации.** Стремительное развитие математического моделирования, математических методов в научных исследованиях, методов численного решения сложных задач в различных областях науки и техники определяет актуальность данной тематики и представляют собой один из эффективных методов научных исследований.

Вычислительная гидродинамика получила быстрое развитие за последние несколько десятилетий, и проблемы, которые могут быть решены с её помощью, варьируются от простых ламинарных потоков до очень сложных многофазных потоков, включая теплообмен. Многие из существующих программных пакетов вычислительной гидродинамика объединены с системами автоматического проектирования для упрощения и удешевления процесса проектирования. По мере того как вычислительная гидродинамика становится инженерным инструментом, его точность становится все более важной, что приводит к необходимости надежного метода оценки и контроля точности (ошибки), чем определяется актуальность темы диссертации.

Методы математического моделирования и вопросы изучения точности моделирования того или иного реального физического процесса рассмотрены в работах [L. F. Richardson *The Approximate Arithmetical Solution by Finite Differences of Physical Problems Involving Differential Equations with an Application to the Stress in a Masonry Dam. Philosophical Transactions of the Royal Society of London. Series A*, 210, 307-357], [Н. Н. Яненко *Об экономичных неявных схемах (метод дробных шагов)* / Н. Н. Яненко // Доклады Академии наук СССР. - 1960. - Т.134, N 5. - С.1034-1036. - Библиогр.: с.1036], [А. А. Самарский *Математическое моделирование и вычислительный эксперимент. Вестник АН СССР*, 1979, №5, с. 38-49], [Patankar S. V. *A Calculation Procedure for Two Dimensional Elliptic Situations. Numerical Heat Transfer*. –1981. –Vol. 4. – P. 409–425], [Peric M. A. *A Finite Volume Method for the Prediction of Three-dimensional Fluid Flow in Complex Ducts. PhD Thesis*. – London: Imperial College, 1985. – 394 p.] др.

**Связь темы диссертации с приоритетными научными направлениями, крупными научными программами (проектами) и 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 2019-2021 гг.

**Цель исследования заключается в** выборе модели и развитие метода моделирования течений несжимаемой жидкости и газа в рамках бесплатного прикладного пакета OpenFOAM на примере численных расчетов возможного наводнения в пойме реки Нарын вблизи посёлка Шамалды-Сай, Кыргызстан.

**Для достижения поставленной цели решались следующие задачи:**

1. Верификация использованного открытого пакета OpenFOAM7, установленного в операционной системе Ubuntu 20.04 LTS на различных задачах вычислительной гидродинамики.

2. Построение метода, способного снизить ошибку дискретизации ниже требуемого уровня без какого-либо вмешательства пользователя и с наименьшей вычислительной нагрузкой за счет создания оптимальной сетки для данной задачи.

3. Создание трёхмерной расчетной сетки с помощью snappyHexMesh для задач возможного затопления реальной местности поймы реки Нарын около посёлка Шамалды-Сай.

4. Численное моделирование возможного затопления местности вблизи посёлка Шамалды-Сай, Кыргызстан.

**Научная новизна полученных результатов.**

1. Проведена верификация пакета OpenFOAM7 на различных задачах вычислительной гидродинамики. Обнаружено, что при ламинарном обтекании круглого цилиндра использованные схемы второго и третьего порядка точности по числу Струхала дают значение 0.172, что согласуется с экспериментальными и численными данными с точностью 4.2%. Схемы первого порядка точности MinmodV и upwind дают на 8.4% и 14% заниженные значения числа Струхала соответственно.

2. Разработан метод оценки остаточной погрешности на грани контрольного объема для течения в канале с каверной, позволяющий оценивать погрешность путем сравнения значений, экстраполированных на грань из соседних узлов. Построена автоматическая процедура адаптации сетки в областях с большими градиентами давления и скорости, путем повторного определения ячеек, разделяющих грань с большой ошибкой, разделением их параллельно грани.

3. Предложен метод автоматического построения трёхмерной расчетной сетки для задач обтекания модели здания и реальной местности поймы реки Нарын около посёлка Шамалды-Сай. Этот метод позволяет эффективно проводить численное моделирование возможного наводнения, составить карту затопления этой местности.

4. Проведён расчет возможного наводнения вблизи посёлка Шамалды-Сай, Кыргызстан. Обнаружено, что для трёх различных значений начальной высоты водного столба  $H_0 = 5\text{м}$ ,  $10\text{м}$  и  $15\text{м}$  площади затопления имеет разные значения - с ростом начальной высоты растет площадь затопления в зависимости от топологии местности.

**Практическая значимость полученных результатов.** Результаты данной работы вносят определенный вклад в метод математического моделирования турбулентных течений. Особо следует подчеркнуть верификацию использованного открытого пакета OpenFOAM7 на различных задачах вычислительной гидродинамики, развитие детального документирования пакета. Также можно их использовать в учебном процессе в качестве спецкурса для студентов старших курсов, магистрантов и аспирантов

**Основные положения диссертации, выносимые на защиту.**

1. Результаты верификации пакета OpenFOAM7 на различных задачах вычислительной гидродинамики.

2. Метод оценки остаточной погрешности на грани контрольного объема для течения в канале с каверной, позволяющий оценивать погрешность путем сравнения значений, экстраполированных на грань из соседних узлов. Этот метод позволяет осуществить автоматическую процедуру адаптации сетки в областях с большими градиентами давления и скорости, путем повторного определения ячеек, разделяющих грань с большой ошибкой, разделением их параллельно грани.

3. Метод автоматического построения трёхмерной расчетной сетки для задач обтекания модели здания и реальной местности вблизи посёлка Шамалды-Сай.

4. Результаты моделирования возможного наводнения в поселке Шамалды-Сай, Кыргызстан

**Личный вклад соискателя.** Диссертация является результатом самостоятельных исследований, выполненных автором. Личный вклад автора состоит в постановке и определении цели работы, выборе методов достижения поставленной цели, проведении исследований, анализе полученных результатов и формулировке выводов, публикации статей.

**Апробация результатов исследований.** Полученные в ходе выполнения данной диссертационной работы результаты докладывались на следующих международных, республиканских конференциях и семинарах:

– III International Conference on Advanced Technologies in Materials Science, Mechanical and Automation Engineering: MIP: Engineering-III – 2021. MS ID: AIPCP21-AR-MIP2021-00309. 29-30 April 2021, Krasnoyarsk, Russia.

– 5th International Conference on Advances in Natural and Applied Sciences-ICANAS-2021, Ibrahim Chechen University, Turkey, Agri, 21-23 September 2021.

– Международная научная конференция «Информационные технологии и математическое моделирование в науке и горно-техническом образовании», посвященной 80-летию академика Национальной академии наук, доктора физико-математических наук Жайнакова Аманбека Кыргызский государственный университет геологии, горного дела и освоения природных ресурсов имени академика У. Асаналиева, Кыргызстан, Бишкек, 06-08 октября 2021г.

– Международная научно-практическая конференция «Информационные технологии в научно-техническом и образовательном пространстве», Кыргызский государственный университет строительства, транспорта и архитектуры им Н. Исанова, Кыргызстан, Бишкек, 29 октября 2021 г.

– Международная научно-техническая конференция «Интеграционные процессы в научно-техническом и образовательном пространстве», посвященная 65-летию юбилею Кыргызского государственного технического университета им. И. Раззакова, Бишкек, 18-19 сентября 2019 года.

– XV Международная Азиатской Школа-семинар «Проблемы оптимизации сложных систем». Институт вычислительной математики и математической геофизики СО РАН (Россия, г. Новосибирск), Новосибирский государственный университет (Россия, г. Новосибирск), Институт информационных и вычислительных технологий МОН РК (Республика Казахстан, г. Алматы) при поддержке Сибирской Российской секции R8 IEEE (Россия, г. Новосибирск), Институт математики НАН КР (Киргизия, г. Бишкек). Академгородок, Новосибирск, Россия, 26-30 августа, 2019.

– Республиканская научно-практическая конференция «Физико-технические проблемы в образовании и науке», Ошский технологический университет имени М. М. Адышева, Ош, Кыргызстан, 18-19 мая 2018 года.

– XIV Международная Азиатская Школа-семинар «Проблемы оптимизации сложных систем». Институт информационных и вычислительных технологий МОН РК (Республика Казахстан, г. Алматы), Институт вычислительной математики и математической геофизики СО РАН (Россия, г. Новосибирск), Новосибирский государственный университет (Россия, г. Новосибирск), Институт математики НАН КР (Кыргызская Республика, г. Бишкек), Институт автоматики и информационных технологий

НАН КР (Кыргызская Республика, г. Бишкек). пансионат «Отель Евразия»,  
Иссык-Куль, Кыргызская Республика, 20 июля - 31 июля 2018 г.

### **Полнота отражения результатов диссертации в публикациях.**

Основные результаты исследований опубликованы в 16 научных статьях и 6 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.** Диссертация состоит из введения, 3 глав, заключения, библиографии. Работа содержит 148 страницы текста, 46 рисунков, 4 таблиц и 118 библиографических ссылок.

## **ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ ДИССЕРТАЦИИ**

**Во введении** обоснована актуальность темы, сформулированы постановка исследуемой проблемы, цели и задачи исследования, представлены научная новизна и практическая значимость работы. Кратко описаны структура и основное содержание диссертации по главам.

**В первой главе** «Обзор литературы» проведен обзор литературы по тематике диссертационной работы. Рассмотрены методы моделирование турбулентных двухфазных течений с определением свободной границы раздела между фазами.

**Выводы по первой главе:** Обзор литературы показал, что модели турбулентности с двумя дифференциальными уравнениями являются наиболее представительной группой дифференциальных моделей моделирования турбулентности, которые основаны на использовании гипотезы Буссинеска, по которой напряжения Рейнольдса пропорциональны коэффициенту турбулентной вязкости и тензору скоростей деформации.

**Во второй главе** «Методология и методы исследования» описана процедура дискретизации методом конечного объема на примере общего уравнения переноса обобщенной переменной  $\phi$ .

**Объектом** исследования является численное решение систем стационарных и нестационарных уравнений Навье-Стокса в пакете OpenFOAM7.

**Предметом** исследования являются методы дискретизации уравнений Навье –Стокса методом контрольных объемов пакета OpenFOAM7.

Основные уравнения механики жидкости так называемые уравнения Навье-Стокса представляют собой набор уравнений в частных производных, которые гласят [Ландау Л. Д., Лифшиц Е. М., 1986, Лойцянский Л. Г., 2003]:

Уравнение непрерывности:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial (\rho U_i)}{\partial x_i} = 0 \quad (1)$$

Уравнение переноса импульса:

$$\frac{\partial(\rho U_i)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho U_i U_j)}{\partial x_j} = \rho g_i + \frac{\partial \sigma_{ij}}{\partial x_j} \quad (2)$$

где  $\rho$  – плотность жидкости,  $U_i, g_i$  –, составляющая вектора скорости и ускорение силы тяжести в направлении координаты  $x_i$ , а  $\sigma_{ij}$  – тензор вязких напряжений.

Дискретизация этого уравнения методом контрольного объема выполнена для каждого члена в отдельности и определены возникающие при этом результирующие ошибки дискретизации.

Также же представлен общий алгоритм решения уравнений Навье-Стокса в рамках открытого пакета OpenFOAM7.

**Выводы по второй главе:** Последовательно рассмотрены методы дискретизации каждого члена в основных уравнениях для течений несжимаемой жидкости и газа. Приведены способы линеаризации нелинейных членов. Рассмотрены процедуры SIMPLE и PISO для численного решения связанных через давление нелинейных уравнений. Даны сведения о современных пакетах прикладных программ вычислительной гидродинамики, рассмотрена структура использованного пакета OpenFOAM, приведены методы пре-процессинга и пост-процессинга

**В третьей главе** «Численное моделирование ламинарных и турбулентных течений» представлены результаты математического моделирования сложных гидродинамических явлений на основе нестационарных трехмерных уравнений Навье-Стокса, описывающих динамику ламинарных и турбулентных течений в рамках пакета программ OpenFOAM.

**Первая тестовая задача. Обтекание холма.** Целью этой задачи является проверка входящих в OpenFOAM7 моделей турбулентности для задач обтекания водным потоком препятствия неровного рельефа. Геометрия первой задачи приведена на рисунке 3.1. Поток воды поступает в канал слева, а выходит справа и соответствует экспериментальной работе [Almeida G. P., D. F. G. Durao and M. V. Heitor, 1993]. Высота канала составляла  $H = 170$  мм, а максимальная высота и длина холма составляли  $h = 28$  мм и  $2R = 108$  мм соответственно. Рабочей жидкостью является вода с кинематической вязкостью  $\nu = 1 \times 10^{-6}$  м<sup>2</sup>/с. Число Рейнольдса, рассчитанное через среднюю скорость  $U_0 = 2.147$  м/с и  $h$  было равно  $Re = \frac{U_0 h}{\nu} = 60\,116$ .

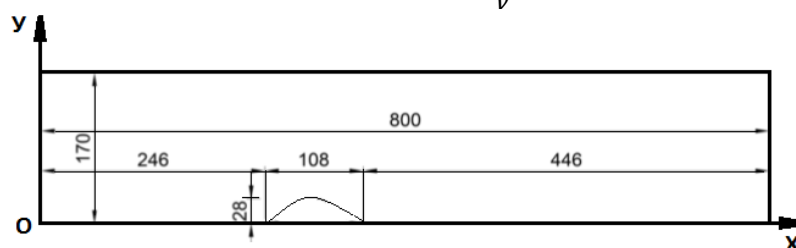


Рисунок 3.1 - Геометрия одиночного холма и оси координат  
Параметры применяемых моделей турбулентности приведены в таблице 3.1.



Таблица 3.1 - Коэффициенты k-ε-модели турбулентности

k-ε-модель		$C_\mu$	$C_{1\varepsilon}$	$C_{2\varepsilon}$	$\sigma_k$	$\sigma_\varepsilon$
1	Стандарт	0.09	1.44	1.9	1.0	1.3
2	Realizable	0.09	1.44	1.9	1.0	1.2
3	RNG	0.033	1.176	1.92	1.0	1.3
4	Монин-Обухов	0.033	1.176	1.92	1.0	1.3
5	Атмосферный пограничный слой	0.0256	1.13	1.9	0.74	1.3

На рисунке 3.2 приведено поле модуля скорости и на рисунке 3.3 приведена кинетическая энергия турбулентности для стандартной k-ε-модели турбулентности. Видно, что перед холмом происходит торможение потока, по мере приближения к вершине холма скорость возрастает, а за холмом имеется рециркуляционная зона.

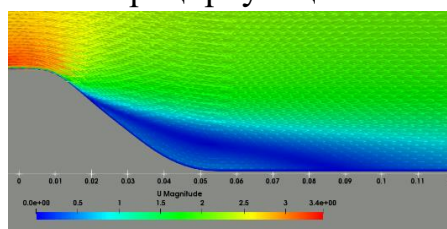


Рисунок 3.2 - Поле скорости в подветренной области холма

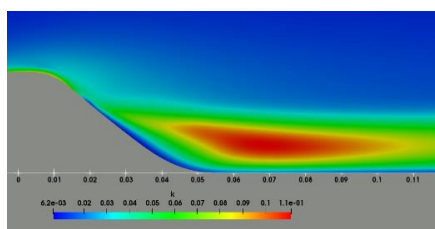


Рисунок 3.3 - Поле кинетической энергии турбулентности в подветренной области холма

На следующих рисунках приведено сравнение численных значений продольной скорости (рисунок 3.4) и кинетической энергии турбулентности (рисунок 3.5) в сечении  $x = 90\text{мм}$  с соответствующими экспериментальными данными.

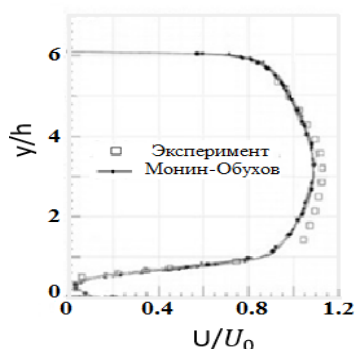


Рисунок 3.4 - Профиль продольной скорости

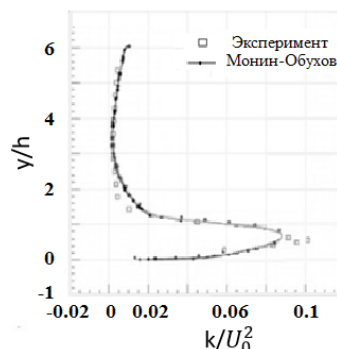


Рисунок 3.5 - Профиль энергии турбулентности

Продольная скорость представлена в единицах  $U_0$ , кинетическая энергия турбулентности разделена на величину  $U_0^2$ , а поперечная координата разделена на величину  $h$ . Из рисунков 3.4-3.5 видно, что получено наилучшее совпадение с экспериментальными данными для модели Монина-Обухова.

**Вторая тестовая задача. Течение в канале с каверной.** В данной тестовой задаче рассматривается двумерное ламинарное течение в канале с

округленными краями каверной, расположенной в нижней стенке канала (смотрите рисунок 3.6).

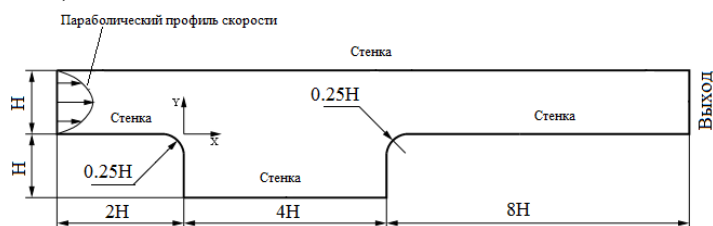


Рисунок 3.6 - Геометрия задачи, система координат и граничные условия

Целью выбора данной задачи является изучение метода адаптивного измельчения расчетной сетки. При этом используется внесенный нами метод оценки погрешности на грани контрольного объема.

Результаты численных результатов на окончательной расчетной сетке из 3257 ячеек приведены на рисунок 3.8аб. Максимальное значение модуля скорости равно 1.48 м/с. Скорость нормализована на величину средней скорости на входе.

Как видно из рисунка 3.8а, основной поток направлен вдоль оси  $Ox$  и в направлении вдоль оси  $Oy$  изменение скорости происходит по параболическому закону. Вблизи правого верхнего угла каверны образуется точка торможения, в которой образуются большие градиенты скорости и давления.

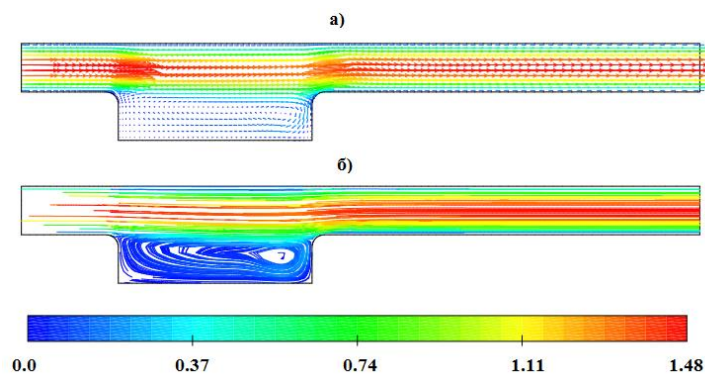


Рисунок 3.8 - Поле вектора скорости (а) и изолинии (б) модуля скорости

В самой каверне образуется вихрь, который идет по потоку вниз параллельно основному потоку в канале, после точки торможения, идет вниз. Далее достигая нижней точки каверны, поворачивается налево, идет против основного потока. Достигая левой стенки каверны, этот вихрь дальше идет вверх по правой стенке, и около левого верхнего угла присоединяется к основному потоку. Градиенты скорости и давления в этой области около левого верхнего угла каверны являются более умеренными по сравнению правым верхним углом каверны.

В таблица 3.2. приведены сведения о коэффициенте потери давления как для постоянного сгущения расчетной сетки, так и для адаптивной сетки.

Таблица 3.2 - Коэффициент потери давления

Адаптивное сгущение		Сгущение с постоянным шагом	
Число ячеек	$C_p$	Число ячеек	$C_p$
36	1.241	172	1.438
144	1.351	1548	1.502
496	1.468	13932	1.518
1541	1.508	125388	1.52
2734	1.518	501552	1.52
3044	1.518		
3227	1.518		
3457	1.518		

Как следует из таблицы 3.2, благодаря адаптивному методу сгущения расчетной сетки перепад давления быстро достигает своего конечного значения. Коэффициент потери давления не меняется в течение последних четырех циклов сгущения, что позволяет предположить, что оставшиеся грани с предполагаемой погрешностью, выше требуемой не влияют на глобальную точность поля давления. Падение давления на окончательной адаптированной сетке хорошо согласуется (погрешность 0.2%) с исходным падением давления. Это означает, что адаптивное сгущение способно обеспечить точные решения с экономией на количестве ячеек расчетной сетки, поскольку конечная адаптированная сетка содержит 0.65% от числа ячеек в случае сгущения расчетной сетки с постоянным шагом.

**Третья тестовая задача. Ламинарное обтекание круглого цилиндра.** Целью этой задачи является изучение точности различных методов дискретизации конвективного члена в систему уравнений Навье-Стокса. Рассматривается двумерное течение слева направо с цилиндром радиуса  $R=1\text{м}$ , помещенным в несжимаемую среду. Скорость набегающего потока равна 1 м/с. Геометрия рассматриваемой задачи и граничные условия показаны рисунке 3.18. Начало координат расположено в геометрическом центре цилиндра.



Рисунок 3.18 - Геометрия задачи и граничные условия

Типичная прямоугольная сетка, используемая для моделирования создана с помощью утилиты blockMesh пакета OpenFOAM7 приведена на рисунке 3.19.

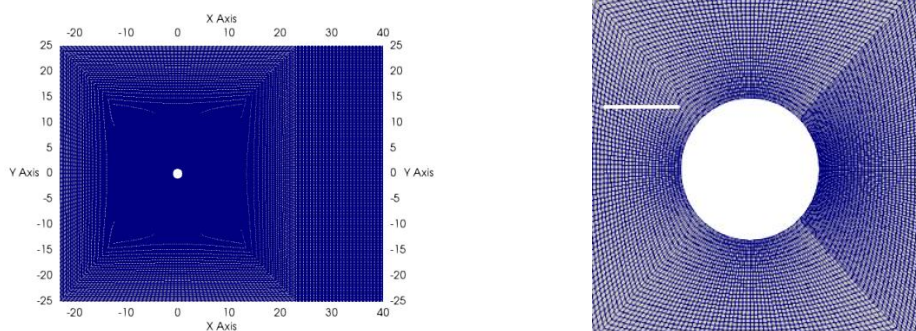


Рисунок 3.19 - Расчетная сетка (слева) и сгущение сетки около цилиндра (справа)

Сведения методах дискретизации систем уравнений (1) приведены в таблице 3.3.

Таблица 3.3 - Используемые схемы дискретизации

Слагаемое	Схема	Порядок точности схемы
Производная по времени	CrankNicolson 0.5	Первый/Второй
Градиент	Gauss linear	Второй
Конвекция	Upwind, MinmodV	Первый
	GammaV 1.0, vanLeerV	Второй
	limitedLinearV 1	Второй
	linearUpwindlimitedV	Второй
	SuperBeeV, QUICKV	Второй/Третий
Диффузия	Gauss linear corrected	Второй
Интерполяция	Linear	Второй

В таблица 3.4 приведены данные по численным результатам всех использованных схем дискретизации конвективного члена в уравнении (1). По времени вычислений до момента времени  $t=500$ с самой экономичной оказалась схема upwind, а в случае использования схемы GammaV 1.0 время вычислений было максимальным, порядка 1713.18 с.

Таблица 3.4 - Результаты численных расчетов

Схема	Gamma V 1.0	Limited LinearV 1	Linear Upwind limited	QUIC KV	van LeerV	Super BeeV	MinmodV	upwind
Время вычислений, с	1713.18	1015.18	1097.75	1030.96	1501.34	1024.84	1404.59	858.82
Число Струхалы	0.172	0.172	0.172	0.172	0.172	0.172	0.156	0.141
Частота, Гц	0.086	0.086	0.086	0.086	0.086	0.086	0.078	0.070

Число Струхалы равно 0.172 для всех использованных схем второго порядка точности. Этот результат хорошо согласуется с экспериментальным

(0.164) и численным (0.165) значениями, полученными соответственно в [Tritton, D.J. 1959г.] и [Qu, L., Norberg, C., Davidson, L., Peng, S., Wang, F 2013г.] с точностью 4.2%. Схема MinmodV дает на 8.4%, а схема upwind на 14% заниженные значения числа Струхала. Такое поведение схемы upwind вероятно связано с численной диффузией [Ferziger J. H., Peric M. 2002].

**Четвертая тестовая задача. Обтекание модели здания - куба.** В качестве следующей тестовой задачи выбрано моделирование обтекания куба, расположенного в центре трехмерной аэродинамической трубы прямоугольного сечения. Задача взята из базы данных ERCOFTAC, case 41 и соответствует экспериментальной работе [Martinuzzi, Tropea, 1993]. Куб, смонтированный в центр нижней стенки канала с размером  $390 \times 60 \times 5$  см является моделью здания. Куб с линейным размером  $H = 2.5$  см расположен на расстоянии  $3H$  от входа канала. Число Рейнольдса, рассчитанное через высоту куба равно 80000. Принятая система координат и граничные условия показаны на рисунке 3.31. Начало координат расположено в нижней грани наветренной стороны куба.

Целью этой задачи является проверки автоматического метода построения трёхмерной расчетной сетки при помощи утилиты snappyHexMesh пакета OpenFOAM7. Последующем, этот метод построения расчетной сетки применяется в следующей задаче моделирования процесса наводнения в пойме реки Нарын, близи Шамалды-Сай.

Вкратце, метод построения расчетной сетки заключается в следующем. Сначала необходимо подготовить файл, содержащий поверхность куба в формате stl, в ASCII виде и расположить её в папке /constant/triSurface. Далее подготавливается программа snappyHexMeshDict на языке C++, затем помещается в папку system.

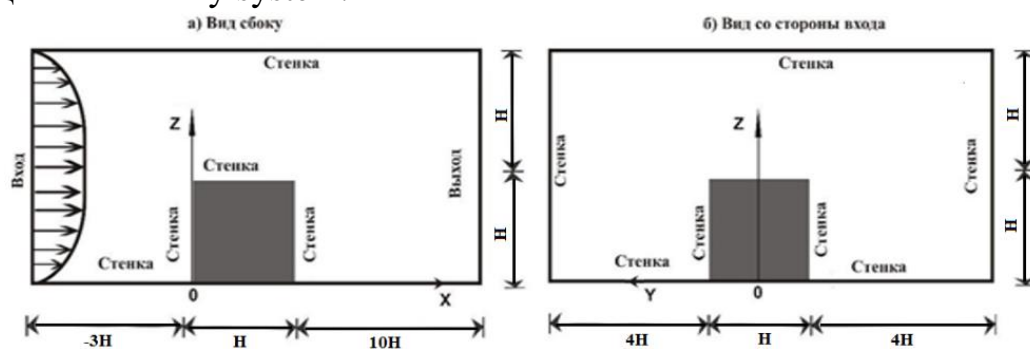


Рисунок 3.31 - Геометрия задачи и граничные условия

Далее созданная утилитой blockMesh гексаэдральная фоновая сетка при помощи утилиты snappyHexMesh OpenFOAM на основе программы snappyHexMeshDict преобразуется в трёхмерную расчетную сетку. Детали измельчения расчетной сетки вблизи куба приведены на рисунке 3.32.



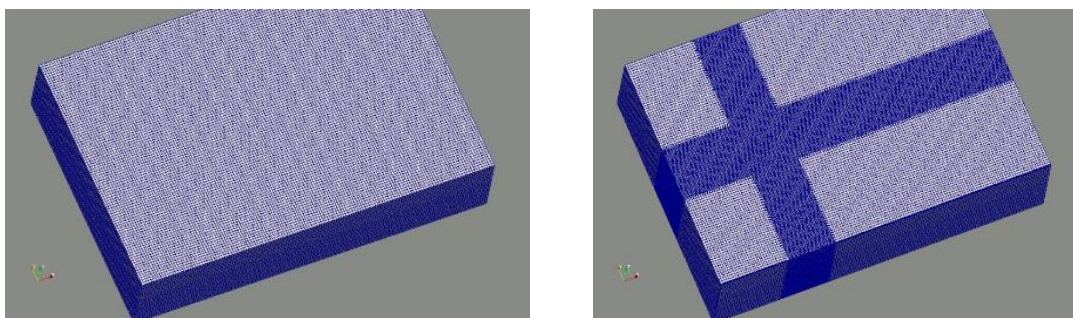


Рисунок 3.32 - Предварительная равномерная (слева) и измельчённая окончательная (справа) сетка

Поле модуля скорости приведено на рисунке 3.33, а на рисунке 3.34 показаны изолинии модуля скорости, где отчетливо видны рециркуляционные зоны перед кубом (наветренная сторона) над кубом и за кубом (подветренная сторона).

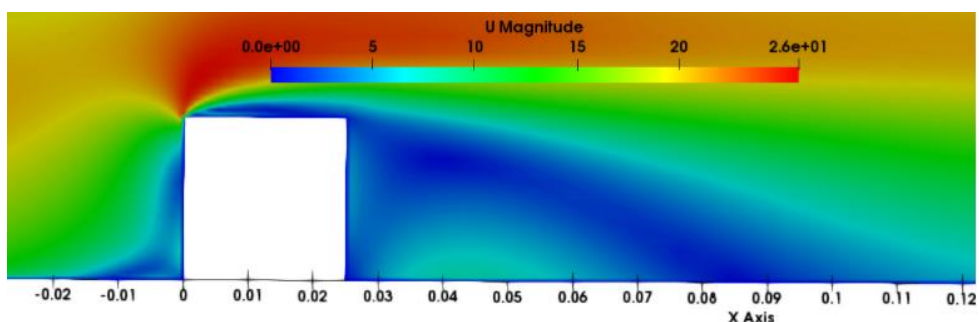


Рисунок 3.33 - Поле модуля скорости

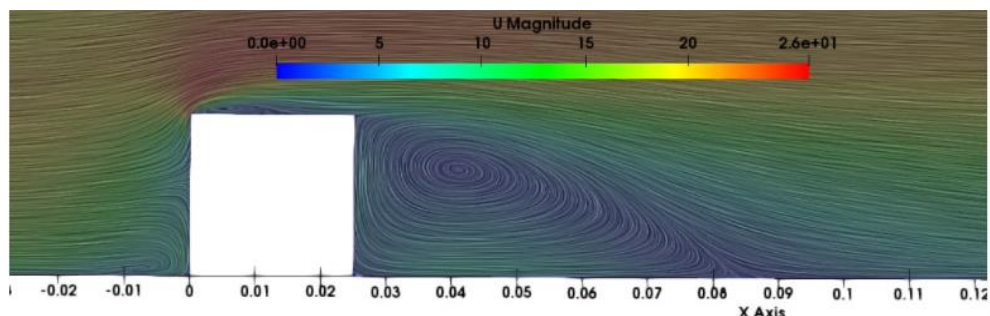


Рисунок 3.34 - Изолинии модуля скорости

Сравнение численных результатов (сплошная линия) со соответствующими экспериментальными данными (маркеры) по продольной скорости  $U_x$  приведены на рисунке 3.35. Соответствие между численными данными и экспериментом следует признать удовлетворительным. Это свидетельствует об адекватности метода построения неструктурированной расчетной сетки.

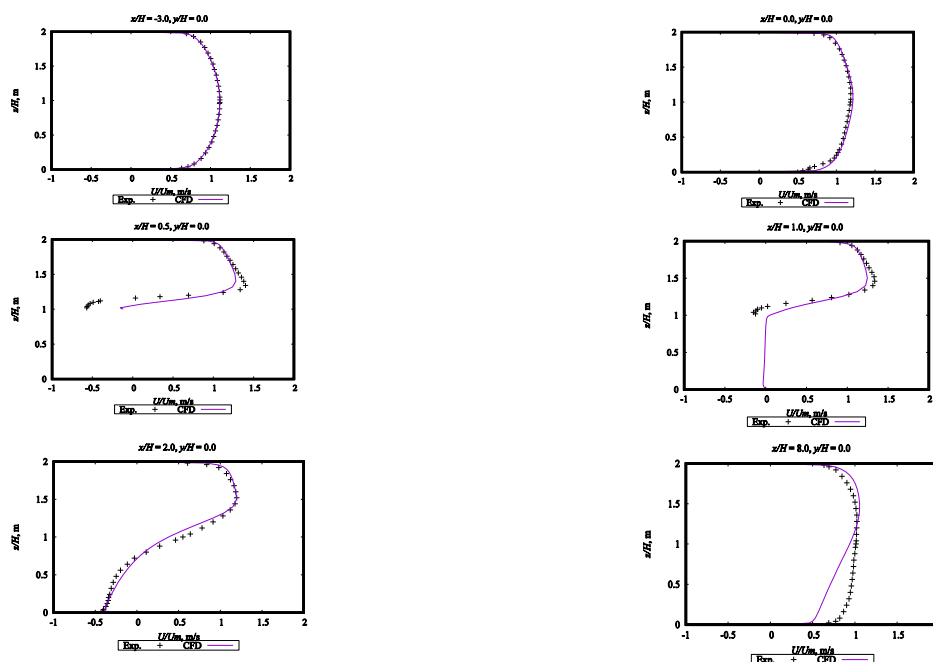


Рисунок 3.35 - Поперечные профили продольной скорости

**Пятая тестовая задача. Численное моделирование наводнения в пойме реки Нарын вблизи поселка Шамалды-Сай.** Рассматривается задача возможного наводнения в пойме реки Нарын около Шамалды-Сай (смотрите рисунок 3.36).

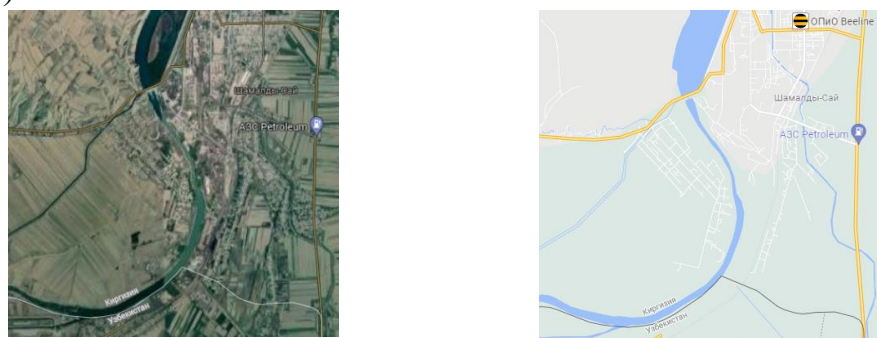


Рисунок 3.36 - Спутниковое изображение рельефа (слева) и карта местности (справа)

Сетка строится на основе DEM data из US Geology Survey, преобразованной в последующем в текстовый ASCII файл стереографического формата stl. Утилита snappyHexMesh пакета OpenFOAM использована для генерации трёхмерной сетки. Созданная таким образом трёхмерная расчётная сетка размером 10 000 м × 6 000 м × 500 м поймы реки Нарын вблизи посёлка городского типа Шамалды-Сай приведена на рисунке 3.37. Расчётная сетка состоит из 1 387 149 гексаэдров, 151 призмы и 187470 полиэдров, а общее число контрольных объёмов равно 1 574 770.

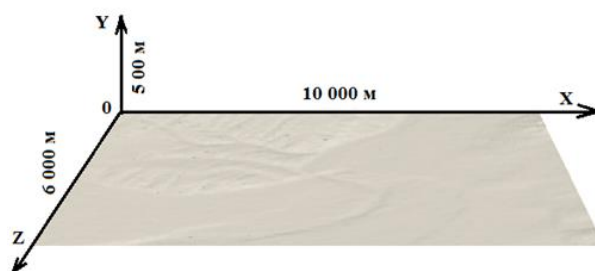


Рисунок 3.37 - Трёхмерная расчетная сетка поймы реки Нарын

Общее время расчета на компьютере с процессором Intel ® Core i5-8250U с частотой 1.60 ГГц и установленной оперативной памятью 8 ГБ составило 183 373с, или около 51 час. Вертикальная координатная ось отсчитывается от дна реки Нарын.

Распределение объемной доли воды в разные моменты времени показаны на следующих рисунке 3.38. Расчеты были проведены для трёх различных начальных высот водного столба  $H_0 = 5\text{ м}$ ,  $10\text{ м}$  и  $15\text{ м}$ . Видно, что чем выше эта начальная, тем больше площади покрывает волна затопления.

За время около 300с или 5 мин фронт волны наводнения проходит вниз по руслу реки Нарын расстояние 6000 м (смотрите рисунок 3.38в). В при этом не учитывается взаимодействие потока воды с растительностью русла реки и различными строениями, которые заметно изменяют общую картину течения, приводя к увеличению зоны затопления.

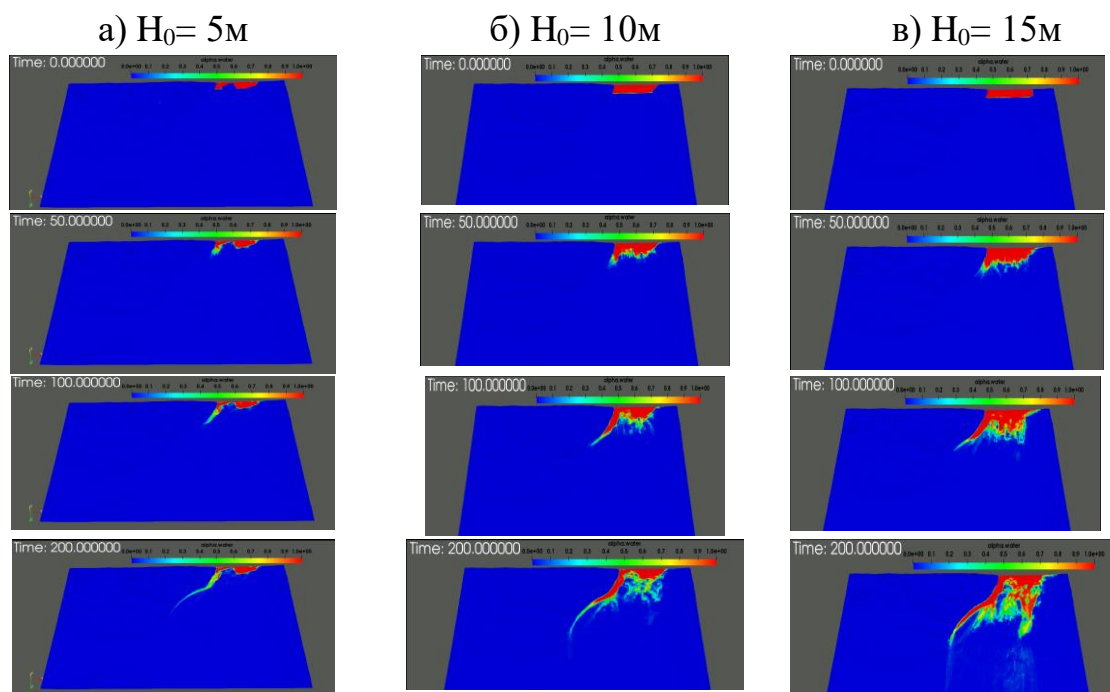


Рисунок 3.38 - Развитие волны прорыва для разной высоты водного столба



Здесь необходимо особо отметить, что из-за ограниченности вычислительных возможностей имеющегося компьютера, размер расчетной сетки был выбран относительно большим. Поэтому, приведенные результаты расчета следует признать, как оценочные, которые требуют верификации на более мелкой сетке с использованием высокопроизводительных вычислительных систем.

Далее рассмотрен случай наводнения на этой местности, дополненной с моделями восьми домов.

В этом случае общее число вычислительных ячеек равно 2 062 935, из них 1 786 565 гексаэдров, 11 819 призмы, 262 740 полиэдров и 1 811 тетраэдров. Общее время расчета на компьютере с процессором Intel® Core i5-8250U с частотой 1.60 ГГц и установленной оперативной памятью 8 ГБ составило 369 628с, или около 103 часа.

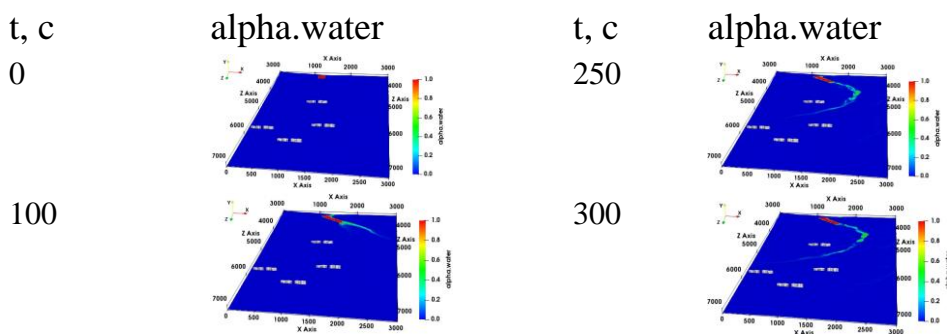


Рисунок 3.40 - Эволюция волны прорыва для начальной высоты водного столба  $H=15\text{м}$ .

В целях экономии вычислительного времени, размер расчетной области уменьшен примерно в 3 раза по сравнению с первым случаем и был равен  $3000\text{м} \times 7000\text{м} \times 500\text{м}$ .

**Выводы по третьей главе:** Рассмотрены несколько тестовых задач позволяющих проводить верификацию выбранного пакета OpenFOAM7 на различных задачах вычислительной гидродинамики. Рассмотрены и решены все 4 задачи которые сформулированы для достижения поставленной цели диссертационной работы.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Основные результаты и выводы диссертационной работы состоят в следующих моментах:

1. Проведена верификация пакета OpenFOAM7 на различных задачах вычислительной гидродинамики. Обнаружено, что при ламинарном обтекании круглого цилиндра использованные схемы третьего и второго

порядка точности по числу Струхаля дают значение 0.172, что согласуется с экспериментальными и численными данными с точностью 4.2%. Схемы первого порядка MinmodV и upwind дают на 8.4% и 14% заниженные значения числа Струхаля соответственно.

2. Разработан метод оценки остаточной погрешности на грани контрольного объема для течения в канале с каверной, позволяющий оценивать погрешность путем сравнения значений, экстраполированных на грань из соседних узлов. Построена автоматическая процедура адаптации сетки в областях с большими градиентами давления и скорости, путем повторного определения ячеек, разделяющих грань с большой ошибкой, разделением их параллельно грани.

3. Предложен метод автоматического построения трёхмерной расчетной сетки для задач обтекания модели здания и реальной местности поймы реки Нарын около посёлка Шамалды-Сай. Этот метод позволяет эффективно проводить численное моделирование возможного наводнения, составить карту затопления этой местности.

4. Проведён расчет возможного наводнения вблизи посёлка Шамалды-Сай, Кыргызстан. Обнаружено, что для трёх различных начальных высот водного столба  $H_0 = 5\text{м}$ ,  $10\text{м}$  и  $15\text{м}$  площади затопления имеют разные значения - с ростом начальной высоты растет площадь затопления в зависимости от топологии местности.

## **СПИСОК ОПУБЛИКОВАННЫХ РАБОТ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ**

1. **Акназарова, С. С.** Моделирование турбулентного обтекания куба методом крупных вихрей [Текст] / С. С. Акназарова, А. К. Калеева, А. Т. Калмурзаева. // Известия Ошского технологического университета 2018. №1-1. ст.102-108. – То же: [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://elibrary.ru/item.asp?id=37351800>

2. **Жайнаков, А. Ж.** Моделирование трёхмерного нестационарного течения в каверне [Текст] / А. Ж. Жайнаков, А. Ы. Курбаналиев, А. Т. Калмурзаева, Г. Т. Сулайманова. // В сборнике: Проблема «Оптимизации сложных систем». Материалы Международной школы – семинар. 2018 г. ст.214-219. – То же: [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=37014647>

3. **Жайнаков, А. Ж.** Моделирование трехмерного турбулентного течения методом крупных вихрей. [Текст] / А. Ж. Жайнаков, А. Ы. Курбаналиев, С. С. Акназарова, А. Т. Калмурзаева. // Известия Кыргызский государственный технический университет им. И. Разаков. 2019г. №2-1(50) ст. 344-349. – То же: [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=39537361>

**4. Жайнаков, А. Ж.** Алгоритм моделирования обтекания двумерных отрывных течений в пакете OPENFOAM. [Текст] / А. Ж. Жайнаков, А. Ы. Курбаналиев, А. Т. Калмурзаева, А. Б. Турганбаева. //Известия Кыргызский государственный технический университет им. И. Разаков. 2019г. №2-1(50) ст. 340-344. – То же: [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=39537360>

**5. Калмурзаева, А. Т.** Моделирование турбулентного течения методом больших вихрей в пакете OPENFOAM. [Текст]/ А. Т. Калмурзаева, А. Ы. Курбаналиев, С. С. Мамаев, С. С. Акназарова. //Проблема «Оптимизации сложных систем». Материалы Международной школы –семинар. 2019г.ст. 46-51, Новосибирск, Россия. – То же: [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://elibrary.ru/item.asp?id=41540168>.

**6. Курбаналиев, А. Ы.** Программа для моделирования ламинарного течения в двумерной квадратной каверне с подвижной верхней крышкой в пакете *Matlab*. [Текст]/ А. Ы. Курбаналиев, А. Т. Калмурзаева. //Кыргыз патент. Авторское свидетельство. Программа для ЭВМ. 14.02.2020г. №604. – То же: [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://drive.google.com/file/d/1n4sfxgwpFDCSbVktchBdghTaZolPfcvs/view>

**7. Курбаналиев, А. Ы.** Программа для моделирования течения в двумерной каверне на основе проекционного метода. [Текст] / А. Ы. Курбаналиев, А. Т. Калмурзаева, М.Ж.Калбекова. Кыргыз патент. Авторское свидетельство. Программа для ЭВМ. 08.10. 2020г. №639. – То же: [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://patent.gov.kg/wp-content/uploads/2023/06/%D0%98%D0%9C-11-2020.pdf>

**8. Курбаналиев, А. Ы.** Критическое сравнение различных версий пакета OPENFOAM на задаче моделирования водослива. [Текст] / А. Ы. Курбаналиев, Б. Р. Ойчуева, А. Т. Калмурзаева, А. Ж. Жайнаков, Т. Ч. Култаев.// Вычислительные технологии. ISSN 1560-7534.Том 26 №1. Федеральный исследовательский центр Информационных и вычислительных технологий. 2021г. Т.26, стр.44-57. Новосибирск, Россия. Doi 10.257433/ICT.2021.26.2.004 – То же: [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=45668393>

**9. Курбаналиев, А. Ы.** Программа для численного решения уравнений Навье-Стокса в двумерном приближении. [Текст] / А. Ы. Курбаналиев, А. Т. Калмурзаева, М. Ж. Калбекова, Марс кызы Таттыбубу.// Кыргыз патент. Авторское свидетельство. Программа для ЭВМ. 2021г., №672, 25.02.2021. <http://old2.patent.kg/wp-content/uploads/2021/04/%D0%98%D0%9C-41-2021.pdf>

**10. Калмурзаева, А. Т.** Численное моделирование нестационарного обтекания кругового цилиндра. [Текст] / А. Т. Калмурзаева, З. К. Абдумиталипова, А. Ы. Курбаналиев, Марс кызы Таттыбубу. // Вестник Ошского государственного университета. ISSN 1694-7452. 2021, Том 1. №1

Ст.144-150. – То же: [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=46561758>

**11. Калбекова, М. Ж.** Мультифизическое моделирование процесса теплопроводности [Текст] / М. Ж. Калбекова, Марс кызы Таттыбубу, Ормош кызы А., А. Т. Калмурзаева. // Вестник Ошского государственного университета. ISSN 1694-7452. 2021. Том 1 №1 Ст. 136-143. – То же: [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=46561757>

**12. Калмурзаева, А. Т.** Программа для решения задачи численного моделирования течения квадратной каверне с использованием гибридной схемы дискретизации с использованием алгоритма SIMPLE. [Текст] / А. Т. Калмурзаева, А. Ы. Курбаналиев, Марс кызы Таттыбубу // Кыргыз патент. Авторское свидетельство. Программа для ЭВМ. 2021г. №693, 27.03.2021. – То же: [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://old2.patent.kg/wp-content/uploads/2021/07/%D0%98%D0%9C-622021.pdf>

**13. Kurbanaliev, A. Y.** Turbulent Flow Modelling using open source packages OpenFOAM and Paraview. A. Y. Kurbanaliev, A. T. Kalmurzaeva., B. R. Oichueva, A. B. Turganbaeva. // Proceedings of 5<sup>th</sup> International Conference on Advances in Natural and Applied Sciences, 21-23 September 2021, Ağrı, Turkey. – То же: [Электронный ресурс]. – Режим доступа: [https://drive.google.com/file/d/1AoYVR21NPQSyfHvnCILs2\\_Mb3048UBu7/view](https://drive.google.com/file/d/1AoYVR21NPQSyfHvnCILs2_Mb3048UBu7/view)

**14. Калмурзаева, А. Т.** Численное моделирование течения в каверне при умеренных числах Рейнольдса. [Текст] / А. Т. Калмурзаева // Горный журнал. Кыргызский государственный университет геологии, горного дела и освоения природных ресурсов имени академика У. Асаналиева. Бишкек 2021. стр. 18-22. – То же: [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://ksmu.kg/wp-content/uploads/2021/11/zhurnal-01.10.2021.pdf>

**15. Курбаналиев, А. Ы.** Численное моделирование течения в канале с каверной методом адаптивных сеток. [Текст] / А. Ы. Курбаналиев, А. Т. Калмурзаева, Марс кызы Таттыбубу. // "Современные проблемы механики, гидрогазодинамика, геомеханика, геотехнологии и информатика" № 43(1), 2021 г. Бишкек. – То же: [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://elibrary.ru/item.asp?id=48227013>

**16. Курбаналиев, А. Ы.** Исследование точности аппроксимации временной производной в OpenFOAM. [Текст] / А. Ы. Курбаналиев, А. Т. Калмурзаева, Марс кызы Таттыбубу. // "Современные проблемы механики, гидрогазодинамика, геомеханика, геотехнологии и информатика". № 43(1), 2021 г. Бишкек. – То же: [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://elibrary.ru/item.asp?id=48227009>

**17. Kurbanaliev, A. Y.** Critical reviewing of OpenFOAM buoyantcavity tutorial. [Текст] / A. Y. Kurbanaliev, M. Zh. Kalvekova, A. T. Kalmurzaeva, T. Dyikanova. // AIP Conference Proceedings 2402, 20009 2021г. DOI

10.1063/5.0071571. – То же: [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=47558659>

**18. Kurbanaliev, A.Y.** Numerical Simulation of Nonstationary Laminar Flow around a Circular Cylinder. [Текст] / A. Y. Kurbanaliev, A. T. Kalmurzaeva, M. Zh. Kalvekova. A. T. Dyikanova, N. A. Amankulova// AIP Conference Proceedings 2402, 2021г. DOI 10.1063/5.0071578. – То же: [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=47557342>

**19. Калмурзаева, А.Т.** Анализ ошибок вычислений при моделировании плоской струи. [Текст] / А. Т. Калмурзаева., Т.Т.Ташполотов// Наука, новые технологии и инновации Кыргызстана №5, 2023г. Бишкек То же: [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://elibrary.ru/item.asp?id=54791066>

**20. Курбаналиев, А. Ы.** Численное моделирование наводнения в пойме реки нарын вблизи городка Шамалды-Сай [Текст] / А. Ы. Курбаналиев, А. Т. Калмурзаева.// "Современные проблемы механики, гидрогазодинамика, геомеханика, геотехнологии и информатика". №52(2), 2023 г. Бишкек. – То же: [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://elibrary.ru/item.asp?id=55163157>

**21.Курбаналиев, А. Ы.** Программа для подготовки данных для моделирования я естественной конвекции в прямоугольной каверне в пакете OPEN FOAM [Текст] / А. Ы. Курбаналиев, А. Т. Калмурзаева, М. Ж. Калбекова.// Кыргыз патент. Авторское свидетельство. Программа для ЭВМ. 2022г., .№742, 11.04.2022. <http://patent.gov.kg/wp-content/uploads/2022/12/%D0%98%D0%9C-7-2022.pdf>

**22.Калмурзаева, А. Т.** Программа для подготовки данных для моделирования я естественной конвекции в прямоугольной каверне в пакете OPEN FOAM [Текст] / А. Т. Калмурзаева, А. Ы. Курбаналиев, Т.Т.Ташполотов.// Кыргыз патент. Авторское свидетельство. Программа для ЭВМ. 2022г., .№742, 11.04.2022. <http://patent.gov.kg/wp-content/uploads/2022/10/%D0%98%D0%9C-92022.pdf>

**05.13.16 - илимий изилдөөлөрдө эсептөө техникаларын, математикалык моделдөөнү жана математикалык методдорду колдонуу адистиги боюнча физика-математика илимдеринин кандидаты илимий даражасын алуу үчүн Калмурзаева Анипа Ташбаевнанын «Контролдук көлөмдөр ыкмасынын эсептөө каталыктарын анализдөө» аттуу темадагы диссертациялык ишинин**

## **РЕЗЮМЕСИ**

**Ачкыч сөздөр:** турбуленттүүлүк, дискретизациялоо, контролдук көлөм ыкмасы, интерполяция ыкмалары, OpenFOAM7.

**Изилдөө объектиси.** Навье-Стокстун стационардык жана стационардык эмес теңдемелеринин OpenFOAM7 пакетиндеги сандык чечими.

**Изилдөөнүн предмети.** OpenFOAM7 пакетинин контролдук көлөмдөр ыкмасын колдонуу менен Навье-Стокс теңдемелерин дискретизациялоо ыкмалары.

**Изилдөөнүн максаты.** Кыргызстандын Шамалды-Сай айылына жакын жердеги Нарын дарыясынын жайылмасында мүмкүн боло турган суу ташкынынын сандык эсептөөлөрүнүн мисалында, кысылбаган суюктуктун жана газдын агымдарынын OpenFOAM7 акысыз колдонмо пакетинин алкагында моделин тандоодо жана аны моделдөө ыкмасын өнүктүрүү.

**Изилдөө ыкмасы.** OpenFOAM7 пакетиндеги эсептөө гидродинамикасынын маселелерин математикалык моделдөө.

### **Алынган натыйжалар жана алардын жаңылыгы:**

1. OpenFOAM7 пакетинин текшерүү эсептөө гидродинамикасынын ар кандай маселелери боюнча жүргүзүлдү. Тегерек илиндрдин айланасындагы ламинардык агымда, колдонулган үчүнчү жана экинчи тактыктагы схемалар Струхал саны боюнча 0.172 маанисин берери аныкталды, ошондой эле эксперименталдык жана сандык маалыматтарга 4.2% тактыкта дал келет. Струхал саныны боюнча биринчи тартиптеги MinmodV жана upwind схемалары тиешелүү түрдө 8.4% и 14% тактыкта төмөндөтүлгөн маанисин беришет.

2. Кавернасы бар каналдагы агым үчүн контролдук көлөмдүн бетиндеги калдык катаны баалоо ыкмасы иштелип чыкты. Басымдын жана ылдамдыктын чоң градиенттери бар аймактарда торчону ылайыкташтыруунун автоматтык процедурасы бетти чоң ката менен бөлүп турган торчолорду бетке параллел бөлүү жолу менен кайра түзүлөт.

3. Шамалды-Сай айылынын жанындагы Нарын дарыясынын жайылмасынын реалдуу аянтынын жана имараттын моделинин айланасындагы агымдын маселелери үчүн үч өлчөмдүү эсептөөчү торчону автоматтык түрдө түзүү ыкмасы сунушталды. Бул ыкма ушул жерде мүмкүн болгон суу каптоону натыйжалуу сандык моделдештирүүгө, суу каптоонун картасын түзүүгө мүмкүндүк берет.

4. Шамалды-Сай айылына жакын жерде мүмкүн болуучу сел каптоону эсептөө жүргүзүлдү. Суу мамычасынын баштапкы бийиктигинин үч түрдүү  $H_0 = 5\text{м}$ ,  $10\text{м}$  жана  $15\text{м}$  маанилери үчүн сел каптоо аянты ар кандай мааниге ээ экендиги байкалды – баштапкы бийиктиктин өсүшү менен суу каптоо аянты аймактын топологиясына жараша көбөйөт.

**Колдонуу чөйрөсү:** Иштин натыйжалары турбуленттүү агымдарды математикалык моделдөө ыкмасына белгилүү бир салым кошот. Эсептөө гидродинамикасынын ар кандай маселелери боюнча колдонулган OpenFOAM7 ачык пакетин текшерүүнү, пакетти ийне-жибине чейин документтештирүүнү өнүктүрүүнү өзгөчө баса белгилөө керек.



## РЕЗЮМЕ

диссертации Калмурзаевой Анипы Ташбаевны на тему: «Анализ вычислительных погрешностей метода контрольных объёмов» на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 05.13.16 - Применение вычислительной техники, математического моделирования и математических методов в научных исследованиях

**Ключевые слова:** турбулентность, дискретизация, метод контрольных объёмов, методы интерполяции, OpenFOAM7.

**Объект исследования.** Численное решение систем стационарных и нестационарных уравнений Навье-Стокса в пакете OpenFOAM7.

**Предмет исследования.** Методы дискретизации уравнений Навье-Стокса методом контрольных объёмов пакета OpenFOAM7.

**Цель исследования.** Выбор модели и развитие метода моделирования течений несжимаемой жидкости и газа в рамках бесплатного прикладного пакета OpenFOAM7 на примере численных расчетов возможного наводнения в пойме реки Нарын вблизи посёлка Шамалды-Сай, Кыргызстан.

**Метод исследования.** Математическое моделирование задач вычислительной гидродинамики в пакете OpenFOAM7.

### **Полученные результаты и их новизна:**

1. Проведена верификация пакета OpenFOAM7 на различных задачах вычислительной гидродинамики. Обнаружено, что при ламинарном обтекании круглого цилиндра использованные схемы третьего и второго порядка точности по числу Струхала дают значение 0.172, что согласуется с экспериментальными и численными данными с точностью 4.2%. Схемы первого порядка MinmodV и upwind дают на 8.4% и 14% заниженные значения числа Струхала соответственно.

2. Разработан метод оценки остаточной погрешности на грани контрольного объема для течения в канале с каверной. Построена автоматическая процедура адаптации сетки в областях с большими градиентами давления и скорости, путем повторного определения ячеек, разделяющих грань с большой ошибкой, разделением их параллельно грани.

3. Предложен метод автоматического построения трёхмерной расчетной сетки для задач обтекания модели здания и реальной местности поймы реки Нарын около посёлка Шамалды-Сай. Этот метод позволяет эффективно проводить численное моделирование возможного наводнения, составить карту затопления этой местности.

4. Проведён расчет возможного наводнения вблизи посёлка Шамалды-Сай, Кыргызстан. Обнаружено, что для трёх различных значений начальной высоты водного столба  $H_0 = 5\text{м}$ ,  $10\text{м}$  и  $15\text{м}$  площади затопления имеют разные значения - с ростом начальной высоты растет площадь затопления в зависимости от топологии местности

**Область применения:** Результаты данной работы вносят определенный вклад в метод математического моделирования турбулентных течений. Особо следует подчеркнуть верификацию использованного открытого пакета OpenFOAM на различных задачах вычислительной гидродинамики, развитие детального документирования пакета.

## RESUME

**of the dissertation of Kalmurzayeva Anipa Tashbaevna on the topic: "Analysis of computational errors of the control volume method" for the degree of Candidate of Physical and Mathematical Sciences in specialty 05.13.16 - Application of computer engineering, mathematical modeling and mathematical methods in scientific research**

**Keywords:** turbulence, discretization, control volume method, interpolation methods, OpenFOAM7.

**The object of the study.** Numerical solution of systems of stationary and non-stationary Navier-Stokes equations in the OpenFOAM7 package.

**The subject of the study.** Methods of discretization of the Navier–Stokes equations by the control volume method of the OpenFOAM7 package.

**The aim of the study.** Selection of a model and development of a method for modeling of incompressible fluid and gas flows within the framework of the free OpenFOAM7 applied package on the example of numerical simulations of possible flooding in the floodplain of the Naryn River near the village of Shamaldy-Sai, Kyrgyzstan.

**The research method.** Mathematical modeling of computational fluid dynamics problems in the OpenFOAM7 package.

**The results obtained and their novelty:**

1. Verification of the OpenFOAM7 package was carried out on various computational fluid dynamics problems. It was found that for laminar flow around a round cylinder, the used schemes of the third and second order of accuracy in terms of the Strouhal number give a value of 0.172, which is consistent with experimental and numerical data with an accuracy of 4.2%. The first-order schemes MinmodV and upwind give 8.4% and 14% underestimated values of the Strouhal number, respectively.

2. A method has been developed for estimating the residual error on the edge of the control volume for flow in a channel with a cavern. An automatic procedure for adapting the grid in areas with large pressure and velocity gradients is constructed by re-determining the cells separating the face with a large error by dividing them parallel to the face.

3. A method of automatic construction of a three-dimensional computational grid for the problems of flow around the building model and the real terrain of the floodplain of the Naryn River near the village of Shamaldy-Sai is proposed. This method makes it possible to effectively carry out numerical modeling of possible flooding, to make a flooding area map.

4. A possible flood was calculated near the village of Shamaldy-Sai, Kyrgyzstan. It was found that for three different initial heights of the water column  $H_0 = 5\text{m}$ ,  $10\text{m}$  and  $15\text{m}$ , the flooding area has different values - with an increase in the initial height, the flooding area increases depending on the topology of the terrain

**Scope of application:** The results of this work make a certain contribution to the method of mathematical modeling of turbulent flows. The verification of the OpenFOAM package used for various computational fluid dynamics tasks, the development of detailed documentation of the package should be emphasized.



Формат 60x84 1/16. Объем 1,5 п.л.  
Бумага офсет. Офсетный печать. Тираж 100 экз.

ЧП «Сарыбаев Т.Т.»  
г. Бишкек, ул. Раззаков 49  
т. 0 708 058 368