

**МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ КЫРГЫЗСКОЙ
РЕСПУБЛИКИ**

**КЫРГЫЗСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ
УНИВЕРСИТЕТ им. И. Раззакова**

**КЫРГЫЗСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ
СТРОИТЕЛЬСТВА, ТРАНСПОРТА И АРХИТЕКТУРЫ им. Н. Исанова**

Диссертационный совет Д.01.12.005

На правах рукописи

УДК 532.546

КУРБАНАЛИЕВ АБДИКЕРИМ ЫРЫСБАЕВИЧ

**МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ВНУТРЕННИХ И
ВНЕШНИХ ОДНО- И ДВУХФАЗНЫХ ТУРБУЛЕНТНЫХ ТЕЧЕНИЙ
НА ОСНОВЕ МЕТОДА КОНТРОЛЬНЫХ ОБЪЕМОВ**

Специальность 01.02.05 – Механика жидкости, газа и плазмы

АВТОРЕФЕРАТ

**диссертации на соискание ученой степени
доктора физико-математических наук**

БИШКЕК – 2014

Работа выполнена в Кызыл-Кийском гуманитарно-педагогическом институте
Баткенского государственного университета

Научный консультант: доктор физико-математических наук, профессор, академик НАН КР, Заслуженный деятель науки КР, Народный учитель КР **Жайнаков А. Ж.**

Официальные оппоненты: доктор физико-математических наук, профессор **Туганбаев У. М.** (Кыргызский Национальный аграрный университет им. К.И. Скрябина).

доктор физико-математических наук, профессор **Курбацкий А. Ф.** (Институт теоретической и прикладной механики Сибирского отделения РАН, Новосибирск, Россия).

доктор технических наук, профессор **Абдылдаев М. Ю.** (Кыргызский национальный университет им. Ж. Баласагына).

Ведущая организация: Научно-исследовательский институт математики и механики Казахского национального университета им. Аль-Фараби, Алматы, Казахстан

Защита состоится « 14 » февраля 2014г. в 14⁰⁰ часов на заседании диссертационного Совета Д.01.12.005 по защите диссертаций на соискание ученой степени доктора (кандидата) наук при Кыргызском Государственном техническом университете им. И. Раззакова 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 Кыргызского Государственного университета строительства и архитектуры им. Н. Исанова

Автореферат разослан « 10 » января 2014г.

Ученый секретарь
диссертационного Совета Д.01.12.005,
к.ф. – м.н., доцент

Ж. Ж. Доталиева

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы диссертации. Благодаря бурному развитию быстродействующих вычислительных комплексов и методов численного решения нелинейных взаимосвязанных интегро-дифференциальных уравнений, математическое моделирование в данное время является одним из эффективных методов исследований в различных областях науки и техники. По этой причине математическое моделирование сильно дополняет физический эксперимент, даже в некоторых случаях подменяет его. Поэтому методы математического моделирования являются наиболее результативными методами решения сложных взаимосвязанных систем нелинейных дифференциальных уравнений в частных производных.

Достаточно широкое количество процессов, протекающих в химических и других технологических процессах, большинство явлений, встречающихся в метеорологии, океанологии, гидродинамике и гидравлике, из-за малых характерных скоростей течений можно описать в рамках системы уравнений Навье-Стокса для несжимаемой вязкой жидкости. При моделировании такого класса задач, возникает целый ряд требований к численным методам решения, такие как высокий порядок аппроксимаций временного, диффузионного, конвективного и источникового членов, минимальная схемная диффузия, устойчивость и монотонность.

В данной работе представлены результаты трехмерного численного моделирования турбулентного внутренних и внешних (со свободными границами) одно – и двухфазных течений жидкости на основе метода конечных объемов. В данном методе зависимые переменные хранятся в центрах контрольных объемов, что приводит к меньшим требованиям к памяти компьютера и относительно малому времени вычислений по сравнению с методом конечных элементов.

Логически данная работа состоит из двух частей. Первая часть посвящена моделированию внутренних (ограниченных) турбулентных течений. Рассмотрены задачи моделирования в каверне, в канале прямоугольного сечения и в канале с диффузорным выходом. Многие тестовые задачи выбраны из классической базы данных Европейского сообщества исследований течений, турбулентности и горения ERCOFTAC.

Математическое моделирование с применением современных прикладных пакетов вычислительной гидродинамики является эффективным инструментом прогнозирования различных техногенных и природных явлений. По числу повторяемости, площади распространения и ежегодному материальному ущербу среди природных стихийных катаклизмов затопление водой местности и населенных пунктов занимает первое место. Данный класс течений характеризуется нелинейностью краевой задачи и сложностью определения неизвестной формы свободной границы. В качестве примеров можно перечислить такие явления, как нестационарное течение жидкости в канале с неровным дном, временное изменение свободной границы в поле силы тяжести, движение различных тел

в жидкости, взаимодействие поверхностных волн с различными инженерными берегозащитными сооружениями, препятствиями и т.д. Математическое моделирование течений жидкости и газа является важнейшим элементом решения сложных инженерных задач. Основным инструментом моделирования таких течений является вычислительный эксперимент. При рассмотрении реальных технических устройств, как правило, приходится работать с очень сложной геометрией, что приводит к необходимости использования в расчетах неструктурированных сеток.

Связь темы диссертации с научными программами или научно-исследовательскими работами. Работа выполнена в соответствии с планом НИР Кызыл–Кийского гуманитарного педагогического института Баткенского государственного университета.

Цель и задачи исследования.

Построение модели и эффективной методологии, способной, предсказать внутренние и внешние одно – и двухфазных течений двух несмешивающиеся жидкостей, разделенных между собой четко выделенной межфазной границей.

Для достижения поставленной цели решались следующие задачи:

- проведение систематических расчетов турбулентных течений с помощью полуэмпирических моделей и их сравнение с различными достаточно надежными и информативными экспериментальными данными классической базы данных ERCOFTAC;
- описание методики подготовки расчетной сетки с учетом сложной топологии реальной местности;
- расчет процесса наводнения на реальной местности;
- верификация открытого пакета OpenFOAM на задачах прорыва дамбы.

Научная новизна полученных результатов работы.

- разработана методика численного моделирования внутренних трехмерных отрывных задач динамики вязкой несжимаемой жидкости методом контрольных объемов;
- разработана методика численного моделирования трехмерных нелинейных задач динамики вязкой несжимаемой жидкости со свободными границами методом контрольных объемов;
- разработана методика подготовки трехмерной расчетной сетки с учетом сложной топологии реальной местности;
- проведены в полной трехмерной постановке численные расчеты задач прорыва дамбы различных значениях варьируемых параметров.

Путем использования полученных результатов расчет процесса наводнения на реальной местности вблизи г. Ош проведен впервые.

Практическая значимость полученных результатов. Определенная часть материалов, приведенных в диссертации, является частью семестрового спецкурса «Методы компьютерного моделирования физических процессов», читаемого автором в Кызыл–Кийском гуманитарно-педагогическом институте Баткенского государственного университета для студентов специальностей «Физика» и «Прикладная математика и информатика».

Кроме того, результаты математического моделирования задачи прогнозирования последствий техногенных и природных явлений могут быть полезными при сооружении различных инженерных и берегозащитных сооружений, предназначенных для уменьшения возможных экономических и людских убытков при наводнениях.

Основные положения диссертации, выносимые на защиту.

1. Разработана методика построения трехмерной расчетной сетки с точностью, необходимой для широкого круга задач моделирования процессов затопления территорий со сложным рельефом.
2. Математические модели на основе численного интегрирования полных трехмерных уравнений Навье-Стокса, позволяющие адекватно описывать нестационарную динамику воды на сложном рельефе. Компьютерное моделирование дает возможность в реальном времени определять территорию и время затопления, глубину воды на всей местности, поле скоростей и гидродинамический удар от волны затопления.
3. Разработанная технология является универсальной и может быть использована для расчета динамики поверхностных вод для произвольной территории. Моделирование проводится на заданной местности с учетом реального рельефа. Показано, что особенности рельефа являются определяющим фактором. Расчеты демонстрируют наличие существенной нелинейной связи между динамикой воды и характером рельефа.
4. Методические расчеты путем последовательного измельчения расчетной сетки при отслеживании воздушных капель показывают, что при чрезмерном измельчении ухудшается сходимость численного решения, и общее время расчета неоправданно увеличивается; вне зависимости от способа получения мелкой сетки, получаются неправдоподобные значения скорости воздуха вблизи свободной границы.
5. При моделировании турбулентного течения в канале прямоугольного сечения с наклонным уступом показано возможность появления вторичной зоны рециркуляции около верхней стенки, размер которой зависит от числа Рейнольдса, рассчитанного по высоте уступа.

Достоверность полученных результатов проверена на примере классических задач вычислительной гидродинамики путем сравнения численных данных с соответствующими экспериментальными данными и расчетами других авторов.

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. В обсуждении результатов принимали участие научный консультант, академик НАН КР, д.ф.–м.н., профессор А. А. Жайнаков, д.ф.–м.н., профессор М. М. Тайиров, д.ф.–м.н., профессор А. С. Сопуев.

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

- Международная конференция «Вычислительные и информационные технологии в науке, технике и образовании – 2013 (ВИТ–2013)». Восточно-Казахстанский государственный технический университет им.Д. Серикбаева Усть-Каменогорск, Казахстан, 18–22 сентября 2013 года.
- Семинар факультета геофизики университета Индианы, Блумингтон, США, 23 ноября 2010 года.
- Семинар «Вычислительные возможности Comsol Multiphysics 3.5a». Университет Феникса, Индианаполис, США, 10 март 2010 года.
- Двадцать пятая ежегодная конференция института вычислительной гидродинамики. Университет Оксфорда, Великобритания, 15–16 сентября 2008 года.
- Республиканская научно-практическая конференция «Стратегия развития системы общего среднего образования». Узбекский научно исследовательский институт педагогических наук им. Кары Ниязи, Ташкент, Узбекистан, 20–21 октября 2006 года.
- Одиннадцатая ежегодная конференция по Центральной Евразии. Университет Индианы, Блумингтон, США, 3 апреля 2003 года.

Полнота отражения результатов диссертации в публикациях. Основные результаты исследований опубликованы в 36 научных статьях и одной монографии.

Структура и объем диссертации. Диссертация состоит из введения, 6 глав, заключения, библиографии и двух приложений. Работа содержит 206 страниц текста, 84 рисунка, 4 таблицы и 178 библиографическую ссылку.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность темы, сформулированы постановка исследуемой проблемы, цели и задачи исследования, представлены научная новизна и практическая значимость работы. Анализируются современные подходы в моделировании течений несжимаемой жидкости, их преимущества и недостатки. Кратко описаны структура и основное содержание диссертации по главам.

В первой главе, которая состоит из четырёх параграфов, рассмотрены современные методы вычислительной гидродинамики. Приведены приближения уравнений Навье-Стокса для расчета турбулентных одно- и двухфазных течений, с учетом их возможностей и ограничений. Описаны наиболее распространенные модели турбулентности, используемые для замыкания усреднённых по Рейнольдсу уравнений Навье-Стокса.

Рассмотренные дальше течения со свободной границей являются достаточно сложным классом течения с движущимися границами. Положения границ известны в начальный момент времени, их последующие изменения определяются как часть общего решения. Приведены основные сведения о методах определения положения свободной границы.

Делается вывод, что при нынешнем уровне развития вычислительных систем, численное моделирование трёхмерных нестационарных многофазных течений с ориентацией полученных результатов на решение инженерно-технических задач основывается в основном на усреднённых по Рейнольдсу уравнений Навье-Стокса с полуэмпирическими моделями турбулентности, а для определения положения свободной границы применяется метод объема жидкости.

Уравнения неразрывности и переноса количества движения вместе образуют усреднённых по Рейнольдсу систему уравнений Навье-Стокса и для несжимаемого течения при отсутствии массовых сил имеют вид:

$$\frac{\partial}{\partial x_i}(\rho \bar{u}_i) = 0; \quad \frac{\partial}{\partial t}(\rho \bar{u}_i) + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho \bar{u}_i \bar{u}_j + \rho \bar{u}'_i \bar{u}'_j) = -\frac{\partial \bar{p}}{\partial x_i} + \frac{\partial \bar{\tau}_{ij}}{\partial x_j} \quad (1)$$

где \bar{u}_i – компоненты средней скорости, ρ – плотность, \bar{p} – среднее давление, $\bar{\tau}_{ij} = \mu \left(\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} + \frac{\partial \bar{u}_j}{\partial x_i} \right)$ – тензор вязких напряжений, связанный с молекулярной вязкостью μ , $\rho \bar{u}'_i \bar{u}'_j$ – напряжения Рейнольдса, требующие моделирования. При наличии внешних сил эти уравнения необходимо дополнить соответствующими членами.

Учет турбулентных пульсаций на гидродинамику течения базировался на двухпараметрических моделях турбулентности.

Особое место при моделировании рассматриваемого класса течений занимает метод определения границы раздела между двумя фазами — водой и воздухом. Согласно основной идее метода объема жидкости, для каждой вычислительной ячейки определяется некоторая скалярная величина, представляющая собой степень заполнения этой же ячейки одной фазой, например водой. Если в какой-то ячейке эта величина равна 0, то она пустая, если равна 1, то она полностью заполнена. Соответственно, если ее значение лежит между 0 и 1, то можно сказать, что эта ячейка содержит свободную (межфазную) границу. Другими словами, объемная доля воды α определяется как отношение объема воды в ячейке на полный объем данной ячейки. Соответственно, $1 - \alpha$ представляет собой объемную долю второй фазы — воздуха в данной ячейке. В начальный момент времени дается распределение поля этой величины и дальнейшая ее временная эволюция вычисляется как решение следующего транспортного уравнения:

$$\frac{\partial \alpha}{\partial t} + \frac{\partial (\alpha \bar{u}_i)}{\partial x_i} = 0. \quad (2)$$

Положение свободной границы определяется уравнением: $\alpha(x, y, z, t) = 0$. Поэтому, физические свойства газожидкостной смеси определяются осреднением с соответствующим весовым коэффициентом:

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

Здесь индексы 1 и 2 соответствуют жидкой и газовой фазе.

Суть метода объема жидкости (Volume of Fluid), имплементированного в решатель `interFoam` пакета `OpenFOAM` заключается в том, что граница раздела двух фаз не вычисляется явно, но до некоторой степени определяется как свойство поля объемной доли воды. Так как значения объемной доли заключены между 0 и 1, фазовая граница не определяется точно, однако, она занимает некоторую область, где поблизости должна существовать резкая межфазная граница.

Во второй главе, состоящая из трёх параграфов, 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.

Для вычисления интегралов по контрольному объёму использовался метод Гаусса, а соответствующие значения величин на гранях контрольного объема вычислялись из значений в центрах соседних ячеек путем применения тех или иных интерполяционных схем. Сведения о методах дискретизации приведены табл. 1.

Таблица 1. Схемы дискретизации.

Уравнение	Производная по времени	Конвективный член	Диффузионный член
Момент импульса	Euler	Gauss linear	Gauss linear
объемная доля жидкости, α	Euler	Gauss vanLeer	Gauss linear
Кинетическая энергия турбулентности, k	Euler	Gauss upwind	Gauss linear
Скорость диссипации энергии, ε	Euler	Gauss upwind	Gauss linear

Третья глава из восьми параграфов посвящена способам реализации основных этапов разработки численного метода для выбранного класса задач, в частности: особенностям методов решения задач для несжимаемой жидкости в естественных переменных, методам решения результирующей системы линейных алгебраических уравнений. Указаны преимущества и недостатки рассмотренных методов, определены конкретные пути реализации поставленной задачи. Особое внимание уделено методу интерполяции Рай-Чоу, позволяющую исключить известную проблему получения волнообразных численных решения полей скорости и давления. Сведения о методах решения алгебраических уравнений приведены табл. 2.

Таблица 2. Решатели уравнений для основных переменных.

Уравнение	Решатель	Точность
Коррекция давления	метод сопряженных градиентов с предобуславливанием, PCG	1e-10
Давление	метод сопряженных градиентов с предобуславливанием, PCG	1e-7
Скорость	метод бисопряженных градиентов с предобуславливанием, PBiCG	1e-6
Кинетическая энергия турбулентности, k	метод бисопряженных градиентов с предобуславливанием, PBiCG	1e-6
Скорость диссипации энергии, ε	метод бисопряженных градиентов с предобуславливанием, PBiCG	1e-6

Для решения уравнения переноса (2) для объемной доли жидкости α применяется, созданный в компании OpenCFD решатель MULES, использующий многомерный универсальный ограничитель для явного решения и обеспечивающий ограниченность объемной доли фазы, независимой от применяемой основной численной схемы, структуры сетки и т. д.

Для нестационарной задачи необходимо задание начальных значений всех зависимых переменных. Значения всех компонент скорости равны нулю, так как по условию рассматриваемой задачи до момента времени $t = 0$ движение отсутствует. Давление тоже равно нулю. Кинетическая энергия турбулентности и скорость её диссипации имеют некоторое малые значения, что обеспечивает хорошую сходимость численного решения на первых шагах интегрирования. В задачах моделирования внешних течений со свободной границей начальное распределение объемной доли α было неоднородным, поскольку часть расчетных ячеек заполнена водой.

На неподвижных твердых стенках расчетной области задано условие прилипания, что определяет равенство нулю всех компонент 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.

Четвертая глава посвящена основным аспектам численного моделирования пространственных задач в рамках выбранного пакета: дан краткий обзор существующих программных средств, приведены основные критерии отбора выбранного пакета для моделирования OpenFOAM и визуализации результатов численных расчетов на ParaView, выделены принципы построения задач согласно идеологии пакета OpenFOAM. Для иллюстрации возможностей численного расчета внутренних и внешних задач, в качестве примера рассмотрены задачи моделирования классического течения в квадратной каверне (см. рис. 1) и водосливе (см. рис.2. и рис. 3).

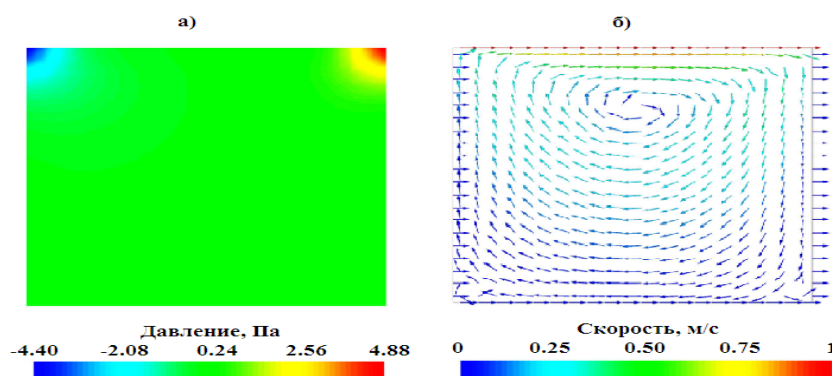


Рис. 1. Поля давления и скорости.

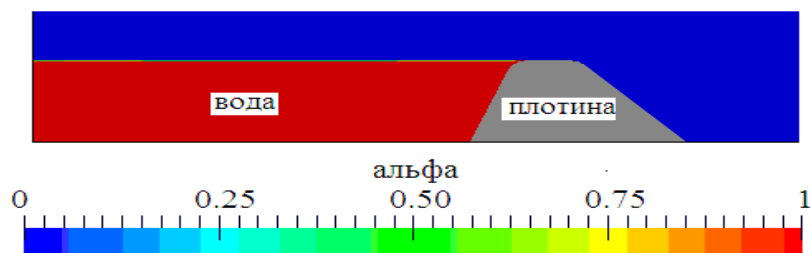


Рис.2. Начальное распределение объемной доли воды.

Вода втекает в расчетную область слева с постоянной скоростью, после заполнения плотины перетекает через неё и вытекает через правую границу.

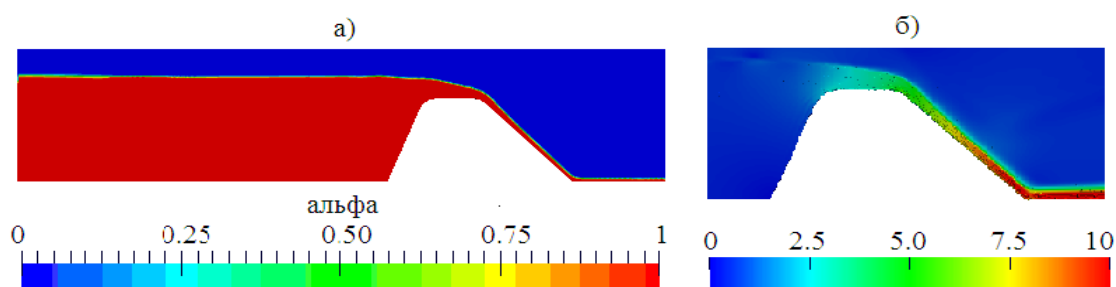


Рис. 3. Объемная доля воды при $t = 12c$.

Предложена оригинальная методика для определения положения свободной поверхности, так как программа визуализации Paraview, входящая в состав OpenFOAM, не имеет подобной утилиты, а сам пакет OpenFOAM не решает уравнение для определения положения свободной поверхности, а решает только уравнение переноса для объемной доли воды. Построенные таким образом временные изменения высоты воды непосредственно перед и за плотиной приведены на рис. 4.

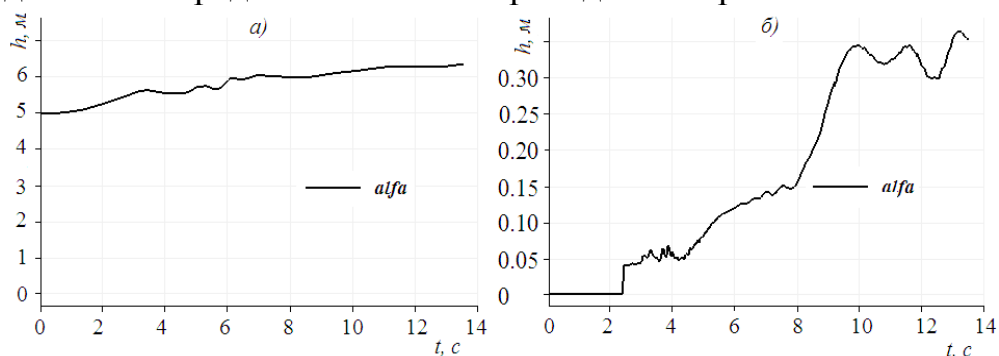


Рис. 4. Эволюция высоты водного потока.

Далее, для моделирования процесса наводнения на реальной местности со сложной топологией необходимо трехмерную поверхность местности импортировать в OpenFOAM. Для этой цели приведено подробное описание разработанного метода подготовки трёхмерной расчетной сетки для моделирования процесса наводнения на реальной местности со сложными топографическими данными, посредством утилиты snappyHexMesh. Для этого написана специальная программа snappyHexMeshDict, текст которой в приложении 1. В расчетах по построению трёхмерной сетки были использованы топографические данные Digital Terrain Elevation Data, которые были в последующем конвертированы в формат stl. Далее созданная утилитой blockMesh гексаэдральная фоновая сетка при помощи утилиты snappyHexMesh пакета OpenFOAM преобразуется в трехмерную поверхность, которая используется для моделирования процесса наводнения.

В пятой главе проведена верификация выбранной математической модели рассматриваемых внутренних задач путем сравнения результатов численных расчетов турбулентности течений с соответствующими экспериментальными данными, что необходимо для выяснения эффективности расчетных моделей и проверки достоверности полученных результатов. Было рассмотрено большое число тестовых задач, отражающих в той или иной мере характерные особенности рассматриваемой проблемы.

Некоторая часть тестовых задач взяты из классической базы данных Европейского сообщества исследований течений, турбулентности и горения ERCOFTAC. Тестовые задачи для сравнений выбирались по возможности взаимосвязанные, с возрастающей сложностью из числа имеющихся в доступной научной литературе и интернет сообществе. Кроме того, для каждого рассматриваемого класса течений, проводилась проверка расчетной сетки на явление насыщения. Для ограничения схемной диффузии, связанной с представлением конвективных членов разностями против потока, где это было необходимо, использовался метод направленного измельчения расчетной сетки.

Турбулентный поток в канале с внезапным расширением является одним из классических тестов для проверки модели турбулентности. В этой тестовой задаче проведено трехмерное моделирование стационарного несжимаемого течения в канале с внезапным расширением. Учет турбулентных пульсаций на осредненное течение базировался на RNG $k-\varepsilon$ модели турбулентности.

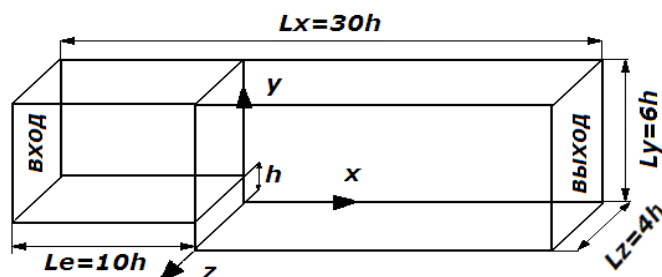


Рис.5. Геометрия рассматриваемой задачи.

Целью данной задачи было изучение чувствительности численных результатов к длине турбулентного перемешивания, которая была равна определенной части высоты уступа $h = 0.98$ см. Проведено последовательное измельчение сетки с целью нахождения наименьшего разрешения, необходимое для учета характерных особенностей рассматриваемой задачи. Проведено трехмерное моделирование уступа при числе Рейнольдса $Re_h = 5000$ с последующим сравнением с соответствующими экспериментальными данными работы Jovic S., Driver D., 1994.

Распределение продольной скорости при различных значениях параметра интенсивности турбулентного перемешивания len показано на рис. 6.

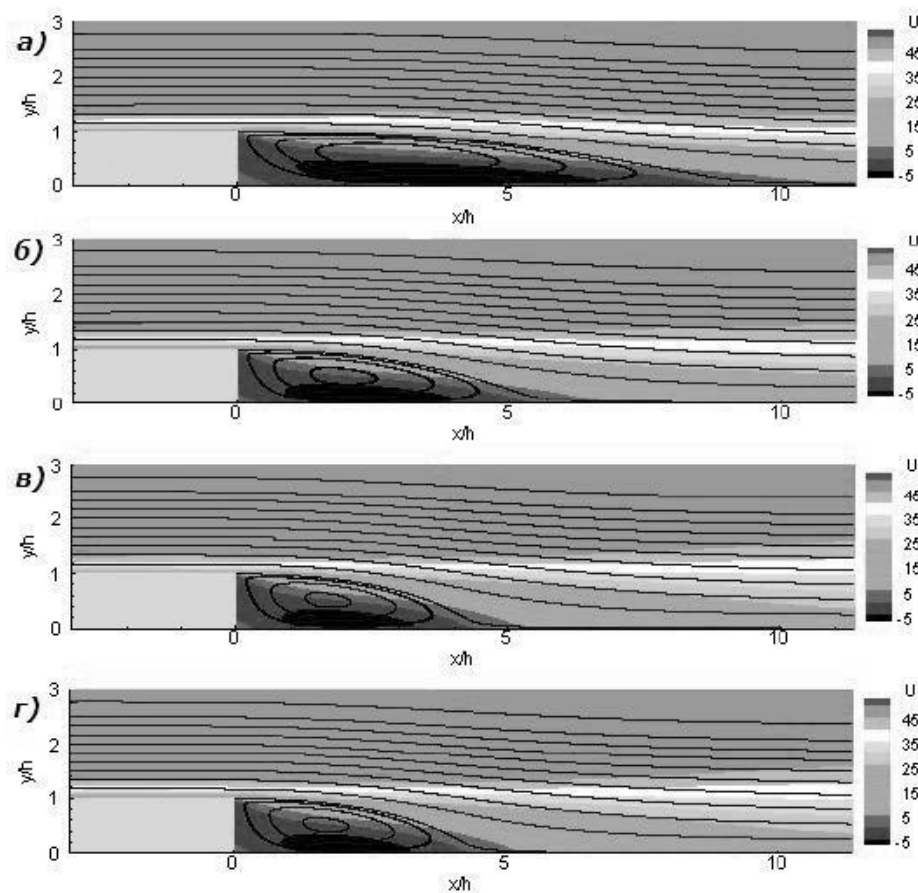


Рис. 6. Изолинии продольной скорости при разных значениях len .
а) $len = 3,5\%$ б) $len = 7\%$ в) $len = 14\%$ г) $len = 28\%$.

В обнаружено, что длина присоединения зависит от длины перемешивания. Так она в единицах высоты уступа была равна $L = 5,16$ для $len = 7\%$. Интересно заметить, что при меньшем значении $len = 3,5\%$ от высоты уступа, имеем меньшую турбулентную диссипацию, в результате чего получаем большое значение длины присоединения L . В экспериментальной работе обнаружено, что обратное присоединение происходит на расстоянии примерно от $6.0h$ и до $6.1h$ от плоскости внезапного расширения, а прямое численное моделирование работы дает значение средней длины присоединения как $6.28h$. Профили продольной

скорости в различных сечениях вниз по потоку при различных значениях длины турбулентного перемешивания приведены на рис. 7. Скорость представлена в единицах максимальной входной скорости U_0 .

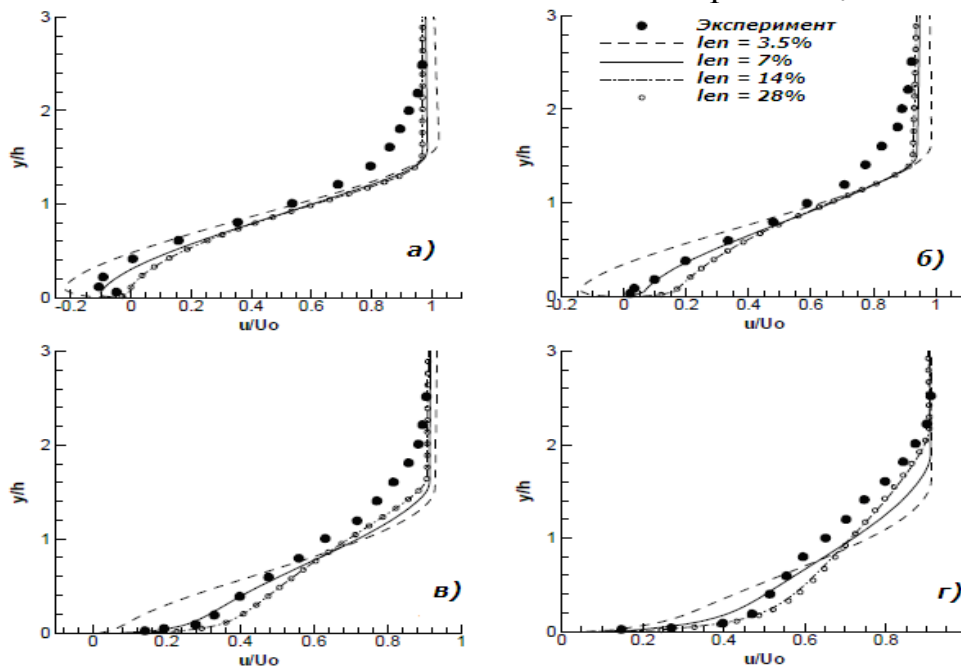


Рис.7. Поперечные профили продольной скорости:
а) $x/h=4$ б) $x/h=6$ в) $x/h=10$ г) $x/h=19$

Результаты на рис.7, получены с использованием мелкой сетки. Можно отметить, что при $len = 3,5\%$ от высоты уступа имеет место более низкая диссипация турбулентной энергии, что в свою очередь приводит к завышенным численным значениям продольной скорости. С увеличением длины турбулентного перемешивания значения численной скорости приближаются к экспериментальным результатам. Однако, как показывают методические численные расчеты, результаты $len = 14\%$ и $len = 28\%$ очень близки. Это указывает на то, что существует некоторое значение длины турбулентного перемешивания len_0 , больше которого дальнейшее увеличение len не влияет на численные результаты.

Конфигурация третьей тестовой задачи соответствует экспериментальной работе Ruck B., Makiola B., 1993 и без сохранения геометрической пропорции приведена на рис. 8.

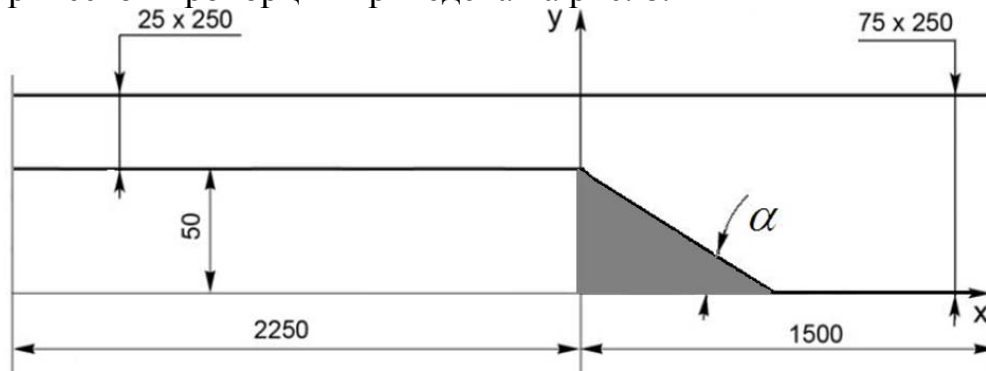


Рис.8. Конфигурация рассматриваемой задачи. Все размеры указаны в мм.

Стационарный турбулентный поток несжимаемой жидкости поступает слева в прямоугольную входную часть канала с поперечным сечением 25x250мм и длиной 2250мм. Высота уступа была равна $H = 50\text{мм}$, а степень расширения канала $Er = 5$. В расчетах наклон уступа изменялся от 15° до 90° . В целях экономии вычислительного времени, все расчеты сначала проводились на относительно грубой сетке с общим числом 16875 ячеек. Затем полученное поле, при помощи утилиты mapFields пакета OpenFOAM интерполировалось на более мелкую сетку из 337500 ячеек. При этом общее время расчета одного варианта задачи на компьютере Pentium® Dual-Core CPU T4400 @2.20 GHz 2.87 Gb составило 1716с, а для прямого расчета этого же варианта задачи на мелкой сетке потребовалось 14748с.

На рис. 9 и рис. 10 представлены поперечные профили вектора скорости и продольной интенсивности турбулентности $I = (u'/U_0) * 100\%$ в различных сечениях вниз по потоку. Скорость разделена на величину $U_0 = 22.85\text{м/с}$, а продольная координата y представлена в единицах H . Сплошная линия соответствует численным результатам данной работы и маркер представляют экспериментальные данные.

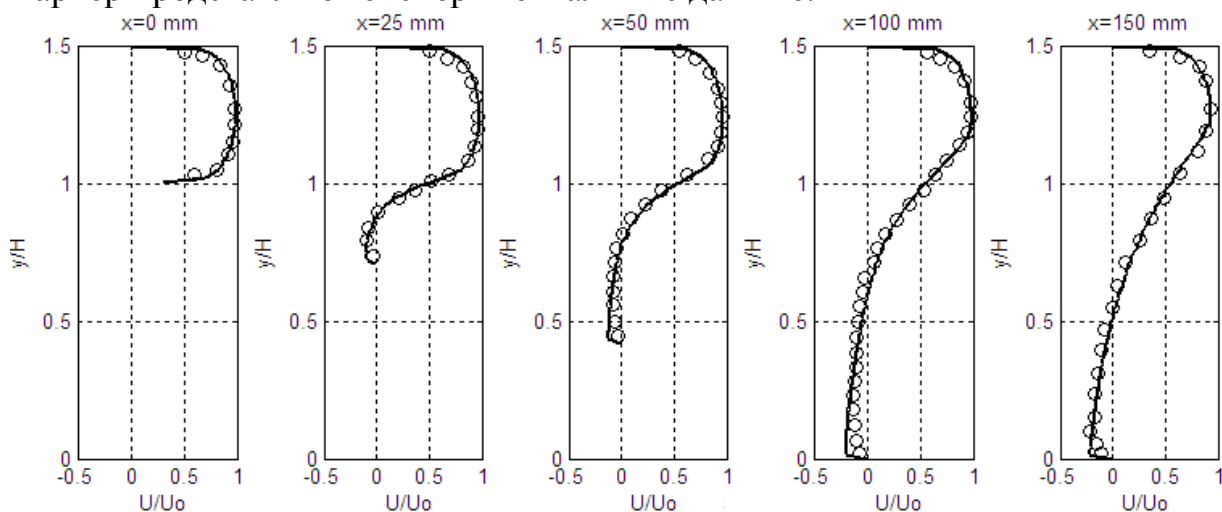


Рис. 9. Изменение безразмерной продольной скорости в различных сечениях.

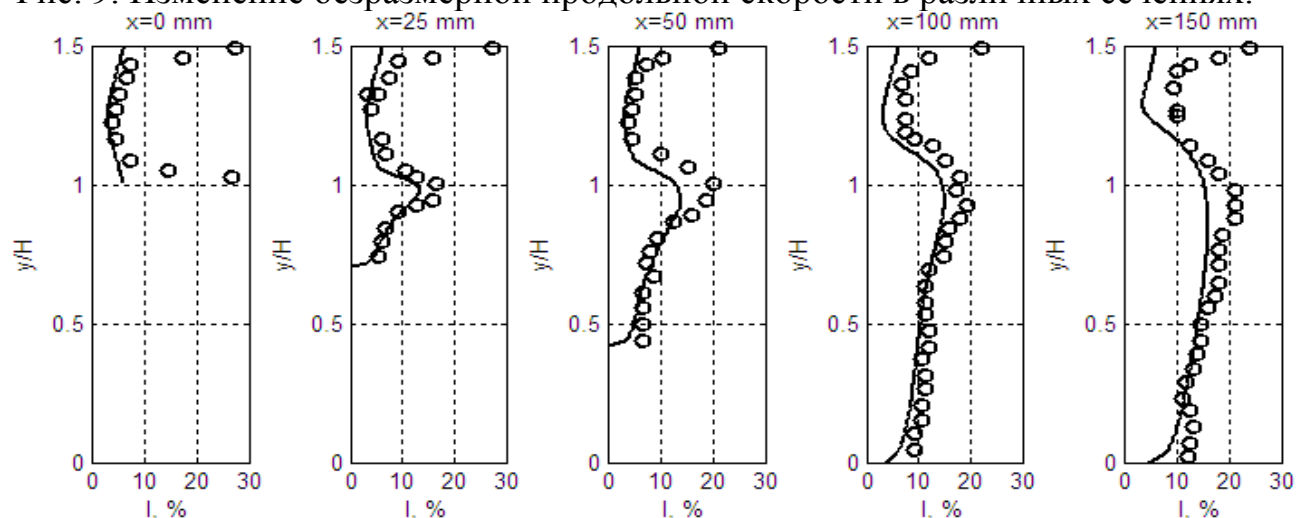


Рис. 10. Изменение интенсивности турбулентности в различных сечениях.

В целом соответствие между численными результатами и опытными данными по профилям средней скорости вполне удовлетворительное. Имеет место незначительное отличие между ними около нижней стенки в сечениях $x=100\text{ мм}$ и $x=150\text{ мм}$ от плоскости уступа. Максимум продольной интенсивности турбулентности расположен во внешнем слое рециркуляционной зоны, на расстоянии порядка $y/H \approx 1$. Имеющиеся отличия между численным расчетом и экспериментом по распределениям интенсивности турбулентности (см. рис. 10, сечение $x=0\text{ мм}$) и вблизи твердых стенок вниз по потоку можно объяснить известным недостатком примененной $k-\varepsilon$ модели турбулентности.

Распределение вектора скорости для различных значений угла наклона уступа представлено на рис. 11. Отличительной чертой течения при угле наклона $\alpha = 15^\circ$ является появление второй зоны рециркуляции около верхней стенки канала. Из-за образования вторичной зоны обратных течений около верхней стенки, структура течения при $\alpha = 15^\circ$ отличается существенно от других значений угла наклона: поток отклоняется в сторону нижней стенки. А это в свою очередь влияет на длину основной зоны обратных токов около нижней стенки. Наличие этой зоны обратных токов отчетливо вида на рис. 12, где представлены линии тока при различных значениях α (верхний левый рисунок).

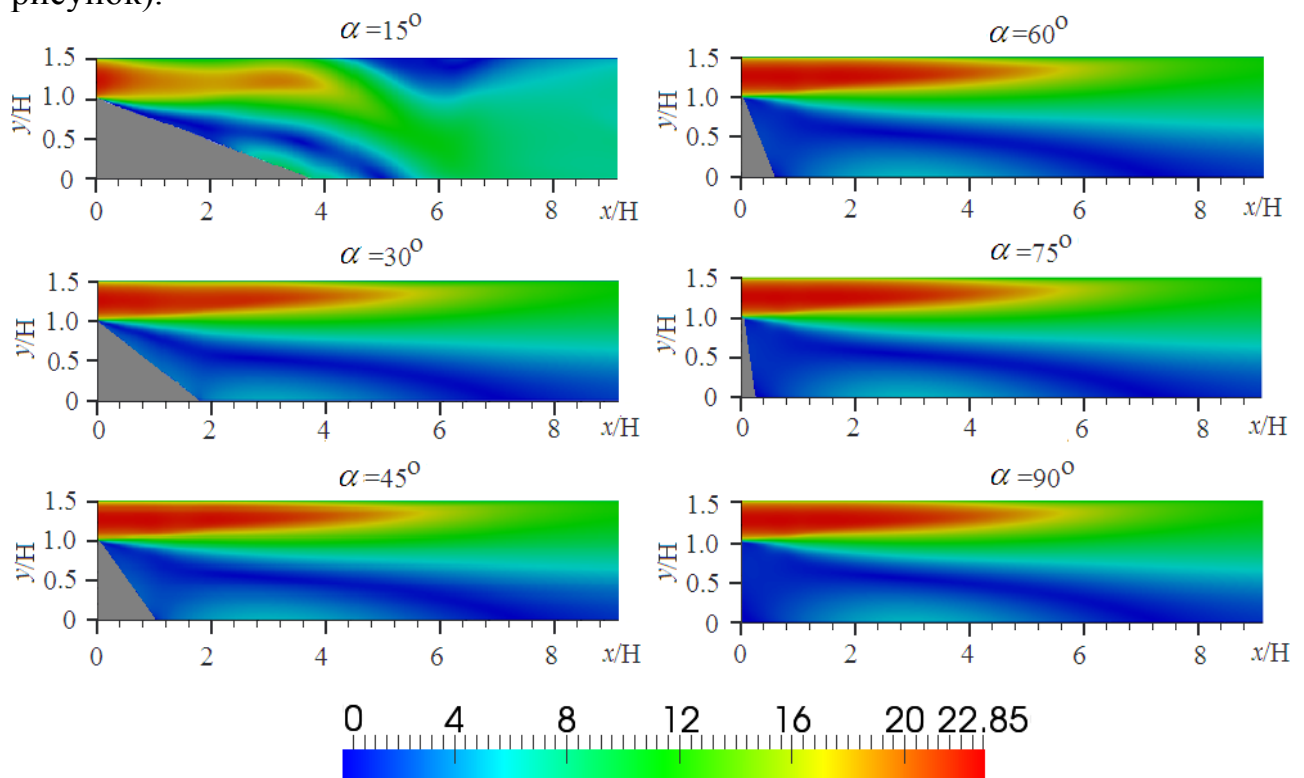


Рис. 11. Изоповерхность вектора скорости вблизи уступа при различных значениях α .

С ростом угла наклона уступа длина рециркуляционной зоны около нижней стенки растет и достигает максимального значения при $\alpha = 90^\circ$. При этом координата точки присоединения составляет величину порядка $7.3H$.

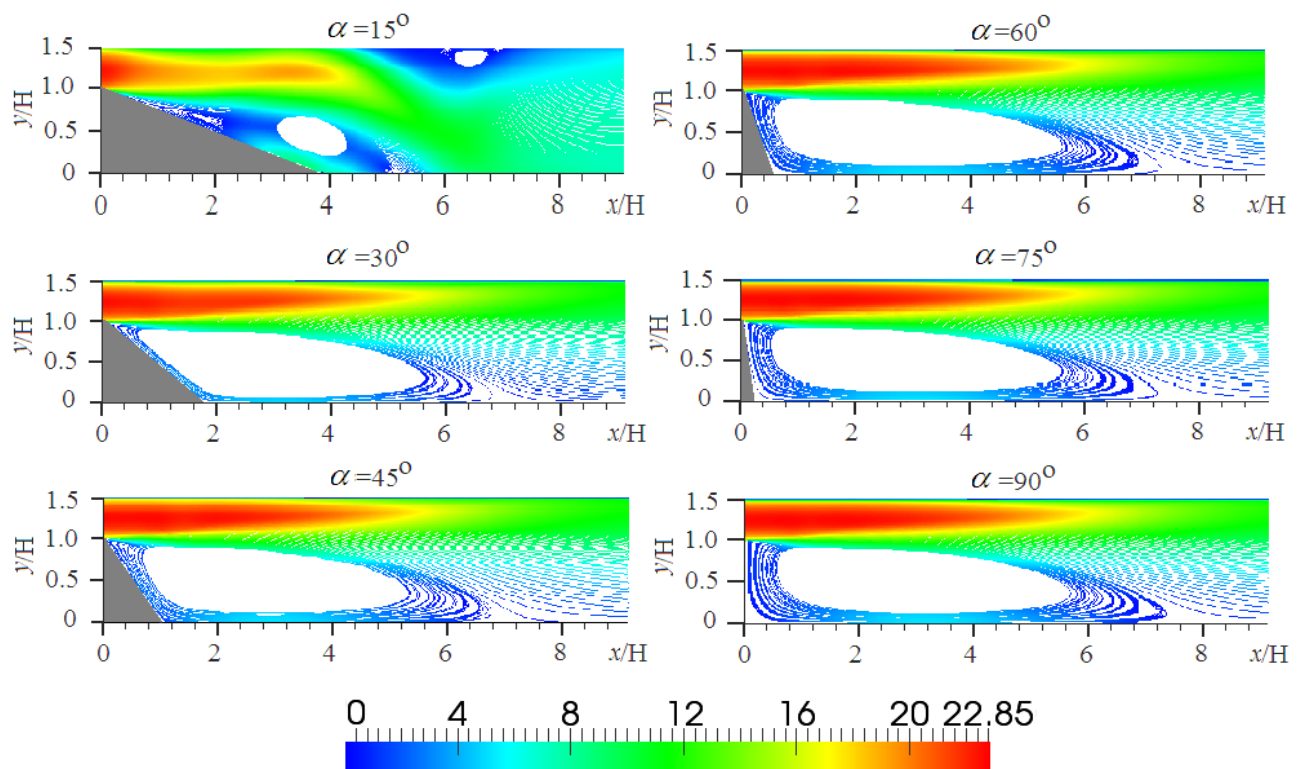


Рис. 12. Линии тока при различных значениях α .

Выполненные методические расчеты показывают, что при рассматриваемых значениях числа $Re = 73000$ и степени расширения канала $Er = 3$, уменьшение угла наклона уступа приводит к уменьшению размера зоны обратных токов около нижней стенки. Изменение угла наклона между 90° до 45° не приводит к существенному изменению длины присоединения. Это отчетливо видно из рис.13, где представлена зависимость длины присоединения от угла наклона уступа. Подобное поведение наблюдалось и в соответствующей экспериментальной работе.

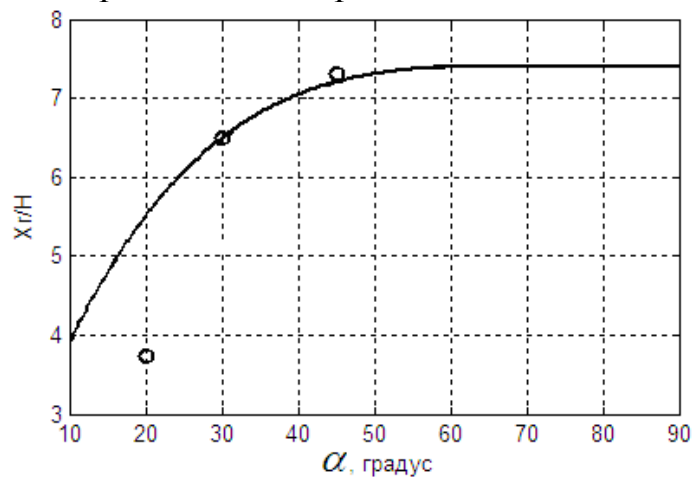


Рис. 13. Изменение безразмерной длины присоединения.

Одной из проблем при моделировании отрывных течений является существенный наклон области рециркуляции к расчетной сетке, что приводит к появлению сильной схемной диффузии. В результате при численном моделировании трудно предсказать длину присоединения с

приемлемой точностью. С уменьшением угла наклона уступа число неортогональных расчетных ячеек растет. Так, если при угле наклона $\alpha = 30^\circ$ число таких ячеек составляло 50, то уже при $\alpha = 15^\circ$ это число равно 3910 и все эти ячейки расположены вблизи наклонного уступа. По-видимому, с этим, в большей степени, связано расхождение между численными и экспериментальными данными при малых углах наклона – численный результат примерно в два раза превышает экспериментальное значение (см. рис. 13).

В следующей тестовой задаче рассматривается метод моделирования турбулентного течения в канале с диффузорным выходом, геометрия которого показана на рис. 14.

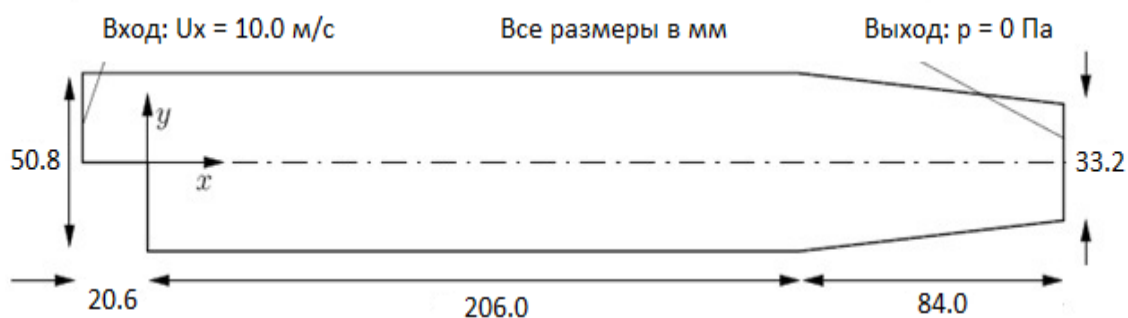


Рис. 14. Геометрия расчетной области.

Целью задачи было изучение входных граничных условий на средние характеристики течений. Входные граничные условия для осевой составляющей скорости U_x задавались двумя способами. В первом случае скорость была равна постоянному значению 10 м/с, а во втором случае она определялась по логарифмическому профилю.

Далее, на рис. 15–18 представлены результаты численного моделирования влияния входных условий на характеристики течения. Левые части рис. 15–18 каждого рисунка соответствуют постоянному значению $U_x = 10$ м/с, а правые части логарифмическому профилю входной осевой скорости соответственно.

Внимательное сравнение левых и правых частей этих рисунков показывает, что начальные входные условия имеют значительные влияния на общую картину течения, хотя в обоих случаях расход воздуха является одинаковым. В случае использования логарифмического профиля скорости, максимальные значения вектора скорости, давления, кинетической энергии и скорости её диссипации (правые части рис. 15–18) превышают соответствующие значения этих же величин в случае использования на входе постоянного поперечного профиля скорости примерно в два раза (левые части рис. 15–18). То же самое можно сказать относительно минимальных значений кинетической энергии турбулентности и скорости её диссипации. Более того, минимальное значение давления $p = -21.2439$ Па более чем в два раза меньше, чем значение давления $p = -8.01548$ Па в случае постоянного профиля скорости (см. рис. 16).

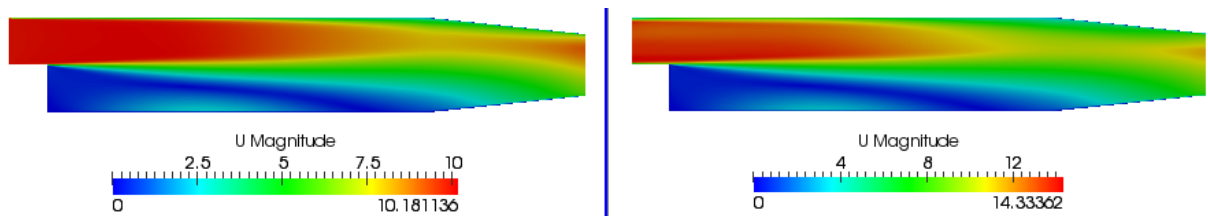


Рис. 15. Поле вектора скорости.

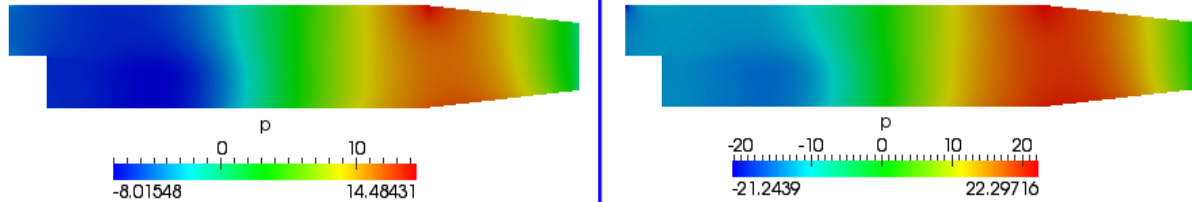


Рис. 16. Поле давления.

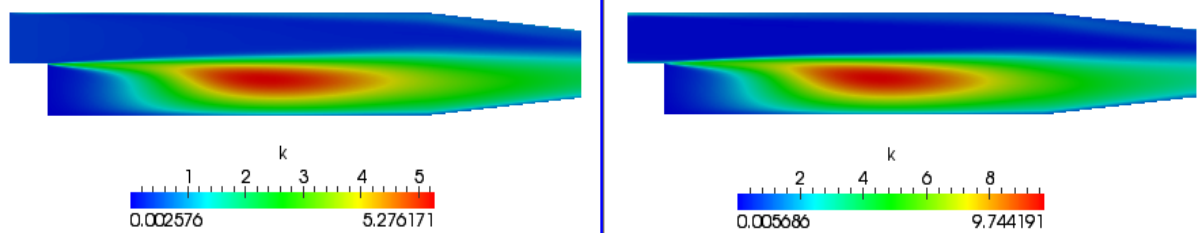


Рис. 17. Поле кинетической энергии турбулентности.

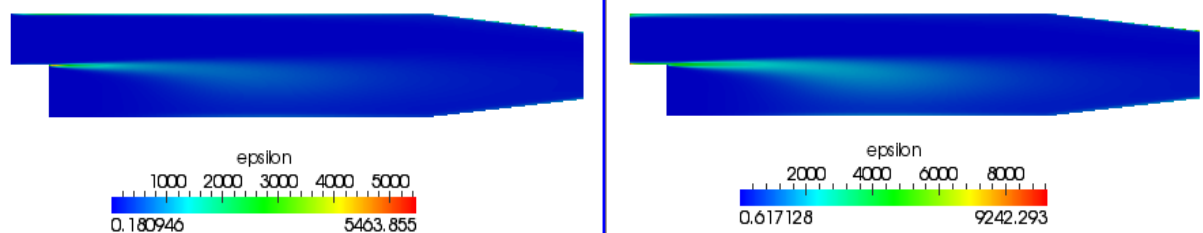


Рис. 18. Поле скорости диссипации кинетической энергии турбулентности.

Сказанное отчетливо видно на следующих рис. 19–20, где представлены профили величин вдоль поперечной линии, концы которых имеют координаты $(0.1347; -0.0305, 0)$ и $(0.1347; 0.0305, 0)$. В целом, характер изменений всех величин одинаков для обоих входных граничных условий, однако максимальные и минимальные значения заметно отличаются.

На следующих рис. 21–22 представлены продольные профили величин вдоль линии с концами, координаты которых имеют значения $(-0.0517, 0.0, 0)$ и $(0.3211, 0.0, 0)$. Как видно из рисунков, имеются заметные отличия, как в характере поведения профилей, так и в значениях давления (рис. 21) и скорости диссипации (рис. 22).

Таким образом, входной профиль характеристик течения имеет существенное влияние, что необходимо принять во внимание при моделировании. Проведенные систематические расчеты показывают, что если использовать постоянный профиль входной скорости, то необходимо увеличить входную часть канала примерно на $100h$, где h – высота уступа.

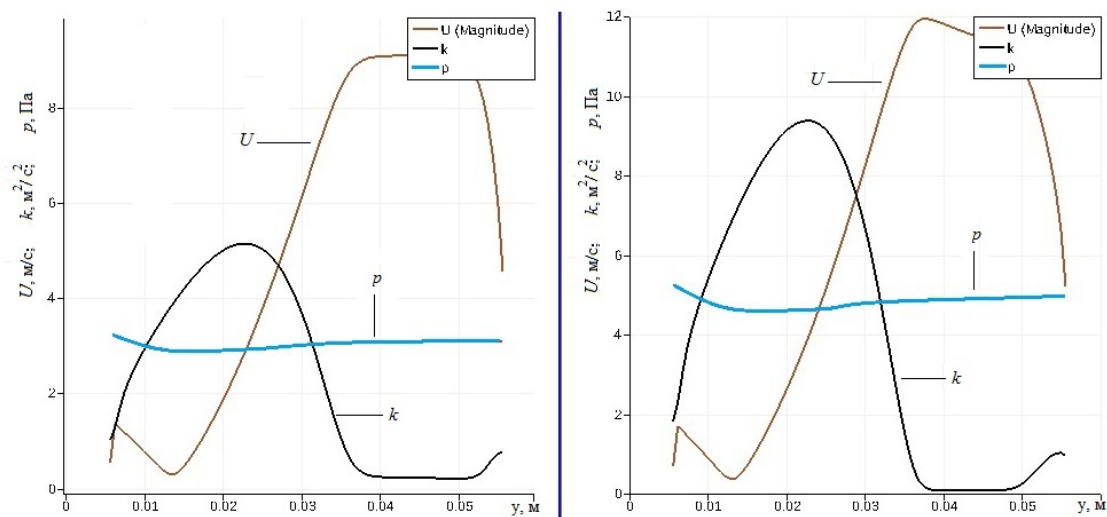


Рис. 19. Поперечное распределение величин U , k и p .

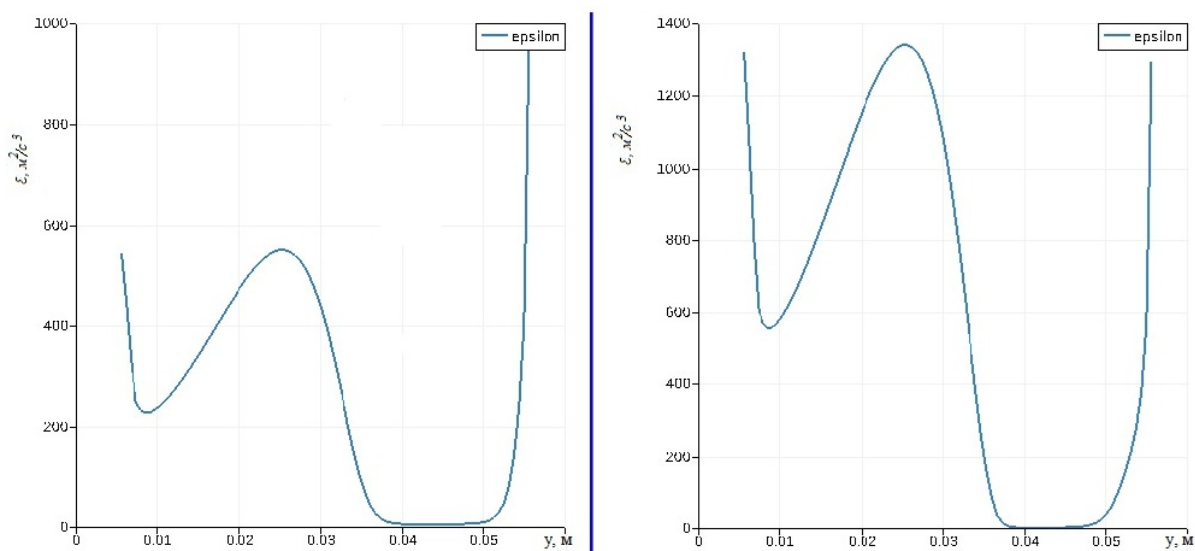


Рис. 20. Поперечное распределение скорости диссипации.

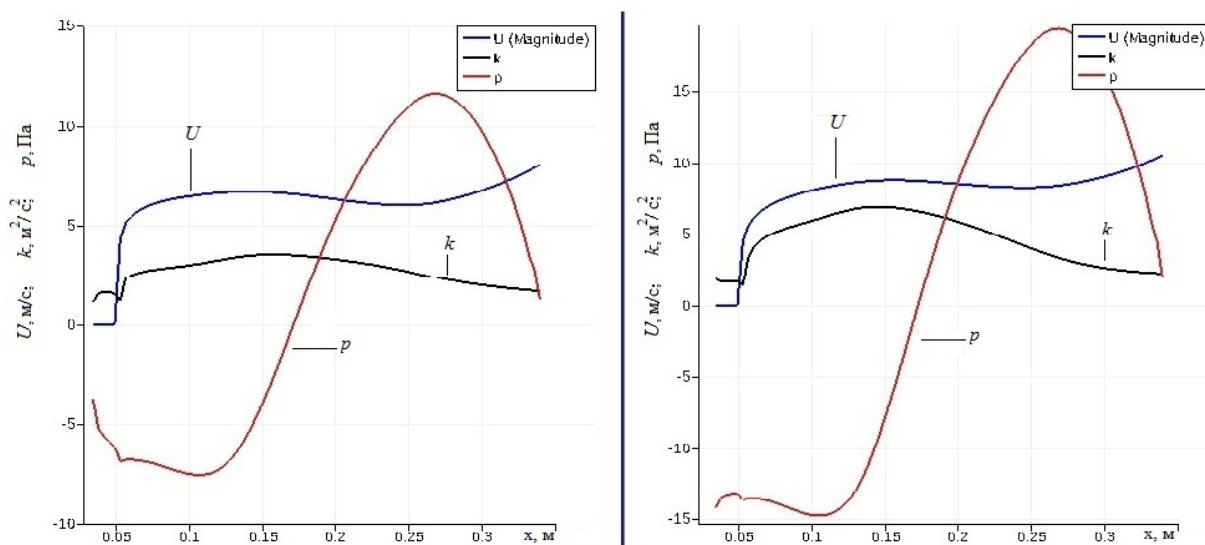


Рис. 21. Продольное распределение величин U , k и p .

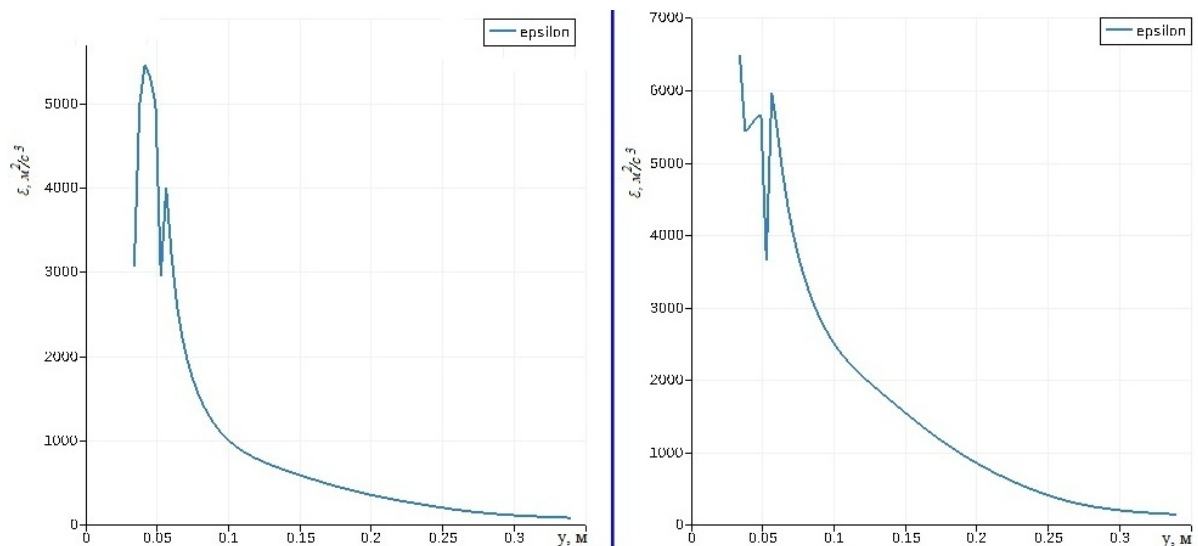


Рис. 22. Продольное распределение скорости диссипации.

Частичное разрушение дамбы. На рис. 23. показана геометрия рассматриваемой задачи. Резервуар длиной 1м, шириной 2м и высотой 0.8м заполнен водой с начальной высотой 0.6м. Перегородка, разделяющая воду от правой пустой плоской части с тремя открытыми границами имеет длину 0.4м и расположена между точками с координатами (1; 0.8;0) и (1; 1.2;0).

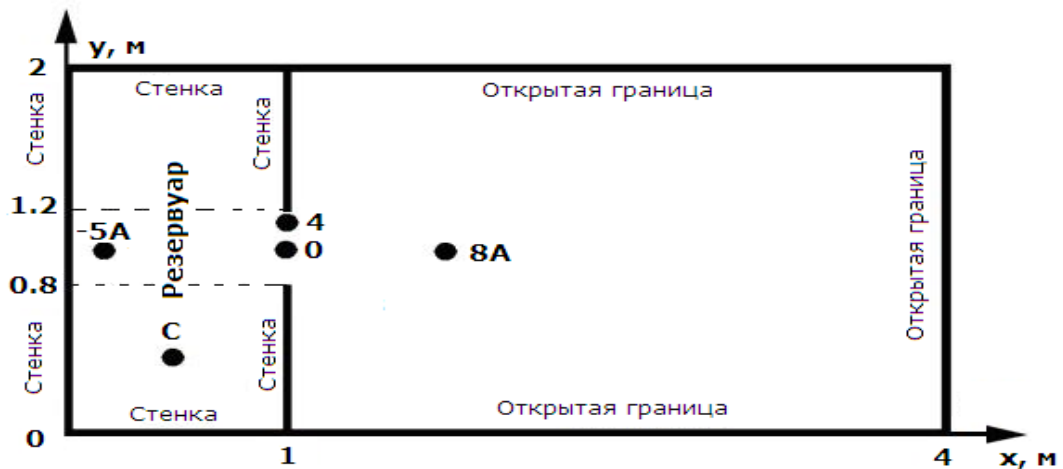


Рис. 23. Геометрия рассматриваемой задачи.

В эксперименте Fraccarollo L., Toro E. F, 1995 для измерения высоты водного потока были использованы пять датчиков, координаты места расположения которых приведены в табл. 3.

Таблица 3. Координаты измерительных датчиков.

Датчик	-5A	C	4	0	8A
x, м	0.18	0.48	1.0	1.0	1.722
y, м	1.0	0.4	1.16	1.0	1.0

На рис. 24 приведено трехмерное распределение объемной доли воды в различные моменты времени. В момента времени $t = 0$ с перегородка убирается мгновенно, и вода из-за силы тяжести устремляется в пустую

часть резервуара. Примерно через $t = 1\text{ с}$ вода достигает дальнюю открытую границу расчетной области и вытекает из неё.

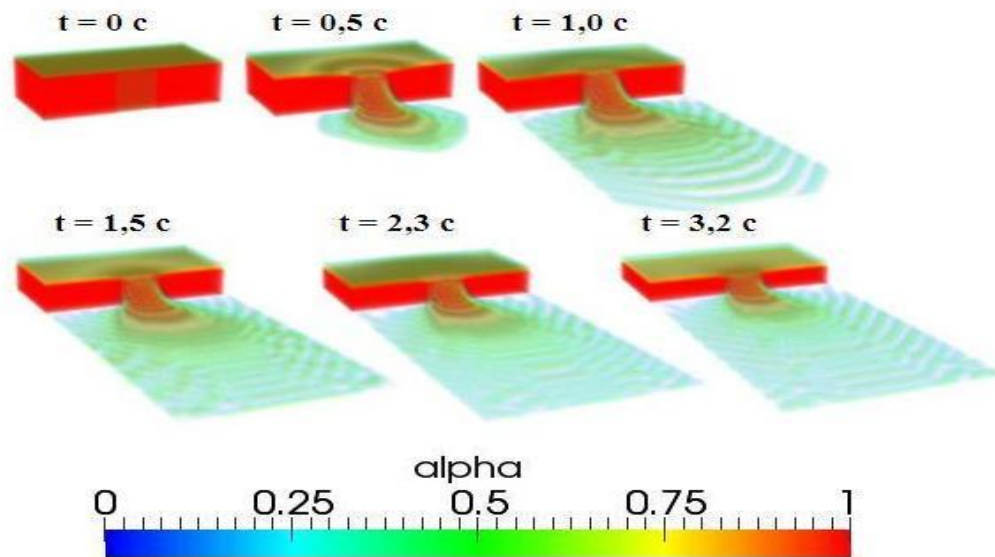


Рис. 23. Распределение объемной доли воды.

На рис. 25 и рис. 26 представлены численные результаты временной эволюции высоты водного потока (сплошная линия) и соответствующие экспериментальные данные (маркеры)

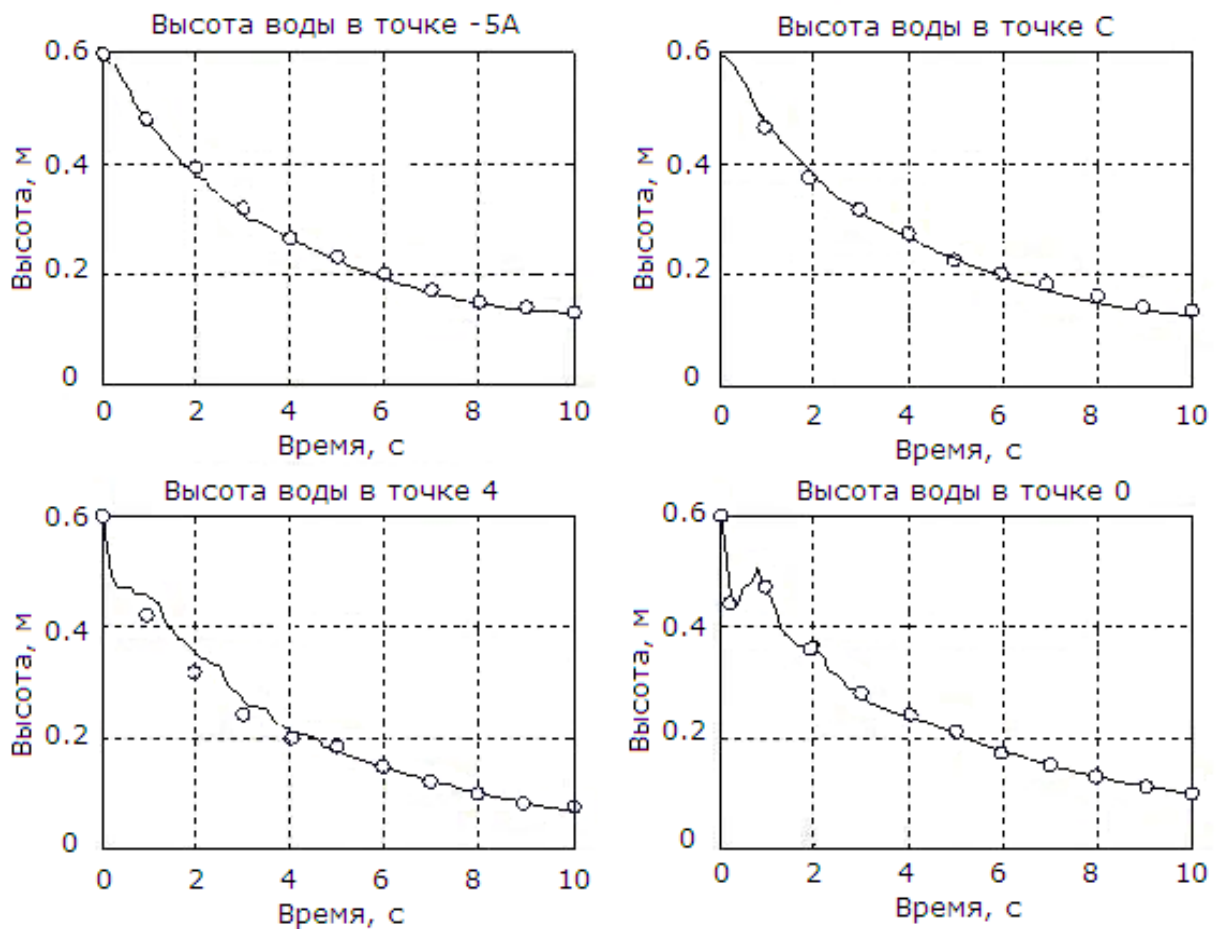


Рис. 25. Изменения во времени высоты водного потока в точках -5А, С, 4 и 0.

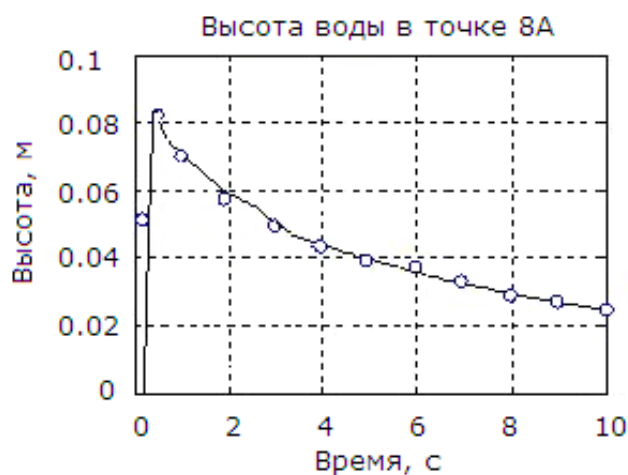


Рис. 26. Изменение во времени высоты водного потока в точке 8А.

Сравнение результатов численного моделирования с соответствующими экспериментальными данными показывает достаточно хорошее согласие между ними. Небольшое колебание численных данных в начальный момент времени в точках 4 и 0 вероятно связано с влиянием граничных условий на твердых стенках резервуара и конечной величиной скорости убирания перегородки. При численном моделировании считается, что перегородка убирается мгновенно, т.е. скорость бесконечная. На самом деле в эксперименте эта скорость имеет некоторое конечное значение.

Обрушение столба жидкости к каналу с плоским дном. Геометрия рассматриваемой модельной задачи аналогична работе Buchner B., G. van Ballegoyen, 1997 и представлена на рис. 27.

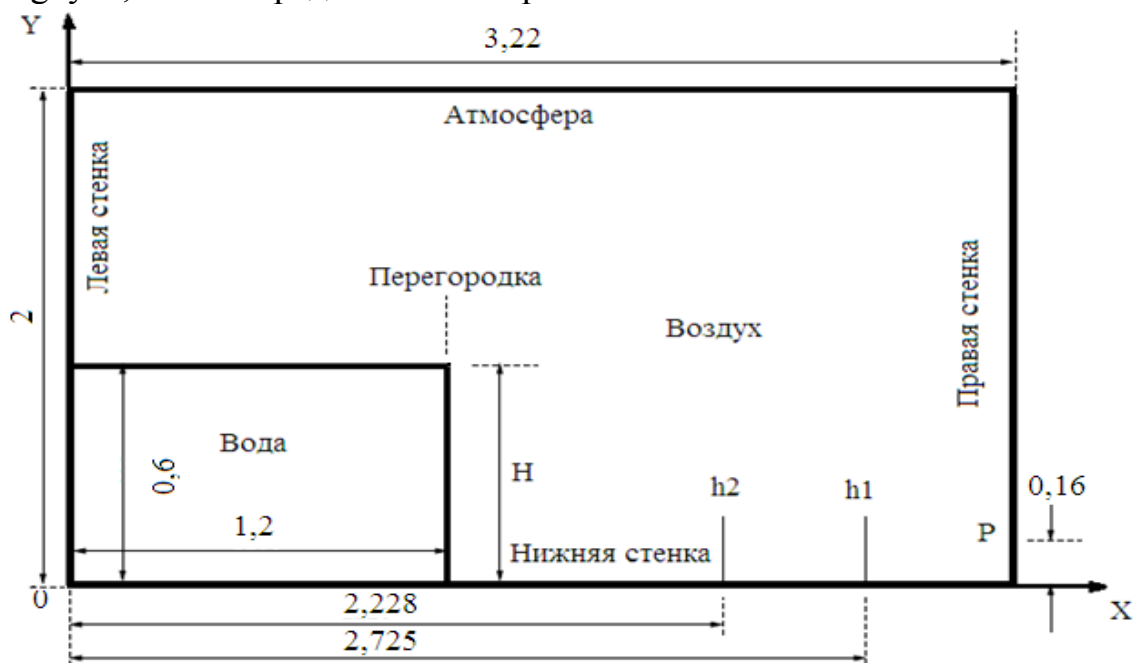


Рис. 27. Геометрия задачи и граничные условия.

Модель представляет собой резервуар гексаэдрной формы, размерами длиной 3.22м, высотой 2м и шириной 1м. В левом нижнем углу расположен столб воды высотой $H=0.6$ м, длиной 1.2м и шириной 1м. Для измерения силы давления потока жидкости на правую стенку резервуара

соответствующий измерительный датчик давления был расположен в точке Р с координатами $x = 3.22\text{м}$ и $y = 0.160\text{м}$. Кроме того, в двух сечениях при $x_1 = 2.725\text{м}$ и $x_2 = 2.228\text{м}$ были измерены уровни свободной поверхности воды h_1 и h_2 . Плотность воды была равна 998.2кг/м^3 , а воздуха – 1.225кг/м^3 . Несмотря на то, что эксперимент является трехмерным, простота геометрии позволяет моделировать его в двумерном приближении.

Простота геометрии задачи позволяет легко разделить её на гексаэдральную сетку с равномерно расположенными ячейками. Для проверки влияния схемной диффузии были проведены тестовые расчеты при различных значениях расчетной ячейки. Проведенные методические расчеты показывают, что давление потока на правую стенку в точке Р и уровень свободной поверхности или высота водного столба сильно зависит от размеров ячеек. Кроме того, пропорциональное увеличение числа ячеек приводит к сильному увеличению времени расчета. Так для расчётной сетки размером $512 \times 512 \times 512$ общее время расчета на компьютере Pentium® Dual-Core CPU T4400 @2.20 GHz 2.87 Gb составляет около 15 часов, тогда как для сетки $64 \times 64 \times 64$ это время равно приблизительно 55 с.

На рис. 6.11 представлены численные результаты объемной доли воды для различных моментов времени. В момент времени $t=0$ перегородка убирается мгновенно и столб воды под действием силы тяжести устремляется в правую пустую часть резервуара. В момент времени около $t=0.65\text{с}$ вода достигает правой стенки и, ударяясь об нее под действием силы инерции, устремляется вверх. По мере движения вверх по правой стенке поток утончается и в момент времени $t = 1.3\text{с}$, когда сила тяжести превышает над силой инерции, происходит возвратное движение воды с образованием характерного крючка.

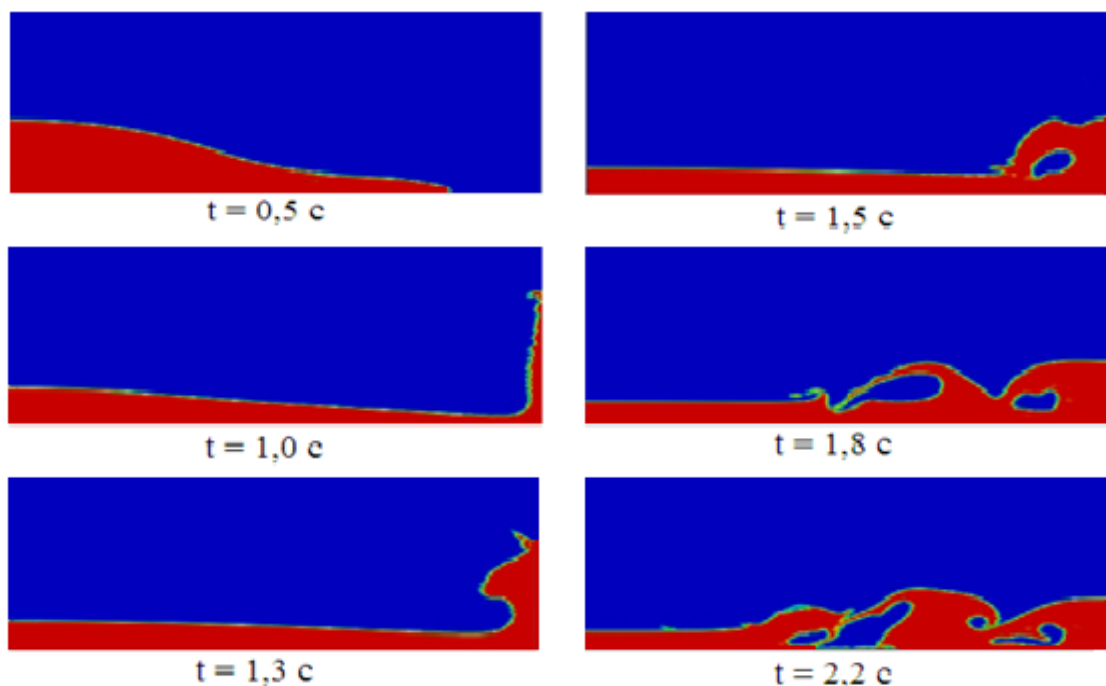


Рис.28. Движение столба воды в различные моменты времени.

Сформированная таким образом обратная волна, достигая основной поток, ударяясь об него, образует вторичную волну и т. д. (при $t=1.5\text{с}$ и $t=1.8\text{с}$). После момента времени $t=2.2\text{с}$ инерция воды сильно уменьшается и дальнейшее рассмотрение движения не представляет практический интерес.

Известно, что последовательное измельчение расчетной сетки должно обеспечить получение более или менее правдоподобного положения свободной границы. Проведенные методические расчеты свидетельствуют, что более мелкая расчетная сетка эффективно отслеживает воздушные капли – пузырьки в воде. Однако при этом имеют место две проблемы, связанные с измельчением расчетной сетки. Во-первых, чрезмерное измельчение приводит к ухудшению сходимости решения. Во-вторых, независимо от способа получения мелкой сетки, получаются неправдоподобные значения скорости воздуха вблизи свободной границы. Более того, измельчение расчетной сетки более определённого предела не приводит к существенному улучшению разрешения свободной границы, и как говорилось выше, общее время расчета неоправданно увеличивается.

На рис. 29 представлены численные и соответствующие экспериментальные данные по высоте водного столба в сечениях с координатами $x_1 = 2.725\text{м}$ и $x_2 = 2.228\text{м}$. Совпадение между этими данными достаточно удовлетворительное до момента времени около $t = 1.5\text{с}$. для сечения $x_1 = 2.725\text{м}$ (рис. 29а).

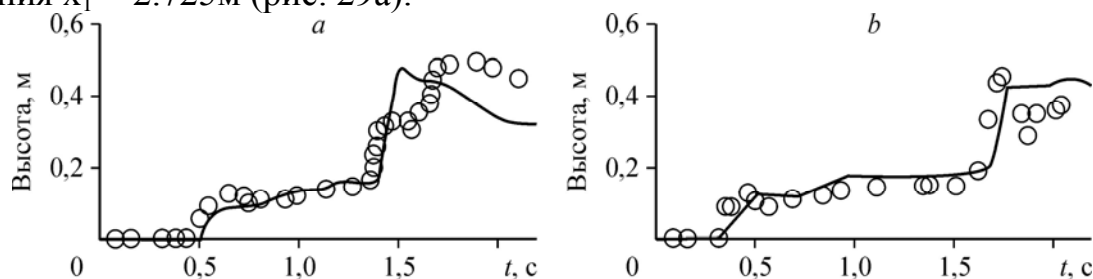


Рис. 29. Высота водного столба при различных сечениях.

После этого времени обратная волна, движущаяся против основного потока, ударяется о свободную поверхность и создает определенные неточности, как в численных, так и в экспериментальных данных. Разногласия такого рода также наблюдались в работе Abdolmaleki K., Thiagarajan K. P., Morris-Thomas M. T., 2004, в которой для численного моделирования использовался известный коммерческий пакет FLUENT. Результаты этих авторов приведены на рис. 30.

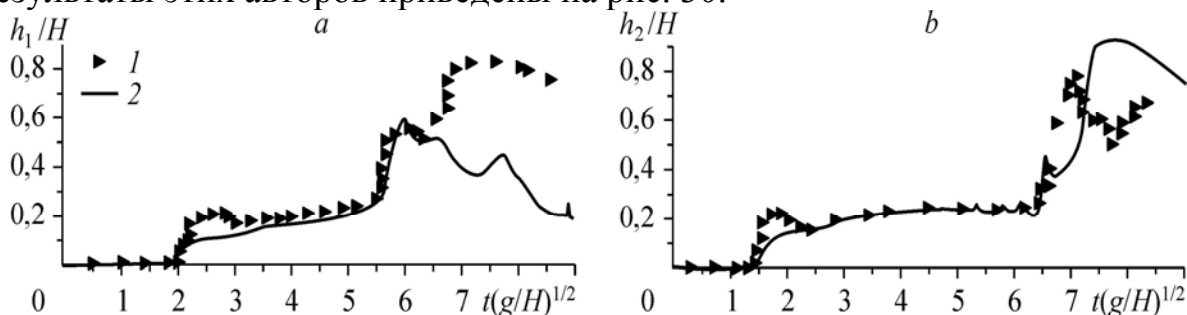


Рис. 30. Высота водного столба работы других авторов.

Здесь высота водного столба разделена на величину H , а время представлено в безразмерной форме $\tau = t(g/H)^{0,5}$, где $g=9.81\text{м/с}^2$ – ускорение свободного падения, $H=0.6\text{м}$ – первоначальная высота водного столба. Из этих рисунков можно заключить, что в данной работе уровни свободной поверхности в двух различных сечениях предсказаны точнее.

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

На рис. 31 представлены численные результаты давления жидкости на правую стенку в точке P с координатами $(x=3.2; y=0.16)$ и соответствующие экспериментальные данные. Точное значение давления в точке P не может быть измерено, так как датчики давления имеют конечный размер – круг диаметром около 90 мм.

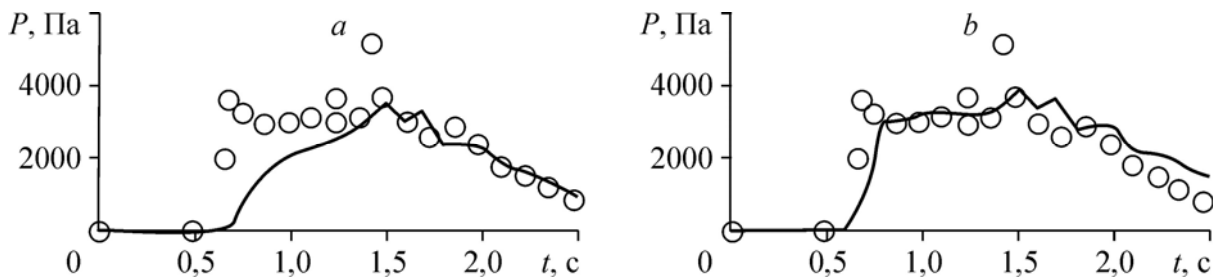


Рис. 31. Изменение давления в точке P .

Расчетное давление в центре датчика давления (см. рис. 31а) с течением времени медленно возрастает, однако после момента времени $t=1.5\text{с}$ или после второго максимума, совпадение экспериментальных данных с численными результатами улучшается. Характер изменения расчетного давления в нижней точке датчика (см. рис. 31б) достаточно хорошо повторяет соответствующий характер изменения экспериментальных данных, однако максимальные значения несколько занижены.

Подобное поведение расчетного давления показано на рис. 32, заимствованного из PhD диссертации Nielsen К. В., 2003. На рис. 32а показано давление в центре, а справа в нижней точке датчика.

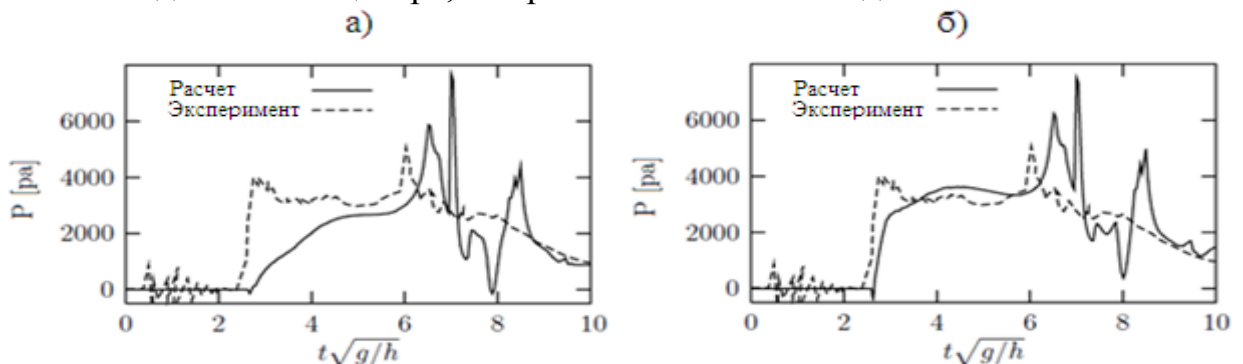


Рис. 32. Расчетные данные Nielsen К. В., 2003.

Как говорилось выше, в центре датчика давление возрастает медленно, а в нижней точке датчика быстрее. Однако, в отличие от настоящей работы,

после второго пика проявляются не обнаруженные в эксперименте колебания численного давления.

При численном моделировании предлагается, что перегородка убирается мгновенно, т.е. ее вертикальная скорость перегородки бесконечная. С другой стороны, могут быть и другие физические условия, которые трудно учесть или не учтены в численном моделировании. Детальный анализ условий проведения эксперимента показывает, что эта скорость имеет конечное значение. Проверочные экспериментальные данные при одинаковых условиях дают разные, не совпадающие друг с другом результаты. Об этом частично свидетельствуют хаотические колебания давления в точке Р до момента времени $t=0.5$ с или до безразмерного момента времени $\tau = t(g/H)^{0.5} < 2$ (см. рис. 32). В этот момент времени вода еще не дошла до правой стенки (см. рис. 32), но датчик регистрирует колебания давления благодаря движению потока воздуха.

Кроме этого, вышеприведенные расхождения между расчетом и экспериментом после момента безразмерного времени $\tau = t(g/H)^{0.5} > 6$, как нам кажется, можно объяснить двухмерностью используемой модели. Возможно, в некоторых точках расчетной области течение приобретает трехмерный характер.

Сравнивая данные этой работы (см. рис. 29) и работ Abdolmaleki K., Thiagarajan K. P., Morris-Thomas M. T., 2004 (рис. 30) и Nielsen K. B., 2003 (см. рис. 32), можно утверждать, что численные результаты моделирования рассматриваемой задачи, полученные при помощи бесплатного пакета OpenFOAM более близки к экспериментальным данным, чем результаты, полученные с помощью коммерческого пакета FLUENT.

Обрушение столба жидкости при наличии препятствия прямоугольной формы. Экспериментальные данные и результаты численного моделирования простой модели плотины, проведены в Нидерландском институте морских исследований. В эксперименте Kleefsman K. M. T., Fekken G., Veldman A. E. P., Iwanowski B., Buchner B., 2005 использован открытый резервуар длиной 3.22м с поперечным сечением $1 \times 1 \text{ м}^2$. Первоначально резервуар был разделен на две неравные части стенкой, расположенной при $x=2$ м. За этой стенкой находится вода высотой 0.55 м, а другая часть резервуара пуста. В этой части резервуара расположен контейнер длиной 40см с поперечным сечением $16 \times 16 \text{ см}^2$. Координата левой грани контейнера равна $x=0.67$ м (см. рис. 33).

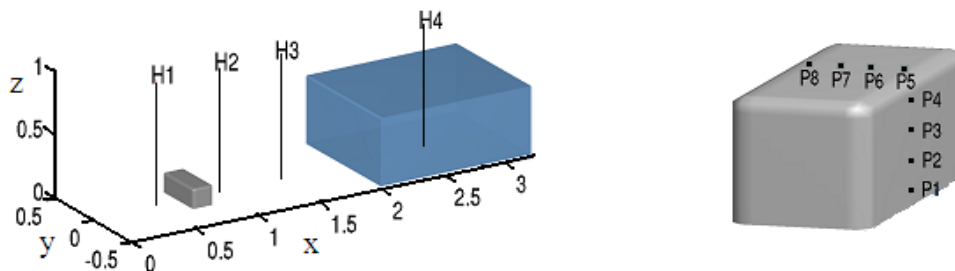


Рис. 33. Расположение измерительных датчиков.

При проведении эксперимента были измерены высота водяного столба и давление жидкости на поверхность контейнера. Расположение измерительных датчиков показано на рис. 33. Были использованы четыре датчика для измерения высоты водяного столба: один (Н4) в заполненной водой части, а остальные в другой пустой части резервуара. Координаты этих датчиков были равны $x = 0.5\text{м}$, 1.0м , 1.5м и 2.66м соответственно.

Контейнер был снабжен восьмью датчиками давления, четыре на лицевой поверхности в точках с координатами $z = 0.025\text{м}$, 0.063м , 0.099м и 0.136м , а остальные четыре датчика расположены на верхней стороне контейнера при $x = 0.806\text{м}$, 0.769м , 0.733м и 0.696м . Датчики на лицевой поверхности расположены на расстоянии 0.026м влево от центральной линии $y = 0$, а датчики на верхней поверхности располагались на расстоянии 0.026м вправо от центральной линии $y = 0$. В эксперименте также была измерена сила, оказываемая на контейнер со стороны потока воды. В целях определения скорости входа воды в пустую часть резервуара, был использован горизонтальный датчик на боковой стенке.

До момента времени $t=0$ вода находилась в спокойном состоянии. В момент времени $t=0$ мгновенно убиралась разделительная стенка и столб воды, вследствие сила тяжести устремляется в пустую часть резервуара, где находится контейнер. Была использована расчетная сетка $180 \times 60 \times 80$, а продолжительность расчётного времени составляла 6с . Начальный шаг по времени составлял 0.001с , дальше он изменялся в зависимости от числа Куранта, которое было равно 0.85 .

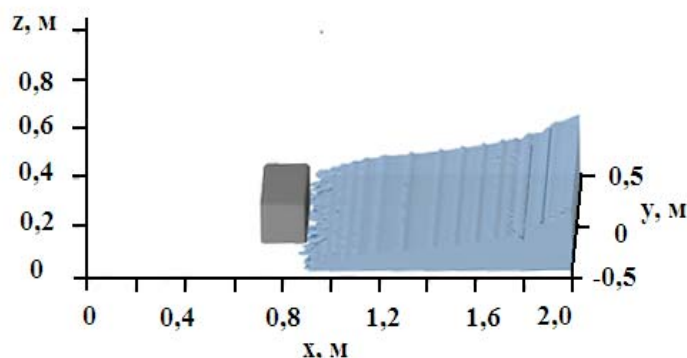


Рис. 34. Сравнение численных и экспериментальных данных для момента времени $t = 0.4\text{с}$.

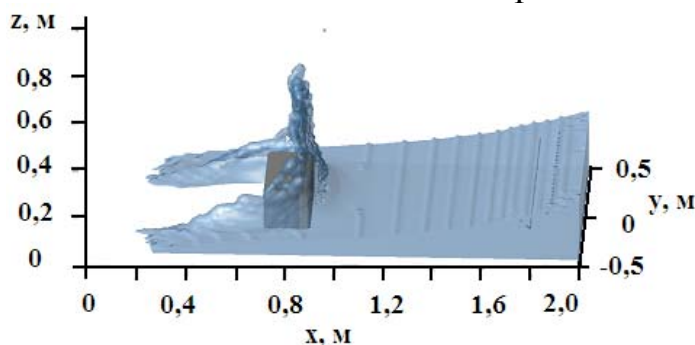


Рис. 35. Сравнение численных и экспериментальных данных для момента времени $t = 0.6\text{с}$.

На рис. 34 и 35 представлено сравнение численных и экспериментальных данных для моментов времени $t=0.4\text{с}$ и $t=0.6\text{с}$ соответственно. Справа представлены соответствующие кадры фильма, снятого во время выполнения эксперимента. Можно заметить достаточно хорошее визуальное совпадение численных результатов с экспериментальными данными. Время достижения потока воды контейнера, как в эксперименте, так и при численном моделировании одинаковое. Кроме того, формы свободной поверхности, которые образуются после удара потока об контейнер, тоже совпадают. Однако можно заметить, что при численном моделировании присутствуют некоторые неровности свободной поверхности между водой и окружающей средой – воздухом, которые могут быть устранены путем использования кусочно-линейной реконструкции свободной поверхности.

На рис. 36. приведена высота водного потока в двух различных точках: в резервуаре и непосредственной близости контейнера. Соответствие между ними достаточно хорошее, пока вода не вернется от задней стенки после около 1.8с. После этого наблюдается некоторое несоответствие: численные данные несколько завышены. В момент времени около 5с, вторичная волна достигает окрестности датчика Н2. Однако при численном моделировании это время равно примерно 5.3с. Тем не менее, общий характер изменений численных и экспериментальных данных совпадает.

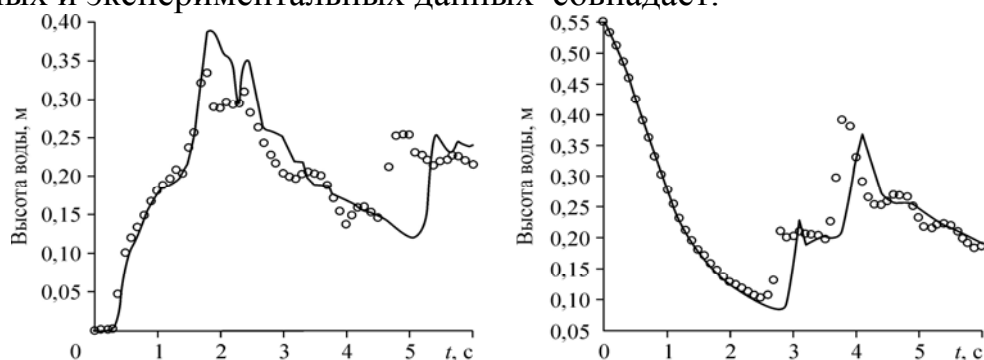


Рис. 36. Высоты водного потока в точках Н2 (слева) и Н4 (справа).

Как видно из рис. 37, момент времени $t=0.5\text{с}$, когда волна достигает контейнера, предсказан с хорошей точностью, однако величина расчетного давления по сравнению с экспериментальным значением несколько завышена (левый рисунок).

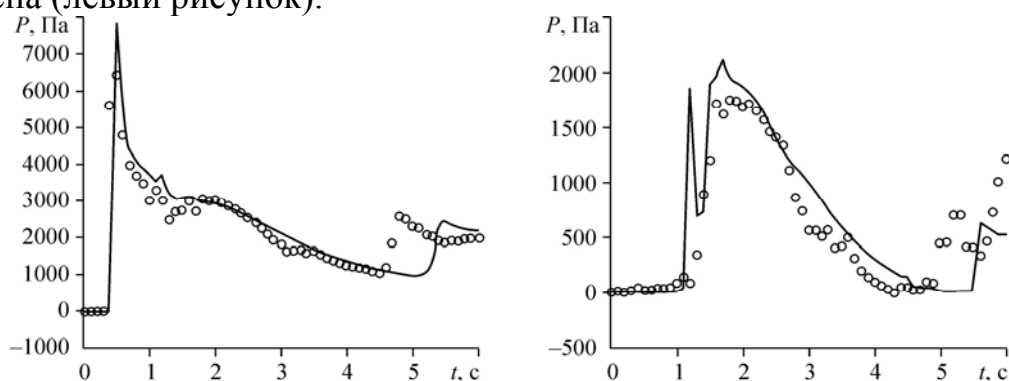


Рис. 37. Давление в точках Р2 (слева) и Р7 (справа).

Однако по сравнению с экспериментом, численные значения второго максимума давления в точке P2 смещены вправо на 0.6с, а в точке P7, смещены вправо на 0.3с. Как показал эксперимент, момент времени, когда поток обратно достигает контейнера (это около 4.7с), хорошо виден на этих рисунках. Кроме этого, при сравнении численных и экспериментальных значений давления в точках P7 (правый рисунок), можно заметить некоторые различия. После 1.3с имеет место небольшое колебание с продолжительностью около 0.2с, которое не наблюдается в эксперименте. До этой точки вода касается верхней части контейнера, когда волна, идущая от задней стенки, возвращается в эту точку.

Обрушение столба жидкости в канале с внезапным расширением. Следующей тестовой задачей является течение в канале с внезапным расширением. Соответствующий эксперимент проведен в www.uclouvain.be/ Civil engineering department of Universite catholique de Louvain, Belgium.

На рис. 6.21 схематически представлены геометрия и места расположения измерительных датчиков. Все размеры указаны в метрах. В эксперименте в точках S1, S2, S3, S4 и S5 была измерена глубина воды.



Рис. 38. Геометрия канала и расположение измерительных датчиков.

Левая часть канала (рис. 38, закрашенная область) была заполнена водой, разделенной от правой сухой части перегородкой. Первоначальная глубина воды была равна 0.2м. На рис. 39 представлены сравнения расчетных и экспериментальных данных по глубине воды в точках S2 и S3.

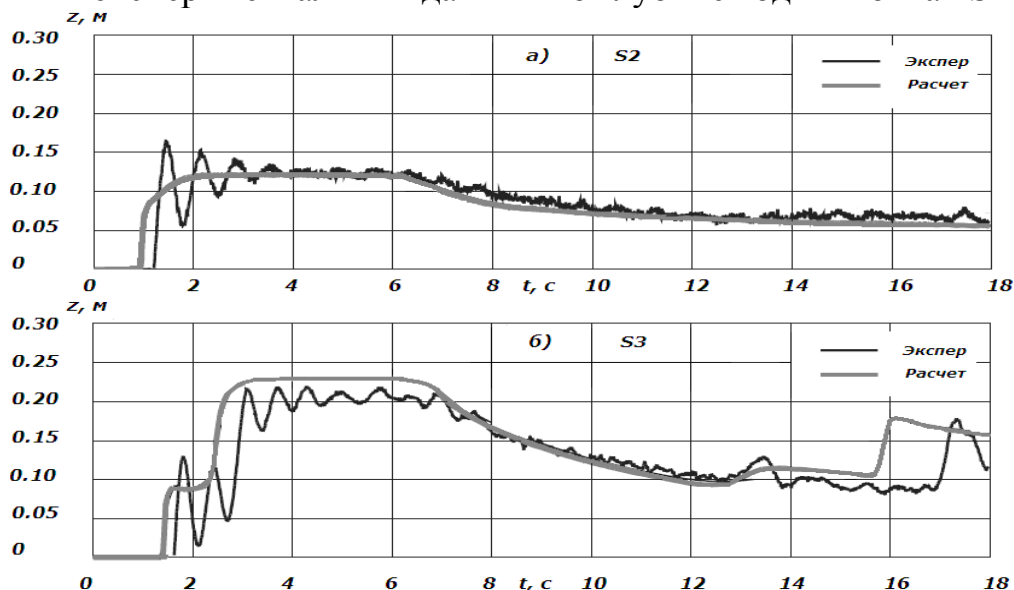


Рис. 39. Изменение глубины воды во времени в точках S2 и S3.

В целом расчетные данные достаточно удовлетворительно согласуются с экспериментальными данными, если не считать небольшую разницу во времени (~ 1.34 с) появления гидродинамического скачка в точке S3: расчет дает более раннее появление отраженной от боковой стенки волны.

Обрушение столба жидкости в канале с трапецевидным препятствием. Далее в качестве шестой модельной задачи рассмотрено течение в канале при наличии препятствия трапецевидной формы. Канал прямоугольного сечения имел длину 8.9м, ширину 0.3 м и высоту 0.34 м. Перегородка, разделяющая резервуар с водой глубиной 0.25м от сухой левой части канала, расположена на расстоянии 4.65м от входа в канал (рис.40).

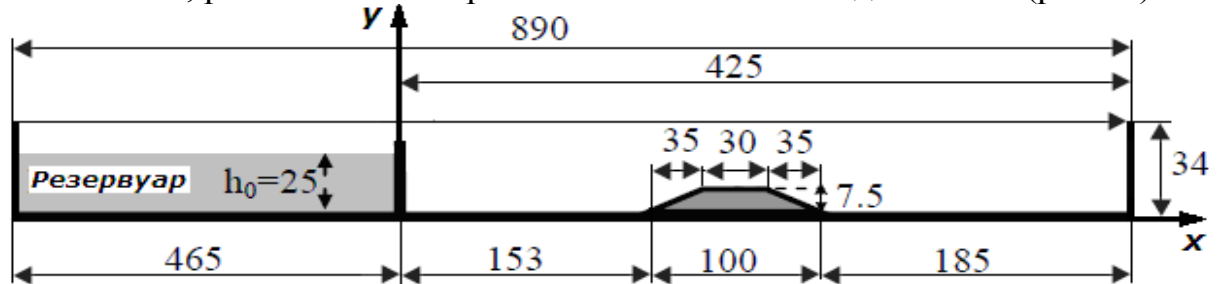


Рис. 40. Геометрия второй задачи. Все размеры в см.

В момент времени перегородка убирается мгновенно и вода из-за силы тяжести устремляется в пустую сухую часть канала. Доходя до препятствия, часть воды отражается от него и, образуя характерный крючок, движется вверх по потоку, тогда как другая часть воды проходит через препятствие и идет вниз по каналу. Таким образом, имеет место смешанный тип течения.

Сравнение рассчитанных и экспериментальных данных Косаман S. профилей свободной поверхности в разные моменты времени приведено на рис. 41.

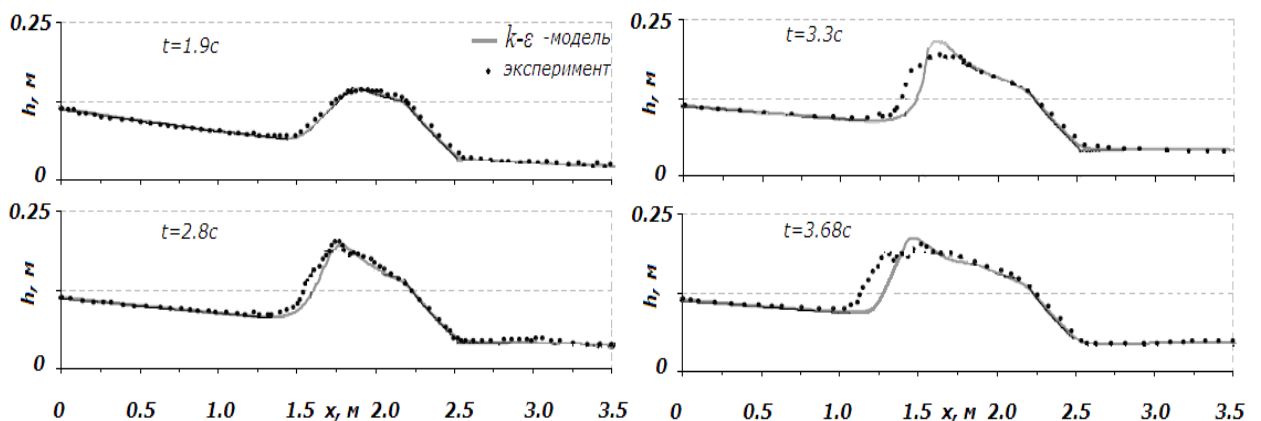


Рис. 41. Положение свободной поверхности воды.

Положение свободной поверхности при численном моделировании для моментов времени $t=1.9$ с и $t=2.8$ с близко к экспериментальным данным. В момент времени около $t=3.3$ с образуется обратная волна и результаты численного моделирования при $x \approx 1.5$ м превосходят соответствующие экспериментальные данные. Из-за препятствия форма свободной поверхности меняется резко, тогда как в эксперименте она меняется более гладко, без образования пика.

Моделирование течения на реальной местности. Для иллюстрации способов применения численного моделирования крупномасштабных гидродинамических расчетов рассмотрим задачу расчета процесса наводнения местностей вблизи плотин Андижанского и Папанского водохранилищ вблизи г. Ош, Кыргызстан (см. рис. 42). При этом необходимо особо подчеркнуть, что здесь не моделируется ситуация реального прорыва дамбы и наводнения нижележащих местностей, а демонстрируется принципиальная возможность применения описываемой технологии при наличии необходимых топографических данных. В расчетах использовались топографические данные Digital Terrain Elevation Data <http://data.geocomm.com/catalog/KG/group121.html>, которые в последующем конвертировались в файл с расширением stl. Далее, созданная утилитой blockMesh гексаэдральная фоновая сетка при помощи утилиты snappyHexMesh пакета OpenFOAM преобразуется в трехмерную поверхность, которая используется для моделирования процесса наводнения (рис. 43).



Рис.42. Карты Андижанского (слева) и Папанского (справа) водохранилищ.

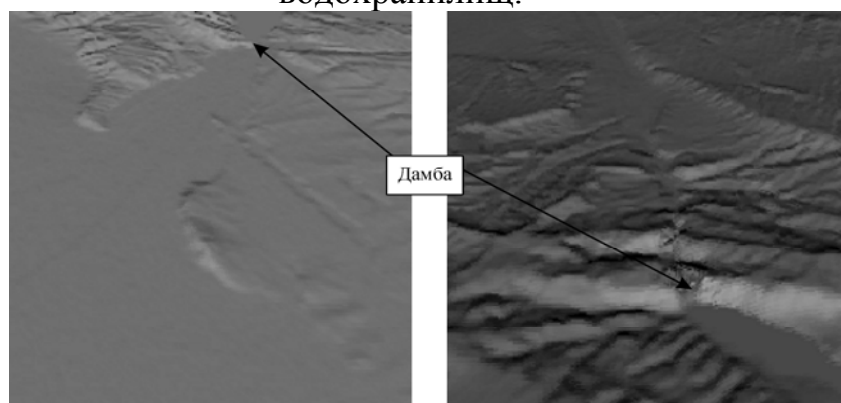


Рис.43. Трехмерная поверхность местностей Андижанского (слева) и Папанского (справа) хранилищ.

Для Андижанского водохранилища расчетное поле имело размеры $6000 \times 4000 \times 1500$ м, физическое время моделирования для сетки $120 \times 120 \times 80$ составляло около девяти часов. На рис. 44, 45 показаны различные степени наводнения в местностях с реальной топологией. Красный цвет соответствует чистому водному потоку, а синий — воздушному потоку (в синих областях

отсутствует водный поток). Из рис. 44 видно, что передний фронт потока воды за 240 с доходит до нижней границы расчетной области, проходя расстояние около 6000 м, покрывает большую часть площади, расположенной ниже по течению реки.

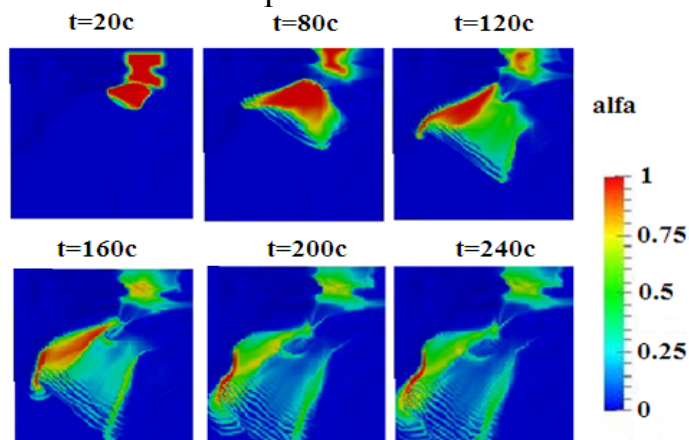


Рис. 44. Картина течения для Андижанского водохранилища.

Расчетное поле для Папанского водохранилища имеет размеры 5000×5000×1300 м (см. рис. 45).

Общее расчетное время в случае сетки 50×60×30 составляет около 5 часов. Как видно из рис. 45, после момента времени $t \approx 200$ с образуется обратное течение (рис. 45, д, е) и после момента времени $t = 260$ с оно разделяется на две части — одну в зоне обратных токов, другая продолжает течение в нижней части русла реки. Расчеты показывают, что примерно около 60 % от всего первоначального объема воды остается в зоне обратных токов.

В настоящей задаче не учитывается взаимодействие потока воды с растительностью русла реки и различными строениями, которые заметно изменяют общую картину течения, приводя к увеличению зоны затопления. Необходимо особо отметить, что из-за ограниченности вычислительных возможностей компьютера, размер расчетной сетки был выбран относительно большим. Поэтому, приведенные результаты расчета следует признать как оценочные, которые требуют верификации на более мелкой сетке.

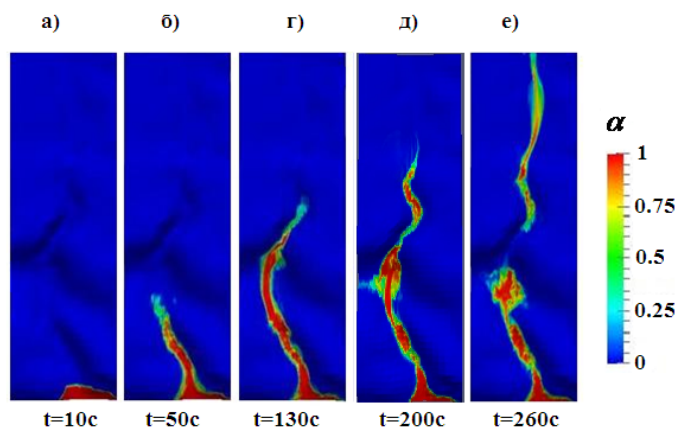


Рис. 45. Картина течения для Папанского водохранилища.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Основные результаты и выводы диссертационной работы состоят в следующих моментах:

1. Проведено систематическое тестирование использованных модифицированных вычислительных методов на разнообразных задачах классической базы вычислительной гидродинамики, ориентированное на оценку влияния схемных факторов на численное решение задач, точности получаемых результатов на основе исследования приемлемости двухпараметрических модели турбулентности, используемой в сочетании с пристеночными функциями.

2. Разработана методика построения трехмерной неструктурированной расчетной сетки с точностью необходимой для широкого круга задач для моделирования процессов затопления территорий со сложным рельефом.

3. Разработке математических моделей на основе численного интегрирования полных трехмерных уравнений Навье-Стокса, позволяющих адекватно описывать нестационарную динамику воды на сложном рельефе дне речного русла. Компьютерное моделирование дает возможность в реальном времени определять территорию и время затопления, глубину воды на всей местности, поле скоростей и гидродинамический удар от волны затопления.

4. Разработано универсальная технология, которая может быть использована для расчета динамики поверхностных вод на произвольной территории. Моделирование проводится на заданной местности с учетом реального рельефа. Показано, что особенности рельефа являются определяющим фактором. Расчеты демонстрируют наличие существенной нелинейной связи между динамикой воды и характером рельефа.

5. Проведено методические расчеты путем последовательного измельчения расчетной сетки при отслеживании воздушных капель показывают, что при чрезмерном измельчении ухудшается сходимость численного решения, и общее время расчета неоправданно увеличивается; вне зависимости от способа получения мелкой сетки, получаются неправдоподобные значения скорости воздуха вблизи свободной границы.

6. При моделировании турбулентного течения в канале прямоугольного сечения с наклонным уступом показано возможность появления вторичной зоны рециркуляции около верхней стенки, размер которой зависит от числа Рейнольдса, рассчитанного по высоте уступа. Численное значение длины присоединения для углов наклона от 30° и выше хорошо согласуется с опытными данными, однако, при малых углах имеет место различие. Это вероятно связано с тем, что при уменьшении угла наклона число неортогональных расчетных ячеек резко возрастает, и они все расположены около уступа.

7. Изучена чувствительность численных результатов к длине турбулентного перемешивания, входным граничным условиям. Показано, что правильный выбор значения длины l_{ep} основанной на характерной высоте

уступа имеет решающее значение для моделирования турбулентного потока. Было установлено, что существует некоторое пороговое значение l_{en} , выше которого дальнейшее увеличение l_{en} не влияет на численные результаты.

СПИСОК ОПУБЛИКОВАННЫХ РАБОТ

1. **Курбаналиев А. Ы.** Полуэмпирические модели турбулентности и проблемы замыкания основных уравнений [Текст] /Курбаналиев А. Ы. // Научные труды Ош ГУ. Серия физико-математические науки. Вып. №2. - Ош, 1999, с. 262-269.
2. **Курбаналиев А. Ы.** Математическое моделирование турбулентного течения в канале с внезапным расширением [Текст] / Курбаналиев А. Ы. // Научные труды Ош ГУ. Серия физико-математические науки. Вып. №2. - Ош, 1999, с. 270-279.
3. **Курбаналиев А. Ы.** Влияние гидродинамических факторов на процессы горения с учетом образования экологических вредных примесей[Текст] / Курбаналиев А. Ы.// Вестник БатГУ. №1. - Бишкек, 2002, с. 140-142.
4. **Курбаналиев А. Ы.** Численное моделирование реагирующей газовой смеси на основе k - ε модели турбулентности [Текст] / Курбаналиев А. Ы.//Матер. Республ. научно-теорет. конф. «Актуальные проблемы естественных, гуманитарных и технических наук», посвященной годовщине БатГУ. - Кызыл-Кыя, 2002, с. 58-63.
5. **Курбаналиев А. Ы.** Численное моделирование излучающего газа с эшелонированной подачей окислителя [Текст] / Курбаналиев А. Ы. // Вестник Ош ГУ. Серия физико-математических наук. Вып.6. - Ош, 2003, с. 103-105.
6. **Курбаналиев А. Ы.** Математическое моделирование смешения незакрученной пристеночной струи в цилиндрическом канале [Текст] / Курбаналиев А. Ы. // Вестник КРСУ. – Бишкек, 2006. Т. 6, №5, с. 78-81.
7. **Курбаналиев А. Ы.** Моделирование относительных движений классической механики с помощью MATLAB [Текст]/ Курбаналиев А. Ы. // Научный вестник ФерГУ. №4, - Фергана, 2006, с. 51-56.
8. **Курбаналиев А. Ы.** Теңдемелерди жана теңдемелер системасын MATLAB программалык пакетинин жардамында чечүү[Текст] / Курбаналиев А. Ы., Курбаналиев М. А., // Учебно–методическое пособие. – Кызыл-Кыя, 2006, с.116.
9. **Тайиров М.М.** Моделирование процесса теплопроводности [Текст]/ Тайиров М. М., Курбаналиев А. Ы., Курбаналиев М. А. //Учебно–методическое пособие. - Ош, 2007, с.38.
10. **Тайиров М.М.** Компьютерная обработка результатов физического эксперимента[Текст] / Тайиров М.М., Курбаналиев А. Ы., Курбаналиев М. А. Учебно–методическое пособие. - Ош, 2007, с.49.
9. **Курбаналиев А. Ы.** Моделирование ламинарного течения вязкой жидкости в пакете FEMLAB. [Текст] / Курбаналиев А. Ы., Темирбаев М. М. //

10. **Курбаналиев А. Ы.** Методы моделирования физико-химических процессов в реагирующих системах [Текст] / Курбаналиев А. Ы., Темирбаев М. М. // Вестник БатГУ. №6. - Баткен, 2010, с. 111-114.
11. **Курбаналиев А. Ы.** Методы расчета процессов тепломассообмена в плоском и осесимметричном пограничном слое с горением [Текст] / Курбаналиев А. Ы. // Вестник БатГУ. №6 - Баткен, 2010, с.115-117.
12. **Курбаналиев А. Ы.** Моделирование влияния закрутки потока на тепломассообменные процессы в пограничном слое [Текст] / Курбаналиев А. Ы. // Вестник БатГУ. №6, - Баткен, 2010, с. 118-124.
13. **Курбаналиев А. Ы.** Моделирование влияния входных граничных условий на характеристики турбулентных течений [Текст] / Курбаналиев А. Ы. // Наука и новые технологии. №7. - Бишкек, 2010, с. 27-31.
14. **Курбаналиев А. Ы.** Моделирование движения газожидкостной смеси со свободной границей [Текст]/Курбаналиев А. Ы. // Известия вузов. №7. - Бишкек, 2011, с. 3-8.
15. **Курбаналиев А. Ы.** Численное моделирование смешения коаксиальных струйных турбулентных течений [Текст]/ Курбаналиев А. Ы.// Известия КГТУ им. И. Раззакова. №24. - Бишкек, 2011, с. 409-413.
16. **Курбаналиев А. Ы.** Моделирование смешения нагретой струи в сопутном потоке [Текст] / Курбаналиев А. Ы. //Известия КГТУ им. И. Раззакова. №24. - Бишкек, 2011, с. 417-421.
17. **Курбаналиев А. Ы.** Применение пакета OpenFOAM для моделирования течений со свободными границами [Текст]/ Курбаналиев А. Ы., Тайиров М. М.// Известия КГТУ им. И. Раззакова. №24. - Бишкек, 2011, с. 421-424.
18. **Курбаналиев А. Ы.** Численное моделирование смешения турбулентных газовых струй с различной плотностью [Текст] / Курбаналиев А. Ы. // Вестник Ош ГУ. №2, Вып.1. - Ош, 2012, с.153-157.
19. **Курбаналиев А. Ы.** Численное моделирование закрученной пристенной струи в цилиндрическом канале [Текст]/ Курбаналиев А. Ы., Темирбаев М. М. // Вестник Ош ГУ. №2, Вып.1. Ош, 2012, с.157-161.
20. **Жайнаков А. Ж.** Моделирование движения столба жидкости в пакете OpenFOAM. [Текст] / Жайнаков А. Ж., Курбаналиев А. Ы., Тайиров М. М.// Современные проблемы механики сплошных сред. Вып.16. - Бишкек, 2012, с.17-23.
21. **Курбаналиев А. Ы.** Трехмерное моделирование крупномасштабных гидродинамических событий в пакете OpenFOAM. [Текст]/ Курбаналиев А. Ы. // Современные проблемы механики сплошных сред. Вып.16. - Бишкек, 2012, с.89-95.
22. **Жайнаков А. Ж.** Моделирование прорыва дамбы в канале прямоугольного сечения [Текст] / Жайнаков А. Ж., Курбаналиев А. Ы. // Известия НАК КР. №4. - Бишкек, 2012, с. 24-27.
23. **Жайнаков А. Ж.** Моделирование турбулентного течения в прямоугольном канале с внезапным расширением [Текст] / Жайнаков А. Ж.,

- 24. Курбаналиев А. Ы.** Численное моделирование особенностей отрывных течений [Текст] / Курбаналиев А. Ы., Тайиров М. М. // Наука и новые технологии. №5. - Бишкек, 2013. стр. 77-80.
- 25. Курбаналиев А. Ы.** Численное моделирование ламинарных отрывных течений в пакете FEMLAB 3.0. [Текст]/ Курбаналиев А. Ы. // Вестник Ош ГУ. №1. - Ош, 2013, с. 182-187.
- 26. Курбаналиев А. Ы.** Моделирование гидродинамических процессов на поверхности раздела вода-воздух [Текст] / Курбаналиев А. Ы., Жайнаков А. Ж. // Вестник Ош ГУ. - Ош, 2013, №2, с. 53-58.
- 27. Курбаналиев А. Ы.** Моделирование водослива методом контрольного объема [Текст] / Курбаналиев А. Ы., Жайнаков А. Ж. // Вестник Ош ГУ. - Ош, 2013, №2, с. 58-62.
- 28. Жайнаков А. Ж.** Трехмерное моделирование потока жидкости со свободной границей методом объема жидкости. [Текст] / Жайнаков А. Ж., Курбаналиев А. Ы. // Вестник КРСУ. - Бишкек, 2013. Т.13, №1, с. 66-70.
- 29. Жайнаков А. Ж.** Технология моделирования крупномасштабных процессов наводнения методами вычислительной гидродинамики [Текст] / Жайнаков А. Ж., Курбаналиев А. Ы. // Вестник Восточно-Казахстанского государственного университета им. Д. Серикбаева. Вычислительные техн. Институт вычислительн. техн. Сибирского отд. РАН. 2013, часть 1. Том 18, №4, с. 131-132.
- 30. Курбаналиев А. Ы.** Моделирование внутренних и внешних турбулентных течений. [Текст]/ Курбаналиев А. Ы. // Монография. - Бишкек, 2013. – 153с.
- 31. Курбаналиев А. Ы.** Моделирование частичного прорыва дамбы в канале прямоугольного сечения [Текст] / Курбаналиев А. Ы. // Интернет журнал НАК КР. - Бишкек, 2013.
- 32. Жайнаков А. Ж.** Математическое моделирование задачи прорыва дамбы [Текст] / Жайнаков А. Ж., Курбаналиев А. Ы. // Вычислительные технологии. - Новосибирск, 2013. Т. 18, №3, с. 12-21.
- 33. Жайнаков А. Ж.** Верификация открытого пакета OpenFOAM на задачах прорыва дамб. [Текст]/ Жайнаков А. Ж., Курбаналиев А. Ы. // Теплофизика и аэромеханика / Институт теплофизики СО РАН, - Новосибирск, 2013. Т. 20, №4, с. 461-472.
- 34. Курбаналиев А. Ы.** Численное моделирование смешения турбулентных газовых струй с различной плотностью [Текст]/ Курбаналиев А. Ы. // Вестник КГНУ. Серия 3. Естественно-технические науки. - Бишкек, 2013, с.160-164.
- 35. Курбаналиев А. Ы.** Моделирование течения жидкости в канале с обращенным назад наклонным уступом [Текст] / Курбаналиев А. Ы., Калеева А. К. // Современные проблемы механики сплошных сред. Вып.18. - Бишкек, 2013, с.121-129.

Курбаналиев Абдикерим Ырысбаевичтин 01.02.05 - суюктуктун, газдын жана плазманын механикасы адистиги боюнча физика-математика илимдеринин доктору окумуштуулук даражасына ээ болуу үчүн «Ички жана тышкы бир жана эки фазалуу турбуленттик агымдарды контролдук көлөмдөр ыкмасынын жардамында математикалык моделдештирүү» аттуу темадагы диссертациялык ишинин

РЕЗЮМЕСИ

Өзөктүү сөздөр: турбуленттүүлүк, агымдын ажырашы жана биригиши, рециркуляциялык зоналар, үч өлчөмдүүлүк, эки фазалуулук, эркие бет, суюктуктун көлөмү ыкмасы, суу басуу, жердин топографиясы, OpenFOAM.

Изилдөөнүн объектиси: Үч өлчөмдүү турбуленттүү рециркуляция зоналары бар ички жана эки фазалуу стационардык эмес бош бети бар агымдар.

Максаты жана маселелери: Ички жана тышкы бир жана эки фазалуу бири бирине сиңбечүү, ачык көрүнгөн чек ара менен бөлүнүп турган эки суюктуктун агымдарын алдын ала айта ала турган натыйжалуу усулду жана моделди түзүү. Бул максатка жетүү үчүн төмөндөгү маселелер каралды: жарым эмпирикалык моделдерди пайдалануу менен турбуленттүүлүк агымдарды систематикалык эсептөөлөрдү жүргүзүү жана алардын жыйынтыгын ERCOFTAC классикалык базадагы ар кандай ишенимдүү жана маалыматтуу эксперименталдык берилгендер менен салыштыруу; татаал топологияга ээ болгон жердин бетин эске алуу менен эсептөө сеткасын даярдоо усулун түзүү жана чыныгы жердеги суу басууну кубулушун эсептөө.

Эсептөө усулуяты: Ички жана тышкы бир жана эки фазалуу бош бети бар турбуленттүү агымдарга арналган Рейнольдстун ыкмасы менен ортолоштурулган Навье–Стокстун үч өлчөмдүү стационардык жана стационардык эмес теңдемелерин сандык интегралдоо.

Алынган жыйынтыктар жана алардын жаңылыгы. Контролдук көлөмдөр ыкмасы менен кысылбоочу илешимдүү суюктуктун динамикасынын үч өлчөмдүү ажыроочу ички маселелерин сандык моделдештирүү усулуятын түзүүлдү; контролдук көлөмдөр ыкмасы менен кысылбоочу илешимдүү суюктуктун динамикасынын бош бети бар үч өлчөмдүү сызыктуу эмес маселелерин сандык моделдештирүү усулуяты түзүүлдү; татаал топологияга ээ болгон жердин бетин эске алуу менен үч өлчөмдүү эсептөө сеткасын даярдоо усулу түзүүлдү. Алынган жыйынтыктарды колдонуу менен биринчи жолу: Ош шаарынын айланасындагы аймактарын суу басуу кубулушу эсептелинди. Жантык тегиздик боюнча кеңейүүчү каналдын жогорку чек арасында Рейнольдстун жогорку сандарында рециркуляция зонасынын пайда болору көрсөтүлдү.

Колдонуу областы: Жыйынтыктар суюктуктун жана газдын ички жана тышкы агымдарын сандык моделдештирүүдө; курулуштарга болгон аэродинамикалык басымды эсептөөдө; көп фазалуу чөйрөлөрдүн динамикасын сандык моделдештирүүдө; түрдүү техногендик жана табигый кубулуштарды алдын ала айтуу жана алардын зыянын баалоо; маанилүү чарба курулуштарын, инженердик-техникалык жана эл жашаган пункттарды суу басуу картасын түзүүдө.

РЕЗЮМЕ

диссертации Курбаналиева Абдикерима Ырысбаевича на тему: «Математическое моделирование внутренних и внешних одно- и двухфазных турбулентных течений на основе метода контрольных объемов» на соискание ученой степени доктора физико-математических наук по специальности 01.02.05 - механика жидкости, газа и плазмы.

Ключевые слова: турбулентность, отрыв потока и присоединение, рециркуляционные зоны, трехмерность, нестационарность, двухфазность, свободная поверхность, метод объема жидкости, наводнение, топография местности, OpenFOAM.

Объект исследования: Пространственные турбулентные внутренние течения с зонами рециркуляции и внешние двухфазные нестационарные течения со свободной границей.

Цель и задачи исследования: Построение модели и эффективной методологии, способной, предсказать внутренние и внешние одно – и двухфазных течений двух несмешивающиеся жидкостей, разделенных между собой четко выделенной межфазной границей. Для достижения поставленной цели решались следующие задачи: проведение систематических расчетов турбулентных течений с помощью полуэмпирических моделей и сравнение их результатов с различными достаточно надежными и информативными экспериментальными данными классической базы данных ERCOFTAC; описание методики подготовки расчетной сетки с учетом сложной топологии реальной местности и расчет процесса наводнения на реальной местности;

Методика исследования: численное интегрирование стационарных и нестационарных осредненных Рейнольдсу трёхмерных уравнений Навье-Стокса, описывавших внутренние и внешние одно– и двухфазных турбулентных течений с свободными границами методом контрольных объемов.

Полученные результаты и их новизна: разработана методика численного моделирования внутренних трехмерных отрывных задач динамики вязкой несжимаемой жидкости методом контрольных объемов; разработана методика численного моделирования трехмерных нелинейных задач динамики вязкой несжимаемой жидкости со свободными границами методом контрольных объемов; разработана методика подготовки трехмерной расчетной сетки с учетом сложной топологии реальной местности; путем использования полученных результатов впервые: проведен расчет процесса наводнения на местности вблизи г. Ош; показано образование вторичной рециркуляционной зоны около верхней стенки при больших числах Рейнольдса в канале в наклонном уступом.

Область применения: результаты диссертационной могут быть использованы для численного моделирования внутренних и внешних течений жидкости и газа; вычисления аэродинамических нагрузок на сооружения, численного моделирования динамики многофазных сред; прогнозирования различных техногенных и природных явлений и оценки ущерба от этих явлений; составления карт затопления важных народно-хозяйственных объектов, инженерно-технических коммуникаций и населённых пунктов.

SUMMARY

**of the doctoral dissertation of Kurbanaliev Abdikerim Yrysbaevich on the theme «Mathematical modeling of internal and external single-and two-phase turbulent flows on the base control volumes method»
for the degree of the doctor of physical and mathematical sciences,
specialty 01.02.05 - Mechanics of liquid, gas and plasma.**

Keywords: turbulence, flow separation and reattachment, the recirculation zone, three-dimensionality, unsteady, two-phase, free-surface, volume of liquid method, flooding, terrain topography, OpenFOAM.

The object of the research: three-dimensional turbulent internal flow with recirculation zones and external two phase free surface.

The purpose and objectives of the dissertation: To construct the model and effective methodology that can be able to predict the internal and the external one - and two-phase flow of two immiscible fluids, separated by the well defined interfacial boundary. For achieving of this purpose the following tasks were solved: the systematic calculations of the turbulent flows by the using of semi-empirical models and comparison of their results with the various sufficiently robust and informative experimental data of the ERCOFTAC classical database; description of the methodology for the preparation of the numerical grid, with the taking into account of the complex topology of the real terrain and the numerical modeling of flood on the real areas;

The method of the research: numerical integration of the steady and unsteady Reynolds averaged three dimensional Navier–Stokes equations describing the internal and external one– and two phase turbulent free surface flows control volume method.

Results and novelty: the technique of the numerical simulation of the internal three-dimensional separation problems of the incompressible viscous fluid dynamics using control volume method; the technique of three-dimensional numerical simulation of nonlinear problems of viscous incompressible fluid with free boundaries using control volume method; a method of preparation of the three-dimensional computational grid with the complex topology of the real terrain; by using of the obtained results the modeling of the flooding in the real terrain near Osh town were carried out first time. The formation of the secondary separation zone near the top wall were reported first time.

Scope: results of the thesis can be used for the numerical simulation of the internal and external flows; for the calculation of the aerodynamic loads on the structures; for the numerical simulations of the dynamics of multiphase medium; for the forecasting of the various man-made and natural phenomena and assess the damage from these events; for mapping of flood of important national economic constructions, technical engineering networks and communities.