

*На правах рукописи*



**БЕЛИКОВ Виталий Васильевич**

**СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ МЕТОДОВ И ТЕХНОЛОГИЙ  
ПРИКЛАДНОГО ЧИСЛЕННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ  
В ГИДРАВЛИКЕ ОТКРЫТЫХ ПОТОКОВ**

Специальность 05.23.16 — Гидравлика и инженерная гидрология

**АВТОРЕФЕРАТ**

диссертации на соискание ученой степени  
доктора технических наук

Москва 2005

Работа выполнена в Открытом акционерном обществе  
«Научно-исследовательский институт энергетических сооружений»  
(ОАО «НИИЭС»)

**Официальные оппоненты:**

Академик РАН, Доктор технических наук,  
профессор

О.Ф. Васильев

Доктор технических наук, профессор

Д.В. Козлов

Доктор технических наук, профессор

А.В. Мишуев

**Ведущая организация:**

Всероссийский научно-исследовательский институт  
гидротехники и мелиорации (ВНИИГиМ) им. А.Н. Костякова.

Защита диссертации состоится «28» марта 2005 г.

в 15 часов на заседании диссертационного Совета Д 220.045.02  
в Московском государственном университете природообустройства  
по адресу:

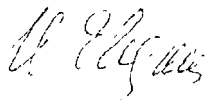
127550, Москва, ул. Прянишникова, 19, корпус 1, ауд. 201.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Московского  
государственного университета природообустройства.

Автореферат разослан «25» апреля 2005 г.

Ученый секретарь диссертационного Совета

кандидат технических наук



И.М. Евдокимова

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**Актуальность проблемы.** При изучении природных течений и расчете гидротехнических сооружений (ГТС) на современном этапе важная роль отводится методам численного моделирования. Их бурное развитие вызвано как экономическими причинами (стоимость физической модели обычно в несколько раз больше стоимости разработки аналогичной компьютерной модели); так и возможностью изучения таких сложных физических явлений, которые нельзя исследовать в натуральных или лабораторных условиях. Очевидно, что создание адекватных физических моделей участков и бассейнов рек протяженностью сотни и тысячи километров по существу нереально. Следовательно, безальтернативным вариантом для исследования наводнений и волн прорыва является компьютерное моделирование.

Важность задачи моделирования наводнений определяется тем, что согласно мировой статистике, из всех стихийных бедствий они приводят к наибольшему экономическому ущербу. В условиях глобального потепления климата и увеличения водности рек на территории Российской Федерации угроза наводнений все более нарастает, о чем свидетельствуют события последних лет в Якутии и на Северном Кавказе. Одновременно с этим увеличивается и вероятность разрушения напорных фронтов ГТС, в том числе в связи с длительными сроками эксплуатации и недостаточным техническим обслуживанием, что может привести к образованию волн прорыва. В обоих случаях (как природном, так и техногенном) последствиями прохождения паводковой волны являются затопление территорий, разрушение плотин, дамб, энергетических, промышленных и гражданских объектов, человеческие жертвы. Последствия наводнений существенным образом зависят от возможности их прогнозирования и превентивных защитных мер.

Наводнения — важная, но далеко не единственная проблема, для решения которой могут и должны применяться, развиваться и совершенствоваться методы компьютерного моделирования на основе численного решения уравнений гидродинамики и гидравлики. Это вопросы гидравлических расчетов гидротехнических сооружений (сопряжения бьефов, водосбросов, отстойников, дериваций ГЭС), улучшения судоходства, проектирования водозаборных устройств, расчета мостовых переходов (в том числе групповых отверстий), прогноза русловых деформаций на реках и т.д. Необходимость подобных исследований в свое время зафиксирована рядом Постановлений ГКНТ СССР и комплексных научно-технических программ. В настоящее время актуальность темы обусловлена сотнями ежегодно возникающих проблем на водных объектах, требующих решения на современном научном уровне.

**Цель и задачи исследований.** Целью диссертационной работы является разработка единого теоретического и технологического подхода к компьютерному моделированию мелководных нестратифицированных открытых потоков, обеспечивающего эффективное решение многих практических задач гидравлики. Реализация такого подхода, использующего сочетание доступной вычислительной техники, надежных численных алгоритмов, ГИС-технологий, современных методов измерений и графического представления результатов, позволит без больших материальных затрат выполнять высоко-

точные многовариантные расчеты сложных прикладных задач для выработки рациональных проектных, технологических и управленческих решений

Для достижения этой цели были поставлены следующие задачи

разработать универсальную математическую модель, пригодную для исследования мелководных потоков в одномерной, двухмерной (в плане) и двухслойной схематизациях течения,

разработать численные алгоритмы дискретизации этой модели на нерегулярных адаптивных треугольно-четырёхугольных сетках, позволяющие рассчитывать течения с любыми числами Фруда в областях большой протяженности и сложной геометрии при любом рельефе дна,

разработать методы и алгоритмы построения нерегулярных сеток и интерполяции на эти сетки рельефа земной поверхности, заданного на произвольных наборах точек,

создать технологии подготовки исходных данных и визуализации результатов расчетов с применением ГИС-технологий и электронных топографических карт, обеспечивающие построение компьютерных моделей сложных гидротехнических объектов, участков и бассейнов рек,

с применением разработанных методик провести численные гидравлические исследования различных водных объектов

**Методика исследований.** Поставленные задачи были решены с применением аппарата вычислительной гидравлики, теории разностных схем, метода конечных элементов, ГИС-технологий. Адекватность разработанных численных моделей проверялась путем сопоставления с данными физических экспериментов и натурных наблюдений. Подготовка исходных данных, расчеты и отображение результатов проводились на персональных ЭВМ по программам, написанным на языках программирования FORTRAN и DELPHY

### **Научная новизна:**

разработан способ сквозного численного моделирования каскадов гидроузлов с учетом подтопления нижних бьефов водоподъемных плотин,

предложен надежный «неотрицательный» численный алгоритм решения задач склонового стока при произвольном профиле земной поверхности,

разработана неявная схема конечных объемов для уравнений Сен-Венана на треугольных сетках с дивергентной аппроксимацией конвективных членов,

построена явная схема распада разрывов для расчета волновых течений и течений с большими числами Фруда на гибридных сетках в областях со свободными границами,

предложена двухслойная математическая модель паводковых течений, учитывающая неколлинеарность векторов скорости в русле и на пойме и не требующая специальных гипотез для замыкания,

разработаны вариационно-маршевый алгоритм и программа построения треугольных сеток, обеспечивающие хорошее качество расчетных сеток в областях сложной геометрии,

для целей пересчета уровней дна в узлы расчетных сеток разработан и реализован на ЭВМ новый метод «гармонической» интерполяции функций, заданных на произвольных наборах точек в Евклидовых пространствах,

разработана балльная шкала степени возможных разрушений от наводнений и волн прорыва, позволяющая оценивать последствия застройки территорий, подверженных затоплению.

Достоверность результатов исследований определяется тем, что предложенные математические и численные модели основаны на фундаментальных законах гидромеханики, теории разностных схем и методе конечных элементов, а результаты расчетов сопоставлены с известными теоретическими решениями, результатами физических экспериментов, измерениями на многочисленных реальных объектах и показали хорошую сходимость.

**На защиту выносятся:** двухслойная математическая модель паводковых течений, учитывающая неколлинеарность векторов скорости в русле и на пойме и являющаяся обобщением одномерных и двумерных уравнений Сен-Венана;

совокупность численных алгоритмов, пригодных для произвольных сеток и обеспечивающих надежное решение одномерных, двумерных и двухслойных уравнений мелкой воды при любых числах Фруда и произвольном рельефе дна, в том числе с возможностью расчета распространения волн по сухому дну при нефиксированных границах течения, а также возможностью расчета течений с водоворотными зонами;

совокупность методов и технологий построения компьютерных гидравлических моделей участков и бассейнов рек, включающая алгоритм и программу подготовки исходных данных с использованием ГИС-технологий, алгоритмы и программы построения неструктурированных сеток и интерполяции рельефа земной поверхности, программу визуализации результатов расчетов в виде слоев электронной топографической карты;

результаты компьютерного гидравлического моделирования пятнадцати участков и бассейнов рек, полученные на основе представленных в диссертации методов и технологий.

**Личный вклад в решение проблемы.** Диссертация является результатом двадцатилетних исследований автора, которые проводились последовательно в ОАО «ВНИИ Транспортного строительства», Вычислительном Центре РАН, ОАО «НИИ Энергетических сооружений». Все модели, методы, алгоритмы и программы, представленные в диссертации, разработаны лично автором диссертации либо при его основополагающем участии, все исследования конкретных объектов выполнены непосредственно автором либо под его руководством. Соавторство в отдельных разработках оговорено в соответствующих разделах диссертации.

**Реализация результатов исследований.** Разработанные автором диссертации методы расчета были использованы в ряде рекомендательных документов, а также при выполнении более 50 проектов, связанных с исследованием водных объектов и обоснованием конструктивных решений различных гидротехнических сооружений. Проведены расчеты волн прорыва и зон затопления для 10 гидроузлов, в том числе Красноярского, Саратовского, Угличского, Рыбинского, Краснодарского, Новосибирского. Разработана компьютерная модель «Река Москва» для расчета природных и техногенных паводковых волн и переноса загрязнений. Выполнен гидравлический расчет мосто-

вых переходов для рек в различных регионах России и бывшего СССР Проведено многовариантное компьютерное моделирование для разработок схем защиты городов Вилюйска, Якутска, Олекминска, пос Зырянка (р Колыма) от размывов берега и затоплений, для проектирования водозаборных устройств на реках Лене и Волге Выполнены расчеты русловых деформаций на участках подводных переходов трубопроводов через реки Белая, Кама, Лена, Алешкинскую протоку р Оби, заливы Чайво и Пильтун на о Сахалин С применением численного моделирования рассматривались варианты улучшения судоходства на р Волге ниже Горьковского и на р Дон ниже Кочетовского гидроузлов, в узле слияния р Лены и Алдана, решались вопросы выбора рациональных конструкций нижних бьефов водопропускных труб на железнодорожных линиях линиях Белорецк-Карламан и Беркамит-Томмот Разработанные автором компьютерные программы переданы в Государственный фонд алгоритмов и программ СССР, зарегистрированы в Российском агентстве по патентным и товарным знакам, используются на Географическом факультете МГУ, в Московском Физико-техническом институте, в ОАО «Гипроречтранс», в МГУП «Мосводоканал», в ОАО «НИИ Энергетических сооружений»

**Практическая значимость.** Разработанные методы, технологии и программы существенно расширяют возможности применения численного моделирования в гидравлических исследованиях для решения актуальных проблем народного хозяйства В частности, они позволяют

проводить расчеты стационарных и нестационарных течений в мелких водоемах, каналах и речных долинах сложной формы,

исследовать течения в бьефах гидроузлов, отстойниках, водосбросах, деривациях ГЭС для оптимизации конструктивных решений,

рассчитывать и отображать на электронных топографических картах динамику течения, зоны затопления и степень возможных разрушений при прохождении природных и техногенных паводков,

прогнозировать русловые деформации сложных многорукавных участков рек, в том числе в местах подводных переходов трубопроводов,

производить гидравлический расчет групповых отверстий при проектировании мостовых переходов через систему русл, имеющую общие пойменные участки,

получить решение одной из основных задач речной гидравлики — распределение расходов воды между рукавами многорукавного русла,

создавать компьютерные гидравлические модели речных бассейнов для целей прогнозирования и оптимального управления водными ресурсами, для комплексного решения проблем водопользования

**Апробация работы.** Основные положения диссертационной работы докладывались на 4-ой Республиканской конференции «Научно-технические проблемы гидравлики дорожных водопропускных сооружений» (Саратов, 1985), II-VI конференциях «Динамика и термика рек, водохранилищ и прибрежной зоны морей» (Москва, 1984 - 2004), 15th World Congress on Scientific Computation Modeling and Applied Mathematics (Berlin, 1997), научно-практическом семинаре «Геоинформационные системы и их возмож-

ности в водном секторе» (Москва, 1998), Международном симпозиуме IАHR «Гидравлические и гидрологические аспекты надежности и безопасности гидротехнических сооружений» (С -Петербург, 2002), Международной конференции «RIVER FLOW 2002» (Бельгия, 2002), Всероссийской конференции «Современные геоинформационные системы для предупреждения и ликвидации чрезвычайных ситуаций» (Москва, 2003), Всероссийском конгрессе работников водного хозяйства (Москва, 2003), Международной конференции «Гидравлика (наука и дисциплина)» (С -Петербург, 2004), Всероссийской конференции «Прикладная геометрия, построение расчетных сеток и высокопроизводительные вычисления» (Москва, 2004), 17 Международном симпозиуме по льду (С-Петербург, 2004), Международной конференции «Перенос наносов в эрозионно-руслых системах» (Москва, 2004), VI Всероссийском гидрологическом съезде (С -Петербург, 2004), Научно-практической конференции «Обеспечение безопасности гидротехнических сооружений и предотвращение вредного воздействия вод в период прохождения половодий и паводков» (Пятигорск, 2004)

**Публикации.** Основное содержание диссертации изложено в 39 печатных работах

**Структура и объем работы.** Диссертация состоит из введения, пяти глав, заключения, списка литературы из 201 наименования, приложения, в котором представлены сертификаты на компьютерные программы и справки об использовании научных разработок Работа изложена на 375 страницах машинописного текста, включая 18 таблиц и 139 рисунков

**Благодарности.** Автор глубоко благодарен безвременно ушедшему Учителю и другу, известному вычислительно-гидравлику д т н А Н Милитееву, многолетнее творческое сотрудничество с которым явилось основой ряда исследований, представленных в настоящей работе Особая признательность за совместную реализацию конкретных проектов выражается к г н А М Алабяну, к г н АА Зайцеву, к ф -м н С А Иваненко (посмертно), к т н Ю М Колесникову, В В Кочеткову, к т н С С Медведеву, к ф -м н А Ю Семенову Автор высоко ценит помощь своих коллег Директора Центра гидравлических исследований ОАО «НИИЭС» к т н В Б Родионова, д т н , профессора АМ Прудовского, не ЕС Третьюхиной, м н с НВ Никитиной и многих других

## **КРАТКОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ.**

**Введение** представляет собой несколько расширенный вариант общей характеристики диссертационной работы, приведенной выше

### **Глава 1. Математические и численные модели течений в приближении мелкой воды на нерегулярных сетках**

Изложены математические модели и численные алгоритмы для расчета открытых потоков в одномерной и двумерной (плановой) схематизации, а также двухслойная модель паводковых течений, являющаяся обобщением одномерной и двумерной моделей Сен-Венана Основное внимание уделено двумерным численным алгоритмам, реализованным на неструктурированных треугольных и треугольно-четыреугольных сетках Приведено краткое описание соответствующих комплексов программ для ЭВМ

В п. 1.0 дается краткий обзор существующих и перспективных подходов к компьютерному моделированию открытых потоков. Отмечается, что гидравлические исследования всегда занимали видное место среди теоретических и прикладных наук. В России и бывшем СССР выросла замечательная плеяда гидродинамиков и гидравликов мирового уровня, в том числе М.А. Великанов, А.П. Зегжда, В.М. Маккавеев, Н.И. Маккавеев, И.И. Леви, В.Н. Гончаров, Г.В. Железняков, А.В. Караушев, К.В. Гришанин, И.Ф. Карасев, К.И. Российский, Н.С. Знаменская, Ц.Е. Мирцхулава, Т.Г. Войнич-Сяноженцкий, А.В. Мишуев, Д.В. Штеренлихт, И.А. Шеренков, Н.А. Картвелишвили, В.М. Лятхер, А.М. Прудовский, И.В. Кочин, Л.Г. Лойцянский, Л.И. Седов, Г.И. Петров, Г.Г. Черный, Н.Н. Моисеев, Г.И. Марчук и другие.

С конца 50-х годов в связи с развитием вычислительной техники в России нашу науку стали представлять такие высококвалифицированные вычислители-гидродинамики, а затем и гидравлики С.К. Годунов, О.М. Белоцерковский, С.М. Белоцерковский, А.А. Дородницын, В.Я. Шакалов, О.Ф. Васильев, С.М. Шугрин, А.Ф. Воеводин, М.Т. Гладышев, Б.Л. Историк, А.Н. Милитеев, С.Я. Школьников, Б.В. Архипов. Можно говорить о возникновении нескольких научных школ вычислителей-гидравликов школы Института Гидродинамики СО РАН, школы Вычислительного Центра РАН, школы НИС Гидропроекта (теперь ОАО «НИИЭС»). Большое влияние на развитие численных алгоритмов для решения уравнений Сен-Венана оказали работы по вычислительной газовой динамике С.К. Годунова, В.П. Колгана, В.В. Русанова, А.В. Родионова, П.Роуча, Р.Куранта, А.Хартена, С.Ошера, П.Лакса, В.Вендроффа, П.Роу. В развитие математических и численных моделей гидравлики открытых потоков большой вклад внесли О.Ф. Васильев, Н.Е. Вольцингер, Р.В. Пясковский, Л.В. Овсянников, А.Н. Милитеев, И.А. Шеренков, Дж. Стокер, М. Эббот, Ж. Кюнж, П. Гластер, А.Ю. Семенов, С.С. Маханов, С.А. Иваненко.

Ряд моделей и алгоритмов был разработан автором диссертации совместно с авторами. В 1985 г. В.В. Беликовым и А.Ю. Семеновым явная по времени численная схема С.К. Годунова была адаптирована для решения двумерных уравнений мелкой воды на гибридных сетках с учетом точного решения задачи о распаде произвольного гидродинамического разрыва [5,8,12,15,34]. В 1988 - 1992 годах В.В. Беликовым и А.Н. Милитеевым была разработана двухслойная математическая модель паводковых течений, обобщающая одномерную и двумерную модели Сен-Венана [10,17,25,37]. В начале 90-х годов В.В. Беликовым и А.Н. Милитеевым была разработана неявная схема конечных объемов с консервативной аппроксимацией конвективных членов на треугольных неструктурированных сетках, позволяющая рассчитывать отрывные вихревые течения [19].

При решении практических задач гидравлики открытых потоков одним из ключевых моментов является осознание и использование того принципиального факта, что двумерные нестационарные уравнения Сен-Венана во многих случаях достаточно хорошо описывают не только плавные изменяющиеся, но и резко изменяющиеся течения с образованием отрывных (циркуляционных) зон. Вывод уравнений Сен-Венана без допущений о плавной изменчивости потока дан, например, в работах А.Н. Милитеева,



причем показано, что подкачка энергии в циркуляционную зону происходит за счет пульсаций на границе с транзитной струей. В численных экспериментах удалось получить спектр пульсаций, обогащенный новыми гармониками при сгущении расчетной сетки, что в том числе свидетельствует и о высоком качестве разностной схемы. По видимому, в ближайшей перспективе для решения практических задач гидравлики наиболее оправдано применение в расчетах простейших уравнений, не требующих сложных гипотез для их замыкания, но, тем не менее, позволяющих моделировать резко-нестационарные и не плавно изменяющиеся течения с возможным образованием гидравлических прыжков и водоворотных зон.

Наряду с численными алгоритмами чрезвычайно важно совершенствовать и технологии компьютерного моделирования (автоматизацию подготовки исходных данных и проверку расчетов и визуализацию полученных результатов). Перспективным направлением здесь является применение электронных топографических карт, ГИС-технологий, нерегулярных гибридных треугольно-четырёхугольных сеток, которые легко адаптируются для исследования течений в областях сложной геометрии при наличии плотин, дамб, дорог, мостовых переходов.

В п. 1.1 приведена известная одномерная система уравнений Сен-Венана с учетом деформируемости дна водотока, предложено несколько вариантов ее разностной дискретизации, описан алгоритм сквозного счета водоподъемных плотин, а также «неотрицательный» алгоритм решения уравнения диффузионной волны.

При решении некоторых задач гидравлики открытых потоков можно применять уравнения Сен-Венана в так называемом диффузионном приближении, когда в уравнении движения пренебрегают полной производной от расхода воды по времени, полагая, что гравитационные силы уравновешиваются силами трения. Диффузионные уравнения описывают весьма широкий класс течений, в том числе кривые подпора и спада спокойного потока, распространение волн половодья, течения на поймах и другие. Двумерные двухслойные уравнения диффузионной волны выведены в п. 1.4 диссертации и использовались при решении ряда практических задач (главы 3,4). Весьма эффективным оказывается применение уравнения диффузионной волны при расчете склонового стока с водосборных бассейнов как альтернатива использованию уравнения кинематической волны, приводящего к образованию нефизических разрывных решений.

В задачах склонового стока моделируются тонкие слои жидкости (глубина которых может обращаться в ноль), стекающие по поверхностям с большими уклонами, причем шаги расчетной сетки и перепады уровней на ячейке могут на несколько порядков превосходить глубину потока. Это приводит к неустойчивости численного счета и возникновению отрицательных глубин, когда уровень поверхности жидкости опускается ниже поверхности земли, что не имеет физического смысла. Поэтому для таких задач актуальным является разработка алгоритмов, автоматически обеспечивающих неотрицательность глубин во все время счета. В диссертации описывается и теоретически обосновывается гибридный (явно-неявный) «неотрицательный» метод решения уравнений диффузионной

волны (отличный от метода С. С. Маханова и А. Ю. Семенова), наиболее эффективный для рассматриваемого класса задач

В п. 1.2 излагается, следуя [19], неявная схема конечных объемов для двумерных уравнений Сен-Венана на нерегулярных треугольных сетках, обеспечивающая консервативную аппроксимацию конвективных членов и позволяющая производить расчет отрывных течений с образованием вихревых зон. В интегральной форме уравнения имеют вид<sup>1</sup>

$$\int_{\Omega} \frac{\partial \bar{q}}{\partial t} d\Omega + \oint_{\sigma} \frac{1}{2} g h^2 \bar{n} d\sigma + \oint_{\sigma} q_n \bar{v} d\sigma = - \int_{\Omega} a \bar{q} d\Omega - \int_{\Omega} g h \nabla z d\Omega, \quad (1.2.1)$$

$$\int_{\Omega} \frac{\partial h}{\partial t} d\Omega + \oint_{\sigma} q_n d\sigma = 0, \quad a = 0.5 \lambda |\bar{q}| h^{-2}, \quad \lambda = 2 g n^2 h^{-3/2} \quad (1.2.2)$$

Здесь  $\Omega$  — область интегрирования в плоскости декартовых координат  $x, y$ ;  $\sigma$  — ее граница,  $\bar{n}$  — вектор единичной внешней нормали к границе;  $t$  — время,  $\bar{q}$  — вектор удельных расходов воды,  $q_n$  — проекция  $\bar{q}$  на нормаль,  $\zeta, z$  — уровни свободной поверхности и дна соответственно;  $h = \zeta - z$  — глубина потока;  $\bar{v} = \bar{q}/h$  — вектор средней по глубине скорости потока,  $g$  — ускорение свободного падения;  $\lambda$  — коэффициент гидравлического трения;  $n$  — коэффициент шероховатости;  $\nabla$  — дифференциальный оператор Гамильтона.

В (1.2.1), (1.2.2) вектор удельного расхода  $\bar{q}(x, y, t)$  и уровень водной поверхности  $\zeta(x, y, t)$  — неизвестные величины, которые должны быть найдены в процессе решения конкретной задачи при заданных начальных значениях  $\bar{q}(x, y, 0)$ ,  $\zeta(x, y, 0)$  и граничных условиях. Граничное условие на твердых границах — равенство нулю нормальной компоненты расхода ( $q_n = 0$ ) На жидких границах может быть задан либо удельный расход  $\bar{q}(t)$ , либо уровень  $\zeta(t)$ , либо определена связь между расходами и уровнями воды  $\bar{q}(\zeta)$

Как известно, решение стационарных и квазистационарных задач практически не зависит от числа Фруда  $Fr = U / \sqrt{gH}$  при  $Fr < 0.3$ . Поэтому разностная схема для уравнений (1.2.1), (1.2.2) не должна иметь таких ограничений на шаг по времени, где фигурировала бы скорость распространения малых возмущений  $C = \sqrt{gh}$ . Для этого необходимо, чтобы схема для уравнений Сен-Венана без конвективных членов была неявной. В предлагаемом алгоритме в узлах треугольной сетки задаются отметки дна  $z$  и вычисляются значения  $\zeta, h, \bar{v}$ , в центрах треугольников вычисляется вектор  $\bar{q}$ . Шаблоном для вычисления  $\bar{q}$  служит треуголь-

ник, шаблоном для вычисления  $\zeta$  — многоугольник, образованный отрезками, проходящими через середины сторон и центры тяжести треугольников, имеющих своей вершиной соответствующий узел (рис. 1.2.1.). Считается, что  $\bar{q}$ ,  $\zeta$ ,  $z$ ,  $h$  — кусочно-постоянные функции на соответствующих шаблонах. Интегрируя по треугольнику  $l$  с вершинами  $ijk$  и площадью  $\omega_l$  и используя тождественные преобразования с учетом  $z = \zeta - h$ , получим дискретный аналог уравнения (1.2.1) в виде:

$$\frac{\bar{q}_i^{r+1} - \bar{q}_i^0}{\tau} + g h_i^r \nabla \zeta^{r+1} + a_i^r \bar{q}_i^{r+1} + \frac{\bar{K}_i^r}{\omega_l} = 0, \quad h_i^r = \frac{1}{3}(h_i^r + h_j^r + h_k^r), \quad (1.2.3)$$

где  $\tau$  — шаг по времени; верхним индексом здесь и далее обозначается номер итерации при расчете величин на верхнем слое по времени ( $r = 0, 1, 2, \dots, M$ ), причем индекс «0» соответствует уже вычисленным значениям с предыдущего слоя;  $\nabla \zeta^{r+1}$  выражается через  $\zeta_i^{r+1}$ ,  $\zeta_j^{r+1}$ ,  $\zeta_k^{r+1}$  и координаты вершин треугольника по известным формулам метода конечных элементов.

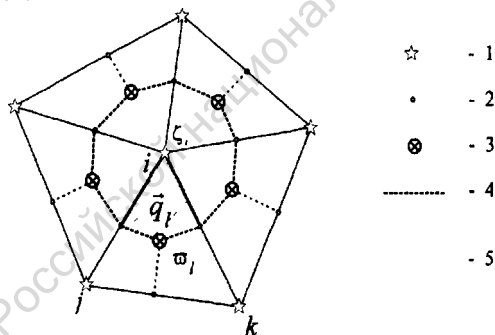


Рис. 1.2.1. Дискретизация расчетной области: 1 — узлы, 2 — середины сторон, 3 — центры тяжести треугольников, 4 — граница шаблона для  $\zeta$ , 5 — пересечение шаблонов для  $\zeta$  и  $q$ .

С помощью (1.2.3.)  $\bar{q}_i^{r+1}$  выражается в виде:

$$\bar{q}_i^{r+1} = \bar{F}_i^r - D_i^r \nabla \zeta^{r+1}, \quad \bar{F}_i^r = \frac{1}{1+a_i^r \tau} \left( \bar{q}_i^r + \frac{\tau}{\omega_l} \bar{K}_i^r \right), \quad D_i^r = \frac{\tau g h_i^r}{1+a_i^r \tau} \quad (1.2.4)$$

Дискретный аналог уравнения неразрывности (1.2.2.) на шаблоне для  $\zeta_i$  имеет вид:

$$\frac{\zeta_i^{r+1} - \zeta_i^0}{\tau} \Omega_i + \sum_{l=1}^{m_i} (q_l^{r+1} L_l) = 0, \quad \Omega = \frac{1}{3} \sum_{l=1}^{m_i} \omega_l, \quad (1.2.5)$$

где  $m_i$  — число треугольников, сходящихся в вершине  $i$ ;  $L$  — длина части границы шаблона, лежащей внутри треугольника  $l$ . С учетом (1.2.4) из (1.2.5), имеем:

$$\zeta_i^{r+1} = \zeta_i^0 - \frac{\tau}{\Omega_i} \sum_{l=1}^{m_i} \left[ \left( F_n^r - D^r \frac{\partial \zeta_i^{r+1}}{\partial n_l} \right) L \right], \quad (1.2.6)$$

где  $\left( \frac{\partial \zeta_i^{r+1}}{\partial n_l} \right)$  выражается линейно через  $\zeta_i^{r+1}, \zeta_j^{r+1}, \zeta_k^{r+1}$ .

Уравнение (1.2.6) связывает значения  $\zeta_i^{r+1}$  в узле  $i$  и соседних с ним узлах, что приводит к системе линейных алгебраических уравнений относительно  $\zeta_i^{r+1}$ ,  $i = 1, \dots, N$ , где  $N$  — число узлов для всей расчетной области. Матрица этой системы разреженная, симметричная и положительно определенная, что позволяет применять эффективные процедуры ее обращения для нахождения решения.

После нахождения  $\zeta_i^{r+1}$  во всех узлах и их подстановки (1.2.4), определяются согласованные с уравнением неразрывности векторы удельных расходов на всех элементах (треугольниках) сетки. Итерации на каждом шаге по времени прекращаются при выполнении условия:

$$\max_i \left| \zeta_i^{r+1} - \zeta_i^r \right| \leq \epsilon \max_i \left| \zeta_i^{r+1} - \zeta_i^0 \right|, \text{ где } \epsilon \text{ — малая величина.}$$

При отсутствии конвективных членов описанная неявная разностная схема дивергентна по массе и импульсу (на горизонтальном дне без трения), имеет первый порядок аппроксимации по времени и второй по пространству и абсолютно устойчива.

Для вычисления конвективных членов на каждой итерации выполняется интерполяция потоков импульса на стороны треугольников с использованием удельных расходов в центрах треугольников. Поскольку интерполяция производится между величинами, взятыми с одной итерации, далее верхние индексы опускаем. Пусть  $\tilde{Q}_l$  — полный расход через часть границы треугольника  $l$ , образованной половинами сторон треугольника с вершинами в узле  $i$ . Назовем эту величину расходом из треугольника / в узел  $i$  и примем, что он положителен, если жидкость вытекает из треугольника через соответствующий угол. Введем  $Q_{li} = (q_n L)_l$  — расход жидкости через часть границы (длиной  $L$ ) шаблона для  $\zeta_i$ , лежащей внутри треугольника  $l$ . Сумма  $\tilde{Q}_l$  и  $Q_{li}$  представляет собой расход через замкнутый контур — границу четырехугольника (на рис. 1.2.1 заштрихован). Уравнение неразрывности для этого четырехугольника имеет вид:

$$\frac{\omega_l}{3} \frac{\partial \zeta_i}{\partial t} + Q_{li} + \tilde{Q}_l = 0.$$

Или с использованием (12 5)

$$\bar{Q}_{li} = -Q_{li} + \frac{\omega_l}{3\Omega_l} \sum_{l=1}^{m_l} Q_{li} \quad (12 7)$$

Согласно (12 7)

$$\sum_{l=1}^{m_l} \bar{Q}_{li} = 0, \quad (12 8)$$

т е сумма расходов, втекающих в узел , равна сумме вытекающих расходов. Скорость жидкости в узле определяется по формуле

$$\bar{v}_l = \left( \sum_{\bar{Q}_{li} > 0} \bar{v}_l \bar{Q}_{li} \right) / \left( \sum_{\bar{Q}_{li} > 0} \bar{Q}_{li} \right), \quad (1.2.9)$$

где суммирование  $\bar{v}_l = \bar{q}_l / h_l$  проводится только по втекающим (положительным) расходам. По формулам, аналогичным (1 2 7), (1 2 9), можно определить  $\bar{Q}_{ij}$ ,  $\bar{Q}_{jk}$ ,  $\bar{v}_j$ ,  $\bar{v}_k$ , после чего аппроксимация конвективных членов в разностном уравнении (12 3) представима на каждой итерации в виде"

$$\bar{K}_l = \sum_{s=i,j,k} Q_{ls} \bar{v}_{ls}, \quad \bar{v}_{ls} = \begin{cases} \bar{v}_l, & \bar{Q}_{ls} > 0, \\ \bar{v}_s, & \bar{Q}_{ls} < 0 \end{cases} \quad (1.2.10)$$

Из (1 2 8), (1 2 9) следует, что аппроксимация (1 2 10) не нарушает закон сохранения импульса на сетке, т е свойство дивергентности исходных уравнений характерно и для разностной схемы с учетом конвективных членов. Для обеспечения устойчивости этой схемы шаг по времени вычисляется по формуле-

$$\tau = \min_l(\tau_l), \quad \frac{1}{\tau_l} = \frac{1}{\omega_l} \max_l \left( \sum_{>0} (\bar{Q}_{li} / h_l), -\sum_{<0} (\bar{Q}_{li} / h_l) \right), \quad (1 2 11)$$

где суммирование ведется отдельно по втекающим в треугольник и вытекающим из него расходам.

Описанная схема тестировалась, в частности, на задаче о внезапном расширении открытого потока в плане (так называемом течении за обратным уступом). Экспериментально такое течение исследовалось Маневичем. В результате систематических расчетов на вложенных треугольных сетках при  $b/B = 0.5$  (где  $b$  — ширина уступа,  $B$  — ширина потока за уступом) и различных значениях безразмерного параметра  $\lambda B/H$ , характеризующего отношение сил трения к силам инерции, получено хорошее совпадение с экспериментальными данными (рис 12 2). На рис 1 2 3 показано поле скоростей при  $\lambda B/H = 0.4$ , для удобства визуализации пе-

рассчитанное с треугольной сетки в равноотстоящие один от другого поперечники. На том же рисунке показано поле отклонений отметок водной поверхности от невозмущенных значений в некоторый момент времени. Хорошо видны вихревые структуры, образующиеся на границе раздела водоворотной зоны и транзитного потока.

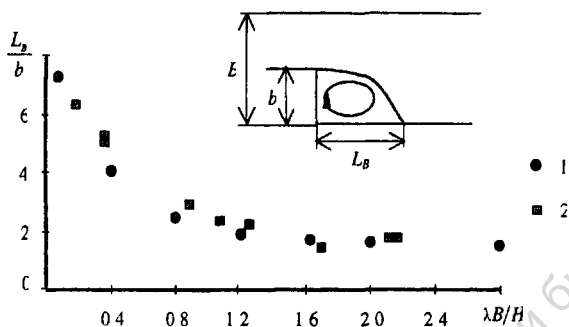


Рис. 1.2.2. Сравнение рассчитанной длины водоворота с наблюдаемой в эксперименте 1 — расчет 2 — эксперимент

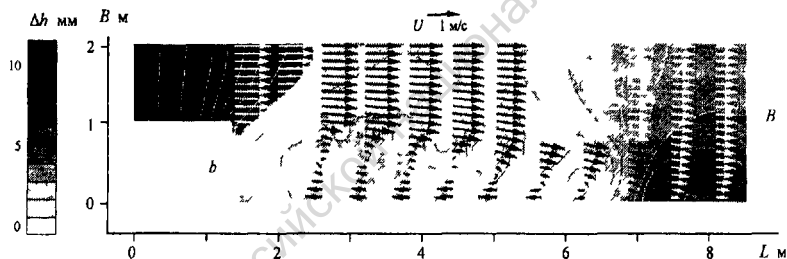


Рис. 1.2.3. Результаты расчета (на треугольной сетке) скорости и уровней водной поверхности для течения за обратным уступом  $\Delta h$  — отклонение уровня водного зеркала от горизонтального,  $L$  — длина участка,  $B$  — ширина участка,  $b$  — ширина уступа,  $U$  — скорость течения

Для расчета деформаций дна в случае гидравлически однородного грунта применяется следующая система уравнений

$$\frac{\partial h S}{\partial t} + \frac{\partial U S h}{\partial x} + \frac{\partial V S h}{\partial y} = -K(S - S_n) \quad (1.2.12)$$

$$(1-p) \frac{\partial z_b}{\partial t} = -K(S - S_n) \quad (1.2.13)$$

$$S_H = 0,4 \frac{\langle U_* | -U_{*N} \rangle^2}{gh} \left( \frac{0,13}{tg \varphi} + 0,01 \frac{|U|}{W} \right) \quad (1.2.14)$$

где  $h$  — глубина,  $U, V$  — соответственно составляющие скорости по оси  $X$  и  $Y$ ,  $S$  — объемная концентрация частиц наносов в потоке,  $S_H$  — равновесная концентрация частиц (концентрация насыщения), принимаемая по видоизмененной формуле Бэгнольда,  $K$  — коэффициент интенсивности обмена наносами между дном и потоком,  $p$  — пористость грунта (отношение объема пор к объему всего грунта с порами),  $\varphi$  — угол внутреннего трения грунта,  $W$  — гидравлическая крупность грунта,  $U_*, U_{*N}$  — динамическая и неразрывающая динамическая скорости течения,  $|U|, |U_N|$  — средняя по сечению скорость потока и средняя неразрывающая скорость соответственно. Неразрывающая скорость принимается по известным формулам В. Н. Гончарова и Ц. Е. Мирцхулава.

В качестве начальных условий для (12)–(12) берутся начальная поверхность дна  $Z(x, y, 0)$  и соответствующие ей мгновенные поля  $V(x, y, 0)$ ,  $h(x, y, 0)$ ,  $S(x, y, 0)$ . В качестве граничных условий задаются равновесные либо заданные концентрации наносов на входных границах, через которые поток втекает в расчетную область. Возможные варианты — «замораживание» отметок дна на входных границах, а также «зацикливание» — задание периодического граничного условия, когда весь объем выносимых за пределы расчетной области наносов поступает снова через входные границы. Последнее условие может использоваться при расчете долговременных деформаций участков русла с учетом движения донных форм.

Система уравнений (12)–(12) относительно концентрации наносов и отметок дна решается методом конечных элементов на треугольных сетках. Разработанная численная схема обеспечивает выполнение разностного аналога сохранения массы для твердой фазы и согласована со схемой для уравнения неразрывности жидкой фазы, что исключает возникновение источников и стоков массы (так называемых диполей). В то же время схема типа направленных разностей исключает нефизичные осцилляции поверхности дна.

В п. 1.3 описана явная схема распада разрывов и ее модификации для расчета течений с умеренными и большими числами Фруда на гибридных треугольно-четырёхугольных сетках, в том числе по сухому дну и при нефиксированных границах течения. Ввиду значительного количества публикаций по этой тематике [5, 7, 8, 12, 15, 34] и в связи с недостатком места описание схемы здесь не приводится, а дается лишь несколько примеров расчета.

На рис. 1.3.1 представлены результаты расчетов течения в сужающемся быстротоке на вложенных сетках. Расчеты демонстрируют сходимость численного решения к точному, которое отмечено штриховой линией и представляет собой систему стационарных гидравлических прыжков. Сплошная линия — это изолинии уровня свободной поверхности (цифры — уровень в мм), полученные из расчетов. По мере увеличения разрешения сетки заметна все более отчетливая локализация гидравлических прыжков.

Рис. 1.3.2 иллюстрирует растекание бурного потока по наклонной плоскости. Постановка задачи соответствует экспериментам, выпол-

ненным в лаборатории мостовой гидравлики ВНИИ транспортного строительства Г Я Волченковым и В В Беликовым. На рисунке приведено сравнение экспериментальных значений эюр скоростей и глубин потока (крестики) с полученными в численных расчетах.

На рис. 1.3.3 представлены результаты серии расчетов наката длинных волн-солитонов на берег (крестиками отмечены экспериментальные данные).

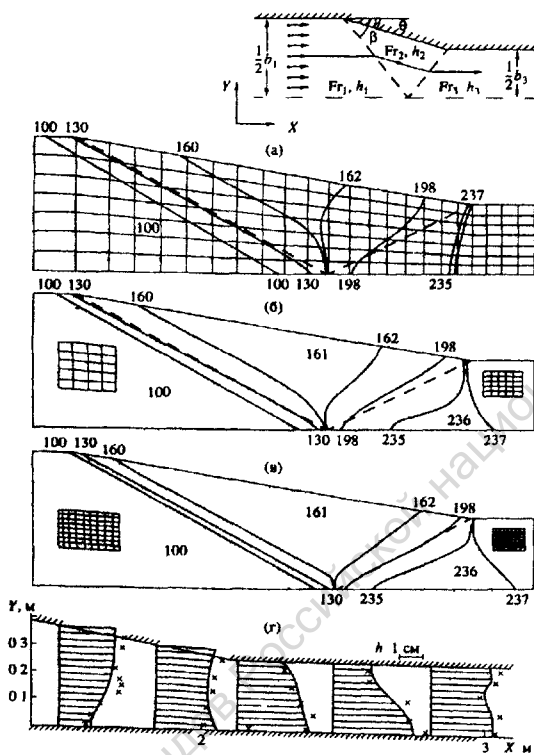


Рис. 1.3.1.

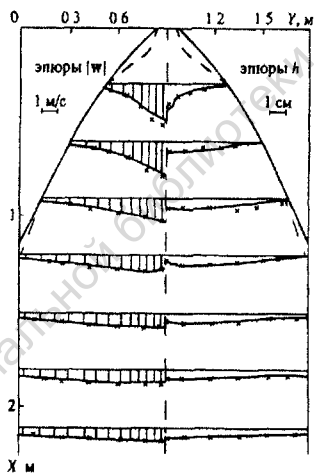


Рис. 1.3.2.

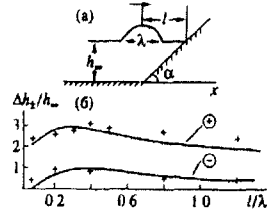


Рис. 1.3.3.

В п. 1.4 приведена двухслойная математическая модель паводковых течений, учитывающая неколлинеарность векторов скорости потока ниже и выше бровок русла, и ее дискретизация на треугольных сетках.

Распространение паводка в долинах рек с меандрирующими руслами при затопленной пойме имеют весьма сложную структуру. Направления движения руслового и пойменного потоков часто не совпадают, происходит перетекание воды из русла на пойму и обратно. Наличие дорог, пересекающих пойму, и других сужений потока приводит к концентрации расходов в руслах с последующим интенсивным поступлением потока на пойму. Криволинейные очертания русел и границ поймы в пла-



не, необходимость учета притоков, существенное различие в размерах русловых и пойменных участков создают дополнительные трудности при разработке адекватных численных алгоритмов. При этом следует иметь в виду, что размеры расчетной области для таких задач зачастую составляют десятки и сотни километров, ширина пойм измеряется километрами и десятками километров, а ширина русл — сотнями метров.

Очевидно, что стандартные двумерные уравнения мелкой воды не могут быть непосредственно применены для описания рассматриваемого класса задач, поскольку не позволяют учитывать (в силу осреднения по всей глубине потока) разные направления скорости течения ниже и выше бровок русла. Поэтому необходимо либо использовать трехмерные уравнения гидродинамики (что является общим, но весьма трудоемким и дорогостоящим подходом), либо разрабатывать специальные математические модели, с одной стороны учитывающие особенности изучаемого явления, а, с другой, допускающие возможность численного моделирования реальных объектов. И.А. Шеренковым предложена схематизация потока, в соответствии с которой граница раздела руслового и пойменного потоков располагается горизонтально в поперечном направлении на уровне бровок русла. Автору диссертации совместно с А.Н. Милитеевым удалось развить этот подход, построив замкнутую двухслойную систему уравнений без привлечения каких-либо новых эмпирических констант [10,17,25,37]. Математическая модель и эффективный численный алгоритм, учитывающий специфику паводковых течений, апробированы в лабораторных экспериментах, на ряде природных объектов в различных климатических зонах (Приморье, Прибалтика, Европейский север, Западная Сибирь, п/о Ямал, бассейн р. Волги ) и показали высокую экономичность и точность расчетов.

По вертикали область течения разделяется на два слоя: слой воды над поймой и над руслом выше бровок и слой воды в русле ниже бровок (рис. 1.4.1). Кроме того, принимается такой масштаб пространственного осреднения, что течение в русле может быть описано в одномерной постановке, а течение на пойме — в двумерной.

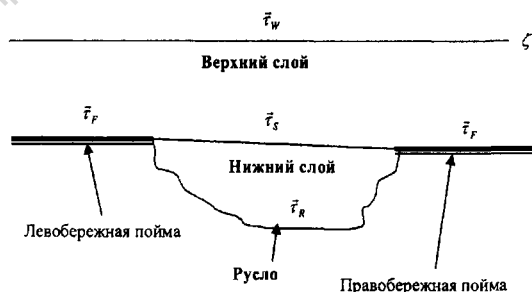


Рис. 1.4.1. Двухслойная схематизация паводкового течения

Исходная математическая модель состоит из двумерных (осредненных по глубине) уравнений движения для верхнего слоя, одномерного уравнения движения для нижнего слоя и общего уравнения неразрывности):

$$\frac{\partial q_i}{\partial t} + \frac{\partial q_j u_i}{\partial x_j} + gh \frac{\partial \zeta}{\partial x_i} = \tau_{Fi} - \tau_{Si} + \tau_{Wi}, \quad (1.4.1)$$

$$\frac{\partial Q}{\partial t} + \frac{\partial QU}{\partial S} + g\omega \frac{\partial \zeta}{\partial S} = (\tau_{Si} B + \tau_{Ri} \chi) S_i, \quad (1.4.2)$$

$$\frac{\partial \zeta}{\partial t} + \frac{\partial q_i}{\partial x_i} + \frac{\partial (UH)}{\partial S} = q_0 \quad (1.4.3)$$

В этих уравнениях  $i, j = 1, 2$ ; по повторяющимся индексам производится суммирование;  $t$  — время;  $x$  — декартовы координаты в плане;  $\vec{q} = (q_1, q_2)$  — вектор удельных расходов воды в верхнем слое;  $h$  — толщина верхнего слоя;  $\vec{u} = \vec{q}/h$  — вектор средней по глубине скорости в верхнем слое;  $g$  — ускорение свободного падения;  $\zeta$  — уровень свободной поверхности воды;  $\vec{\tau}_S, \vec{\tau}_F, \vec{\tau}_R, \vec{\tau}_W$  — векторы касательных напряжений на границе раздела верхнего и нижнего слоев, на поверхности поймы, на дне русла и на свободной поверхности воды соответственно, причем  $\vec{\tau}_S = 0$  вне русла, а  $\vec{\tau}_F = 0$  вне поймы;  $Q$  — полный расход в бровках русла;  $S$  — координата вдоль русла;  $\vec{S} = (S_1, S_2)$  — единичный вектор вдоль русла;  $\omega$  — площадь поперечного сечения русла в бровках;  $U = Q/\omega$  — средняя скорость воды в бровках русла ( $\vec{U} = U\vec{S}$ );  $B$  — ширина русла в бровках;  $\chi$  — смоченный периметр русла в бровках;  $H = \omega/B$  — средняя глубина русла в бровках;  $q_0$  — осадки. Последнее слагаемое в левой части уравнения неразрывности (1.4.3) отлично от нуля только в границах русла, а величины  $H, \omega$  становятся зависящими от  $\zeta$  при падении отметок свободной поверхности в русле ниже его бровок.

Неизвестными в уравнениях (1.4.1) — (1.4.3) являются четыре функции  $q_1, q_2, Q, \zeta$ . Все остальные переменные величины выражаются через них, так что для замыкания системы достаточно определить касательные напряжения на верхних и нижних поверхностях каждого из двух слоев. Касательные напряжения на дне русла, на поверхности поймы и на свободной поверхности воды принимаются в соответствии с квадратичным законом сопротивления:

$$\vec{\tau}_R = -\lambda_R \vec{U} |\vec{U}|/2, \quad \vec{\tau}_F = -\lambda_F \vec{u} |\vec{u}|/2, \quad \vec{\tau}_W = \lambda_W \vec{W} |\vec{W}|/2, \quad (1-4.4)$$

где  $W$  — вектор скорости ветра, а коэффициенты гидравлических сопротивлений вычисляются по формулам

$$\lambda_R = 2gn_R^2 R^{-1/3}, \lambda_F = 2gn_F^2 h^{-1/3}, \lambda_W = 5,6 \cdot 10^{-7} \quad (1-4.5)$$

в которых  $n_R, n_F$  — коэффициенты шероховатости русла и поймы соответственно;  $R = \omega/\chi$  — гидравлический радиус потока в бровках русла.

Для определения касательных напряжений между слоями 1 и 2 заметим, что в двухслойной схеме единственный вектор, не связанный с движением координат — это разность скоростей в верхнем и нижнем слое. Поэтому на поверхности раздела

$$\bar{\tau}_S = \lambda_S \bar{V} |\bar{V}| / 2; \quad \bar{V} = \bar{u} - \bar{U}; \quad (1.4.6)$$

где коэффициент гидравлического трения между слоями  $\lambda_S$  однозначно определяется из требования совпадения гидравлических характеристик прямолинейного равномерного потока при расчете по двухслойной и однослойной схемам и имеет вид:

$$\lambda_S = \lambda_R \frac{\chi}{B} \left( \frac{h}{h+H} \right)^3 \left( \sqrt{\frac{\lambda_R}{\lambda_*}} - 1 \right)^{-2}, \quad (1.4.7)$$

где  $\lambda_* = 2gn_R^2 R_*^{-1/3}$ ,  $R_* = R(1+h/H)$ .

Анализ этой формулы показывает, что при условии  $h \ll H$

$$\lambda_S \approx 36\lambda_R \frac{\chi}{B} \frac{h}{H} \quad (1.4.8)$$

и, следовательно, касательные напряжения на границе раздела стремятся к нулю при глубине верхнего слоя, стремящейся к нулю. При условии  $h \gg H$  коэффициент трения между слоями равен

$$\lambda_S \approx \lambda_* \frac{\chi}{B} \quad (1-4.9)$$

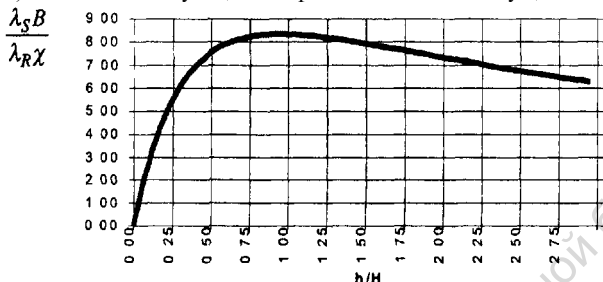
и в пределе отношение  $h/H \rightarrow \infty$  также стремится к нулю. На рис. 1.4.2 приведен график зависимости отношения  $\lambda_S B / \lambda_R \chi$  от отношения глубин  $h/H$ , из которого видно, что в характерном для реальных паводков диапазоне изменения глубин коэффициент гидравлического трения между слоями в 4 - 8 раз превосходит коэффициент трения о дно русла, то есть близок к коэффициенту сопротивления поймы. Максимальное значение

$\lambda_S$  достигается при  $h/H = 0.95$  и равно  $\lambda_{MAX} = 8.33\lambda_R \frac{\chi}{B}$ .

Поскольку при пересечении руслового и пойменного потоков под значительными углами величины  $|\bar{v}|$  и  $|\bar{U}|$  одного порядка, а  $\lambda_S \gg \lambda_R$  (при условии достаточной глубины затопления поймы), постольку на таких участках  $|\bar{\tau}_S| \gg |\bar{\tau}_R|$  и пойменный поток может оказывать определяющее влияние

ание на течение в русле. При этом пропускная способность русла уменьшается из-за дополнительного трения на границе раздела, что в свою очередь приводит к повышению уровней водной поверхности и глубин на пойме, то есть к осуществлению обратной связи в системе русло-пойма.

Отметим, что величина  $\lambda_S$  может зависеть еще от угла между векторами скорости в верхнем и нижнем слое, однако успешный опыт многочисленных расчетов с использованием формулы (1.4.7) дает основание утверждать, что соответствующая поправка не является существенной.



**Рис. 1.4.2.** Теоретическая зависимость относительного коэффициента гидравлического сопротивления между слоями от отношения глубин на пойме и в русле

Система уравнений (1.4.1) - (1.4.3) и замыкающих соотношений (1.4.4) - (1.4.7) с учетом начальных и граничных условий на расходы и уровни воды позволяет в результате ее решения каким-либо численным методом определить скорости руслового и пойменного потоков и отметки свободной поверхности во всей области течения. В целях повышения эффективности вычислений вводится допущение о малости влияния локальных ускорений на динамику потока, которое справедливо при выполнении условий

$$\lambda_F L/h \gg 1, \lambda_R L/H \gg 1, \quad (1.4.10)$$

где  $L$  — характерный линейный размер задачи. Пренебрегая в уравнениях движения (1.4.1) - (1.4.2) полными производными по времени и переходя к векторной форме записи с применением оператора Гамильтона и операции скалярного умножения, получим систему уравнений

$$gh\nabla\zeta = \bar{\tau}_F + \bar{\tau}_W - \bar{\tau}_S, \quad (1.4.11)$$

$$g\omega\vec{s} \cdot \nabla\zeta = (\bar{\tau}_S B + \bar{\tau}_R \lambda) \cdot \vec{S}, \quad (1.4.12)$$

$$\frac{\partial \zeta}{\partial t} + \nabla \cdot (\bar{q} + \bar{U}H) = q_0, \quad (1.4.13)$$

которая, как и (1.4.1) — (1.4.3), дополняется соотношениями (1.4.4) - (1.4.7).

В диссертации показывается, что эту систему можно свести к одному уравнению в частных производных относительно  $\zeta$ :

$$\frac{\partial \zeta}{\partial t} + \nabla \cdot \left[ \bar{E} - D\nabla\zeta + \vec{S} \left( E_R - D_R \frac{\partial \zeta}{\partial S} \right) \right] = q_0 \quad (1.4.14)$$

где слагаемое в круглых скобках отлично от нуля только в границах русла, над руслом  $\bar{E} = \bar{E}_S$ ,  $D = D_S$ , над поймой  $\bar{E} = \bar{E}_F$ ,  $D = D_F$ ,  $E_R$ ,  $D_R$ ,  $\bar{E}_S$ ,  $D_S$ ,  $\bar{E}_F$ ,  $D_F$  вычисляются по формулам

$$E_R = (h+H) \frac{\bar{S} \bar{\tau}_W}{\gamma_R}, \quad D_R = \frac{g(h+H)^2}{\gamma_R}, \quad \gamma_R = \sqrt{\frac{\lambda_R \chi}{2B} \left| \bar{S} \bar{\tau}_W - g(h+H) \frac{\partial \zeta}{\partial S} \right|} \quad (1.4.15)$$

$$D_S = gh^2 / \gamma_S; \bar{E}_S = \bar{\tau}_W / \gamma_S; \gamma_S = \sqrt{\frac{\lambda_S}{2} \left| \bar{\tau}_W - gh \nabla \zeta \right|} \quad (1.4.16)$$

$$D_F = gh^2 / \gamma_F; \bar{E}_F = \bar{\tau}_W / \gamma_F; \gamma_F = \sqrt{\frac{\lambda_F}{2} \left| \bar{\tau}_W - gh \nabla \zeta \right|} \quad (1.4.17)$$

Уравнение (1.4.14) в частных производных второго порядка параболического типа с нелинейными коэффициентами относительно отметки свободной поверхности воды является **обобщением известного диффузионного приближения для уравнений мелкой воды на случай двухслойного паводкового потока**. Это уравнение (требует постановки граничных условий на всех границах области течения. На части границы может быть задан уровень воды, а на другой части — удельный расход воды (условие непротекания через твердую границу соответствует нулевой расход). Таким образом, граничные условия записываются в виде"

$$\zeta \Big|_{\sigma_1} = \zeta_1, \quad \left[ \bar{E} \bar{N} - D \frac{\partial \zeta}{\partial N} + \bar{S} \bar{N} \left( E_R - D_R \frac{\partial \zeta}{\partial S} \right) \right] \Big|_{\sigma_2} = q_N, \quad (1.4.18)$$

где  $\sigma_1, \sigma_2$  — части границы  $\sigma = \sigma_1 \cup \sigma_2$  области течения в плане;  $q_N$  — суммарный (включая русла) удельный расход воды по нормали к границе.

Для решения (1.4.14) должно быть также задано начальное условие

$$\zeta(x_1, x_2, t=0) = \zeta_0(x_1, x_2). \quad (1.4.19)$$

В результате решения определяются отметки водной поверхности в любой точке плана течения в любой момент времени.

Дискретизация уравнения (1.4.14) производилась стандартной процедурой Галеркина-Петрова с финитными кусочно-линейными весовыми и базисными функциями на треугольных элементах, матрица при производной по времени диагонализировалась (использование стандартной трехдиагональной конечноэлементной матрицы демпфирования привело к сложностям в расчетах нестационарных течений). Таким образом обеспечивался первый порядок аппроксимации по времени и второй по пространству. Получающаяся система линейных алгебраических уравнений с профильной матрицей решалась методом Холесского. В силу нелинейности коэффициентов уравнения (1.4.14) на каждом шаге по времени осуществлялись итерации для их уточнения.

В п. 1.5 дана краткая информация о зарегистрированных в Роспатенте программах для расчета открытых потоков, основанных на предложенных автором диссертации алгоритмах, которые использовались для проведения гидравлических исследований методами компьютерного моделирования:

«RIVER» — для расчета течений в разветвленной системе русел с учетом дождевого стока и снеготаяния (Свидетельство об официальной регистрации программы для ЭВМ № 2002610938);

«FLOOD» — для расчета меженных и паводковых течений и деформаций дна в реках и речных долинах (№ 2002610941);

«БОР» — для расчета бурных потоков и волн прорыва, возникающих при разрушении плотин и ледовых заторов (№ 2001610638);

«Ущерб» от паводков» — для расчета зон возможных разрушений в балловой системе при прохождении природных и техногенных паводков (№ 2003612595);

«GIWER» — для визуализации расчетов на гибридных сетках с применением электронных топографических карт (№ 2002610940).

## **Глава 2. Технологии компьютерного моделирования открытых потоков**

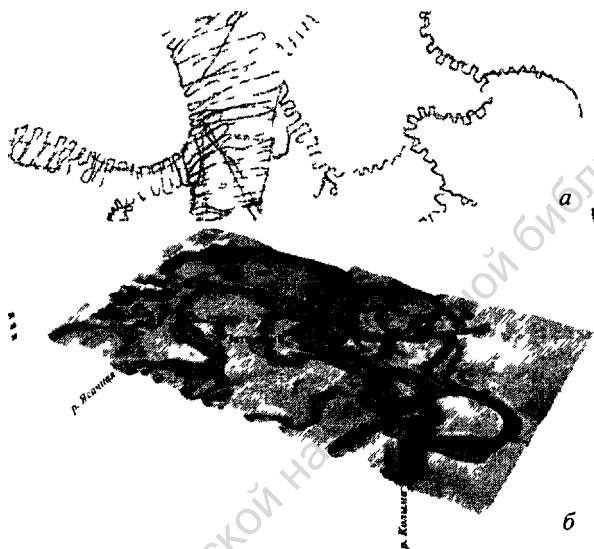
В этой главе описываются технологии компьютерного моделирования, которые в сочетании с представленными в главе 1 алгоритмами позволяют производить построение компьютерных гидравлических моделей реальных водных объектов и обеспечивают получение результатов, пригодных для практического использования. Рассмотрены вопросы применения электронных топографических карт и ГИС-технологий; современных методов измерений; выбора адекватных натуре численных моделей и масштабов моделирования; построения треугольных и гибридных расчетных сеток; эффективной интерполяции функций, заданных на нерегулярных наборах точек; калибровки и верификации численных моделей.

В п. 2.1 описаны способы построения цифровой модели рельефа водного объекта, подготовки гидрологических и литологических исходных данных, рассмотрены вопросы выбора адекватных численных моделей.

Для построения цифровой модели рельефа местности (ЦМР), которая может быть подвержена затоплению, прежде всего необходимы топографические и батиметрические данные. ЦМР является основой для компьютерной модели реального объекта, причем от точности первой модели напрямую зависит и точность второй. Кроме того, для проведения расчетов и оценки возможных ущербов необходима информация о дорогах, дамбах, мостовых переходах, населенных пунктах, характере растительности на пойме. Наиболее удобно для этих целей использовать электронные (цифровые) топографические карты требуемого масштаба, а при их отсутствии проводить векторизацию отсканированных растровых изображений.

Батиметрические данные (промеры глубин в руслах, заливах, водохранилищах) могут быть получены как стандартными, так и современными промерными технологиями с использованием систем спутникового позиционирования (GPS) и вертикальной привязки на местности, а также векторизацией имеющихся лоцманских карт с последующей привязкой к глобальной системе координат и абсолютной системе высот. Объединение топографи-

ческих и батиметрических данных позволяет построить ЦМР, которая будет являться основой для построения компьютерной гидравлической модели. Построение и редактирование ЦМР производится с помощью специальных программ, одна из которых разработана в ОАО «НИИЭС» под руководством автора диссертации и позволяет эффективно редактировать файлы исходных данных, содержащие до миллиона точек. На рис. 2.1.1 представлен фрагмент цифровой модели долины р. Колымы в районе пос. Зырянки.



**Рис. 2.1.1.** Фрагмент поля сухопутных и гидрографических точек (а), использованных для построения численной модели (б) рельефа долины р. Колымы в районе пос. Зырянки

При построении моделей с деформируемым дном, расчете водозаборных устройств и т.п. требуется информация о гранулометрическом (фракционном) составе взвешенных и влекомых наносов и их связи с различными фазами гидрологического режима. Иногда используются поперечные литологические разрезы дна русла (получаемые с помощью бурения в заданных створах), которые позволяют определить и построить поверхность залегания неразмываемых или слабозмываемых грунтов. Построение недеформируемой поверхности, подстилающей дно русла, производится специальными приемами, описанными в п. 4.4 диссертации.

Параллельно с процессом сбора и подготовки исходных данных производится выбор требуемых по условиям задачи масштабов пространственного осреднения. Этот выбор зависит от ряда факторов, в том числе от точности и детальности имеющихся исходных данных, геометрических размеров расчетной области, требуемой точности расчетов и т.п. Так, при моделировании протяженных участков русел и системы русел часто применяются одномерные либо двухслойные двумерные схематизации, в то время как при

моделировании относительно коротких участков с расположенными на них берегозащитными, регуляционными или водозаборными сооружениями следует применять двумерные или даже трехмерные (многослойные по глубине) модели. В диссертации обсуждаются вопросы многомасштабного моделирования и приводятся соответствующие примеры.

При компьютерном моделировании открытых потоков возможно использование как явных, так и неявных по времени численных схем. Эффективность применения явной или неявной схемы зависит от решаемой задачи, а именно от величины числа Фруда, характеризующего отношение силы инерции к силе тяжести. Практика численных расчетов показала, что примерно при  $Fr < 0.3$  неявные схемы оказываются эффективнее явных, и наоборот. Очевидно, что глубоководные озера и водохранилища следует считать с применением неявных схем, а бурные потоки и волны прорыва — по явным схемам. При пограничных с 0.3 значениях чисел Фруда имеет смысл произвести расчеты по явной и неявной схемам и сопоставить их точность и время счета. Достаточно широкий класс течений подлежит моделированию по уравнениям мелкой воды в диффузионном приближении (п. 1.1, 1.3 диссертации) либо без инерционных членов. В этих случаях снятие или уменьшение ограничений на шаг по времени может повысить эффективность расчетов на порядок без существенной потери точности (см. п. 3.5).

В п. 2.2 изложена принципиальная схема применения ГИС-технологий и отмечены преимущества такого подхода.

При определении динамики прохождения паводковой волны и оценках ущерба от естественных паводков или волн прорыва возникает необходимость анализа огромного объема информации как о самих источниках опасности, так и об объектах, попадающих в зону затопления. Первым и самым надежным источником являются топографические цифровые карты разных масштабов. Эти карты изготавливаются, например, на предприятиях Роекартографии и представляют собой векторизованные с высокой точностью изображения объектов топографических карт. Векторизация ведется с использованием пластиковой подложки, что в 2–3 раза повышает ее точность по сравнению с векторизацией на основе бумажной топоосновы. Наличие векторной информации имеет ряд несомненных преимуществ в решении задач распространения паводковой волны и определения ущербов.

Каждый объект на топографической карте имеет независимое описание, представленное метрической частью — расположением объекта на местности, и семантической частью — содержательность (названия и численность населения городов и поселков, судходность рек, классы автодорог, наличие мостов и бродов, характеристики растительности),

наличие высотных отметок и горизонталей позволяет воссоздать рельеф и использовать его в расчетных задачах,

возможен простой и эффективный отбор объектов по их категориям, результаты расчетов можно отображать непосредственно на фоне этих же карт (возможно, предварительно разгруженных от лишней для визуализации, хотя и участвующей в расчетах, информации),

при наличии дополнительных баз данных возможна стыковка их с объектами на картах по метрическим или семантическим ключам,



работая в среде ГИС, можно сравнительно легко использовать информацию, имеющуюся на картах различных масштабов и тематических картах.

Опыт работы показывает, что многие проекты оказываются нежизнеспособными из-за невозможности собрать необходимую, или хотя бы минимальную информацию. Сбор информации на картографической основе позволяет с обозримыми трудозатратами привязывать её к одной системе координат и состыковывать разнородные данные. Получая оценочные результаты по имеющимся, пусть и грубым данным, можно, пересекая построенные зоны опасности со значащими объектами, отображёнными на карте, вычленять графическими построениями категории опасности и возможного ущерба, а далее дополнять и уточнять исходные данные только в значащих местах. Это позволит в реально обозримые сроки получить как общую картину по интересующим регионам, так и по конкретным объектам.

В п. 2.3 рассмотрены общие подходы к генерации неструктурированных гибридных сеток и их адаптации к особенностям водного объекта.

Построение сеток является важной неотъемлемой частью компьютерного моделирования открытых потоков в двумерной и трехмерной схематизации. Если на заре развития численных методов разрабатывались в основном методы конечных разностей на прямоугольных сетках, то в последние десятилетия бурное развитие получили алгоритмы метода конечных элементов (МКЭ), метода конечных объемов и др., реализуемые на криволинейных четырехугольных, треугольных и смешанных (гибридных) треугольно-четырёхугольных сетках. Криволинейные и неструктурированные сетки могут легко адаптироваться к особенностям геометрии и батиметрии расчетной области, особенностям течения, на них точнее могут быть реализованы граничные условия. В тоже время реализация вычислительных алгоритмов при этом заметно усложняется, особенно для схем высокого порядка точности.

Автор диссертации с 1980 г. занимается разработкой алгоритмов решения уравнений мелкой воды на треугольных, а в последствии на гибридных сетках. Еще в середине 80-х годов был разработан и сдан в Государственный фонд алгоритмов и программ комплекс программ построения треугольных сеток «TRIANA» [2], который в дальнейшем постоянно совершенствовался и развивался. Современная версия этой программы позволяет строить треугольные и гибридные сетки хорошего качества в областях сложной геометрии с учетом особенностей рельефа дна. Программа реализована на языках программирования DELPHY и FORTRAN. Примеры сеток приведены на рис. 2.3.1 и в главах диссертации, посвященных конкретным приложениям. Комплекс программ «TRIANA» апробирован при решении большого количества различных задач гидравлики, гидродинамики, теплопроводности, обеспечивая в каждом конкретном случае построение качественных расчетных сеток.

В п. 2.4 представлена новая методика интерполяции рельефа земной поверхности, заданного на нерегулярном наборе точек, в узлы расчетной сетки.

Пересчет измеренных в руслах и переведенных с карт отметок земной поверхности в узлы расчетной сетки является нетривиальной задачей. Здесь важно использование как подходов, учитывающих специфику руслового и пойменного рельефов, так и чисто математических алгоритмов, обеспечи-

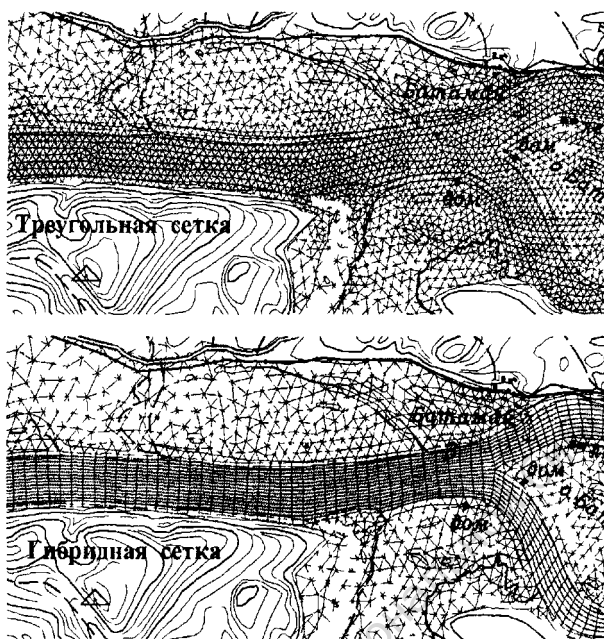


Рис. 2.3.1. Треугольная и гибридная расчетные сетки (фрагмент)

вающих однозначность и непрерывность получаемых на сетке полей интерполируемых величин. Хорошими свойствами обладает алгоритм гармонической интерполяции функций на произвольном наборе точек, разработанный автором диссертации с соавторами [13,14,33,35,36] (свойство линейности доказано А. Ю. Семеновым, сравнительный анализ различных способов интерполяции проведен В. Д. Ивановым и С. А. Корытником).

Предлагаемый алгоритм решает задачу о вычислении в заданной точке  $x_0$  в конечномерном евклидовом пространстве  $E_n$  значения  $f_0$  некоторой скалярной функции  $f = f(x)$  по ее значениям  $\{f_k\}$ , заданным на фиксированной системе точек-узлов  $\{x_k\}$  в  $E_n$ . При этом предполагается, что точка, в которую интерполируется значение  $f$ , находится внутри области, ограниченной выпуклой оболочкой, построенной по  $\{x_k\}$ . Алгоритм использует определение соседей на основании разбиения по ячейкам Дирихле. Пусть точка  $x_0$  принадлежит многоугольнику (многограннику) Дирихле с числом сторон (граней) равным  $M$ . Обозначим длины сторон многоугольника (или площади граней в трехмерном случае) через  $s_m$ ,  $m = 1, 2, \dots, M$ , высоты, опущенные из  $x_0$  на  $s_m$  (или расстояние от  $x_0$  до  $m$ -й грани), — через  $h_m$ , значения функции в центрах прилегающих ячеек Дирихле через  $f_m$ . Тогда формула интерполяции принимает вид

$$f_0 = \sum_{m=1}^M \alpha_m f_m \quad \text{где} \quad \alpha_m = \left( \frac{s_m / h_m}{\sum_{j=1}^M s_j / h_j} \right)^1, \quad m = 1, 2, \dots, M$$





Глубины затоплений через 48 часов после начала наводнения

Глубины затопления через 60 часов после начала наводнения



Уровни водной поверхности на пике наводнения

Максимальные глубины на пойме в районе мостовых переходов



1, 2 — точки измерения уровня воды  
 1 — измеренный 63,40 (рассчитанный 63,34), 2 — соответственно 59,9 (59,80)

Рис. 3.4.1. Моделирование паводка на притоке р Уссури

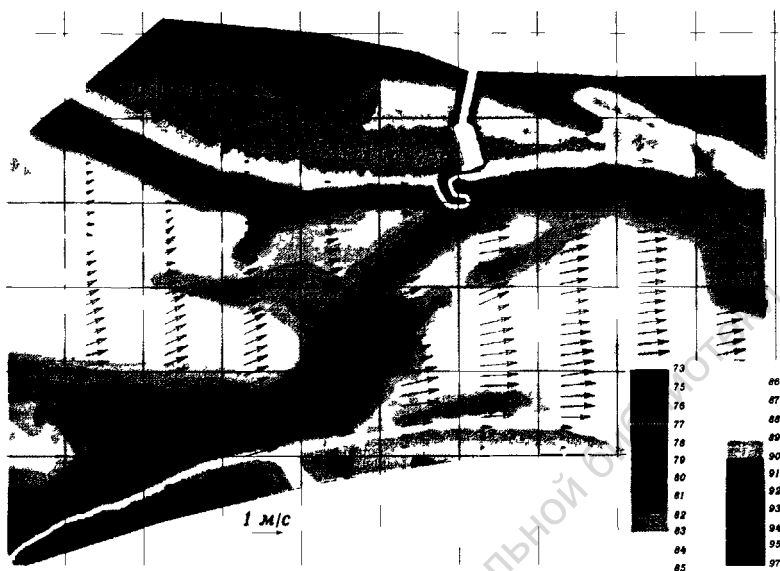


Рис. 4.2.1. Отметки дна русла и поймы на участке Адамовской протоки  
Поле скоростей течения при расходе воды 35000 м³/с

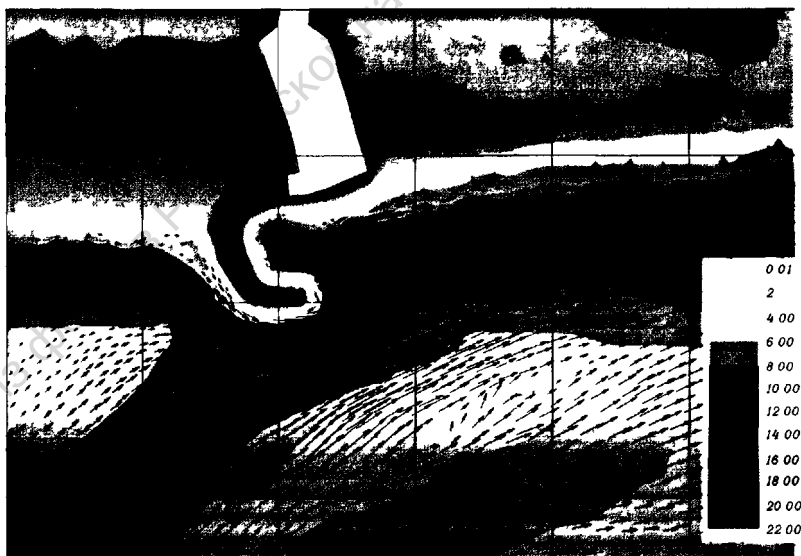


Рис. 4.2.2. Фрагмент полей глубин (в метрах, согласно легенде)  
и скоростей течения у выступающего в русло ковша при расходе 8000 м³/с  
Шаг координатной сетки 250 м

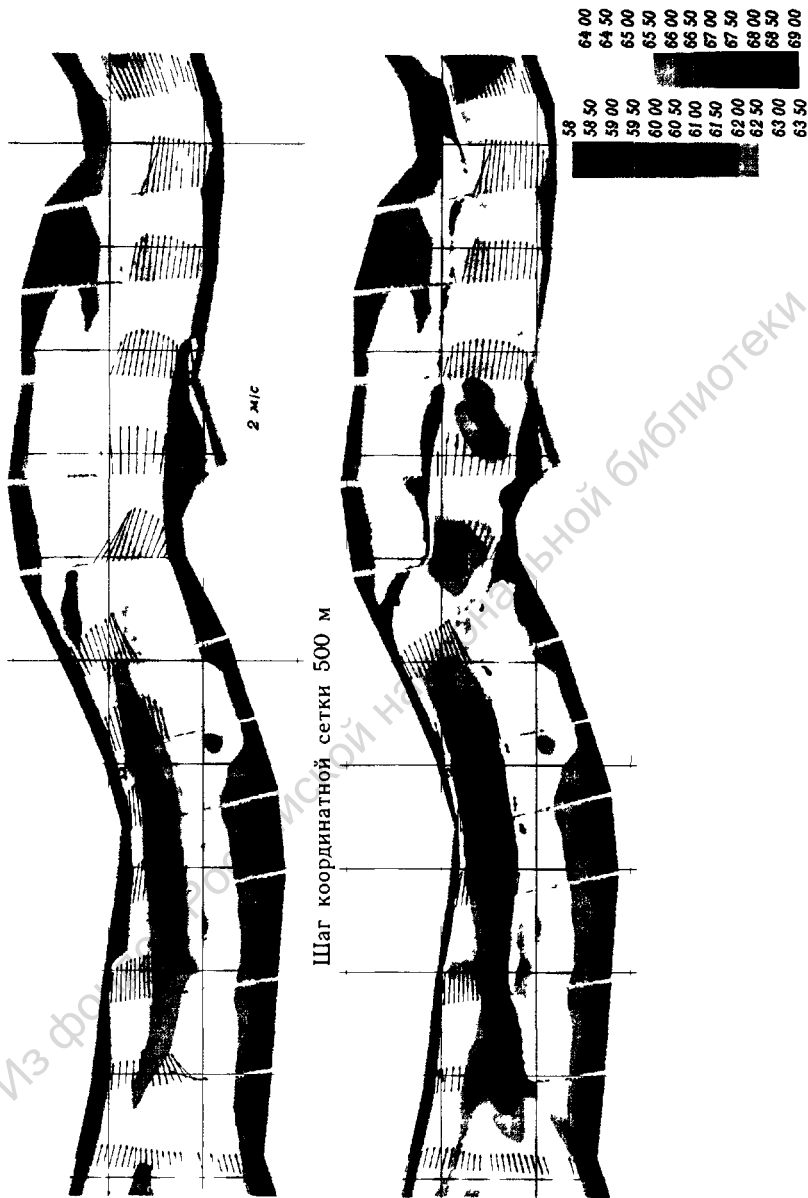


Рис. 4.4.1 Расчет деформаций дна на участке Городецких шлюзов. Поле скоростей и поверхность дна при наличии не переливаемых полузапруд в начальный момент после их сооружения и после размыва до верхнепермских отложений для четвертого сценария при максимальном расходе  $3000 \text{ м}^3/\text{с}$ . 2-5 — контрольные точки

Расчетная сетка на район моделирования (фрагмент)

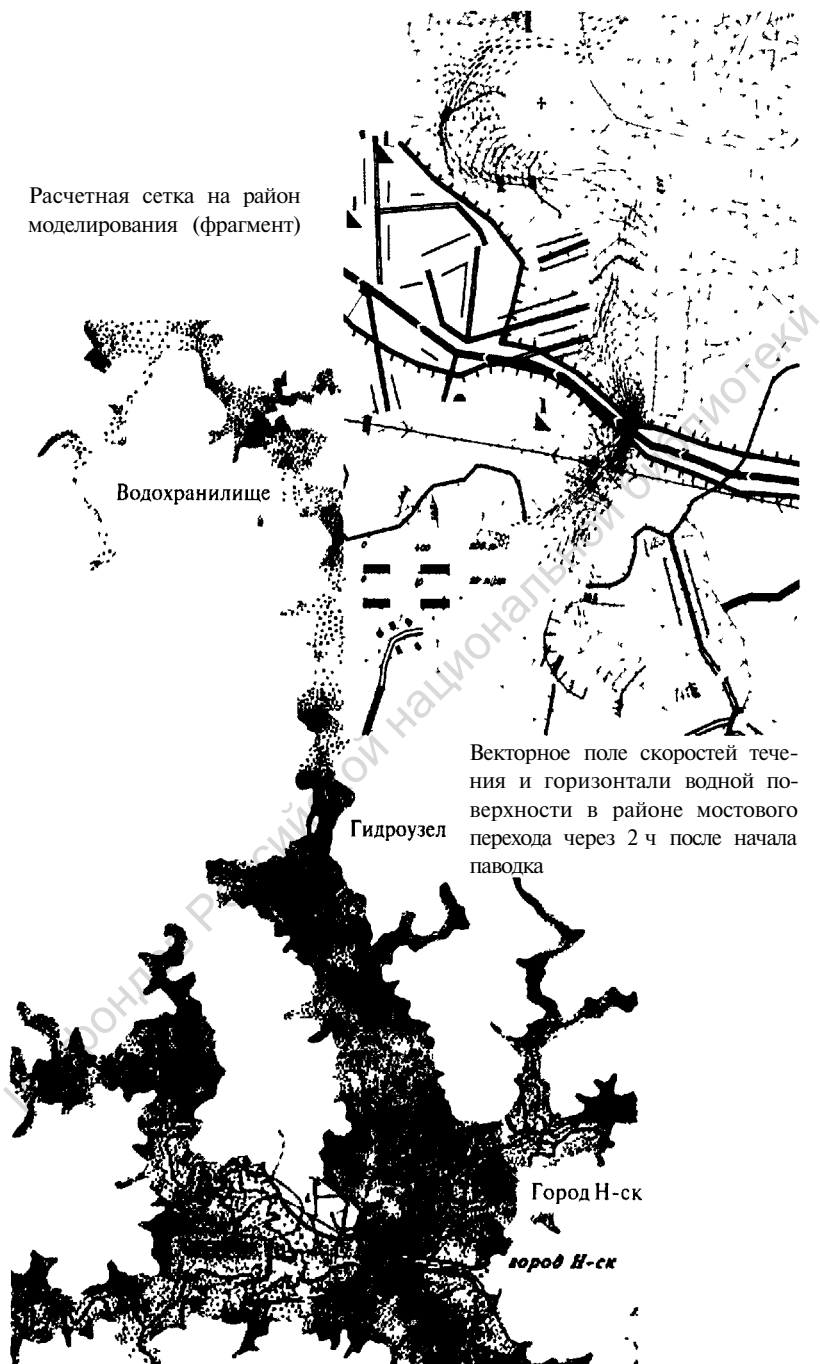
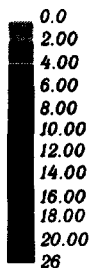


Рис. 5.2.1. Моделирование волны прорыва на малом водотоке



Максимальные глубины затопления котловины (в метрах, согласно легенде)



Карта возможных разрушений в баллах для всей затопляемой котловины



Максимальные глубины затопления (в метрах) в районе города



Карта возможных разрушений (в баллах) в районе города

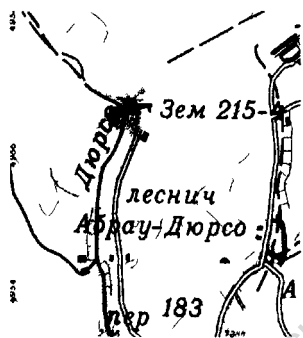
Рис. 5.2.2. Расчет волны прорыва на крупном гидроузле

Рис. 3.1. Карта возможных разрушений (в баллах согласно легенде) от волны прорыва

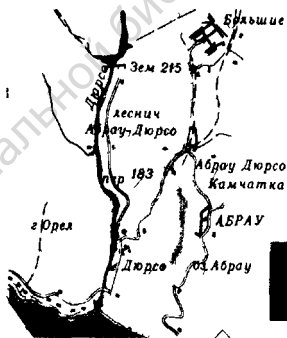
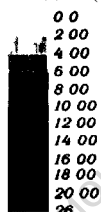




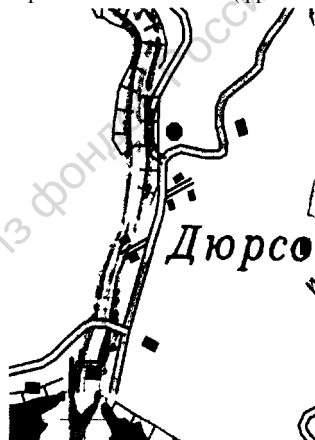
Разрушенные дома в селении Дюрсо (на переднем плане) после прохождения паводка (13 км от устья)



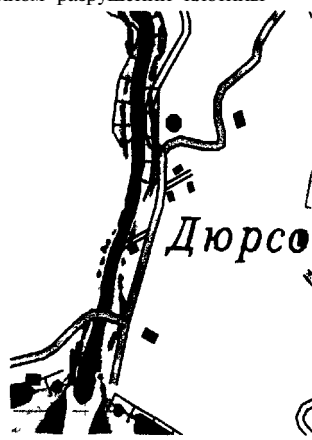
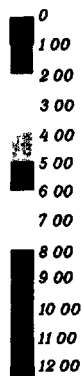
Сетка треугольных элементов в расчетной области (фрагмент)



Максимальные глубины затопления при полном разрушении плотины



Карта возможных ущербов в баллах при частичном разрушении плотины (размыта от гребня на 3 м) фрагмент



Карта возможных ущербов (в баллах) при полном разрушении плотины

Рис. 5.4.1. Моделирование наводнения на р Дюрсо



Рис. 5.5.1 Глубины затопления (в метрах) в нижнем бьефе Саратовского гидроузла при расходе  $70000\text{ м}^3/\text{с}$  (г. Балаково)

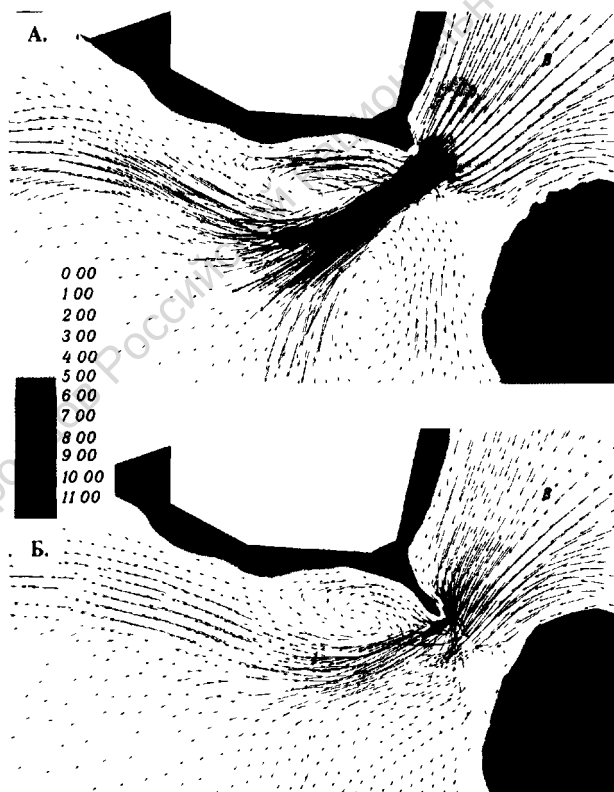


Рис. 5.5.2. Поле скоростей течения у Саратовской ГЭС при наличии прорана. А — сценарий III; Б — сценарий V

Такой способ определения коэффициентов проще и экономичнее, чем в известном методе Сибсона, как не требующий вычисления площадей частей пересечения многоугольников в двумерном случае или трудоемкого вычисления объемов частей пересечения многогранников в трехмерном случае и т.д. Он обеспечивает линейность, однозначность и непрерывную зависимость функции от координат узлов интерполяции.

Сравнительный анализ предлагаемого варианта интерполяции показывает, что по свойствам гладкости он занимает промежуточное место между методом линейной интерполяции, основанной на триангуляции Делоне, и интерполяцией Сибсона, и ближе к последней. На основе нового метода были построены интерполяции повышенного порядка точности [35], а также методики расчета по методу конечных элементов с использованием «натуральных» базисных функций [36]. Новый метод интерполяции успешно использовался автором при расчете рельефа поверхности в узлы расчетных сеток при численном решении более 50 реальных задач. Он может быть рекомендован для практического применения.

В п. 2.5 обсуждаются вопросы тестирования, калибровки и верификации компьютерных моделей. Адекватность математической и численной моделей описываемому классу течений должна обосновываться сопоставлением с данными наблюдений и измерений. Сопоставления могут быть прямыми и косвенными (опосредованными), причем как с лабораторными, так и с натурными данными. Важное значение при разработке численных алгоритмов имеет проверка точности дискретных аналогов исходных уравнений на аналитических тестах. Построение компьютерной модели реального объекта должно завершаться ее калибровкой и верификацией, подтверждающей соответствие модели и природы. В разделе подробно рассматриваются все аспекты проблемы. Перечисляются известные аналитические решения и физические эксперименты.

Наиболее важным с точки зрения практических результатов является компьютерное моделирование натуральных объектов. После построения компьютерной модели реального объекта очередным шагом является ее калибровка, т.е. достижение минимальных отклонений расчетов от данных измерений (например, на водомерных постах) посредством подбора (изменения) свободных параметров математической модели. Обычно погрешность измерения батиметрии, гидрологических и гидравлических параметров потока составляет 5 - 10%, что в большинстве случаев не позволяет требовать и большей точности расчетов. Для двумерных и двумерных двухслойных уравнений мелкой воды единственным свободным параметром (если исключить фиктивный коэффициент искусственной вязкости, присутствующий в некоторых алгоритмах) является коэффициент гидравлического сопротивления либо заменяющий его коэффициент шероховатости. Поэтому калибровка соответствующих моделей производится в основном путем подбора коэффициентов шероховатости и уточнением граничных условий.

Выбор коэффициентов шероховатости имеет важное значение. До эпохи применения ЭВМ и особенно возможности решения двумерных и трехмерных задач на подробных сетках основным расчетным уравнением для решения гидравлических задач являлось уравнение Шези. При этом не

учитывались инерционные свойства потока, а в коэффициент сопротивления включались все потери энергии потока по длине (на трение, конвективные, на внезапное расширение и т.п.) Поэтому для реальных объектов коэффициенты шероховатости обычно сильно варьировались по длине и площади, а зачастую выходили за пределы разумных значений. Напротив, при численном решении двумерных уравнений Сен-Венана с учетом детальной батиметрии на густых сетках все потери энергии, кроме потери на собственно трение о шероховатую поверхность дна русла или поймы, учитываются автоматически в процессе решения и не должны включаться в коэффициент шероховатости. Тем самым в таких расчетах коэффициент шероховатости становится параметром, характеризующим исключительно шероховатость подстилающей поверхности, а его изменчивость для конкретного участка русла или шельфа становится минимальной, в чем убеждают многочисленные расчеты реальных объектов.

Для всех исследованных природных объектов на равнинных реках (более 35 по двумерным моделям) в различных климатических зонах коэффициент шероховатости в формуле Маннинга варьировался в пределах от 0,022 до 0,028 со средним значением (в 70 % случаев) 0,025. Максимальное значение 0,028 достигалось на участке скального переката Хатын-Тумул на средней Лене, причем оно оставалось постоянным в широком диапазоне изменения расходов от 3000 м<sup>3</sup>/с до 40000 м<sup>3</sup>/с (натурный эксперимент) [19]. Минимальные значения 0,022 - 0,023 достигались на участках рек, сложенных галечно-гравелистым грунтом (р. Лена в районе г. Ленска, г. Олекминска) и также практически не зависели от уровней воды. Коэффициенты шероховатости поймы также варьируются не очень сильно (на практике от 0,04 до 0,07).

Иногда встречаются случаи косвенного подтверждения точности выполненных расчетов и правомерности предлагаемых рекомендаций. Так, например, при определении схемы защиты г. Вилюйска от подмывов берега во время наводнений [22,39] были даны рекомендации по устройству четырех полузапруд, которые должны были защитить весь размываемый участок берега (рис. 2.5.1). Реально были сооружены две полузапруды из четырех, и на незащищенном участке подмыв берега продолжается. Еще один случай косвенного подтверждения результатов расчетов приведен в п. 5.4.

### **Глава 3. Численное моделирование паводковых, ветровых и приливных течений в сложных ситуационных условиях с учетом природных и антропогенных воздействий**

В данной главе рассмотрены приложения методов и технологий численного моделирования открытых потоков, изложенных в главах 1,2, к решению практических задач гидравлики, связанных с наводнениями, паводками, приливными и нагонными явлениями. Построены модель русловой сети бассейна р. Москва (п. 3.1) с применением одномерных методик *1D*, модели дельты р. Волга (п. 3.2), речной системы на п-ове Ямал (п. 3.3), притоков р. Уссури (п. 3.4) с применением двухслойной схематизации п. 1.4, модели мелководных заливов Пильтун и Чайво на о. Сахалин на основе двумерных алгоритмов (п. 1.2, 1.3).

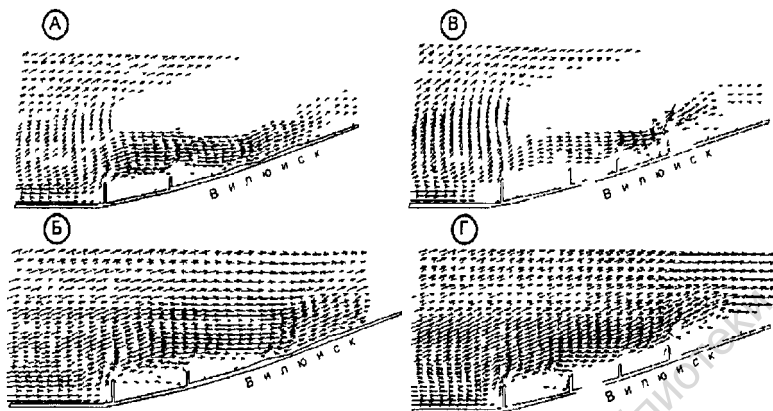


Рис. 2.5.2 Расчет поля скоростей при проектировании вариантов расположения берегозащитных полузапруд (р. Вилюй у г. Вилюйска)

В п. 3.1 представлена численная гидравлическая модель бассейна р. Москвы с учетом основных притоков, водоподъемных плотин и динамики формирования паводкового стока с незарегулированной части водосбора. Эта модель использовалась для прогноза формирования волны половодья, для сравнительного анализа эффективности гидравлических промывок русла р. Москвы в различные годы, для расчета экологических попусков, а также при обосновании защитных мероприятий при застройке пойменных территорий.

Компьютерная модель р. Москвы от верхнемоскворецких водохранилищ до устья (включая основные притоки) позволяет рассчитывать параметры течения в период пропуска весенних половодий, дождевых паводков и гидравлических промывок русла с учетом различных режимов регулирования сбросных расходов водохранилищ и протекания воды через водосливные плотины городского бьефа и нижнего течения реки. В основу модели положено численное решение системы одномерных уравнений Сен-Венана с учетом инерционных членов и эффектов аккумуляции расхода на пойме (программа «RIVER»), причем в модель заложено более 600 поперечников по руслу и притокам — рекам Рузе, Истре, Пахре, Нерской, Северке. Для определения боковой приточности с незарегулированной части водосбора применяются синхронные расчеты по модулю стока и по метеорологическим данным, что позволяет существенно повысить точность краткосрочного гидрологического прогноза. Разработана методика расчета склонового и руслового паводкового стока, основанная на решении уравнений диффузионной волны по оригинальному численному алгоритму (изложен в п. 1.1 диссертации), обеспечивающему неотрицательную глубину стекающего слоя воды в любых ситуациях. Работы проводились по заказам ФГУП «Канал им. Москвы» и МГУП «Мосводоканал» в 1994–2002 гг. творческим коллективом под общим руководством Ю. М. Колесникова, результаты опубликованы в [16,20].

Модель откалибрована по данным натуральных измерений и применялась для расчета паводков в 1981,1982,1994,1998 - 2004 годах, в том числе в режимах гидравлической промывки русла и в режимах краткосрочного и долгосрочного прогнозов. Точность результатов достаточно высокая. Автоматическое отображение исходной информации и результатов расчетов, включая зоны затопления территорий, на электронной топографической карте существенно улучшает восприятие и повышает наглядность результатов. На рис. 3.1.1, 3.1.2 на цветной вкладке представлены фрагменты отображения результатов расчетов на карте, на рис. 3.1.3 приведены сопоставления измеренных и рассчитанных параметров течения в некоторых створах р. Москвы

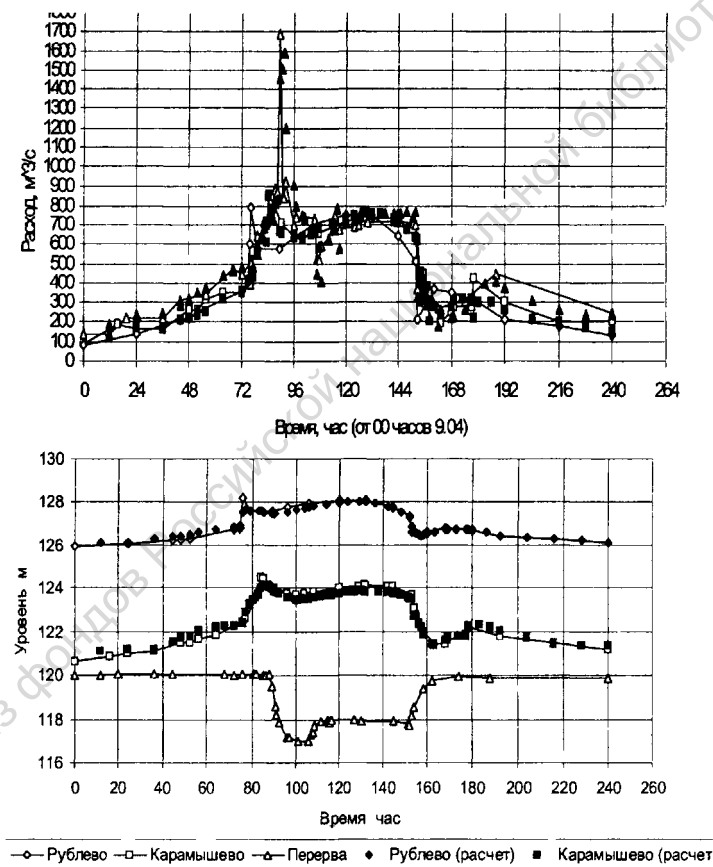


Рис. 3.1.3 а, б Сопоставление рассчитанных и измеренных расходов и уровней воды в различных створах р. Москвы в паводье 1999 г

В п. 3.2 приведен пример расчета протяженного участка разветвленной русловой сети р. Волги на участке от Волгоградской ГЭС до устья, включая дельту. Работа была выполнена по заданию института «Росгипроводхоз» в 1991г. В задачу исследований входил анализ прохождения весенних паводков с расходами 25,30,35,40 тыс.м<sup>3</sup>/с с целью получения данных о протекании потока и границах затопления поймы с учетом влияния различных уровней Каспийского моря. В расчетах применялась двухслойная модель паводковых течений (п. 1.4). По результатам расчетов сделаны общие выводы по динамике уровней воды и условиях затопления на различных участках поймы и дельты.

В п. 3.3 рассмотрена модель паводковых течений в междуречье нескольких водотоков на п/о Ямал. Решалась задача о расчете групповых отверстий мостовых переходов на сети автодорог, перегораживающих пойму в районе Бованенковского газоконденсатного месторождения (ГКМ), с учетом приливов и ветровых нагонов со стороны Карского моря. Результаты работы опубликованы в [10,17,25,37].

Межпромысловая дорога Бованенково-Харасавэй на п/о Ямал пересекает много водотоков и речных долин, в том числе реки Се-Яху, Надуй-Яху, Ури-Яху, которые на рассматриваемом участке имеют общую пойму и подвержены действию морских приливов и ветровых нагонов. Характерной особенностью этого района является относительно малая ширина (50 — 200 м) глубоких рек (5 — 15 м) по сравнению с шириной затопляемых пойм, которые на два порядка больше ширины рек. Задача моделирования половодных течений для центрального Ямала особенно актуальна в связи с отсутствием на реках гидрологических постов, проводящих режимные наблюдения. В тоже время аэрокосмические наблюдения и наземные гидрометрические измерения дают необходимую информацию для калибровки численной модели.

В расчетах использовалась двухслойная модель паводковых течений (Глава 1, п. 1.4). Применялось трехуровневое многомасштабное (гибридное) моделирование. Мелкомасштабная (глобальная) модель была построена для участка размером 70км\*60км, включающего всю рассматриваемую область течения вплоть до приустьевое участка моря. На этой модели исследовались бытовые (без дорог) и проектные (с дорогами) режимы течения, влияние приливов и ветровых нагонов, перераспределение расходов между отверстиями мостов. При этом местные сопротивления подмостовых отверстий уточнялись из расчетов крупномасштабных фрагментов (локальных моделей), выделенных в окрестностях каждого моста (размером примерно 2км\* 1км). Кроме того, крупномасштабные модели позволили детализировать форму струенаправляющих дамб и определить плановые деформации подмостовых русел. В связи с большим количеством дорог к скважинам, расположенным на пойме р.Се-Яха, возникла необходимость построения промежуточного фрагмента (модели) размером 15км\* 10км, на котором учесть все искусственные сооружения и более подробно задать топографию русел и пойм (рис. 3.3.1).

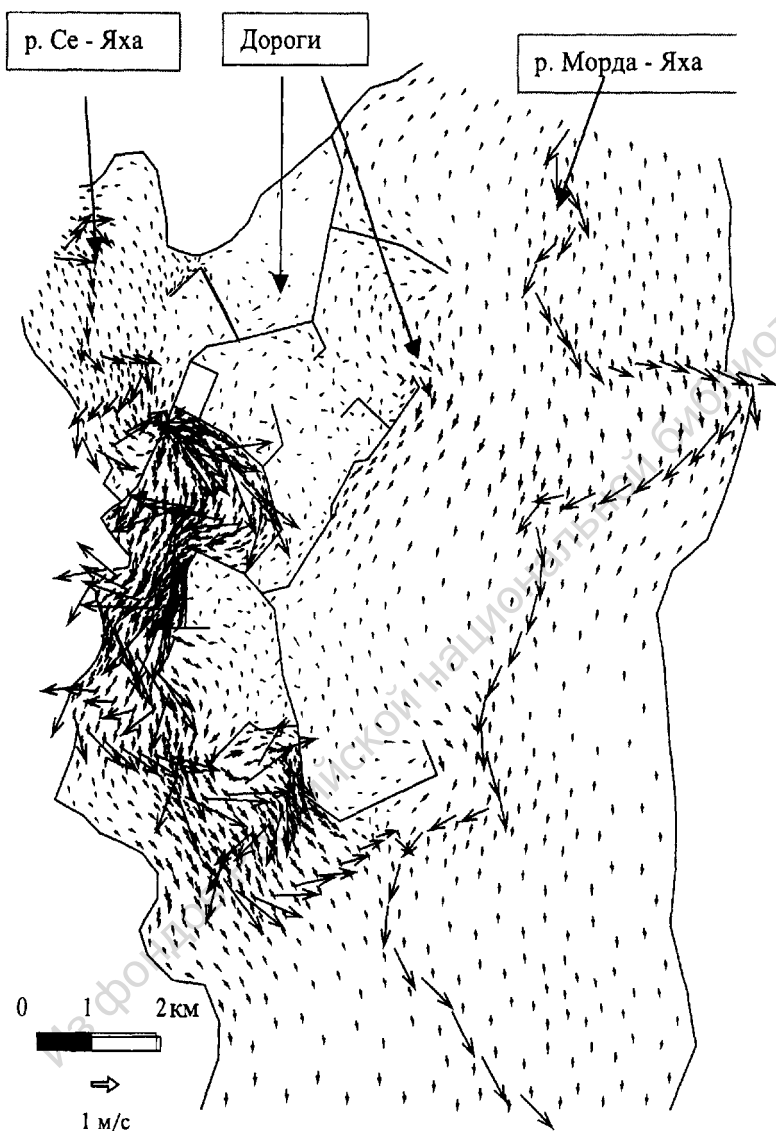


Рис. 3.3.1. Поле скоростей течения во время прохождения паводка 0% обеспеченности в южной части Бованенковского месторождения



В рассматриваемой задаче наиболее интересным с гидравлической точки зрения оказался эффект перетекания значительной части паводкового расхода из р. Се-Яхи в бассейн р. Надуй-Яхи, практически исчезающий при сильном северо-западном ветре. Это определяет специфический расчет групповых мостовых отверстий на реках Се-Яха и Надуй-Яха, при котором для моста через Се-Яху расчетным принимается расход только этой реки, а для моста через Надуй-Яху и пойменного моста увеличенные расходы с учетом перетекания через водораздел. По мере создания планов обустройства месторождений рассчитывались паводковые течения при различных вариантах расположения насыпей автодорог, площадок промышленных объектов, мостов и водовыпусков, что позволило оптимизировать расположение и величину мостовых и водопропускных отверстий на автодорогах Бованенковского ГКМ и решить все поставленные проектировщиками задачи.

В п. 3.4 описан случай катастрофического наводнения в Приморском крае в 1989 г. и его компьютерное моделирование с рассмотрением реального и возможных сценариев развития ситуации. В задачу исследования входил анализ прохождения высокого осеннего паводка 1989 г., приведшего к подтоплению населенных пунктов и чрезвычайным условиям эксплуатации Дальневосточной железной дороги на участке ст. Чалданка — ст. Дальнереченск, и получение данных о характеристиках потока в рассматриваемом районе при различных вариантах усиления ж/д мостов.

Паводок 1989 г., обеспеченностью 1%, был одним из наиболее высоких за весь период существования железной дороги. На пике наводнения для снижения уровней воды было решено взорвать участок автодороги Хабаровск-Владивосток на правобережной пойме р. Б. Уссурка. Через образовавшийся 100-метровый проран поток устремился к насыпи железной дороги, причинив в конечном счете значительный ущерб. Наряду с разрушенным участком автомобильной дороги, из-за большого объема хлынувшей воды был разрушен однопролетный мост с отверстием 6,5 м на 8858-ом км Транссибирской магистрали, в критическом состоянии оказались три других моста.

Сразу же после прохода паводка было решено построить два новых двухпролетных моста по схеме 2 x 66 м на местах проранов на железной и автомобильных дорогах Хабаровск-Владивосток. Этот проект являлся логическим продолжением принятого в период паводка 1989 г. решения отвода воды от железнодорожных мостов. В последствии появились сомнения в целесообразности строительства новых мостов на пойме, и предлагалось рассмотреть вариант увеличения отверстий существующих мостов через р. Б. Уссурка. Многовариантный компьютерный анализ предлагаемых проектных решений и явился предметом выполненных исследований.

Методика исследования паводкового течения в долинах рек Б. Уссурка и Малиновка выбиралась с учетом гидравлических и ситуационных особенностей рассматриваемого района. К ним относятся:

- возможность поступления части расхода из долины р. Б. Уссурка в долину р. Малиновка;

- сильная извилистость русл, наличие разветвленной системы русл;

- малая ширина русл по отношению к ширине пойм, большие размеры расчетной области (примерно 25 x 25 км);

переменный по длине уровень воды в р. Уссури, который является граничным условием модели;

наличие сети железных и автомобильных дорог и мостовых переходов, существенно влияющих на течения в расчетной области.

Все перечисленные факторы в совокупности ставят под сомнение возможность применения в указанных условиях традиционных методов расчета расходов и уровней воды (например, морфометрических). Физическое моделирование также затруднено в силу разномасштабности русловых и пойменных участков, больших перепадов уровней, необходимости сильного искажения геометрических масштабов модели. Напротив, математическая и численная модель паводкового течения, реализованная в виде комплекса программ «FLOOD», позволила учесть все отмеченные выше особенности.

Модель была откалибрована по гидрологической ситуации, создавшейся в осенний паводок 1989г. Погрешность в определении уровней воды у мостовых переходов на пике паводка составила не более 0.1 м, при том, что средний уклон поверхности поймы на рассматриваемом участке равен 0.5 м/км, а размер расчетной области 25\*25 км. На рис. 3.4.1 на цветной вкладке представлены глубины затопления на различные моменты времени с учетом динамики развития ситуации, а также уровни воды на пике паводка. В результате расчетов установлено, что взрыв земляного полотна автомобильной дороги на пике наводнения оказался неэффективным и принес больше вреда, чем пользы. По результатам проведенных исследований разработаны рекомендации, необходимые для комплексного решения задачи реконструкции участка железной дороги ст. Чалданка — ст. Дальнереченск. В частности, отмечается, что для снижения уровней воды увеличение отверстий существующих мостов через р. Б. Уссуру на четном и нечетном железнодорожных путях является более рациональным решением, чем устройство двух дополнительных мостов на пойме. Результаты работы опубликованы в [27].

В п. 3.5 проведено исследование взаимодействия стоковых, приливных и ветровых течений в мелководных заливах Чайво и Пильтун на о. Сахалин. Смоделирован полугодовой приливной цикл, а также стоннонагонные течения с учетом резкой смены направления ветра.

Целью настоящей работы являлся расчет суперпозиции стоковых, приливных и ветровых течений в заливах Чайво и Пильтун на восточном побережье о. Сахалин для анализа возможных вариантов распространения нефтяных загрязнений. Исследования проводились методом численного моделирования на основе решения двумерных уравнений мелкой воды (плотностная стратификация в заливах практически отсутствует) с применением алгоритмов п. 1.2, 1.3, реализованных на неструктурированных треугольных сетках. В силу мелководности заливов и большого влияния касательных напряжений на дне расчет отдельных гармонических составляющих приливных волн и построение котидальных карт не имеет смысла, поскольку из-за нелинейности трения гармоники нельзя складывать. Поэтому расчеты проводились для реальных уровней воды на входе в заливы, задаваемых в виде суперпозиции семи гармонических составляющих приливных волн.

Проведены расчеты приливных и ветровых течений в заливах Пилтун, Чайво по явной и неявной по времени схемам, а также по схеме без конвективных (инерционных) членов. Незначительная разница в результатах наряду с хорошим совпадением натуральных и расчетных значений скорости в контрольной точке, расположенной в горловине залива Чайво, свидетельствует о достаточной точности компьютерной модели.

Расчеты показали, что ветровые нагоны и сгоны воды по амплитуде сопоставимы с приливными течениями, а иногда и превосходят их. В то же время суммарный расход всех впадающих в заливы рек на два порядка меньше приливных расходов в горловинах заливов. Следовательно, течения в заливах формируются в основном под воздействием ветра и приливов. Построены поля почасовых и максимальных значений уровней воды и скоростей течения в узлах расчетной сетки для целей проектирования подводных переходов и расчета переноса загрязнений.

#### **Глава 4. Разработка и применение компьютерных гидравлических моделей участков рек при проектировании гидротехнических сооружений**

В главе рассмотрены примеры приложения разработанных численных методик к гидравлическим расчетам различных гидротехнических сооружений. В п.4.1 проведено исследование влияния водоотводного канала на уровни затопления пойменных участков (использовалась двухслойная модель п. 1.4); в п. 4.2 промоделированы русловые деформации и интенсивность заиливания водозаборного ковша по методике п. 1.2 с применением многомасштабного (гибридного) подхода; в п.4.3 проведен анализ различных вариантов сопряжения отводящего канала ГЭС с руслом горной реки (в расчетах применялся алгоритм п. 1.3); в п. 4.4, 4.5 рассмотрены два принципиально различных варианта поддержания судоходных глубин в нижнем бьефе ГЭС с использованием методик п. 1.1, п. 1.2.

В п. 4.1 представлены результаты численного исследования влияния инженерных сооружений на глубину затопления поймы р. Туры в районе г. Тюмени. Работа выполнена в 1991 г. совместно с Ю.М. Колесниковым и А.Н. Милитеевым [11,37]. В задачу исследований входил анализ прохождения высоких паводков на р. Туре с целью получения данных о протекании потока, уровнях воды и границах затопления поймы в рассматриваемом районе с учетом проектируемого водоотводного канала. В основу методики исследования положено математическое моделирование на ЭВМ по программе «FLOOD» (двухслойная модель) гидрологической обстановки на участке р. Тура протяженностью около 13 км в пределах г. Тюмень, включая пойму. Этот участок характеризуется наличием двух крутых излучин, берегозащитными дамбами обвалования, тремя мостовыми переходами и проектируемым водоотводным каналом, в силу чего правильная оценка гидрологической ситуации при помощи стандартных методик расчета весьма затруднительна.

Для проведения исследований использованы топографические карты М1:10000 и М1:2000, поперечники по руслу р. Туры и водоотводному каналу, а также данные по связи расходов и уровней на водомерном посту г. Тюмень и по уклону водной поверхности. Калибровка модели показала весьма хорошую «разрешающую способность» примененного численного

алгоритма. На рис. 4.1.1 изображены векторные поля скоростей течения для бытовых условий и при наличии канала, и расчетная сетка. По результатам расчетов сделаны общие выводы о влиянии различных вариантов водоотводного канала на уровни водной поверхности и границы затопления поймы и представлены соответствующие таблицы и рисунки. Оказалось, что строительство канала в его основном варианте позволяет понизить уровни водной поверхности в реке максимум на 0.3 м (во временном варианте на 0.2 м). Поэтому экономически более целесообразным представляется поднять отметки берегозащитных дамб на эту величину.

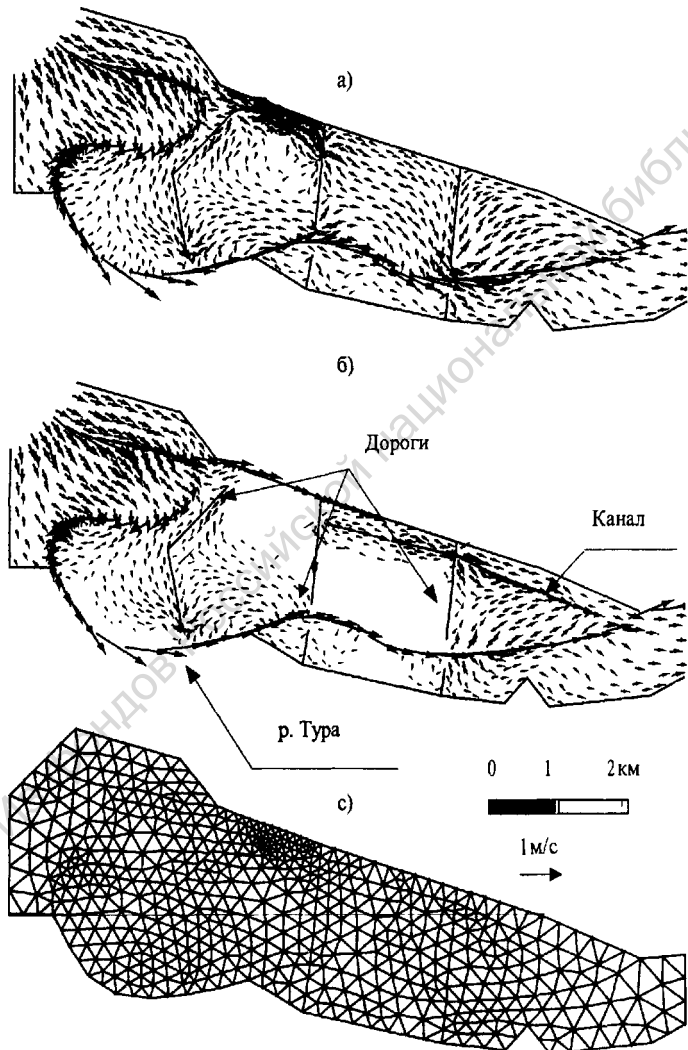


Рис.4.1.1 Скорости течения (а - бытовые, б - с каналом) и расчетная сетка (с)

В п. 4.2 выполнен многовариантный численный анализ гидравлической работы проектируемого водозаборного ковша г. Якутска с учетом влияния русловых деформаций р. Лена. Натурные и теоретические исследования в связи с решением о реконструкции водоприемных устройств Якутского водозабора проводились в 2000 - 2003 г. В.В. Беликовым, А.Н. Милитеевым и А.А. Зайцевым с группой сотрудников Географического факультета МГУ для участка р. Лены в районе Якутского узла разветвления. Эксплуатация существующего водозабора показала, что водоводы и водоприемные устройства, выдвинутые в реку ортогонально течению на расстоянии до 700 м, подвержены отрицательному воздействию подвижных песчаных гряд и проектные условия их функционирования не соблюдаются. Кардинальное инженерное решение должно было максимально ослабить отрицательное воздействие наносов, льда и колебаний уровня воды (которые достигают 11 м) на водоприемные устройства. Для этого предложено разместить последние в ковше, который частично врезан в берег непосредственно за высокой незатопляемой береговой площадкой существующего водозабора таким образом, чтобы по наиболее короткому расстоянию соединить коммуникациями новые водоприемные устройства, расположенные в тыловой части ковша, и удалить их от зоны непосредственного воздействия потока Лены. В качестве альтернативного варианта рассматривался вариант ковша, выступающий в русло реки.

Результаты натурных исследований и данные наблюдений на гидromетрических и водомерных постах легли в основу построения компьютерной модели русловых процессов. Численное моделирование использовалось для прогноза направленности русловых деформаций на участке строительства ковша и обосновало концепцию проекта. Моделирование проводилось с применением фрагментарного подхода к решению поставленных задач. Течение и деформации дна в Адамовской протоке на участке протяженностью пять километров от ее начала рассчитывались на основе двумерных уравнений Сен-Венана и двумерного уравнения баланса наносов по неявной численной схеме, описанной в п. 1.2. (рис. 4.2.1 на цветной вкладке). В районе проектируемого водозабора был выделен прямоугольный фрагмент расчетной области размером 1200x800 м, в котором расчет производился по так называемым трехмерным уравнениям мелкой воды с применением программы SHELOW-3D, разработанной А.Н. Милитеевым. При этом граничные условия для решения трехмерной задачи задавались с учетом решения, полученного по двумерной модели. Основные выводы по расчетам:

вариант вынесенного в русло ковша оказывается неэффективным как в части его заиления, так и обеспечения надежности работы в условиях паводков и ледовых воздействий.

расположение врезанного в берег ковша в целом удачное. Его акватория не подвергается заилению донными наносами. Однако развитие циркуляционных вихрей вызывает мощное заиление за счет выпадения наносов, находящихся во взвешенном состоянии. Ослабить интенсивность вихревых образований можно путем создания ограждающих дамб при заходе на акваторию ковша.

В п. 4.3 построена численная модель нижнего бьефа гидроузла Капанда (Ангола) и проведены исследования вариантов сопряжения отводящего канала ГЭС и основного русла горной реки Кванза.

Гидравлика нижнего бьефа и отводящего канала ГЭС гидроузла «Капанда» в конфигурации начала 90-х годов была детально исследована в экспериментах на физических гидравлических моделях. В связи с изменением конфигурации отводящего канала, принятым в последнее время, а также с изменением поверхности дна русла и береговой линии вследствие размывов дна и берега на выходе из строительного тоннеля потребовалось провести математическое моделирование течений в нижнем бьефе гидроузла. Целью работы являлось исследование влияния изменений в очертаниях отводящего канала на подпор ГЭС. Работа выполнена в 2002 г. в Центре гидравлических исследований ОАО «НИИЭС» методами численного моделирования при участии А.Н. Милитеева и Г.Ф. Онипченко.

Компьютерное моделирование течений в н/б г/у Капанда проводилось на основе численного решения двумерных уравнений Сен-Венана с применением явной схемы распада разрывов (п. 1.3 диссертации), реализованной на четырехугольной криволинейной сетке (программа «БОР»). При этом задавалась реальная батиметрия русла и геометрия сооружений. Была проведена детальная калибровка модели по имеющимся данным на водомерном посту и измеренным продольным профилям водной поверхности при различных расходах. Коэффициент шероховатости по Маннингу изменялся от 0.07 при минимальном межennem расходе до 0.04 при максимальном паводковом, что объясняется наличием крупнообломочного (до 2 м в диаметре) материала в русле, соизмеримого с глубиной потока. В результате исследований дан сравнительный анализ влияния различных вариантов отводящего канала, положения разделительной стенки и бара донных отложений на уровни воды у водовыпусков ГЭС. Отмечено заметное влияние угла сопряжения отводящего канала и основного русла на величину подпора ГЭС.

В п. 4.4 выполнено прогнозирование влияния русловых полузапруд на изменение условий судоходства в нижнем бьефе Горьковской ГЭС. Целью исследования являлось моделирование размывов дна и изменения уровня воды на участке Городецкого переката р. Волга после предполагаемого строительства русловых полузапруд, предназначенных для улучшения условий судоходства. При этом учитывались реальные плановые очертания и батиметрия русла, гидрографы попусков Горьковской ГЭС, данные по свойствам залегающих грунтов, плановое положение проектируемых полузапруд. Исследования проводились методами численного моделирования на ЭВМ с использованием двумерных уравнений мелкой воды и баланса наносов на треугольных неструктурированных сетках по алгоритму, изложенному в главе 1 диссертации (п. 1.2). Работа выполнена В.В. Беликовым, В.В. Кочетковым, А.Н. Милитеевым для ОАО «Гипроречтранс» в 2002 г.

Исходными данными для модели являлись:

батиметрия исследуемого участка русла р. Волги (плановая съемка М 1:5000), разрезы (поперечные сечения) русла;

литологические разрезы исследуемого участка русла р. Волги по данным бурения (всего 36 разрезов). Гранулометрический состав грунтов по данным бурения;

уровни воды по результатам мгновенной связи;  
сценарии суточной работы ГЭС.

Подготовка цифрового рельефа дна русла для проведения расчетов производилась в несколько этапов. На первом этапе были оцифрованы и доопределены (вплоть до боковых границ русла) поперечные литологические разрезы русла, проходящие через пробуренные скважины. На втором этапе на отсканированном плане русла М 1:5000 были нанесены отметки дна с доопределенными поперечниками в двух вариантах: для существующей поверхности дна и для поверхности плотного связного грунта, которая в дальнейших расчетах принималась неразмываемой. На третьем этапе с помощью специальной программы были доопределены уровни дна (в двух вариантах) между промеренными поперечниками с учетом материалов плановой съемки русла. Для каждого варианта формировался соответствующий единый файл рельефа в виде набора точек в декартовых координатах X,Y,Z. На четвертом этапе производилась интерполяция отметок существующей и неразмываемой (глинистой) поверхностей русла в центры ячеек соответствующей расчетной сетки при помощи алгоритма п.2.4.

Для калибровки численной модели использовались материалы мгновенной связи уровней при прохождении расхода воды  $700 \text{ м}^3/\text{с}$ . При этом расходе для удовлетворительного совпадения расчетов с результатами измерений (в пределах 1 — 3 см) потребовалось задать коэффициент шероховатости в формуле Маннинга равным  $n=0.025$ . Во всех дальнейших расчетах принималось  $n=0.025$ .

Систематические расчеты проводились для четырех сценариев работы ГЭС. Рассмотрены два варианта полузапруд — незатопляемые и затопляемые, отметка гребня которых 66.5 м. На рис. 4.4.1 на цветной вкладке приведены отметки дна и скорости течения до и после размыва при сооружении непереливаемых полузапруд. Рис. 4.4.2 показывает время стабилизации уровня воды, а, следовательно и размыва. Полная стабилизация, т.е. достижение верхнепермских отложений, происходит через 15-20 лет. Однако практически стабилизация наступает через 10-15 лет.

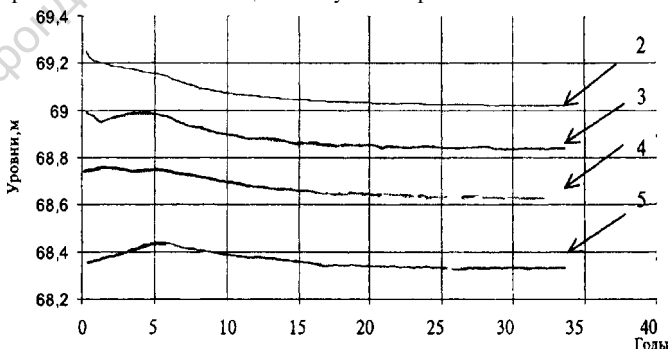


Рис. 4.4.2. Изменение уровней воды в контрольных точках во времени вследствие размыва дна реки. Расход  $3000 \text{ м}^3/\text{с}$ , 2-5 номера контрольных точек

Результаты расчетов показали, что после стабилизации ожидается весьма малый эффект влияния полузапруд. Максимальное повышение уровня по сравнению с существующим на в/п Городец для различных сценариев составит соответственно 0,03, 0,09, 0,17, 0,26 м. При минимальном расходе повышение уровня будет около нуля. Следовательно, можно констатировать, что сооружение полузапруд для улучшения судоходных условий в нижнем бьефе Горьковской ГЭС вряд ли целесообразно.

В п. 4.5 проведено исследование уровенных режимов р. Волга в бьефах проектируемого Нижегородского гидроузла на численной гидравлической модели. Целью работы являлось определение уровенных режимов верхнего и нижнего бьефов проектируемого Нижегородского гидроузла при различных подпорных уровнях с учетом типового суточного регулирования расходов через Горьковскую ГЭС. Для этого построена компьютерная гидравлическая модель участка р. Волга от Горьковской ГЭС до г. Сормово протяженностью 52 км в одномерной схематизации (см. п. 1.1 диссертации), проведена ее калибровка в нестационарном режиме и выполнены расчеты пропускания постоянных и переменных расходов в диапазоне от 500 м<sup>3</sup>/с до 5500 м<sup>3</sup>/с (среднесуточный расход обеспеченностью 1%) при изменении НПУ Нижегородского г/у от 68,0 м до 69,0 м. Работа выполнена В.В. Беликовым, В.В. Кочетковым, Е.С. Третьюхиной. по заказу ОАО «Гипроречтранс» в 2003 г.

Для калибровки модели использовались имеющиеся гидрологические данные по расходам и уровням воды на водомерных постах Городец, Балахна, Сормово в летние месяцы 2002 и 2003 годов. Был выбран характерный период времени, равный 10 суткам, в течение которого наблюдался диапазон изменения расходов от 500 м<sup>3</sup>/с до 2900 м<sup>3</sup>/с, значения которых задавались на входной границе расчетной области течения в створе Горьковской ГЭС. Сопоставление измеренных и рассчитанных значений дало удовлетворительные результаты, особенно по максимальным пиковым значениям уровня воды. При этом коэффициент шероховатости по Маннингу принимался  $n = 0,0245$ , одинаковый на всех поперечниках и не зависящий от уровня воды.

Первая серия систематических расчетов была проведена с реальным 10-суточным сбросным гидрографом при поддержании фиксированных уровней в верхнем бьефе Нижегородского гидроузла, равных 68,0 м, 68,5 м, 69,0 м. Во второй серии были произведены расчеты продольных уровней водной поверхности при постоянных расходах воды от 500 м<sup>3</sup>/с до 5500 м<sup>3</sup>/с в бытовых условиях и при трех уровнях УВБ (68,0 м, 68,5 м, 69 м). Результаты численного моделирования были использованы при выборе НПУ проектируемого Нижегородского гидроузла.

## **Глава 5. Расчет параметров волн прорыва в бьефах гидроузлов как основа для оценки вероятного вреда от их прохождения**

В этой главе рассматривается методика компьютерного моделирования волн прорыва при разрушении напорных фронтов гидроузлов. Применяются как явные, так и неявные численные алгоритмы (Глава 1, п. 1.1 - 1.3). Описана методика построения карт возможных разрушений от наводнений и волн прорыва, приведены примеры расчета реальных объектов.



В п. 5.1 рассмотрены особенности численного моделирования развития прорана в грунтовой плотине на гибридных сетках. Приведен пример расчета прорыва дамбы на р. Þjórsa в Исландии.

Наряду с недостаточной изученностью физических закономерностей развитие проранов в грунтовых плотинах имеют и некоторые сложности при численном моделировании. Специфика двумерного (в плане) моделирования течения при развитии прорана во времени связана с динамикой изменения его размеров и формы, что приводит к вычислительным проблемам, вызванным заменой непрерывного процесса расширения прорана дискретным при включении в расчет новых ячеек сетки. Процесс открытия ячеек при расширении прорана требует специальных модификаций алгоритма, т.к. при мгновенном включении ячеек возникают нефизичные осцилляции решения и погрешности в определении расхода через проран, что особенно наглядно видно при расчете на «грубых» сетках. В разделе излагается методика расчета прорывного паводка на основе численного решения двумерных уравнений мелкой воды, учитывающая любой заданный закон развития прорана во времени. Специальный прием, применяемый для пересчета во времени отметок дна на ячейках сетки, лежащих в створе прорана, обеспечивает достаточную гладкость получаемых расчетных характеристик потока (расходов воды и скоростей течения) в отверстии прорана даже на «грубых» сетках.

В п. 5.2 приведены примеры расчета прорывных паводков на малом потоке и крупной реке с применением ГИС-технологий. Рассмотренные объекты интересны рядом особенностей: мостовыми переходами, во многих местах пересекающими пойму; котловиной с узкими горловинами; и т.п.

Распространение волны прорыва при разрушении напорного фронта грунтовой плотины на небольшой реке моделировалось с учетом динамики развития прорана по методике А.М. Прудовского. Напор гидроузла 18 м, длина водохранилища около 30 км, объем водохранилища 1 км<sup>3</sup>, ширина реки в нижнем бьефе 30 - 40 м, глубина в бровках 3 - 4 м, ширина долины до трех километров, длина долины от гидроузла до устья 60 км. На этом участке долину пересекают четыре мостовых перехода с высокими насыпями подходов (до 12 м), полностью перегораживающие пойму реки. В расчетах использовались векторизованные топографические карты и треугольная сетка (около 56000 ячеек со сторонами от 20 м до 200 м), сгущающаяся к руслу реки, отверстиям мостов и особенностям рельефа. На рис.5.2.1 на цветной вкладке представлены уровни водной поверхности и скорости течения вблизи одного из мостовых переходов, являющегося существенной преградой на пути распространения прорывного паводка, на время через два часа после начала аварии. Виден большой перепад уровней водной поверхности в районе моста, а также раздваивающийся по долинам притоков передний фронт волны прорыва.

Распространение волны прорыва при разрушении напорного фронта высокой бетонной плотины рассматривалось при условии ее мгновенного полного или частичного обрушения. Напор гидроузла 98 м, длина водохранилища около 300 км, ширина до 10 км, объем 100 км<sup>3</sup>. Ширина реки в нижнем бьефе 700 - 900 м, глубина в межень до 10 м, длина рас-

четного участка долины ниже гидроузла 120 км. На протяжении 40 км ниже гидроузла долина реки узкая (1-1.5 км), затем резко расширяется и образует котловину длиной около 50 км и шириной 10-15 км, в которой расположен крупный город, затем опять сужается до 1 км. В расчетах использовались электронные топографические карты и треугольная нерегулярная сетка, адаптированная к руслу и особенностям рельефа. Общее число треугольников около 52000, размеры ячеек сетки варьируются от 80 м до 800 м. На рис.5.2.2 на цветной вкладке представлены максимальные за все время прохождения прорывного паводка глубины затопления, на которых видно, что практически полному затоплению на глубину до 10 - 15 м подвергается правобережная часть города. Когда волна прорыва добегает до узкого выхода из котловины, начинается ее торможение и повышение уровня воды, причем наполнение котловины продолжается почти сутки.

В п. 5.3 представлена балльная система оценки степени возможных разрушений от наводнений и волн прорыва, аналогичная применяемой при оценке силы землетрясений. Задача исследования состояла в разработке нового подхода к оценке ущерба вследствие распространения волны прорыва с целью: страхования гражданской ответственности за последствия аварий ГТС; разработки противопаводковых мероприятий; составления декларации безопасности ГТС.

В страховании участвуют три стороны: владелец ГТС, страховая компания и районы, терпящие ущерб. Оценка ущерба в стоимостном выражении может быть различной для различных районов. Поскольку для достаточно крупных гидроузлов в зону затопления может входить большое количество районов, то необходимо построить карту ущерба— географическую карту местности требуемого масштаба с выделенными на ней зонами ущерба, соответствующими выбранной шкале, причем ущерб может быть выражен не только в форме стоимости, а и в некоторой балловой системе. Построение карт ущерба имеет большое значение для разработки противопаводковых мероприятий. Действительно, если для каждого района затопления можно определить ущерб как в естественных условиях, так и ущерб после проведения мероприятий, то в каждом конкретном случае легко определить эффективность мероприятий и целесообразность их проведения.

В настоящее время большое развитие получили геоинформационные системы (ГИС), в которых имеются обширные сведения о различных характеристиках местности и объектах, расположенных в исследуемых районах. Поэтому разработку методики построения карт ущерба целесообразнее всего проводить с использованием ГИС, в среду которой внедрены методы расчета параметров волны прорыва и связи этих параметров с оценкой ущерба. В работе, выполненной в ОАО «НИИЭС» в 2003 г. В.В. Беликовым, А.Н. Милитеевым и др.[23,25,26], построена математическая модель связи ущерба с локальными параметрами волны прорыва: скоростью, глубиной и временем затопления. В модели выделяются два вида ущерба: 1) ущербы от разрушения зданий и сооружений; 2) ущербы от затопления сооружений и сельхозугодий.

Для каждого из этих видов ущерба построена балльная шкала, в которой степень ущерба в баллах связана с параметрами паводковой волны. Установлено, что первый вид ущерба связан со скоростным напором,

или, что тоже, с удельной кинетической энергией потока. Второй вид ущербов связан с глубиной потока и временем затопления. Для расчета ущербов в балльной системе необходимо найти связь локальных параметров волны прорыва или естественного паводка со степенью ущербов (разрушений). В табл. 5.3.1 представлена связь удельной энергии потока ( $H$  — глубина,  $V$  — скорость течения,  $\rho$  — плотность жидкости) со степенью возможных разрушений, полученная с использованием известных таблиц МЧС. Для математического описания ущербов по предложенной выше шкале балльности разрушений была подобрана простая функция логарифмического вида, связывающая значение баллов с удельной энергией потока

$$B = 2Lg(P), \quad P = 0.5\rho HV^2 \quad (5.3.1)$$

Значение баллов, полученное по этой формуле, практически совпадает со значениями шкалы табл. 5.3.3. С использованием формулы (5.3.1) были построены зоны возможных ущербов в балловом эквиваленте для объекта, описанного в п. 5.2. Результаты расчета отображались совместно со слоями топографической электронной карты (рис. 5.3.1 на цветной вкладке). Видно, что сильным разрушениям подвергается правобережная часть большого города. Карта ущербов в баллах несет основную информационную нагрузку о возможных последствиях наводнения.

В п. 5.4 разработанная балльная система применена при компьютерной оценке реальных и возможных разрушений при прорыве грунтовой плотины на р. Дюро под Новороссийском в августе 2002 г. [24]. Дождевой паводок, усиленный смерчем, привел к переполнению водохранилища в верховьях реки и частичному (на 3 м от гребня почти по всей длине) разрушению грунтовой плотины длиной 214 м и высотой 24 м, в результате чего погибло несколько человек и был причинен серьезный материальный ущерб: разрушены дома (рис. 5.4.1 на цветной вкладке), смыты виноградники. В сентябре 2002 г. автором диссертации была предпринята рекогносцировочная поездка в район наводнения для сбора информации о характере разрушений в нижнем бьефе, видах причиненного ущерба и уточнения топографии местности и параметров гидроузла.

После этого была построена компьютерная модель бассейна р. Дюро, на которой исследовалась динамика и последствия гидродинамической аварии. Для формирования цифрового рельефа поверхности водосбора использовалась электронная топографическая карта, на отдельных участках дно долины было уточнено по результатам обследования на местности. Расчеты производились по явной схеме п. 1.3 сквозным образом на треугольных сетках. Были выполнены две серии расчетов для реальной ситуации (сценарий 1) и для гипотетического случая полного разрушения плотины (сценарий 2).

Получено, что площади затопления отличаются не очень сильно, однако глубины затопления и скорости течения во втором случае примерно в 1.5 раза больше, а максимальный расход излива — примерно в 3 раза. По результатам проведенных расчетов были построены карты возможных разрушений в балльном выражении. На рис. 5.4.1 на цветной вкладке изображены фрагменты карты ущербов для сценариев 1 и 2 в цветовой заливке, где каждый цвет соответствует определенному баллу согласно легенде. Видно, что значительная часть пойменной территории подвержена сильным

Баллы	Разрушения
1	Не приводит к каким-либо разрушениям, ( $P \leq 4$ )
2	Возможен размыв пашни, сложенной легкими грунтами ( $P \leq 14$ )
3	Размыв пашни, сложенной легкими грунтами ( $P \leq 40$ )
4	Незначительные разрушения особо плохо построенных и ветхих зданий Размыв пашни, сложенной средними грунтами ( $P \leq 130$ )
5	Перемещение слабо закрепленных предметов, разрушение легких объектов большой парусности (копен сена, палаток, разрушения плохо построенных и ветхих зданий и т.п.) Размыв пашни на значительную глубину Подмыв корневой системы кустарников со слабой корневой системой ( $P=400$ )
6	Разрушение сплошных деревянных изгородей, ветхих деревянных зданий Подмыв корневой системы кустарников ( $P=1300$ )
7	Достигаются критические параметры потока, могущие повлечь гибель незащищенных людей Разрушение легких деревянных строений, затопление и перемещение потоком легковых автомашин В руслах разрушение деревянных мостов, паромных переправ, средние повреждения находящихся на незащищенных стоянках плавсредств (нанос на берег) ( $P=4000$ ).
8	Полное разрушение деревянных домов, ветхих кирпичных и глинобитных строений, средние разрушения кирпичных и блочных домов малой этажности Разрушение железобетонных и металлических мостов, автодорожных и железнодорожных насыпей, защитных дамб, подвижного железнодорожного состава В руслах средние повреждения находящихся в плавании, на якорной стоянке или на берегу судов ( $P=13500$ )
9	Разрушаются кирпичные и панельные дома средней этажности, водокачки, ЛЭП Поток несет вырванные с корнем деревья В руслах сильные повреждения (оверкили и затопление) незащищенных среднетоннажных и малотоннажных судов, средние разрушения стенок, набережных и пирсов, разрушение ступеней судоремонтных мастерских ( $P=40000$ )
10	Разрушаются промышленные здания с тяжелым металлическим и железобетонным каркасом, порталные краны Поток сильной мутности несет много различных предметов Массовая гибель не эвакуированных людей В руслах разрушение стенок, набережных, молов, выполненных из кладки массивов ( $P=125000$ )
11	Разрушаются бетонные и железобетонные здания антисейсмической и особо прочной конструкции, мостовые перегружатели Почти полное разрушение всех строений Поголовная гибель не эвакуированных людей ( $P=400000$ )
12	Тотальные разрушения ( $P > 1300000$ )

разрушениям, особенно в случае реализации сценария 2 (полное разрушение плотины), причем зоны максимальных ушибов концентрируются вблизи русла, а на удаленных от русла участках поймы балльность невелика Это хорошо иллюстрирует фото рис 5 4 1 на цветной вкладке, где расположенные ближе к руслу дома (в районе селения Дюрсо) полностью разрушены, а более удаленные уцелели

В п. 5.5 приведены результаты численных гидравлических расчетов параметров волны излива и зон затопления в случае повреждения сооружений напорного фронта Саратовской ГЭС. Работа выполнена в Центре гидравлических исследований ОАО «НИИЭС» в 2003 г по заказу Дирекции Саратовской ГЭС [30]. Целью работы являлось определение зон затопления и оценка величины вероятного вреда при различных сценариях пропуска экстремальных половодий через Саратовский гидроузел с учетом возможных аварийных ситуаций. Для решения поставленной задачи была с применением ГИС-технологий построена цифровая модель рельефа долины р. Волга на участке Саратовского и Волгоградского водохранилищ общей протяженностью более 830 км (в качестве базовой топографической основы использовались электронные карты М 1 200 000 для всего участка, на которые накладывались векторизованные лощманские карты). Разработаны четыре компьютерных модели: одномерная для участка р. Волга от Волжской до Волгоградской ГЭС протяженностью 830 км (модель 1), одномерная для участка от Саратовской до Волгоградской ГЭС (модель 4), двумерная для участка Волгоградского водохранилища от г. Балаково до г. Саратова протяженностью 170 км (модель 2), двумерная для участка от г. Сызрань до г. Саратова (модель 3) протяженностью около 300 км.

Для калибровки моделей использовались данные по расходам и уровням воды на водомерных постах Вольск и Саратов в высокие половодья 1979 и 1986 годов (табл. 5.5.1), а также кривая связи расходов и уровней в нижнем бьефе Саратовского гидроузла. Коэффициенты шероховатости по Маннингу принимались для одномерной модели  $n=0,021$ , для двумерной модели на пойме  $n = 0,05$ , в русле  $n = 0,025$  для всех расчетов.

Сценарии расчетов включали варианты совместного развития прорана в грунтовой части русловой плотины (в том числе при переливе через гребень) и работы самой плотины в различных режимах (рис. 5.5.2 на цветной вкладке). Расчеты показали, что максимальные глубины затопления нижнего бьефа при гидродинамической аварии превосходят глубины при расчетном паводковом расходе (рис. 5.5.1 на цветной вкладке) на 1–2 м, что не приводит к катастрофическим последствиям.

Таблица 5.5.1  
Сопоставление измеренных и расчетных уровней воды

№ п/п	Дата	Месторасположение	Расчетный расход, м <sup>3</sup> /с	Уровень воды, м		
				По измерениям	По расчету	
					Модель 1	Модель 2
1	18–24 мая 1979 г	Н Б Саратовской ГЭС	38000	22,65	22,60	22,58
		В/п Вольск		21,66–21,70	21,70	21,53
		В/п Саратов		16,80–17,20	17,15	17,00
2	30 апреля – 8 мая 1986 г	Н Б Саратовской ГЭС	27300	21,05	21,10	21,15
		В/п Вольск		20,01–20,20	19,80	20,02
		В/п Саратов		16,01–16,21	16,20	16,28

**В Заключении** сформулированы основные выводы и результаты, полученные в процессе выполнения диссертационной работы

1 Разработан комплекс математических моделей, алгоритмов и программ для расчета нестратифицированных открытых потоков в приближении мелкой воды, позволяющий исследовать широкий класс нестационарных течений в одномерной, двумерной и двухслойной схематизациях с учетом деформируемости дна и при любых числах Фруда В составе комплекса

численная модель паводкового стока с речных бассейнов, использующая «неотрицательный» алгоритм расчета по уравнению диффузионной волны и реализующая принцип блочного конструирования моделей водосборов,

одномерная численная модель и программа расчета течений в русловой сети с учетом транспорта наносов, деформируемости дна, пойменной аккумуляции, переменного бокового притока и сквозного расчета водосливных плотин в условиях подтопления со стороны нижнего бьефа,

невязная схема конечных объемов для расчета течений и деформаций дна в двумерной плановой постановке на треугольных сетках, обеспечивающая консервативную аппроксимацию конвективных членов и пригодная для моделирования водоворотных зон,

явная схема распада разрывов и компьютерная программа для расчета течений с большими числами Фруда на гибридных треугольно-четырёхугольных сетках, позволяющая производить сквозной счет при наличии гидравлических прыжков и зон обмеления,

двухслойная одномерно-двумерная математическая модель паводковых течений, построенная без введения новых эмпирических констант, и ее численная реализация на треугольных сетках для исследования течений в системе меандрирующих русел с широкой поймой и при наличии искусственных сооружений

Все программы, входящие в состав комплекса, сертифицированы

2 Разработаны современные методы и технологии компьютерного моделирования открытых потоков, включающие

технологии и программу подготовки цифровой модели рельефа с использованием электронных топографических карт и промеров глубин с применением систем спутникового позиционирования,

алгоритм и программу построения нерегулярных треугольных и гибридных треугольно-четырёхугольных сеток, адаптируемых к геометрии и батиметрии области и особенностям течения,

алгоритм и программу интерполяции рельефа земной поверхности, заданного на нерегулярных наборах точек, в узлы расчетной сетки,

методику и программу визуализации результатов расчетов с применением ГИС-технологий

3 С применением разработанных методов и технологий численного моделирования проведены исследования более чем 50 реальных водных объектов Сопоставление результатов расчетов с данными натурных измерений показало достаточную для практических приложений точность разработанных методик, а общий объем выполненных исследований доказывает эффективность разработанной технологической цепочки и всех ее звеньев

4. На основе анализа результатов расчетов сформулирован ряд выводов, в том числе:

вывод о слабой пространственной и временной изменчивости коэффициента шероховатости по Маннингу в руслах равнинных рек при расчетах по двумерным уравнениям Сен-Венана с учетом конвективных членов и при наличии надежной батиметрии. Этот вывод имеет важное практическое значение, поскольку позволяет в некоторых случаях проводить расчеты речных участков, даже не имея данных для калибровки модели.

вывод о возможности решения одной из основных задач гидравлики - распределения расходов между рукавами многорукавного русла — для всех фаз гидрологического режима (от паводка до межени) без детального подбора коэффициентов шероховатости, если использовать подробную батиметрию русел, двумерные уравнения Сен-Венана и достаточно густые расчетные сетки.

вывод о необходимости применения двухслойных моделей мелкой воды при расчете течений в системе меандрирующих русел с затапливаемой широкой поймой (стандартные одномерные методики дают в этих случаях неточные результаты).

5. В процессе разработки методики расчета волны прорыва при разрушении напорных фронтов гидроузлов получены следующие результаты:

сформулирован вывод о необходимости применения в расчетах сертифицированных электронных топографических карт, позволяющих «привязать» параметры волны прорыва и зоны затопления к инфраструктуре расчетной области;

разработаны алгоритм и программа совместного расчета по двумерным уравнениям Сен-Венана водопропускных сооружений гидроузла и прорана в грунтовой части плотины;

разработана балльная система оценки степени разрушений и ущербов при прохождении природной или техногенной паводковой волны, основанная на удельной энергии потока. Карта возможных ущербов, построенная по 12-балльной шкале, позволяет оценить масштабы разрушений, назначить страховые ставки, определить мероприятия по предотвращению ущербов.

Представленные в диссертации математические модели, численные методы и компьютерные технологии применялись для решения многих практических задач гидравлики мелководных открытых потоков. В одних случаях численное моделирование позволило заменить дорогостоящий физический эксперимент, в других — исследовать сложную пространственную структуру течений на обширных территориях, в третьих — осуществить расчет и прогноз динамики распространения паводковых волн естественной и техногенной природы в протяженной русловой сети, и т.д. Предложенные автором методы и технологии расчетов на адаптивных гибридных сетках с применением современных геоинформационных систем обеспечивают быстрое и эффективное построение компьютерных гидравлических моделей реальных объектов и проведение многовариантных проработок возможных проектных и управленческих решений с целью их оптимизации.

## ПЕРЕЧЕНЬ основных публикаций по теме диссертации

- 1 **Использование** уравнений плановой гидравлики для определения характеристик потока в районе мостового перехода //Вопросы гидрометрии и гидравлики переходов через водотоки М ВНИИ транспортного строительства 1984, с 58-70
- 2 **Вычислительный** комплекс TRIANA — генератор сеток треугольных конечных элементов в произвольных плоских областях М ГосФАП СССР, П007705, 1984
- 3 **Расчет** общего размыва под мостами на основе решения уравнений плановой гидравлики //Транспортное строительство 1984, №12, с 12-13 (соавтор Волченков Г Я )
- 4 **Расчет** нестационарных плановых деформаций подмостовых русел методом конечных элементов //Гидравлика дорожных водопропускных сооружений Саратов 1985, с 30-34 (соавтор Волченков Г Я )
- 5 **Применение** метода Годунова с модификацией Колгана к расчету планов течений в нижних бьефах водопропускных труб //Гидравлика дорожных водопропускных сооружений Саратов 1985, №4, с 54-57 (соавтор Семенов А Ю)
- 6 **Деформации** дна в нижнем бьефе водопропускных труб //Мелиорация и водное хозяйство 1988, №6, с 26-28 (соавтор Волченков Г Я )
- 7 **Исследование** течений в нижних бьефах водопропускных труб численными методами /Др ЦНИИС «Пути повышения качества и надежности проектирования и строительства транспортных сооружений М ЦНИИС, 1988, с 131-134 (соавтор Залесский В Ф )
- 8 **Явный** численный метод распада разрывов для решения уравнений мелкой воды Препринт № 42 М Институт общей физики АН СССР, 1988, 44 с (соавтор Семенов А Ю )
- 9 **Пособие** по гидравлическим расчетам малых водопропускных сооружений М «Транспорт», 1992, 410 с (соавтор Волченков Г Я и др )
- 10 **Двухслойная** математическая модель катастрофических паводков //Вычислительные технологии» т 1, №3 Новосибирск 1992, с 167-174 (соавтор Милитеев А Н )
- 11 **Моделирование** работы русла и поймы р Туры на пропуск паводковых расходов //Сб тр МГСУ «Водное хозяйство, порты и портовые сооружения, объекты строительства на шельфе» М 1996,с 15-25 (соавторы Милитеев А Н , Колесников Ю М )
- 12 **Построение** численных методов распада разрыва для решения уравнений теории мелкой воды //В кн «Вычислительная гидродинамика природных течений» М Наука ФИЗМАТЛИТ 1997 - Тр ИОФАН, т 53, с 5-43 (соавтор Семенов А Ю )
- 13 **Геометрический** анализ несобсоновской интерполяции //Вкн «Вычислительная гидродинамика природных течений» М Наука ФИЗМАТЛИТ 1997 - Тр ИОФАН, т 53, с 187-198 (соавторы Семенов А Ю и др )
- 14 **Несобсоновская** интерполяция — новый метод интерполяции значений функции на произвольной системе точек //Вычислительная Математика и Математика Физики Т 37, 1997, №1, с 11-17 (соавторы Иванов В Д , Конторович В К и др )



15 **Численный** метод распада разрыва для решения уравнений теории меткой воды //Вычислительная Математика и Математика Физики 1997, Т 37, №8, с 1006-1019 (соавтор Семенов А Ю )

16 **Численное** моделирование условий санитарных гидравлических промывок русла реки Москвы в черте города //Тр Академии водохозяйственных наук Вып 5 Гидрология и русловые процессы М Изд МГУ 1997, с 105-113 (соавторы Колесников Ю М , Милитеев А Н )

17 **Модель** паводковых течений и ее интеграция в ГИС //Тр семинара «Геоинформационные системы и их возможности в водном секторе» М ГИС-Ассоциация 1998, с 55-57 (соавторы Алабян А М , Баталкина С А )

18 **Математическое** моделирование русловых процессов крупных рек для целей народного хозяйства //Тр 5-ой Всеросс конф «Динамика и термика рек, водохранилищ и прибрежной зоны морей» М 1999, с 17-20 (соавторы Зайцев А А , Милитеев А Н )

19 **Численное** моделирование кинематики потока на участке неразбиваемого русла //Водные ресурсы Т 28, 2001, №6, с 701-710 (соавторы Зайцев А А , Милитеев А Н )

20 **Математическое** моделирование пропуска весеннего половодья через городской бьеф р Москвы //Водные ресурсы Т 28, 2001, №5, с 566-572 (соавторы Колесников Ю М , Иваненко С А )

21 **Моделирование** динамики развития прорана при сквозном счете на гибридных сетках //Тр Симп IАНР «Гидравлические и гидрологические аспекты надежности и безопасности гидротехнических сооружений» С-Петербург 2002 (CD-ROM)

22 **Математическое** моделирование сложных участков русел крупных рек //Водные ресурсы», Т 29, 2002, №6, с 698-705 (соавторы Зайцев А А, Милитеев А Н)

23 **Оценка** параметров прорывного паводка при составлении декларации безопасности ГТС //Известия ВНИИГ им Б Е Веденеева «Гидравлика гидротехнических сооружений» С -Петербург Т 240, 2002, с 145-151 (соавторы Милитеев А Н , Прудовский А М и др )

24 **Компьютерное** моделирование дождевого паводка, приведшего к разрушению плотины (на примере р Дюрсо под Новоросийском) //В сб «Безопасность энергетических сооружений», М ОАО «НИИЭС», 2003, Вып И, с 169-175

25 **Компьютерная** гидравлическая модель речного бассейна - основа определения ущербов народному хозяйству от наводнений //В сб «Безопасность энергетических сооружений», М ОАО «НИИЭС», 2003, Вып 11, с 132-148 (соавторы Милитеев А Н , Прудовский А М , Родионов В Б )

26 **Использование** электронных топографических карт для оценки ущерба от катастрофических паводков //В сб «Безопасность энергетических сооружений», М ОАО «НИИЭС» 2003, Вып 11, стр 434-442 (соавторы Милитеев А Н , Прудовский А М и др )

27 **Выбор** проектных решений по ликвидации последствий катастрофического наводнения в Приморском крае на основе результатов компьютерного моделирования В сб «Безопасность энергетических сооружений»

Вып. 11. М.:ОАО «НИИЭС». 2003. с.396-407 (соавторы Милитеев А.Н., Третьюхина Е.С., Цыпин В.Ш.)

28. **Компьютерные** модели русловых процессов и их прикладное значение. //Др. VI конф. «Динамика и термика рек, водохранилищ и прибрежной зоны морей». М.: 2004, с.295-298. (соавтор Зайцев А.А.)

29. **Численное** моделирование паводков при прорывах речных гидроузлов. //Тр. VI конф. «Динамика и термика рек, водохранилищ и прибрежной зоны морей». М.: 2004, с.87-90. (соавторы Родионов В.Б., Прудовский А.М., Семенов А.Ю.).

30. **Гидравлические** расчеты параметров волны излива и оценка зон затопления в случае повреждения сооружений Саратовской ГЭС. //В сб. «Безопасность энергетических сооружений». М.: ОАО «НИИЭС». 2004. Вып. 12., с.209-220 (Кочетков В.В., Родионов В.Б., Третьюхина Е.С.)

31. **Выбор** инженерных мероприятий для защиты пос. Зырянка (р. Колыма) от береговой эрозии с применением компьютерного гидравлического моделирования. //В сб. «Безопасность энергетических сооружений». М.: ОАО «НИИЭС». 2004. Вып. 12., с.401-418. (соавторы Третьюхина Е.С., Зайцев А.А., Ильясов А.К.)

32. **Компьютерное** моделирование катастрофического заторного наводнения в районе г. Ленска. //В сб. «Безопасность энергетических сооружений». М.: ОАО «НИИЭС». 2004. Вып. 12., с.220-249. (Третьюхина Е.С., Кочетков В.В., Зайцев А.А., Савельев Р.А., Сосунов И.В.).

33. **New Non-Sibson** Interpolation on Arbitrary System of Points in Euclidean Space. Proc. of 15th World Congress on Scientific Computation Modeling and Applied Mathematics. V.2. Berlin: 1997, (coauthor Semenov A.Yu.)

34. **A Godunov's** Type Method Based on an Exact Solution to the Riemann Problem for the Shallow-Water Equations. //Proc. 4 Eur. Congr. Fluid Dyn. Conf.V.1, Part 1. WILEY/ New York: p.310-315. (coauthor Semenov A.Yu.)

35. **Non-Sibsonian** Interpolation on Arbitrary System of Points in Euclidean Space and Adaptive Isolines Generation. //Appl. Numer. Math. 32, № 4, 2000. (coauthor Semenov A.Yu)

36. **Natural** Neighbour Galerkin Methods. //Int. J. for Num. Methods in Engineering. 2001; 50(1), p. 1-27. (coauthors Sukumar N., Moran B., Semenov A.Yu.)

37. **Two-Layer** Model for Flood Computation in Complicated Channel System with Erosion Riverbed with Floodplain. //Proc. Conf. «RIVER FLOW 2002», Bousmar&Zech (eds.). 2002 Swets&Zeltinger, Lisse, ISBN 905809 509 6, p. 263-269. (coauthors Militeev A.N., Rodionov V.B.)

38. **The computer** Model of Formation of an Ice Jam at the Lena River. //Proc. 17th Int. Symp. on Ice. St-Petersburg: 2004, p. 371-378. (coauthor Zaitsev A.A.)

39. **Using** Computer Modeling for Regulation of Sediment Transport under hydraulic structures on a large river. Proc. Int. Symp. «Sediment Transfer through the Fluvial System». Moscow: 2004. IAHS Publ. 288, ISBN 1-901502-67-8, p.386-394. (coauthors Zaitsev A.A., Militeev A.N.)



05 23

Из фондов Российской национальной библиотеки

22 МАР 2005

1083