

На правах рукописи



Зиновьев Александр Тимофеевич

**МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ
ГИДРОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ В ВОДОХРАНИЛИЩАХ И
НИЖНИХ БЬЕФАХ ГЭС НА РЕКАХ СИБИРИ**

Специальность 25.00.27 – гидрология суши, водные ресурсы,
гидрохимия

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
доктора технических наук

Барнаул – 2014

Работа выполнена в лаборатории гидрологии и геоинформатики Федерального государственного бюджетного учреждения науки (ФГБУН) Института водных и экологических проблем Сибирского отделения Российской академии наук

Официальные оппоненты:

КОЗЛОВ Дмитрий Вячеславович, доктор технических наук, профессор, ФГБОУ ВПО «Российский государственный аграрный университет – МСХА имени К.А. Тимирязева», проректор по инновационному развитию, профессор кафедры Комплексного использования водных ресурсов и гидравлики Института природообустройства имени А.Н. Костякова (г. Москва)

БЕЛИКОВ Виталий Васильевич, доктор технических наук, ОАО «Научно-исследовательский институт энергетических сооружений» РусГидро, отдел численных гидравлических исследований, начальник (г. Москва)

ЛЕПИХИН Анатолий Павлович, доктор географических наук, профессор, ФГБУН Горный институт УрО РАН, лаборатория гидрологии, заведующий (г. Пермь)

Ведущая организация: ФГБУН Институт озероведения РАН (г. Санкт-Петербург)

Защита состоится «25» декабря 2014 г. В 14-00 часов на заседании диссертационного совета Д 003.008.01 при ФГБУН Институте водных и экологических проблем СО РАН по адресу: 656038 г. Барнаул, ул. Молодежная, 1.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Института водных и экологических проблем СО РАН и на сайте www.iwep.ru.

Отзывы на автореферат в двух экземплярах, подписанные и заверенные печатью организации, просим высылать по адресу: 656038 г. Барнаул, ул. Молодежная, 1, Диссертационный совет, факс: (3852) 24-03-96, e-mail: iwep@iwep.ru.

Автореферат разослан «25» сентября 2014 г.

Ученый секретарь диссертационного совета
кандидат географических наук, доцент



Рыбкина И.Д.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования. Развитие экономики Российской Федерации, как и любой другой страны, в существенной степени зависит от уровня развития энергетики, которая в обозримый период времени будет складываться из трех основных видов генерирующих мощностей – ТЭС, АЭС и ГЭС. По гидроэнергетическому потенциалу Россия занимает 2-е место в мире после Китая, а по степени его использования уступает большинству стран, развивающих гидроэнергетику. При этом Россия обладает огромной территорией, очень сильно различающейся как по уровню экономического развития, так и по степени освоения имеющегося гидроэнергетического потенциала. Если в центре Европейской части России возможности развития большой гидроэнергетики практически исчерпаны, то потенциал Сибири и Дальнего Востока реализован незначительно. В последних решениях Правительства РФ предполагается создание крупных системообразующих гидроэнергетических комплексов: Нижне-Ангарского, Южно-Якутского, Витимского и Нижне-Енисейского, предусматривающего возведение крупнейшей в России и одной из самых крупных в мире Эвенкийской ГЭС мощностью 12 млн кВт.

Перспективы развития гидроэнергетики Сибири требуют решения важных научных и инженерно-экологических задач, связанных с проектированием, созданием и эксплуатацией больших и глубоких водохранилищ в суровых сибирских условиях. Изменение гидрологического режима зарегулированных участков рек в результате строительства крупных гидроузлов оказывает существенное влияние на состояние водной среды. Природные условия строительства на реках Сибири делают такие воздействия особенно масштабными и сложными. Изменения состояния водной среды могут носить негативный характер и требуют предварительной оценки на этапе проработки экологических последствий реализации гидротехнических проектов. Эффективным подходом для изучения гидрологических процессов на зарегулированных участках рек является применение методов математического моделирования. Этим определяется актуальность темы исследования, связанного с разработкой новых и совершенствованием существующих математических моделей гидрологических процессов в водохранилищах и нижних бьефах гидроузлов.

Изученность проблемы. В результате строительства высоконапорных ГЭС существенно меняется гидрологический режим зарегулированных участков рек. Разработке математических моделей для описания гидрологических процессов в водохранилищах и нижних бьефах ГЭС посвящены работы Абраменкова Н.М., Акопяна М.А., Аландера Дж., Архипова Б.В., Астраханцева Г.П., Белолипецкого В.М., Беннета Дж., Бреховских В.Ф., Бугрова А.Н., Бузина В.А., Васильева О.Ф., Воеводина А.Ф., Гамильтона Н., Дебольского В.К., Деболь-

ской Е.И., Дейка Дж.М.К., Демина Ю.Л., Денисовой А.И., Донченко Р.В., Квона В.И., Кеннона Дж., Климка В.И., Козлова Д.В., Кочергина В.П., Никофоровской В.С., Орлоба Дж., Пеховича А.И., Саймонса Т., Саркисяна А.С., Свенссона У., Сполдинга Д.Б., Сундарама Т.Р., Рема Р.Г., Руховца Л.Г., Рьяна П.Дж., Тимченко В.М., Трегуб Г.А., Филатова Н.Н., Харлемана Д.Р.Ф., Хубера В.С., Хуокумы М.А., Чена Г.Т., Цветовой Е.А., Шаталиной И.Н., Шлычкова В.А., Эдельштейна К.К. и др.

При строительстве глубоких водохранилищ на реках Сибири складываются условия, определяющие своеобразие протекания гидрологических процессов на зарегулированных участках рек. Время заполнения крупных водохранилищ составляет годы и даже десятки лет. Уже в начальный период заполнения водохранилищ формируется вертикальная плотностная (в основном, температурная) стратификация. Уровень водной поверхности водохранилищ постоянно меняется как при их заполнении, так и эксплуатации. Значительную часть года сибирские водохранилища покрыты льдом.

Замедление водообмена на участке водохранилища приводит к изменению потока взвешенных речных наносов через створ плотины. При заполнении водохранилищ вымываются загрязнители из их ложа. Это происходит в условиях формирующейся вертикальной стратификации, которая существенно затрудняет процессы эффективного перемешивания водных масс по глубине и создает условия для вертикальной стратификации растворенных примесей и газов в условиях недостаточной подготовки ложа водохранилищ.

На участках рек в нижних бьефах гидроузлов зимой образуется полынья, а летом снижается температура воды. Изменение температурного режима и условий газообмена приводят к изменению состояния водной среды, влияют на речную флору и фауну.

Анализ публикаций показал, что описание вышеперечисленных и других важных гидрологических процессов типа вертикального турбулентного тепло- и массопереноса или селективного оттока в стратифицированных водохранилищах недостаточно проработаны. Причем, для описания гидрологических процессов на зарегулированных участках рек во многих практически важных случаях достаточно использовать математические модели малой размерности.

Нужно отметить, что проектируемые глубокие водохранилища ГЭС на сибирских реках следует относить к малоизученным водным объектам, по которым имеется сравнительно немного исходной информации (морфометрической, гидро- и метеорологической и т.д.). Это требует разрабатывать и использовать математические модели той минимальной размерности, которая позволяет воспроизводить основные особенности исследуемых гидрологических процессов.

Объекты исследования: глубокие стратифицированные водохранилища и нижние бьефы проектируемых, строящихся и эксплуатируемых крупных ГЭС на реках Сибири.

Предмет исследования: математические модели гидрологических процессов в глубоких стратифицированных водохранилищах и нижних бьефах ГЭС.

Цель работы и задачи исследований. Целью работы является разработка комплекса математических моделей малой размерности для описания гидрологических процессов в водохранилищах и нижних бьефах ГЭС и их применение для изучения изменения состояния водной среды при строительстве крупных водохранилищ на реках Сибири для решения научных и научно-практических задач.

В соответствии с целью работы поставлены следующие **задачи:**

1. Обосновать применение математических моделей малой размерности для описания гидрологических процессов на зарегулированных участках рек для оценки изменения состояния водной среды под воздействием строительства крупных гидроузлов на реках Сибири.

2. Разработать одномерную вертикальную модель для описания гидроледотермических процессов в глубоком замерзающем водохранилище в годовом и многолетнем масштабах с уточненным описанием селективного водозабора и турбулентного переноса.

3. Разработать одномерную горизонтальную модель гидроледотермических процессов в нижних бьефах ГЭС, описывающую формирование и динамику полыньи с учетом видового состава шуги и влияния ледяного покрова на гидравлику речного потока.

4. На основе усовершенствованной одномерной вертикальной гидроледотермической модели построить комплекс моделей для описания процессов переноса взвешенных речных наносов, растворенных примесей и растворенного кислорода в глубоких сибирских водохранилищах.

5. Разработать алгоритмы численной реализации математических моделей гидрологических процессов в водохранилищах и нижних бьефах ГЭС и создать компьютерные программы для решения прогнозных научно-исследовательских и практических задач. На основе разработанного комплекса гидрологических моделей выполнить исследования для оценки изменения состояния водной среды при реализации проекта строительства крупного гидроузла в условиях Сибири (на примере Эвенкийской ГЭС).

6. Для апробации построенных моделей процессов тепло- и массопереноса в глубоких стратифицированных водохранилищах выполнить натурные и теоретические исследования гидрологического режима Телецкого озера – водоема-аналога глубоких сибирских водохранилищ.

7. С использованием разработанной одномерной горизонтальной гидроледотермической модели построить численную модель и выполнить расчеты

процесса формирования полыньи в нижнем бьефе Новосибирской ГЭС для обоснования режима попусков из Новосибирского водохранилища в зимние периоды маловодных лет в целях обеспечения устойчивого водоснабжения г. Новосибирска.

Научная новизна работы. Автором получены следующие новые научные результаты. Разработан комплекс математических моделей малой размерности для описания гидрологических процессов на зарегулированных участках рек при строительстве крупных гидроузлов в условиях Сибири. Основу комплекса составляют усовершенствованные одномерные (1D) модели гидроледотермических процессов в глубоких стратифицированных водохранилищах и нижних бьефах высоконапорных ГЭС. Модель гидроледотермических процессов в глубоких водохранилищах описывает в одномерном вертикальном (1DV) приближении формирование плотностной стратификации в замерзающих проточных водоемах в годовом и многолетнем временных масштабах. Данная модель включает уточненные описания вертикального турбулентного обмена и зоны селективного оттока и учитывает средние расходы в горизонтальных направлениях водохранилища. Развитая одномерная горизонтальная (1DH) модель гидроледотермических процессов в нижних бьефах ГЭС позволяет учесть видовое разнообразие шугового материала и влияние изменения толщины ледяного покрова на гидравлику речного потока. На основе уточненной гидроледотермической 1DV-модели построены модели переноса взвешенных наносов, растворенных примесей и растворенного кислорода в глубоких стратифицированных водохранилищах с учетом специфики гидростроительства в Сибири.

С использованием современного измерительного оборудования выполнены многолетние натурные исследования гидрологического режима Телецкого озера – водоема-аналога глубоких сибирских водохранилищ и получены уточненные данные по пространственно-временной картине распределения тепла и растворенного кислорода в водоеме. Выполнен сравнительный анализ результатов расчетов формирования температурной стратификации Телецкого озера по гидротермическим 1DV- и 3D-моделям с данными измерений.

С использованием разработанной гидроледотермической 1DH-модели построена численная модель и выполнены расчеты формирования полыньи в нижнем бьефе Новосибирского гидроузла. Получены результаты сопоставительных расчетов температуры воды в нижнем бьефе по 1DH- и 2DH-моделям. Проведено сравнение численных и натурных данных о влиянии ледяного покрова на уровни водной поверхности в районе основного водозабора г. Новосибирска (НФС-5).

Достоверность полученных результатов определяется тем, что предложенные математические и численные модели основаны на фундаментальных законах гидромеханики и теории разностных схем, а результаты численных расчетов количественно совпадают с натурными данными по нижнему бьефу

Красноярской ГЭС и Новосибирского гидроузла и результатами наблюдений по Телецкому озеру. Достоверность результатов по моделированию турбулентных потоков определялась прямым путем — численным моделированием ряда сдвиговых турбулентных течений и сравнением результатов расчетов и экспериментов.

Практическая значимость и реализация результатов. С использованием разработанного комплекса гидрологических 1D-моделей дана оценка воздействия строительства проектируемых крупных гидроузлов на изменение гидрологического режима сибирских рек Катунь, Томь, Тимптон и Нижняя Тунгуска на стадии предпроектных исследований. В том числе рассмотрено применение селективного водозабора для уменьшения негативных воздействий гидростроительства на состояние водной среды. Рассчитанные количественные характеристики гидроледотермического режима нижнего бьефа Новосибирской ГЭС могут быть использованы для обоснования режима пусков из Новосибирского водохранилища в зимние периоды маловодных лет в целях обеспечения устойчивого водоснабжения г. Новосибирска.

На основе математических моделей гидроледотермических процессов в водохранилищах и нижних бьефах ГЭС созданы и зарегистрированы в РОСАПО 4 программных комплекса. Ядро программного комплекса «Гидроледотермика-1DH (Полынья)», созданного на основе 1DH-модели, использовано для разработки учебно-научной установки по тематике работ Алтайского научно-образовательного центра информационных технологий (АНОЦ ИТ).

Результаты исследований по разработке математических моделей легли в основу инновационного проекта «Программные комплексы для численного моделирования процессов тепломассопереноса в водоемах, водотоках и на водосборе», который стал победителем Всероссийской программы СТАРТ2005.

Работа выполнялась в соответствии с планами НИР ИВЭП СО РАН, в интеграционных проектах СО РАН: №№ 09-23, 09-95, 12-42, 12-132, в проекте № 16-7 Программы Президиума РАН «Изменение окружающей среды и климата: природные катастрофы», поддержана Российским фондом фундаментальных исследований (грант № 06-05-65076).

Апробация работы. Основные результаты работы были доложены на III-VI конференциях «Динамика и термика рек, водохранилищ, внутренних и окраинных морей» (Москва, 1989, 1994, 1999, 2004), на III Всесоюзной конференции «Актуальные вопросы теплофизики и физической гидродинамики» (Новосибирск, 1989), на общественно-научной конференции «Катунский проект: проблемы экспертизы» (Новосибирск, 1990), на международной школе «Application of Computers in Hydrotechnics and Water Source Protection» (Varna, 1990), на XIX и XX Всесоюзных школах «Математическое моделирование в проблемах рационального природопользования» (Ростов-на-Дону, 1991, 1992), на IV Всесоюзной школе «Математические проблемы экологии» (Душанбе, 1991), на

XXIV конгрессе IAHN «Hydraulic research in a world that needs water» (Madrid, 1991), на Первой Всесибирской конференции «Математические проблемы экологии (МАПЭК-92)» (Новосибирск, 1992), на школе-семинаре «Комплексы программ математической физики» (Новосибирск, 1993), на 2-й международной конференции «CIS Joint Conference on Environmental Hydrology and Hydrogeology» (Washington, 1993), на международной конференции «Hydroscience and Engineering» (Washington, 1993), на 2-й Всероссийской конференции «Математические проблемы экологии (МАПЭК-94)» (Новосибирск, 1994), на школе-семинаре «Моделирование гидроледотермических и гидрохимических процессов в реках, озерах и водохранилищах» (Новосибирск, 1994), на международном симпозиуме «Гидрологические и экологические процессы в водоемах и их водосборных бассейнах» (Новосибирск, 1995),), на VIII международной конференции «Inzynieria Srodowiska» (Wroclawiu, 1996), на международной научной конференции «Фундаментальные проблемы воды и водных ресурсов на рубеже третьего тысячелетия» (Томск, 2000), на 7-м международном семинаре «Physical Processes in Natural Waters» (PPNW7) (Петрозаводск, 2003), на 2-м международном симпозиуме «The West Exploitation and Sustainable Development» (Urumqi, 2005), на научной конференции «Фундаментальные проблемы изучения и использования воды и водных ресурсов» (Иркутск, 2005), на Международных конференциях «Вычислительные технологии в науке, технике и образовании» (Кемерово, 2005; Павлодар, 2006) на Международной научно-практической конференции «Современные проблемы водохранилищ и их водосборов» (Пермь, 2007, 2009, 2011, 2013), на 65-й всероссийской научно-технической конференции НГАСУ (Сибстрин) «Актуальные проблемы строительной отрасли» (Новосибирск, 2008), на Всероссийской конференции «Водные проблемы крупных речных бассейнов и пути их решения» (Барнаул, 2009), на III всероссийской научной конференции «Фундаментальные проблемы воды и водных ресурсов» (Барнаул, 2010), на III и IV всероссийских научных конференциях «Ледовые и термические процессы на водных объектах России» (Онега, 2011; Рыбинск, 2013), на Всероссийской конференции «Устойчивость водных объектов, водосборных и прибрежных территорий, риски их использования» (Калининград, 2011), на Международном симпозиуме «Улучшение использования водных ресурсов в изменяющемся мире» (Сан-Пауло, 2012), на Всероссийской конференции «Водные и экологические проблемы Сибири и Центральной Азии» (Барнаул, 2012), на Всероссийской конференции «Безопасность и живучесть технических систем» (Красноярск, 2012), на VII Всероссийском гидрологическом съезде (Санкт-Петербург, 2013).

Публикации. По теме диссертации опубликовано более 60 работ, в том числе 18 статей в рецензируемых изданиях, рекомендуемых ВАК, 1 монография (в соавторстве). Получено 4 свидетельства о регистрации программ для ЭВМ. В автореферате приведен список из 48 наиболее значимых публикаций.

Личный вклад автора состоит в постановке задач, разработке способов их решения, научном руководстве работами, непосредственном участии в выполнении расчетов и полевых исследований, теоретическом обобщении полученных результатов.

Основные научные положения, выносимые на защиту:

1. Комплекс математических моделей малой размерности для описания гидро- и ледотермических процессов на зарегулированных участках рек – в глубоких водохранилищах и нижних бьефах для прогноза влияния строительства высоконапорных ГЭС на состояние водной среды сибирских рек.
2. Построенный на основе усовершенствованной гидротермической модели стратифицированного водоема комплекс математических моделей для описания процессов переноса взвешенных речных наносов, растворенных примесей и кислорода в глубоких сибирских водохранилищах.
3. Полученные с использованием разработанного комплекса гидрологических моделей результаты прогностических расчетов по оценке изменения состояния водной среды сибирских рек при строительстве проектируемых ГЭС, в том числе для р. Нижняя Тунгуска при строительстве Эвенкийской ГЭС.
4. Результаты натурных и теоретических исследований термического и кислородного режимов Телецкого озера как водоема-аналога глубоких сибирских водохранилищ, выполненных для апробации разработанных гидрологических моделей.
5. Численная модель и результаты расчетов гидроледотермических процессов в нижнем бьефе Новосибирской ГЭС для обоснования режима пусков из Новосибирского водохранилища в зимние периоды маловодных лет в целях обеспечения устойчивого водоснабжения г. Новосибирска.

Структура и объем работы. Диссертация состоит из введения, семи глав, заключения, списка литературы (310 наименований) и 6 приложений. Работа изложена на 332 страницах текста, иллюстрирована 84 рисунками и 13 таблицами.

Благодарности. Автор выражает благодарность академику РАН Васильеву О.Ф., всем соавторам и сотрудникам Института водных и экологических проблем СО РАН, оказавшим неоценимую поддержку на разных этапах выполнения работы.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во Введении обосновывается актуальность работы, дается краткий обзор научной литературы по направлению исследований, формулируются цель и задачи исследований, отмечаются степень новизны полученных результатов и их практическая значимость, приводится структура и общая характеристика работы, излагается краткое содержание работы и даются сведения по ее апробации.

ГЛАВА 1. МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ДЛЯ ПРОГНОЗОВ ВЛИЯНИЯ СТРОИТЕЛЬСТВА КРУПНЫХ ВОДОХРАНИЛИЩ НА ГИДРОЛОГИЧЕСКИЙ РЕЖИМ РЕК

Строительство крупных водохранилищ гидроэнергетического назначения на сибирских реках приводит к существенным изменениям состояния водной среды на зарегулированных участках рек. К числу важных задач при проектировании строительства перспективных гидроэнергетических комплексов относятся прогнозы гидродинамических, гидрофизических и гидрохимических процессов в водохранилищах и нижних бьефах ГЭС и гидроузлов.

В **разд. 1.1** обсуждаются проблемы, связанные с изменением гидрологического режима рек при строительстве крупных водохранилищ на реках Сибири. При этом гидрологические процессы на участках водохранилищ и нижних бьефов рассматриваются как процессы, определяющие абиотические факторы водной среды. Исходя из того, что в основе всех гидрологических процессов (гидродинамических, ледовых, гидрохимических и др.) лежит поступление, перераспределение и трансформация энергии, то прогноз годового термического режима водохранилища является базисом для изучения всех, протекающих в водных объектах процессов. Иначе говоря, при описании гидрологических процессов в глубоких водохранилищах и нижних бьефах ГЭС можно использовать гидротермические модели, позволяющие учесть основные особенности рассматриваемых процессов для условий гидростроительства в Сибири.

В **разд. 1.2** рассматриваются математические модели различного уровня сложности и размерности для описания гидрологических процессов в глубоких стратифицированных водохранилищах высоконапорных ГЭС: 1) одномерные вертикальные (1DV) модели непрерывной стратификации в глубоких озерах и водохранилищах, где на первый план выходит описание вертикального переноса тепла, обусловленного тепловым и динамическим взаимодействием водоема с атмосферой; 2) двумерные продольно-вертикальные (2DV) модели, построение которой выполнено путем осреднения исходных трехмерных термогидродинамических уравнений водоема по его ширине; 3) трехмерные (3D) модели, используемые для описания гидродинамики и термического режима глубоких стратифицированных водоемов, в первую очередь озер.

Анализ перечисленных моделей показал, что область применения 2DV – моделей ограничивают, в общем случае, отсутствие качественных исходных данных для численного моделирования и вычислительные ресурсы, требующиеся для проведения больших объемов вариантных расчетов. Важным условием успешного применения 3D-моделей также является наличие качественных натуральных данных для калибровки и верификации моделей. Для проектируемых крупных водохранилищ сибирских ГЭС характерны значительные величины годового водообмена и изменения уровня водной поверхности. С учетом этого,

численное прогнозирование на основе 3D-моделей при многолетних периодах наполнения крупных сибирских водохранилищ выглядит достаточно проблематичным.

В настоящее время, несмотря на высокий уровень развития вычислительных технологий и широкое использование многомерных моделей при решении различных водно-экологических задач, достаточно простые и надежные 1DV-модели гидрологических процессов часто применяются при прогнозах воздействия крупного гидростроительства на состояние водной среды зарегулированных участков рек. При этом достигается определенный компромисс между малым количеством имеющихся входных данных и возможностью учета основных эффектов, важных при описании рассматриваемых гидрологических процессов. Поэтому актуальным является вопрос о дальнейшем развитии математических 1DV-моделей, описывающих вертикальное распределение температуры в глубоких замерзающих водохранилищах.

В **разд. 1.3** приведены примеры математических моделей разной размерности для описания гидроледотермических процессов в нижних бьефах ГЭС. Часто численные расчеты проводятся при малых объемах исходных данных, поэтому важно применять достаточно простые и надежные гидрологические модели для оценки изменения ледотермического режима на зарегулированных участках рек. Показано, что основные вопросы прогнозирования изменения гидроледотермического режима нижних бьефов сибирских ГЭС могут быть решены с использованием одномерных горизонтальных (1DH) моделей.

В **разд. 1.4** дан анализ возможностей и ограничений использования прикладных программных продуктов (ППП) для решения гидрологических задач. Отмечается, что коммерческие ППП на основе многомерных моделей имеют как широкий диапазон возможностей для выполнения гидрологических расчетов, так и существенные ограничения по детализации пространственного и временного разрешения для моделируемых объектов и процессов, по требованиям к входной информации, точности описания процессов и т.д. Для проектируемых сибирских водохранилищ многие требования ППП к пространственно-временному разрешению, составу и точности морфометрической, гидрометеорологической, гидрохимической и прочей информации для калибровки и верификации многомерных моделей трудно выполнить.

ГЛАВА 2. МОДЕЛИРОВАНИЕ ГИДРОФИЗИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ В ГЛУБОКИХ СТРАТИФИЦИРОВАННЫХ ВОДОХРАНИЛИЩАХ

Глава посвящена усовершенствованию математического описания гидроледотермических процессов большого временного масштаба в глубоких стратифицированных водохранилищах. В **разд. 2.1** обсуждается теоретическое описание гидротермических процессов в глубоких стратифицированных водохра-

нилищах на основе моделей малой размерности. Подобные математические модели непрерывной стратификации впервые рассмотрены в работах Дейка Дж.М.К., Россинского К.И., Харлемана Д.Р.Ф., Хубера В.С. и других авторов и опираются на допущение о том, что изотермические слои в водоеме близки к горизонтальным. Это предположение позволяет свести задачу к одному уравнению переноса тепла с одной пространственной координатой. Исследования в данном направлении продолжены работами Сундарамы Т.Р., Рэма Р.Г. и их коллег, где при описании вертикального турбулентного обмена коэффициент турбулентной теплопроводности полагается зависящим от числа Ричардсона. В работах Васильева О.Ф., Квона В.И. и их коллег для определения коэффициентов вертикального турбулентного обмена использована ($E-\varepsilon$)-модель турбулентности. Отличительная черта данной модели – учет индуцированного ветровым воздействием на свободную поверхность горизонтального сдвигового течения и генерируемой им турбулентности, что важно при моделировании формирования термоклина и использовано в диссертации.

В разд. 2.2 описывается усовершенствованная одномерная вертикальная (1DV) модель гидротермических процессов в глубоком стратифицированном водохранилище. Для ее построения использованы методика одномерного (вертикального) представления и гидростатическое приближение. Система определяющих трехмерных конвективно-диффузионных уравнений тепло- и массопереноса осредняется по горизонтальным сечениям водохранилища с учетом соответствующих граничных условий. Модель включает уточненное описание зоны селективного оттока и дополнена кинематическими условиями, учитывающими средние расходы в горизонтальных направлениях водохранилища.

Коэффициенты эффективной вертикальной диффузии тепла K_T и импульса K_U рассчитываются по формулам

$$K_T = \lambda_T + \alpha_t \nu_t, \quad K_U = \nu + \nu_t, \quad (2.1)$$

где λ_T и ν – коэффициенты молекулярной теплопроводности и вязкости; коэффициент турбулентной вязкости $\nu_t \sim E^2/\varepsilon$ рассчитывается по ($E-\varepsilon$)-модели турбулентности; α_t – эмпирический коэффициент.

Средние уклоны поверхности водохранилища в продольном и поперечном направлениях $\langle \partial H / \partial x \rangle$ и $\langle \partial H / \partial y \rangle$ определяются заданием кинематических условий на горизонтальные компоненты скорости U и V , приближенно отражающих особенности ветровой циркуляции вод в водоеме ограниченных размеров

$$\int_0^H U(z, t) B(z) dz = Q, \quad \int_0^H V(z, t) L(z) dz = 0, \quad (2.2)$$

где ширина $B(z)$ и длина $L(z)$ водоема определяются морфометрией его ложа.

Гидротермическая 1DV-модель проточного водоема требует задания полей скорости на водостоке и водозаборе $u_{in}(z, t)$ и $u_{out}(z, t)$, соответственно, которые

обычно аппроксимируются гауссовыми распределениями. В **разд. 2.3** дано используемое уточненное описание поля скорости струи на водозаборе $u_{out}(z,t)$. Это связано с важностью оценок применения селективного водозабора для приближения ледотермического режима участков рек в нижних бьефах к естественному состоянию.

В моделях селективного оттока предполагается, что горизонтальная скорость $u_{out}(z,t)$ вне водозаборной струи равна нулю, а ее максимальное значение достигается на оси водозаборного отверстия. Для замыкания модели требуется определить ширину струи δ и профиль скорости $u_{out}(z,t)$. В работе для этого применена методика (Бочаров, Васильев, 1991), базирующаяся на том, что значения чисел Фруда для верхней и нижней частей селективной струи равны между собой и при линейных зависимостях $\rho(z)$ лежат в окрестности $Fr^{cr}=0,25$, а для разрывных профилей $\rho(z)$ – в окрестности $Fr^{cr}=0,5$. Разрыв $\rho(z)$ играет роль потенциального барьера, при преодолении которого происходит перестройка профиля скорости.

На рис. 2.1 показано изменение размеров зоны оттока в зависимости от характера вертикальной стратификации в водохранилище (расчет по уточненной гидротермической 1DV-модели (Бочаров, Зиновьев, 1991)).

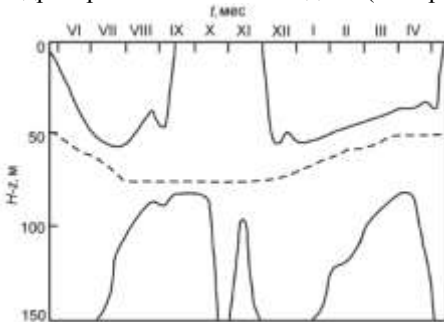


Рис. 2.1. Внутригодовая динамика зоны оттока из водохранилища. Сплошные линии – границы селективной струи; пунктирная линия – глубина оси водозаборного отверстия

Уточненное описание вертикального турбулентного переноса тепла (солёности) и импульса в ряде случаев важно для учета воздействия устойчивой плотностной стратификации на вертикальные пульсации скорости и, тем самым, на моделирование гидротермических процессов в целом. В **разд. 2.4** выполнена модификация стандартной ($E-\varepsilon$)-модели вертикального турбулентного переноса в стратифицированных водоемах путем использования алгебраических уравнений для напряжений Рейнольдса.

Для простоты предполагается отсутствие вертикальной компоненты W вектора средней скорости. Тогда процессы турбулентного переноса тепла (солёности) и импульса описываются уравнениями типа

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial z} \left[\lambda \frac{\partial T}{\partial z} - \langle w\theta \rangle \right], \quad (2.3)$$

$$\frac{\partial U}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial z} \left[\nu \frac{\partial U}{\partial z} - \langle uw \rangle \right], \quad (2.4)$$

$$\frac{\partial V}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial z} \left[\nu \frac{\partial V}{\partial z} - \langle vw \rangle \right]. \quad (2.5)$$

Здесь T и θ – средняя и пульсационная составляющая температуры (солености) воды; (U, V) и (u, v) – средние и пульсационные составляющие горизонтальной скорости потока; w – вертикальная компонента пульсации скорости; $\langle \dots \rangle$ – осреднение по ансамблю реализаций; λ , ν – коэффициенты молекулярного переноса; t – время; вертикальная координата z направлена вверх и отсчитывается от дна.

Градиентные выражения $\langle w\theta \rangle = -\lambda_t (\partial T / \partial z)$, $\langle uw \rangle = -\nu_t (\partial U / \partial z)$ и $\langle vw \rangle = -\nu_t (\partial V / \partial z)$ в сочетании со стандартной (E - ε)-моделью турбулентности приводят к замыканию уравнений (2.3)-(2.5). Здесь λ_t и ν_t – коэффициенты турбулентной теплопроводности (диффузии) и вязкости.

Усовершенствование модели турбулентного переноса выполняется путем привлечения дифференциальных уравнений переноса для турбулентных потоков импульса и тепла (корреляций второго порядка термогидродинамических полей) с последующей их заменой на алгебраические уравнения для получения следующих градиентных выражений:

$$\langle \rho'w \rangle = -d_t \rho \frac{\partial}{\partial z}, \quad \langle w\theta \rangle = -\lambda_t \frac{\partial T}{\partial z}, \quad (2.6)$$

$$\langle uw \rangle = -\nu_t \frac{\partial U}{\partial z}, \quad \langle vw \rangle = -\nu_t \frac{\partial V}{\partial z}, \quad (2.7)$$

где d_t – коэффициент турбулентного массопереноса.

Коэффициенты эффективного вертикального переноса тепла, импульса и параметров турбулентности определяются из иных, хотя схожих с формулами (2.1), выражений

$$K_T = \lambda + \lambda_t, \quad K_U = \nu + \nu_t, \quad (2.8)$$

$$K_E = \nu + C_s \frac{E}{\varepsilon} \langle w^2 \rangle, \quad K_\varepsilon = \nu + C_\varepsilon \frac{E}{\varepsilon} \langle w^2 \rangle, \quad (2.9)$$

Величины λ_t , ν_t и d_t и $\langle w^2 \rangle$ в (2.6)-(2.9) являются сложными функциями от T , U , V , E и ε ; C_s и C_ε – эмпирические коэффициенты.

Модифицированная модель турбулентности апробирована путем расчетов развития сдвигового течения в круговом канале под действием постоянного касательного напряжения, приложенного к свободной поверхности первоначально покоящейся жидкости (условия эксперимента (Kato et al., 1969)). Рассчитывалось заглупление перемешанного слоя в жидкости постоянной плотности

($\rho = \text{const}$) и устойчиво стратифицированной в начальный момент жидкости ($\partial\rho/\partial z = (\partial\rho/\partial z)_0 = 1,92 \cdot 10^{-3} \text{ г/см}^4$ при $t=0$) (Kato et al., 1969). В качестве функции T в уравнении состояния рассматривалась соленость (концентрация соли в воде).

Динамика толщины перемешанного слоя $D=D(t)$ в стратифицированной жидкости, рассчитанная с использованием двух моделей турбулентности, показана на рис. 2.2. Здесь же точками приведена экспериментальная зависимость $D=D(t)$ (Kato et al., 1969). В расчетах за нижнюю границу перемешанного слоя принималось значение z , при котором турбулентная вязкость $\nu_t = 1 \text{ см}^2/\text{с}$.

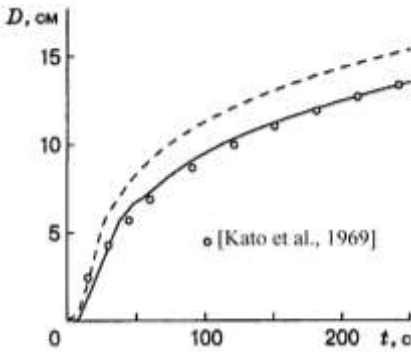


Рис. 2.2. Динамика толщины перемешанного слоя (штриховые линии – стандартная $(E-\varepsilon)$ -модель, сплошная – модифицированная модель

Полученная по модифицированной модели зависимость $D=D(t)$ находится в лучшем количественном согласии с экспериментом, чем вычисленная по стандартной $(E-\varepsilon)$ -модели, хотя качественное согласие наблюдается в обоих расчетах. На рис. 2.3 представлена скорость вовлечения $u_e = dD/dt$ нетурбулентной жидкости в турбулентную зону (размера D) в зависимости от числа Ричардсона потока Ri_0 .

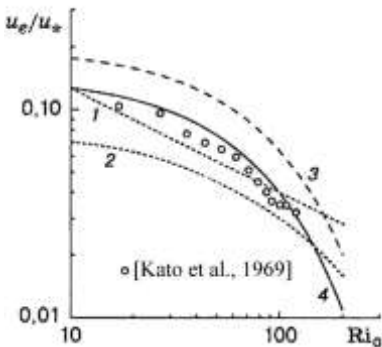


Рис. 2.3. Зависимость скорости вовлечения u_e/u_* от числа Ричардсона Ri_0 : 1 – модель с алгебраическим выражением для масштаба длины $L \sim E^{3/2} D$ [Левеллен, 1980], 2 – модель с уравнением переноса для L [Левеллен, 1980], 3 – стандартная $(E-\varepsilon)$ -модель, 4 – модифицированная модель

Из рис. 2.3 видно, что результаты, полученные по предложенной модели турбулентности, качественно и количественно согласуются с эксперименталь-

ными данными лучше, чем результаты расчетов по стандартной ($E-\varepsilon$)-модели и моделям (Левеллен, 1980).

В **разд. 2.5** выполнено уточненное моделирование роста-таяния ледяного покрова в замерзающих водохранилищах с учетом его теплосодержания. В **разд. 2.6** разработаны методы численного решения нелинейной краевой задачи, реализующей 1DV-модель. В **разд. 2.7** обсуждаются результаты расчетов термического режима проектировавшихся сибирских водохранилищ, Катунского и Крапивинского по разработанным моделям. Данные по прогнозу термического режима водохранилища Катунской ГЭС с максимальной глубиной 167,7 м (средняя глубина 70 м) представлены в **п. 2.7.1**. Объем водохранилища при полном затоплении равен 5,8 км³, среднегодовой период водообмена в условиях средней водности – 3-4 мес. Общепринятый критерий существования вертикальной плотностной (температурной) стратификации – малое значение плотностного числа Фруда ($Fr \ll 1/\pi$) (Orlob, 1982). Для Катунского водохранилища (за исключением первого года его заполнения) этот критерий удовлетворяется ($Fr=10^{-1} \div 10^{-3}$). Расчеты показали, что температура сбрасываемой из Катунского водохранилища воды T_{out} будет летом ниже температуры воды в естественных условиях до 7 °С, в то время как зимой T_{out} будет достигать 3 °С, и в нижнем бьефе образуется полынья. Использование селективного (поверхностного) водозабора позволит существенно приблизить значения температуры вытекающей воды в летние и зимние месяцы к естественным значениям. В **п. 2.7.2** приведены результаты расчетов годового термического режима водохранилища Крапивинского гидроузла со створом плотины на расстоянии 385 км от устья р. Томь для различных исходных данных по метеоусловиям и водности. Показано, что можно приблизить температуру сбрасываемой в нижний бьеф воды к наблюдаемой в естественных условиях путем организации поверхностного водозабора в летние (июль-август) и зимние (январь-март) месяцы.

ГЛАВА 3. МОДЕЛИРОВАНИЕ ГИДРОЛЕДОТЕРМИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ В НИЖНИХ БЬЕФАХ ГИДРОУЗЛОВ

В **главе** разрабатывается уточненная математическая модель гидроледотермических процессов в нижних бьефах ГЭС и гидроузлов. В **разд. 3.1** обсуждается влияние строительства новых или изменения режима эксплуатации действующих гидроузлов на характеристики ледотермического режима рек на участках нижних бьефов. В **разд. 3.2** строится комплексная одномерная горизонтальная модель (так называемая 1DH-модель) гидроледотермических процессов в нижних бьефах ГЭС. Ее базовой составляющей является модель гидравлического режима нестационарного руслового потока. Среди прочих основных моделей модели температурного режима реки, образования и переноса шугового материала, движения кромки льда и роста-таяния ледяного покрова.

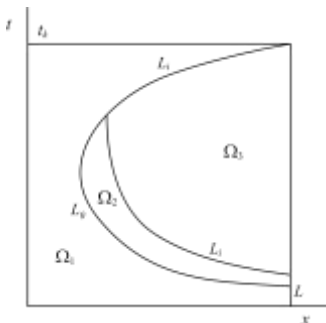


Рис. 3.1. Схематичное представление области определения задачи

Область определения задачи $\Omega \equiv \{(x, t): 0 \leq x \leq L, 0 \leq t \leq t_k\}$ ($0, L$ – координаты створа плотины и замыкающего створа, соответственно; t_k – расчетный период времени) разбивается на подобласти Ω_1, Ω_2 и Ω_3 : $\Omega = \Omega_1 \cup \Omega_2 \cup \Omega_3$ с учетом специфики определяющих физических процессов следующим образом (см. рис. 3.1):

1) на пространственно-временной подобласти Ω_1 рассматривается нестационарное течение в открытом русле в отсутствие ледовых процессов;

2) подобласти Ω_2 отвечает участок реки, где протекают процессы шугообразования;

3) участку реки под ледяным покровом соответствует подобласть Ω_3 .

Представленное на рис. 3.1 разбиение области определения Ω отвечает упрощенной ситуации движения кромки льда – однократному ее наступлению-отступлению. Линия $L_0 = L_0(t)$ отмечает положение створа нулевой изотермы при наступлении кромки льда («заныривание» нулевой изотермы под лед на рис. 3.1 не отображено). Положение створа нулевой изотермы L_0 для любого $t \in (0, t_k)$ определяется из следующих условий $T(L_0) = 0$ и $T(x) > 0$ при $x < L_0$.

Кривой $L_i = L_i(t)$ на рис. 3.1 показано положение кромки льда. В обозначениях L_0, L_i и L участку реки, где протекают процессы шугообразования, соответствует область $\Omega_2 = \{(x, t): L_0 \leq x \leq L_i, 0 \leq t \leq t_k\}$ (если кромка ледяного покрова находится вне границ области Ω , то полагаем $L_i \equiv L$); область сплошного ледяного покрова может быть определена как $\Omega_3 = \{(x, t): L_i \leq x \leq L, 0 \leq t \leq t_k\}$. В данной постановке делается предположение о сплошности ледяного покрова, т.е. не рассматриваются случаи возникновения полыньи правее границы L_i на рис. 3.1.

Для расчета гидравлического режима водотока в пространственно-временной области Ω решается система одномерных уравнений Сен-Венана, описывающая нестационарное течение в русле с учетом наличия льда в переменных ω и Q , где ω – площадь поперечного сечения потока; Q – расход воды.

Условия сопряжения на внутренних границах (рис. 3.1) записываются в следующем виде:

$$\begin{aligned} Q_{L_0-0} &= Q_{L_0+0}, & \omega_{L_0-0} &= \omega_{L_0+0}, \\ Q_{L_i-0} &= Q_{L_i+0}, & \omega_{L_i-0} &= \omega_{L_i+0}. \end{aligned} \quad (3.1)$$

В подобластях Ω_1 и Ω_2 $n=n_0$, где n_0 – шероховатость русла открытого потока. При наличии ледяного покрова (подобласть Ω_3) следует учитывать изменение гидрологических характеристик речного потока при определении смоченного периметра χ и n . Смоченный периметр увеличивается из-за добавления к смоченному периметру открытого потока χ_0 ширины подошвы льда χ_i .

Для моделирования процессов теплообмена на участке реки использовано следующее уравнение:

$$\frac{\partial(\omega T)}{\partial t} + \frac{\partial(QT)}{\partial x} = \frac{B}{c_p \rho} (\Phi_\Sigma + q_t). \quad (3.2)$$

Здесь T – температура воды, c_p – теплоемкость воды, B – ширина русла на уровне свободной поверхности воды, Φ_Σ – тепловой поток на границе раздела «вода-воздух», q_t – удельный приток тепла.

Начально-краевые условия для уравнения (3.2) имеют вид:

$$T = T_{in}(t) \text{ при } x = 0, \quad T = T_0(x) \text{ при } t = 0, \quad (3.3)$$

а условия сопряжения

$$T_{L_0-0} = T_{L_0+0}, \quad T_{L_i-0} = T_{L_i+0}. \quad (3.4)$$

Оба условия сопряжения (3.4) используются при моделировании наступления кромки ледяного покрова. При отступлении ледяного покрова достаточно условия сопряжения на кромке льда.

В подобласти Ω_2 уравнение (3.2) можно заменить соотношением

$$T = 0. \quad (3.5)$$

Когда температура воды, рассчитываемая из решения задачи (3.2)-(3.5), опускается до 0 °С, начинаются процессы формирования первичных форм плавающего льда (сала, шуги). Расход ледового материала (без выделения форм шуги) Q_i математически описывается балансовым уравнением типа (3.2), в котором ρ , c_p и T заменяются на ρ_i , Λ и C_i :

$$\frac{\partial(\omega C_i)}{\partial t} + \frac{\partial(Q C_i)}{\partial x} = \frac{B}{\Lambda \rho_i} (\hat{\Phi}_\Sigma + q_t). \quad (3.6)$$

Здесь C_i – концентрация шуги, ρ_i и Λ – плотность и удельная теплота плавления льда, $\hat{\Phi}_\Sigma$ – тепловой поток от воды в атмосферу ($\hat{\Phi}_\Sigma = (1 - \beta)\Phi_{wa} + \beta\Phi_{ia}$, где β – коэффициент шугохода; Φ_{wa} и Φ_{ia} – потоки тепла от воды и льда в атмосферу соответственно).

Уравнение (3.6) описывает процессы шугообразования на подобласти Ω_2 . На подобластях Ω_1 и Ω_3 предполагается

$$C_i = 0. \quad (3.7)$$

Для уравнения (3.7) задается следующее краевое условие:

$$C_i = 0 \quad \text{при } x = L_0. \quad (3.8)$$

В силу выбора момента времени $t=0$ линия L_0 не касается оси абсцисс. Это позволяет не задавать начальное условие для уравнения (3.6).

При определенных предположениях о минимальной толщине кромки льда ζ_i^0 , при которой она не разрушается под воздействием речного потока, и допущении, что вся образовавшаяся шуга идет на формирование ледяного покрова, уравнение баланса шуги у кромки льда определяет ее движение вверх по течению. Такая постановка задачи предполагает наличие перед кромкой ледяного покрова участка реки, на котором протекают процессы шугообразования. Считается, что лед ниже кромки не исчезает в результате теплового или механического воздействия (появление, к примеру, теплового источника на участке реки, где сформировался ледяной покров, может сделать лед бесконечно тонким, но не нарушает его сплошности по длине реки).

Отступление ледяного покрова на рассматриваемом участке реки связывается с исчезновением шугообразующего участка перед кромкой льда; для расчета L_i в данном случае решается описанная задача стаивания ледяного покрова с учетом его прочностных характеристик.

При решении вопроса о моменте появления кромки льда в области Ω формально полагаем $L_i|_{t=0} = L$, считая, что движение кромки льда в области Ω начинается в тот момент времени t_0 , когда кривая L_0 в первый раз пересечет линию $x=L$.

Изменение толщины ледяного покрова в подобласти Ω_3 описывается уравнением

$$\rho_i \Lambda \frac{\partial \zeta_i}{\partial t} = -(q_{ia} - q_{wi}), \quad (3.9)$$

где ζ_i – толщина льда, q_{wi} и q_{ia} – потоки тепла на границах раздела «вода-лед» и «лед-атмосфера» соответственно.

При использовании уравнения (3.9) предполагается, что ведущими тепловыми процессами являются теплообмен льда с атмосферой и подстилающей водной поверхностью. Приход тепла к нижней поверхности ледяного покрова рассчитывается по формуле:

$$q_{wi} = \alpha_{wi} T,$$

где α_{wi} – коэффициент теплообмена между водой и льдом, зависящий от скорости течения, глубины реки и температуры воды.

Момент разрушения льда $t^m(x)$ в створе с координатой x определяется из условия разрушения льда

$$\sigma^m \zeta_i(x, t^m) = f(P),$$

где σ^m – величина разрушающего напряжения для льда, f – функция от гидравлических характеристик подледного течения P .

В уравнении (3.6) для задания теплообмена поверхности водотока с атмосферой при наличии шуги используется параметр β , соответствующий степени покрытия шугой водной поверхности. Значение β в «одновидовой» модели шугообразования определяется из эмпирических зависимостей, содержащих коэффициенты с большим разбросом их величин, что может в отдельных случаях приводить к погрешностям в определении расходов шуги. В **разд. 3.3** предлагается модель переноса шуги на участке нижних бьефов гидроузлов с учетом видового разнообразия ледяного материала. Процессы шугообразования описываются следующей системой балансовых уравнений (Абраменков, 1984):

$$\frac{\partial M_s}{\partial t} + \frac{\partial(M_s u_s)}{\partial x} = \Psi_{fs}, \quad (3.10)$$

$$\frac{\partial M_f}{\partial t} + \frac{\partial(M_f u_f)}{\partial x} = -\Psi_{fs} - \frac{\theta \Psi_{fa}}{\Lambda}, \quad (3.11)$$

$$\frac{\partial(\beta B)}{\partial t} + \frac{\partial(\beta B u_s)}{\partial x} = \Psi_\beta, \quad (3.12)$$

где

$$\Psi_{fs} = \varphi_1 + \beta \varphi_2 \bar{M}_f,$$

$$\Psi_{fa} = B \beta \Phi_{w-a},$$

$$\Psi_\beta = \frac{\beta \varphi_2 M_f}{\alpha_M},$$

$$\theta = \begin{cases} 0, & T > 0^\circ \text{C} \\ 1, & T \leq 0^\circ \text{C} \end{cases}.$$

Здесь M_s и M_f – удельные (на единицу длины русла) массы поверхностной шуги и внутриводного льда; u_s и u_f – скорости движения поверхностной шуги и внутриводного льда; Ψ_{fs} , Ψ_{fa} , и Ψ_β – члены, описывающие фазовые переходы для форм шуги. Параметр α_M характеризует вновь образующиеся и всплывающие шуговые скопления; φ_1 и φ_2 – параметры модели, интегрально учитывающие процессы коагуляции ледовых образований. Полагаем, что u_s и u_f равны скорости течения.

Источниковый член Ψ_{fa} в (3.11) описывает процесс кристаллизации льда при переохлаждении воды, а Ψ_{fs} и Ψ_β в (3.10)-(3.12) – процессы перехода массы внутриводного льда в поверхностную шугу.

В разд. 3.4-3.5 строятся алгоритмы численной реализации разработанной 1ДН-модели и приводятся результаты ее апробации на расчетах ледотермических режимов нижних бьефов Красноярской и Новосибирской ГЭС. В разд. 3.6 даны примеры расчетов по разработанной ледотермической 1ДН-модели нижних бьефов Катунской ГЭС и Крапивинского гидроузла на реках Катунь (п. 3.6.1) и Томь (п. 3.6.2) соответственно. На рис. 3.2 показаны размеры полыньи в нижнем бьефе Катунской ГЭС при разных метеоусловиях и водности. В средние по температуре зимы минимальные размеры полыньи составят 20-50 км. В теплые зимы длина полыньи в январе-феврале может быть до 120 км.

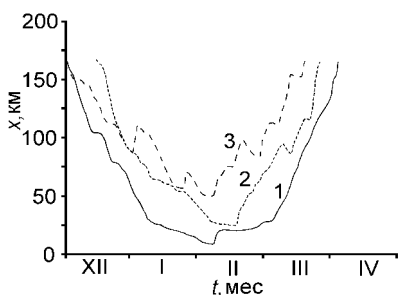
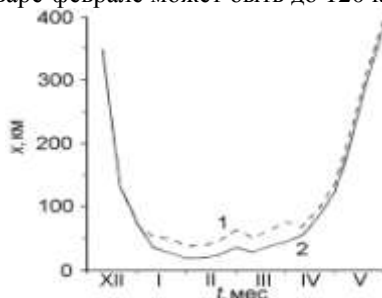


Рис. 3.2. Катунская ГЭС. Прогноз размеров **Рис. 3.3.** Крапивинский гидроузел. Поло-
 полыньи в нижнем бьефе: 1 – холодный, жение кромки льда при проектном (1) и по-
 2 – средний и 3 – теплый годы верхностном (2) водозаборе



Расчеты показали, что в зимние месяцы ниже створа плотины Крапивинского ГУ возникнет полынья длиной 60-80 км (рис. 3.3). При поверхностном водозаборе из водохранилища размеры полыньи могут сократиться до 20-40 км.

ГЛАВА 4. ПРОГНОЗИРОВАНИЕ ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ НА ЗАРЕГУЛИРОВАННЫХ УЧАСТКАХ РЕК

Содержанием главы является разработка комплекса моделей малой размерности для прогноза трансформации стока взвешенных и растворенных примесей и газов при строительстве глубоких сибирских водохранилищ. В разд. 4.1 решается проблема описания транспорта взвешенных речных наносов в глубоком водоеме при наличии вертикальной плотностной стратификации. Характеристика проблемы дана в п. 4.1.1. В п. 4.1.2 получена система определяющих уравнений путем осреднения исходных трехмерных конвективно-диффузионных уравнений переноса взвешенных речных наносов по горизонтальным сечениям водохранилища с учетом условий отражения частиц на свободной поверхности водоема и частичного отражения на твердой границе. Результирующее уравнение для описания процесса переноса i -й фракции наносов имеет вид

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial t}(\Omega C^i) + \frac{\partial}{\partial z}((Q_w - w_s^i \Omega) C^i) = \\ = \frac{\partial}{\partial z} \left[\Omega K_C^i \frac{\partial C^i}{\partial z} \right] + q_{in} C_{in}^i - q_{out} C^i - w_s^i C^i \frac{\partial \Omega}{\partial z}. \end{aligned} \quad (4.1)$$

Для (4.1) задаются следующие начально-краевые условия:

$$C^i(z, 0) = C_0^i(z), \quad (4.2)$$

$$\left(K_C^i \frac{\partial C^i}{\partial z} + w_s^i C^i \right)_{z=H} = 0, \quad \left(K_C^i \frac{\partial C^i}{\partial z} \right)_{z=0} = 0. \quad (4.3)$$

Здесь C^i – концентрация i -й фракции взвешенных наносов; $\Omega = \Omega(z)$ – площадь горизонтального сечения водохранилища на высоте z ; Q_w – вертикальный расход воды (т.е. $W = Q_w / \Omega$ – вертикальная скорость); w_s^i – гидравлическая крупность i -ой фракции наносов; C_{in}^i – концентрация i -й фракции поступающих в водохранилище взвешенных наносов; K_C^i – коэффициент турбулентной диффузии i -й фракции наносов; $H = H(t)$ – глубина водохранилища.

В исходной трехмерной постановке предполагается, что существует поток осаждающихся на дно наносов, равный $w_s^i C^i$. С учетом этого условия при осреднении в правой части уравнения (4.1) появляется член, описывающий осаждение наносов на дно водоема. Для определения вертикального потока Q_w и коэффициентов диффузии K_C^i используется гидротермическая 1DV-модель.

В качестве уравнения состояния используется зависимость

$$\rho(T, C) = \rho_w(T) + \sum_{i=1}^N \left(1 - \frac{\rho_w(T)}{\rho_C^i} \right) \cdot C^i, \quad (4.4)$$

где $\rho_w(T)$ – плотность воды; ρ_C^i – плотность наносов i -й фракции; N – число учитываемых фракций наносов.

Чтобы включить в уравнение (4.4) только мельчайшие фракции наносов, которые не осаждаются полностью на верхних участках водохранилища, полагается $N = \max i : H_{\max} / w_s^i > 0, 1 t_r$, где t_r – среднее время водообмена в водохранилище.

В п. 4.1.3 предлагаются методы решения системы разностных уравнений, аппроксимирующих начально-краевую задачу (4.1)-(4.3); в качестве модельного примера приводятся результаты расчета процесса трансформации твердого стока в проектировавшемся глубоком водохранилище Катунской ГЭС (**п. 4.1.4**). При расчете распределения плотности по уравнению (4.4) учитываются фракции наносов размером ≤ 10 мкм, что составляет ~ 30 % общей массы

поступающих в водохранилище речных наносов. Динамика общей массы наносов, осажденных в водоеме и сброшенных в нижний бьеф, показана на рис. 4.1.

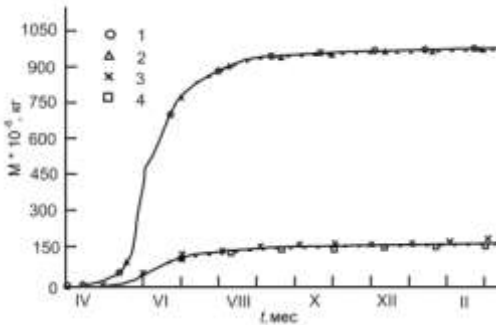


Рис. 4.1. Общая масса наносов M , осажденных в водохранилище и сброшенных в нижний бьеф. Линии 1, 4 – результаты расчета конечно-разностным методом; 2, 3 – методом Монте-Карло

Следует отметить, что для выбранных входных гидрологических данных только $\sim 15\%$ от общей массы поступающих в водохранилище наносов будет сбрасываться в нижний бьеф. Процесс трансформации поступающего в водохранилище твердого стока будет происходить в основном с мая по сентябрь.

В **разд. 4.2** разрабатывается модель миграции растворенной консервативной примеси в глубоком термически стратифицированном водохранилище. Следует отметить (**п. 4.2.2**), что одним из наиболее значительных факторов, оказывающих влияние на состояние водной среды в период заполнения и первые годы эксплуатации водохранилищ, является вынос в водную среду различных примесей из затопленных почв, покрывающих ложе водоема. Модель строится с учетом потока вещества (примеси) из ложа водохранилища, для чего решается задача распространения примеси в затопленном почвенном слое. В этом слое с процессами транспорта примеси рассматриваются также физико-химические процессы взаимодействия порового раствора с почвенным скелетом.

После интегрирования исходных дифференциальных уравнений получается следующее одномерное уравнение массопереноса в водной толще:

$$\frac{\partial(\Omega C)}{\partial t} + \frac{\partial(Q_w C)}{\partial z} = \frac{\partial}{\partial z} \left(\Omega(z) K_C \frac{\partial C}{\partial z} \right) + q_{in} C_{in} - q_{out} C + \frac{\partial}{\partial z} \left(\int_{S_b} (\vec{J} - \vec{V}C) d\vec{S} \right), \quad (4.5)$$

где q_{in} – удельный расход втекающего потока; C_{in} – концентрация примеси во втекающем потоке; Q_w – вертикальный расход воды; K_C – эффективный коэффициент диффузии примеси. Последний член в правой части уравнения (4.5) описывает поступление примеси из ложа в воду.

Начально-краевые условия для уравнения (4.5) имеют вид

$$C(z, t = 0) = C_0(z), \quad (4.6)$$

$$\left(-K_c \frac{\partial C}{\partial z} + WC \right) \Big|_{z=0} = j(0, t), \quad (4.7)$$

$$\left(-K_c \frac{\partial C}{\partial z} + WC \right) \Big|_{z=H(t)} = 0, \quad (4.8)$$

где $H(t)$ – зависимость глубины водоема при его заполнении (или эксплуатации) от времени.

Фигурирующий в (4.7) поток \bar{J} необходимо находить из одномерных аналогов уравнения (4.5). Для их получения используется следующий прием: вся область изменения пространственных переменных (затопленный почвенный слой) осредняется вдоль русла водохранилища, затем полученная двумерная область разбивается плоскостями, перпендикулярными границе «вода-дно». В каждой из таких подобластей рассматривается одномерная задача диффузионно-конвективного переноса веществ.

В пп. 4.2.3-4.2.4 даны методы численного решения задачи и результаты модельных расчетов для глубокого водохранилища проектировавшейся Катунской ГЭС. В качестве примеси выбрана ртуть, поскольку именно по этому веществу имеется большой объем натурных данных, на основе которых могут быть определены параметры модели. Натурные данные были получены в ходе комплексных исследований возможного загрязнения проектируемого водохранилища соединениями Hg (в том числе за счет вымывания из почв), которые выполнялись институтами СО РАН в 1990-х годах.

В расчетах содержание Hg во втекающем в водохранилище потоке принималось постоянной величиной, чтобы прояснить детали пространственно-временного распределения примеси в водохранилище, отвлекаясь от естественных сезонных изменений в р. Катунь. При этом $C_{in}=0,05$ мкг/л, что примерно соответствует среднегодовому содержанию Hg в воде реки. Начальная концентрация Hg в поровом растворе затопленных почв принята равной 1,0 мкг/л; концентрация Hg на твердом скелете почв – 0,17 мг/л. Результаты расчетов показали, что содержание растворенных форм Hg в водохранилище в начальный период заполнения в основном определяется величиной проточности, больших изменений по вертикали концентраций Hg не обнаружено. Особенности слабовыраженной вертикальной неоднородности профиля концентрации Hg определяются морфометрией водохранилища и характеристиками входного потока.

В разд. 4.3 примененный выше подход для описания поведения растворенной примеси используется при разработке модели кислородного режима глубокого стратифицированного водохранилища. Растворенный кислород является

одним из наиболее важных факторов, определяющих практически все химические и биологические процессы в водоемах и водотоках (п. 4.3.1). Для многих растворенных газов характерна стратификация по глубине водохранилищ. Формирование слоя температурного скачка ведет к плотностному расслоению водных масс, что препятствует перемещению их по вертикали и создает условия для стратификации растворенных газов. Для кислорода резко выраженная вертикальная стратификация прослеживается во все сезоны года, особенно в период летнего нагревания.

В п. 4.3.2 строится 1DV-модель кислородного режима глубокого стратифицированного водохранилища для описания поведения растворенного кислорода в водоеме с учетом потока кислорода на границе раздела «вода-дно». Модель базируется на принципах, предложенных Стритером и Фелпсом. Стандартные уравнения модели Стритера-Фелпса, записанные в условиях предположения однородности распределения химических параметров по слоям водоема, модифицируются с тем, чтобы их можно было использовать для глубоких водоемов, характеризующихся интенсивными процессами седиментации. Последние играют важную роль, поскольку осаждающиеся частицы содержат органическое вещество. Предложенная модель поведения кислорода в глубоком водоеме включает три переменных: растворенный кислород, растворенное лабильное органическое вещество и взвешенное органическое вещество и учитывает их конвективный и диффузионный перенос. Кроме того, дополнительно учитывается потребление кислорода на границе «вода-дно». В соответствии с вышеописанной схемой уравнения модели записываются в следующей форме

$$\frac{\partial(\Omega C)}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial z}(Q_w C) = \frac{\partial}{\partial z} \left[\Omega K_C \frac{\partial C}{\partial z} \right] + q_{in} C_{in} - q_{out} C -$$

$$-\Omega k_L L + \frac{\partial}{\partial z} \left[\int_{\Omega_B(z)} \vec{j} \cdot d\vec{\Omega} \right], \quad (4.9)$$

$$\frac{\partial(\Omega L)}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial z}(Q_w L) = \frac{\partial}{\partial z} \left[\Omega K_L \frac{\partial L}{\partial z} \right] + q_{in} L_{in} - q_{out} L -$$

$$-\Omega \cdot (k_L L - k_h S), \quad (4.10)$$

$$\frac{\partial(\Omega S)}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial z}((Q_w - \Omega w_s) S) = \frac{\partial}{\partial z} \left[\Omega K_S \frac{\partial S}{\partial z} \right] + q_{in} S_{in} -$$

$$-q_{out} S - \Omega k_h S - w_s S \frac{d\Omega}{dz}, \quad (4.11)$$

где $C(z, t)$ – концентрация растворенного кислорода; $L(z, t)$ – лабильное органическое вещество; $S(z, t)$ – взвешенное органическое вещество; $\Omega(z)$ – площадь дна водоема на высоте z ; w_s – скорость осадения взвешенного вещества; k_L –

постоянная скорости окисления лабильного органического вещества; k_h – постоянная скорости гидролиза взвешенного органического вещества; \bar{j} – поток потребления кислорода на границе «вода-дно».

Поток кислорода на границе «воздух-вода» вычисляется как

$$j_S = k_r (C_S - C(H(t), t)),$$

где k_r – скорость обмена кислородом через границу «воздух-вода»; C_S – концентрация насыщения растворенным кислородом. Для определения коэффициента k_r используется стандартная формула Бэнкса. При ледоставе предполагается $j_S=0$. Гидрофизические характеристики определяются из решения соответствующей гидротермической 1DV-задачи.

В п. 4.3.3 численная 1DV-модель кислородного режима применена для оценки содержания растворенного кислорода в проектировавшемся Катунском водохранилище. Расчеты показали (п. 4.3.4), что в летне-осенний период формирование термоклина ограничивает вертикальный диффузионный перенос кислорода в гипolimнион. Модель предсказывает возможность дефицита кислорода (концентрацию растворенного кислорода меньше 4 мг л^{-1}) в придонных слоях в течение сентября-ноября в начальный период заполнения водохранилища. Уменьшение растворенного кислорода в основной водной толще зимой практически не наблюдается. Это является следствием позднего замерзания (конец декабря – начало января), также как и высокой концентрации растворенного кислорода ($10\text{-}12 \text{ мг л}^{-1}$) в водах р. Катунь в течение всего года. Последнее компенсирует отсутствие реэрации через ледяной покров. На рис. 4.2 показаны изменения концентраций растворенного кислорода втекающей и вытекающей воды в течение гидрологического года. Следует отметить, что в рассмотренном случае эти концентрации достаточно близки.

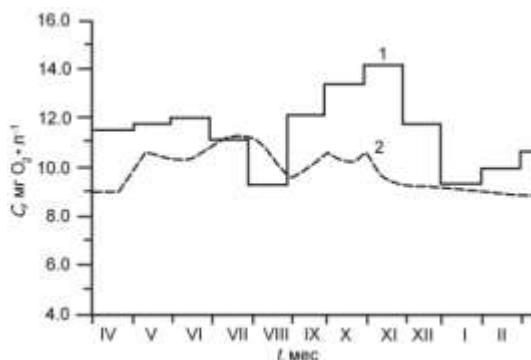


Рис. 4.2. Концентрации растворенного кислорода на входе (1) и выходе (2) водохранилища Катунской ГЭС

ГЛАВА 5. ПРОГНОЗ ИЗМЕНЕНИЯ СОСТОЯНИЯ ВОДНОЙ СРЕДЫ В РЕКЕ НИЖНЯЯ ТУНГУСКА ПРИ СТРОИТЕЛЬСТВЕ ЭВЕНКИЙСКОЙ ГЭС

Глава посвящена прогнозам изменения состояния водной среды реки Н. Тунгуска для двух вариантов расположения створа плотины Эвенкийской ГЭС (ЭГЭС) и по разным этапам наполнения Эвенкийского водохранилища, выполненным с использованием разработанного комплекса гидрологических моделей (**главы 2-4**).

В **разд. 5.1** обсуждаются проблемы, которые возникнут при создании уникального Эвенкийского водохранилища объемом до 409 км³ и длиной 1229 км при положении створа плотины на 120-ом км от устья Н. Тунгуски (основной вариант строительства). Климат региона резко континентальный, среднегодовая температура воздуха в районе строительства –8,5 °С, ее минимальные зимние значения доходят до –63 °С, максимальные летние – до +37 °С. Гидрологический режим реки характеризуется неравномерностью стока, резкими колебаниями уровня воды (до 30 м) в паводок. При высоте плотины около 200 м следует ожидать формирование вертикальной плотностной стратификации в водохранилище, потому прогноз изменения ледотермического режима реки выходит на первый план. Ряд важных проблем изменения качества воды при строительстве водохранилища обусловлен достаточно высоким естественным уровнем минерализации поверхностного стока в районе гидростроительства и большим количеством затопляемой древесно-кустарниковой растительности.

В **разд. 5.2** создана численная модель и выполнены расчеты процессов тепло- и массопереноса в глубоком водохранилище ЭГЭС на основе гидроледотермической 1DV-модели для двух вариантов положения створа плотины, 120 км и 59,5 км от устья Н. Тунгуски. Длина водохранилища во втором варианте при НПУ – 695,5 км, объем – 48,51 км³. Формирование вертикальной плотностной стратификации моделируется с учетом влияния температуры и минерализации на плотность воды. Пространственно-временная динамика общей минерализации в водохранилище описывается на основе 1DV-модели переноса растворенной консервативной примеси (**разд. 4.2**). В отсутствие надежной информации о возможных источниках поступления солей из ложа будущего водохранилища моделируется лишь перенос растворенных примесей, поступающих с речным стоком. Расчеты показали (**п. 5.2.1**), что прогнозируемые показатели общей минерализации являются благоприятными: значения минерализации поверхностных слоев воды будут менее 100 мг/л; у дна – около 400 мг/л. Показатели минерализации вытекающей воды будут стабилизироваться по мере заполнения водохранилища. После некоторого их повышения в начале заполнения, общая минерализация будет уменьшаться до 100 мг/л и ниже.

При прогнозе воздействия строительства ЭГЭС на качество воды в реке

Н.Тунгуска с учетом высокого уровня залесенности территории затопления нужно оценить влияние затопления большого объема древесно-кустарниковой растительности на содержание растворенного кислорода в водохранилище. Адаптация разработанной кислородной 1DV-модели (разд. 4.3) к условиям Эвенкийского водохранилища дала оценки влияния затопленной растительности на содержание растворенного кислорода в водной толще (п. 5.2.2). В адаптированной модели учитывается потребление кислорода на границе «вода-дно» на окисление затопленной растительности. В отсутствии достоверных сведений о взвешенном органическом веществе в реке Н. Тунгуска влиянием его окисления на содержание растворенного кислорода в водохранилище пренебрегается. Наличие или отсутствие льда на поверхности водохранилища учитывается при вычислении потока кислорода через границу раздела «вода-воздух» (или «вода-лед»). При наличии льда потоком кислорода на границе раздела «вода-лед» пренебрегается.

Для изучения влияния затопленной растительности на кислородный режим Эвенкийского водохранилища разработанная кислородная 1DV-модель (разд. 4.3) дополнена рядом формул, предложенных в ИВЭП СО РАН. Потребления кислорода на окисление затопленной растительности учитывается использованием полуэмпирических формул, в которых сток кислорода на границе «вода-дно» пропорционален суммарной массе всех экстрагируемых веществ в затопленном биоматериале.

В расчетах полагается, что лесосводка на затопляемой территории проводиться не будет (до 92 % затопляемых площадей занято древесно-кустарниковой растительностью). На рис. 5.1 показаны расчетные изолинии концентрации растворенного кислорода в приповерхностных слоях водохранилища.

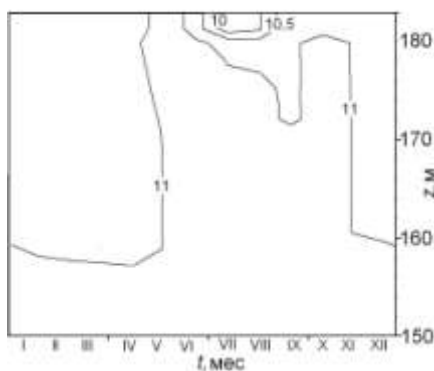


Рис. 5.1. Изолинии концентрации кислорода (мг/л) при наличии минерализации для одного года вблизи поверхности водохранилища (26-й год заполнения)

Полученные результаты показали, что для обоих вариантов положения створа плотины ЭГЭС в течение первых лет заполнения водохранилища зимой

в поверхностных слоях воды возможен дефицит кислорода. С наполнением водохранилища концентрации растворенного кислорода по всей глубине станут близки к концентрациям насыщения.

В разд. 5.3 разработанная 1ДН-модели гидротермических процессов применена для прогноза ледотермического режима реки Н. Тунгуска в нижнем бьефе ЭГЭС. Численная 1ДН-модель ледотермических процессов на участке нижнего бьефа (п. 5.3.1) построена с использованием морфометрической информации для рассматриваемого участка реки и метеорологических данных по м/с Большой Порог. Значения теплового стока в нижний бьеф ЭГЭС задаются по расчетам гидротермического режима Эвенкийского водохранилища (разд. 5.1).

Прогноз ледотермического режима нижнего бьефа ЭГЭС выполнен для двух проектов строительства водохранилища. Расчеты процессов теплопереноса показали, что летние температуры воды в устье реки с некоторого момента заполнения не превысят 6 °С. При положении створа плотины на 120 км от устья дата перехода температуры воды в устье реки через 0 °С весной придется на первую декаду мая; а осенью – на конец ноября-начало декабря. Для створа на 59,5 км от устья почти весь год, за исключением января и февраля, температура воды на участке нижнего бьефа будет выше температуры замерзания (0 °С); максимальная температура воды в устье реки в летний период года уменьшится на 15 °С по сравнению с естественными условиями.

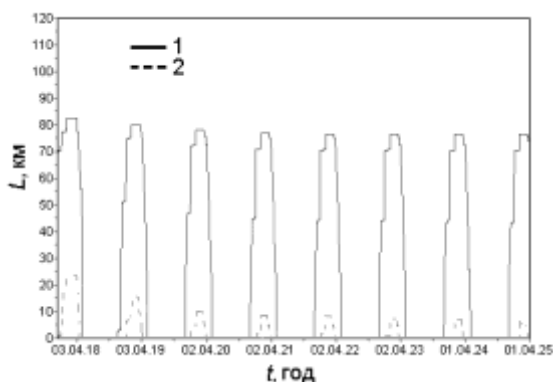


Рис. 5.2. Прогноз замерзания Н. Тунгуски выше устья при заполнении водохранилища: кривая 1 – створ 120 км; 2 – створ 59,5 км (L – расстояние от устья до кромки льда)

В зимние месяцы на этапе заполнения водохранилища для створа плотины на 120-км от устья в нижнем бьефе будет формироваться полынья. Размеры сплошного ледяного покрова от устья реки Н. Тунгуски до кромки льда в сторону плотины ЭГЭС в зимние периоды после третьего года заполнения водохранилища показаны на рис. 5.2. Минимальная длина полыньи в нижнем бьефе – около 45 км. По сравнению с естественными условиями ледообразование начнется на один месяц позже (начало декабря), а река освободится ото льда на

месяц раньше (в начале мая). Для створа плотины на 59,5 км от устья в зимние месяцы при заполнении водохранилища река будет замерзать только в устье.

После заполнения водохранилища река Н. Тунгуска в нижнем бьефе замерзать не будет. Положительные значения температуры воды в устье реки в пределах 2-3 °С в зимние месяцы определяют наличие полыньи вдоль правого берега Енисея ниже устья реки Н. Тунгуска.

В п. 5.3.2 даны оценки минерализации воды в реке Н. Тунгуска ниже плотины ЭГЭС на основе 1DH-модели массопереноса. Сток растворенных солей в нижний бьеф задавался из расчетов минерализации Эвенкийского водохранилища по 1DV-модели. Также по натурным данным о расходах и минерализации воды в створе Б. Порог за 1974 г. рассчитана минерализация воды в реке Н. Тунгуска на участке нижнего бьефа в естественных условиях. На рис. 5.3 приведены значения минерализации воды в устье реки Н. Тунгуска. Нижняя ось абсцисс относится к расчетам минерализации воды в устье реки при наполнении водохранилища для разных положений створа плотины (кривые 1-2); верхняя ось абсцисс – к расчетам минерализации для различных гидрологических периодов 1974 г. (кривая 3).

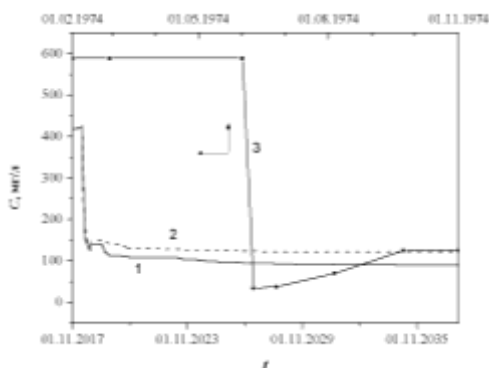


Рис. 5.3. Минерализация воды в устье Н. Тунгуски при заполнении водохранилища: кривая 1 – створ 120 км; 2 – створ 59,5 км; 3 – расчет для условий 1974 г. (в естественных условиях)

Из расчетов следует, что после 2-3-х лет заполнения водохранилища сезонные изменения минерализации воды в нижнем бьефе практически исчезнут, сами уровни минерализации снизятся и уменьшатся их внутригодовые изменения по сравнению с естественными условиями.

ГЛАВА 6. МОДЕЛИРОВАНИЕ И ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ В ТЕЛЕЦКОМ ОЗЕРЕ

Комплексное исследование уникального природного водоема Телецкого озера является важной научной задачей, в разные годы решавшейся в рамках крупных национальных и международных научных программ. Особый интерес

к Телецкому озеру был проявлен в конце 1990-х годов, когда озеро рассматривалось в качестве одного из водоемов-аналогов проектировавшегося Катунского водохранилища. В **главе 6** выполнена апробация ряда разработанных гидрологических моделей на расчетах процессов тепло- и массопереноса в Телецком озере. Для этой цели выполнены многолетние натурные наблюдения термического и кислородного режимов водоема и проведены имитационные расчеты рассматриваемых процессов.

В **разд. 6.1** приведены основные физико-географические характеристики Телецкого озера. Расположенное на юге Западной Сибири в экологически чистом регионе Горного Алтая озеро является глубоким слабо проточным водоемом вытянутой формы. Его длина 77,8 км, максимальная ширина – 5,2 км (средняя – 2,9 км), максимальная глубина – 323,3 м (средняя – 174 м). Основная часть стока (70-75%) в озеро поступает через р. Чульшман в южном его конце и вытекает в противоположном через р. Бия. Годовая амплитуда колебаний уровня Телецкого озера достигает 6 м.

В **разд. 6.2** даны результаты режимных наблюдений вертикальных профилей температуры воды и концентрации растворенного кислорода для Телецкого озера в 2010-2013 гг. Полевые работы выполнены с использованием современного измерительного комплекса на базе профилографа SBE-19. Профили на рис. 6.1 иллюстрируют пространственно-временную картину температурного поля и содержания растворенного кислорода для озера на конец периода летнего нагревания 2010 г. Выполненные в 2010-2013 гг. наблюдения позволили существенно дополнить и уточнить данные наблюдений прошлых лет. Это важно для верификации гидротермических моделей (в том числе высокой размерности), используемых для описания пространственных особенностей плотностной стратификации озера. Так, измеренные профили температуры показали значительную степень однородности температурного поля Телецкого озера как по тальвегу, так и по выполненным поперечным разрезам в отдельные гидрологические периоды.

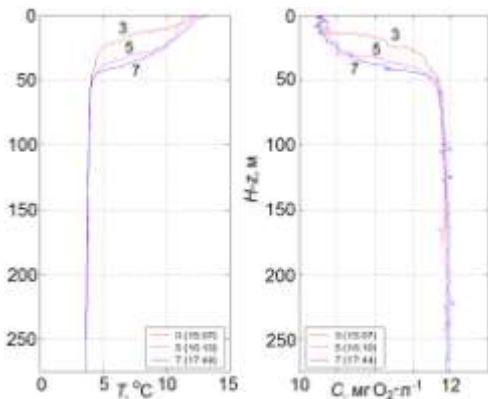


Рис. 6.1. Профили температуры воды и концентрации растворенного кислорода на вертикалях 3, 5 и 7 по результатам измерений 29 августа 2010 г. В скобках указано время начала измерений (время – местное декретное летнее). Время измерений на вертикали – 5-7 мин

В разд. 6.2 обсуждаются результаты имитационных расчетов температурной стратификации Телецкого озера. Первая модель его термического режима построена на основе 1DV-приближения без учета эффекта сжимаемости воды (Зиновьев, 1996). В качестве входных данных использованы среднемесячные метеоданные для метеостанции Яйлю за 1979-1980 гг.; начальные условия $T(z, 0)$ соответствовали натурным данным (Селегей, 1980). Расчеты показали, что термическая 1DV-модель озера хорошо воспроизводит наблюдаемую картину его годовой плотностной (температурной) стратификации по срокам наступления состояний гомотермии, заглоблению верхнего перемешанного слоя, ходу температуры поверхности озера и срокам начала ледостава. При сравнении расчетных и натуральных профилей температуры выявлено некоторое количественное несоответствие данных для глубинных слоев озера. Уточнение численной 1DV-модели процессов теплопереноса в Телецком озере выполнено путем использования модифицированной ($E-\epsilon$)-модели вертикального турбулентного обмена и учета эффекта сжимаемости воды.

Результаты расчетов температурной стратификации Телецкого озера по уточненной гидротермической 1DV-модели с использованием в качестве входных данных среднесуточных значений метеозаэментов по м/с Яйлю в 2010-2012 гг. приведены в разд. 6.3. Расчеты показали, что основным фактором, влияющим на точность 1DV-описания термического состояния глубинных слоев воды Телецкого озера, является учет сжимаемости воды. В уточненной модели температурной стратификации озера использовано уравнение состояния Чена-Миллера, в котором плотность воды зависит от температуры, солёности и давления. Рассчитанная зависимость температуры от глубины с учетом сжимаемости воды близка к полученным экспериментальным данным (рис. 6.2).

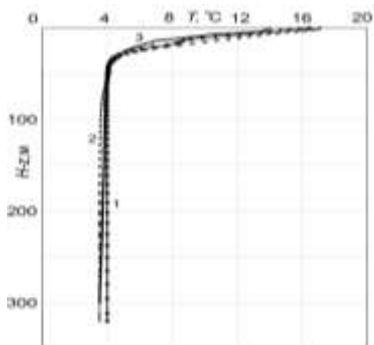


Рис. 6.2. Профили температуры в Телецком озере на 29.08.2010: 1 и 2 – расчеты без учета и с учетом сжимаемости, 3 – натурные измерения зондом SBE-19

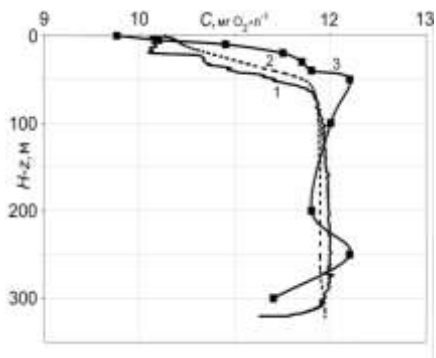


Рис. 6.3. Профиль концентрации растворенного кислорода в Телецком озере на 29.08.2010: 1 – натурные измерения с использованием зонда SBE-19, 2 – расчет, 3 – натурные измерения методом Винклера

На основе уточненной термической 1DV-модели Телецкого озера построена компьютерная 1DV-модель его кислородного режима и выполнены расчеты изменения содержания растворенного кислорода в течение модельного года (разд. 6.4). На рис. 6.3 приведены профили содержания кислорода на конец августа (расчет и натурные данные). Расчеты показали, что концентрации растворенного кислорода по всей глубине озера близки к концентрациям насыщения. Измерения зондом SBE-19 показывают некоторое уменьшение содержания растворенного кислорода в придонных слоях. Возможно, это связано с влиянием слабоминерализованных вод основного притока озера – реки Чулышман.

Разд. 6.5 посвящен сопоставительным расчетам термической структуры Телецкого озера по гидротермическим моделям разной размерности (1DV и 3D) и их сравнению с данными наблюдений. Установлена близость результатов расчетов по обеим моделям и их соответствие натурным данным. Что обосновывает использование гидротермической 1DV-модели в качестве базовой гидрофизической модели при описании гидрохимических процессов в Телецком озере и применение разработанных гидрологических 1DV-моделей для прогнозов качества воды в проектируемых глубоких сибирских водохранилищах.

ГЛАВА 7. МОДЕЛИРОВАНИЕ ГИДРОЛЕДОТЕРМИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ В НИЖНИХ БЪЕФАХ ГЭС ДЛЯ ЗАДАЧ УСТОЙЧИВОГО ВОДООБЕСПЕЧЕНИЯ (НА ПРИМЕРЕ НОВОСИБИРСКОГО ГИДРОУЗЛА)

В главе на примере Новосибирского гидроузла применяется разработанная 1DN-модель гидроледотермических процессов (глава 3) для решения важной и

малоизученной проблемы влияния маловодий на водоснабжение крупных городов.

В настоящее время из-за посадки уровней свободной водной поверхности в нижнем бьефе (НБ) Новосибирской ГЭС (НГЭС) режим эксплуатации Новосибирского водохранилища определяется необходимостью поддержания уровней воды в черте г. Новосибирска на отметках, обеспечивающих надежную работу ключевых систем коммунального и промышленно-энергетического водоснабжения в меженные периоды, особенно в маловодные годы. С этих позиций осенне-зимний сезон является определяющим по дефициту стока. В годы экстремально низкой водности возможна конфликтная ситуация, обусловленная необходимостью поддержания требуемого уровня режима водохранилища и проектными величинами объемов сбрасываемой в НБ воды.

В **разд. 7.1** обсуждается изменение ледового режима р. Обь под влиянием строительства и эксплуатации Новосибирского водохранилища. В **разд. 7.2** предлагается использовать гидроледотермическую 1DH-модель для обоснования режима минимальных пусков в НБ, обеспечивающих требуемые отметки уровня водной поверхности в створе основного водозабора г. Новосибирска НФС-5 (15,6 км от створа плотины НГЭС). Для количественной оценки влияния подпора в присутствии льда на уровень водной поверхности в районе водозабора НФС-5 построена численная 1DH-модель формирования полыньи в нижнем бьефе НГЭС. На рис. 7.1. приведены результаты сопоставления расчетных и натуральных данных по изучению влияния подпора от ледяного покрова на уровень воды при отступлении кромки льда. Уровень воды в створе НФС-5 замерялся в период с 02.03.2009 г. по 23.03.2009 г. при известном графике сброса воды из водохранилища (кривая 4 на рис. 7.1). Начало изменения расхода примерно совпало с началом отступления кромки льда в нижнем бьефе НГЭС из-за начавшегося потепления (с 04.03.2009 г.). Положение кромки льда устанавливалось по космоснимкам (MODIS, 250 м/пиксель) с периодичностью 1 раз в сутки. Кривыми 1-3 на рис. 7.1 показаны наблюдаемые и рассчитанные уровни в створе водозабора. Рассчитанные по 1DH-модели уровни водной поверхности в створе водозабора с учетом ледовых процессов показаны на рисунке 7.1 кривой 2 ($n_i = 0,025$), без учета ледовых процессов – кривой 3. Отчетливо видно повышение уровня (подпор) воды более чем на 1 м при наличии ледовых явлений. Сопоставление кривых 1 и 2 демонстрирует хорошее качественное и количественное согласование расчетных результатов с натурными данными. В период с 12.03.2009 г. по 16.03.2009 г. особенно заметен немонотонный характер зависимости уровня воды от расхода, обусловленный совместным разнонаправленным воздействием двух факторов: повышением уровня воды из-за увеличения расхода и спадом уровня из-за уменьшения подпора вследствие роста длины полыньи.

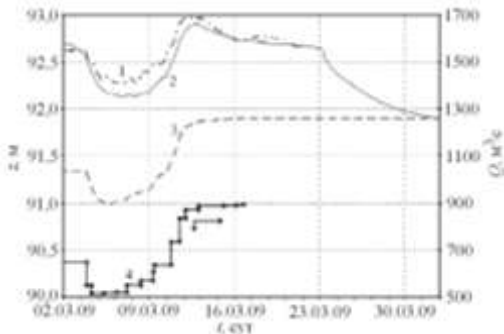


Рис. 7.1. Динамика уровней воды в створе НФС-5 (кривая 1 – наблюдение; 2 – расчет с учетом льда; 3 – расчет в отсутствии льда) и расходов воды (4) в створе плотины НГЭС в марте 2009 г.

Для количественной оценки точности расчетов по 1ДН-модели по гидротермической 2ДН-модели выполнены сопоставительные расчеты термического режима нижнего бьефа НГЭС. Результаты расчетов интегральных характеристик по обеим моделям близки.

В **разд. 7.3** приведены результаты вариантных расчетов длины полыньи в нижнем бьефе НГЭС для различных гидрометеорологических условий при разных коэффициентах шероховатости подошвы льда n_i . Расчетная картина ледовой ситуации в НБ НГЭС соответствует наблюдаемой в естественных условиях: средняя протяженность полыньи колеблется в пределах от 6 до 30 км в течение зимы. Расчеты показали, что подъем уровня воды в районе водозабора НФС-5 из-за подпора, обусловленного присутствием ледяного покрова, может составить 0,5-1,0 м, если кромка льда находится до 30 км от плотины.

Для выявления зависимости величины подъема уровня в створе водозабора НФС-5 при разных попусках и при различных размерах полыньи выполнены вариантные расчеты квазистационарных режимов течения на участке нижнего бьефа. Значения коэффициента шероховатости n_i , равные 0,015 и 0,03, примерно соответствуют пределам изменения данной величины в течение зимы и позволяют получить предельные оценки влияния подпора на уровень водной поверхности. В результате расчетов установлены значения уровня водной поверхности z_{jk} в створе $x=15,6$ км в диапазоне постоянных расходов Q_j от 200 до 1000 м³/с с шагом 100 м³/с при разных положениях кромки льда L_i^k .

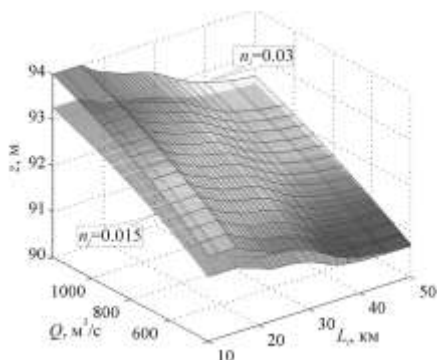


Рис. 7.2. Поверхности уровня воды $z=f(Q, L_i)$ в створе $x=15,6$ км при коэффициентах шероховатости льда $n_i=0,015$ и $0,03$

На рис. 7.2 показаны фазовые поверхности $z=f(Q, L_i)$ для двух значений коэффициента шероховатости n_i подошвы льда, построенные по двум наборам “точек” $z_{jk} = f(Q_j, L_i^k)$. На каждой фазовой поверхности $z=f(Q, L_i)$ можно провести изолинию $z=z^*$, соответствующую минимально допустимому уровню водной поверхности в створе НФС-5 при заданном значении коэффициента шероховатости n_i . В результате получаем зависимости, представленные кривыми на рис. 7.3.

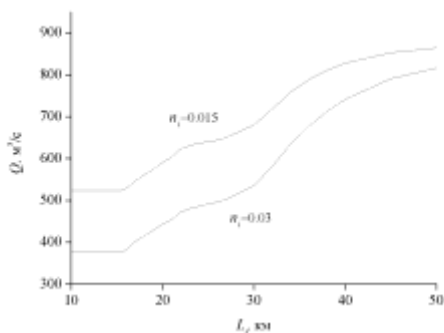


Рис. 7.3. Изолинии $z=z^*$ на поверхностях $z=f(Q, L_i)$ для створа НФС-5 при коэффициентах шероховатости льда $n_i=0,015$ и $0,03$

Наличие прогнозных значений метеоэлементов при известной температуре поступающей из водохранилища воды позволяет определить длину полыньи (расчет положения кромки ледяного покрова на основе 1ДН-модели). После этого, обратив вышеупомянутое соотношение $z = f(Q, L_i)$ (см. кривые на рис. 7.3), можно найти расход Q , гарантирующий достижение технологически приемлемого уровня воды в створе водозабора. Немонотонность зависимости уровня воды в створе водозабора от величины сбрасываемого ГЭС расхода не-

сколько осложняет реализацию описанной процедуры. В силу неоднозначности связи расход-уровень в створе водозабора при маловодьях в теплые зимы возможны ситуации, когда можно уменьшить (не увеличить) сбросные расходы и обеспечить при этом нужный уровень водной поверхности в створе водозабора.

Таким образом, выполненные расчеты зависимости длины полыньи от расхода при разных шероховатостях подошвы льда позволяют предложить следующее обоснование режима минимальных попусков из Новосибирского водохранилища в зимние месяцы маловодных лет:

– по краткосрочному прогнозу метеоусловий в районе нижнего бьефа НГЭС выполняется с использованием 1DH-модели расчет положения кромки ледяного покрова;

– с учетом прогнозируемого положения кромки льда по изолиниям на фазовой поверхности $z=f(Q, L_i)$ определяется минимальный расход сбрасываемой воды, обеспечивающий требуемый уровень водной поверхности z^* в створе водозабора НФС-5.

ВЫВОДЫ

1. Выполнено теоретическое обоснование применения гидрологических моделей малой размерности для оценки воздействия строительства глубоких водохранилищ в условиях Сибири на состояние водной среды зарегулированных участков рек (С. 31-49 диссертации).

2. Создан базовый комплекс математических моделей малой размерности для описания гидро- и ледотермических процессов в глубоких водохранилищах и нижних бьефах гидроузлов. Усовершенствованная гидроледотермическая 1DV-модель глубоких замерзающих водохранилищ учитывает ход уровня водной поверхности и конечные размеры водоема, включает уточненные описания зоны селективного оттока и вертикального турбулентного переноса. Разработанная гидроледотермическая 1DH-модель формирования и динамики полыньи в нижних бьефах ГЭС и гидроузлов позволяет учесть видовой состав шугового материала и влияние продольного градиента толщины льда покрова на гидравлику речного потока.

3. На основе усовершенствованной гидроледотермической 1DV-модели создан комплекс математических моделей для описания следующих гидрологических процессов в глубоких стратифицированных водохранилищах: а) процесса седиментации взвешенных речных наносов; б) миграции растворенной примеси в системе «водоем-затопленные почвы»; в) переноса растворенного кислорода с учетом взаимодействий на границе «вода-дно».

4. Построены алгоритмы численной реализации разработанных математических моделей гидрологических процессов в водохранилищах и нижних бьефах ГЭС и созданы программные комплексы для решения прогнозных научно-

практических задач. С использованием созданного комплекса численных 1D-моделей получены оценки влияния строительства Катунской ГЭС и Крапивинского гидроузла на изменение гидрологического режима рек Катунь и Томь на участках водохранилищ и нижних бьефов. Выполнены исследования по влиянию селективного водозабора на температуру воды, сбрасываемой в нижний бьеф. Расчеты показали, что использование поверхностного водозабора существенно приближает ледотермический режим нижних бьефов к наблюдаемому в естественных условиях.

5. С использованием разработанного комплекса гидрологических 1D-моделей выполнен прогноз изменения состояния водной среды реки Н. Тунгуска под влиянием строительства Эвенкийского водохранилища для двух проектных вариантов положения створа плотины ГЭС. Расчетами установлено, что при всех вариантах строительства в водохранилище достаточно быстро сформируется вертикальная плотностная стратификация; определены общая минерализация и содержание растворенного кислорода в водохранилище и сбрасываемой в нижний бьеф воде в периоды заполнения и проектной эксплуатации водохранилища. Оценки показывают, что с наполнением водохранилища концентрации кислорода по всей глубине станут близки к концентрациям насыщения, а концентрации солей у дна составят около 400 мг/л. Расчеты по ледотермической 1DH-модели для нижнего бьефа ЭГЭС показывают, что летом температура воды в реке Н. Тунгуска существенно понизится (до 6 °С) по сравнению с естественными условиями; зимой вплоть до устья реки сформируется полынья.

6. Для апробации разработанного комплекса гидрологических моделей рассмотрены процессы переноса тепла и растворенного кислорода в Телецком озере – в водоеме-аналоге глубоких сибирских водохранилищ. Для этого а) выполнены многолетние режимные наблюдения вертикальных распределений температуры и концентрации растворенного кислорода в Телецком озере; б) построены численные модели и выполнены варианты расчетов процессов переноса тепла и растворенного кислорода. Сравнение результатов имитационных расчетов по гидротермическим (1DV и 3D) моделям и натурных данных показало, что описание рассматриваемых гидрологических процессов в Телецком озере по 1DV-моделям согласуется с результатами 3D-моделирования и данными наблюдений.

7. В целях решения важной научно-практической задачи о выборе режима пусков из Новосибирского водохранилища, позволяющих обеспечить устойчивое функционирование речных водозаборов г. Новосибирска в зимние месяцы, построена численная 1DH-модель гидроледотермических процессов в нижнем бьефе Новосибирского гидроузла. Выполнены сопоставительные расчеты процессов теплопереноса в нижнем бьефе по 1DH- и 2DH-моделям; получено согласие численных результатов по интегральным характеристикам. Численно

установлены положения кромки ледяного покрова в зависимости от величины теплового стока из Новосибирского водохранилища и метеоусловий в районе нижнего бьефа и подпорные уровни воды в створе основного водозабора г. Новосибирска (НФС-5). Выявленные зависимости подпорных уровней от размеров полыньи совпадают с данными прямых натуральных наблюдений за уровнями воды в створе НФС-5. Показано, что результаты расчетов динамики ледяного покрова в нижнем бьефе НГЭС могут использоваться для обоснования режима попусков из Новосибирского водохранилища в зимние месяцы маловодных лет.

СПИСОК ОСНОВНЫХ ПУБЛИКАЦИЙ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Монография

1. Бузин, В.А. Ледовые процессы и явления на реках и водохранилищах. Методы математического моделирования и опыт их реализации для практических целей (обзор современного состояния проблемы) [Текст] / В.А. Бузин, **А.Т. Зиновьев**. – Барнаул: Изд-во Пять плюс, 2009. – 168 с.

Статьи в журналах из рекомендуемого перечня ВАК

2. **Зиновьев, А.Т.** Моделирование ветровых воздействий на температурную стратификацию глубокого водохранилища [Текст] / **А.Т. Зиновьев**, А.А. Кузьмин // Сибирский физико-технический журнал. – 1991. – № 4. – С. 154-157.

3. Васильев, О.Ф. Математическое моделирование гидротермических процессов в глубоких водоемах [Текст] / О.Ф. Васильев, О.Б. Бочаров, **А.Т. Зиновьев** // Гидротехническое строительство. – 1991. – № 7. – С. 3-5.

4. Бочаров, О.Б. Влияние селективного водозабора на годовой термический режим глубокого водоема [Текст] / О.Б. Бочаров, **А.Т. Зиновьев** // Водные ресурсы. – 1992. – № 5. – С. 52-59.

5. Васильев, О.Ф. Математическая модель миграции растворенной примеси в системе водохранилище-затопленные почвы [Текст] / О.Ф. Васильев, **А.Т. Зиновьев**, П.В. Иванов, С.А. Сухенко // Водные ресурсы. – 1993. – Т. 20. – № 6. – С. 701 - 706.

6. **Зиновьев, А.Т.** Одномерная вертикальная модель процесса седиментации в глубоком водохранилище [Текст] / **А.Т. Зиновьев**, Ю.Н. Копылов, А.А. Кузьмин // Водные ресурсы. – 1995. – Т. 22. – № 6. – С. 676-683.

7. **Зиновьев, А.Т.** Моделирование вертикального турбулентного обмена в пристенном стратифицированном течении [Текст] / **А.Т. Зиновьев**, С.Н. Яковенко // Прикладная механика и техническая физика. – 1998. – Т. 39. – № 6. – С. 57-64.

8. Атавин, А.А. Гидроледотермический режим в бьефах Крапивинского гидроузла. Прогноз и вопросы управления [Текст] / А.А. Атавин, **А.Т. Зиновьев**, А.В. Кудишин // Ползуновский вестник. – 2004. – № 2. – С. 39-44.

9. Атавин, А.А. Планирование попусков в нижний бьеф Новосибирского гидроузла в условиях экстремальных гидрологических ситуаций [Текст] / А.А. Атавин, **А.Т. Зиновьев**, А.В. Кудишин // Ползуновский вестник. – 2005. – № 4. – Ч. 2. – С. 95-100.
10. **Зиновьев, А.Т.** Прогноз качества воды глубоких водохранилищ для решения задач управления [Текст] / **А.Т. Зиновьев**, В.В. Кириллов, К.В. Марусин, А.Ю. Андреева // Ползуновский вестник. – 2005. – № 4. – Ч. 2. – С. 101-106.
11. Винокуров, Ю.И. Математическое моделирование русловых процессов с использованием ГИС-технологий для повышения социальной, экономической и социальной безопасности [Текст] / Ю.И. Винокуров, **А.Т. Зиновьев** // Проблемы безопасности и чрезвычайных ситуаций. – 2008. – № 3. – С. 82-89.
12. **Зиновьев, А.Т.** Компьютерное моделирование русловых деформаций на длинном и узком участке реки [Текст] / **А.Т. Зиновьев**, А.В. Кудишин, К.В. Марусин, А.А. Шибких // Проблемы региональной экологии. – 2008. – № 6. – С. 108-112.
13. **Зиновьев, А.Т.** Численный прогноз качества воды в водохранилище Эвенкийской ГЭС [Текст] / **А.Т. Зиновьев**, К.Б. Кошелев // Мир науки, культуры, образования. – 2009. – № 2(14). – С. 33-35.
14. **Зиновьев, А.Т.** Прогноз изменений показателей качества воды при строительстве высоконапорных ГЭС [Текст] / **А.Т. Зиновьев**, А.В. Кудишин // Мир науки, культуры, образования. – 2010. – № 4 [23]. – С. 276-280.
15. **Зиновьев, А.Т.** Температурный режим Телецкого озера: моделирование и эксперимент [Текст] / **А.Т. Зиновьев**, К.Б. Кошелев, К.В. Марусин // Мир науки, культуры, образования. – 2010. – № 6 [25]. – С. 285-289.
16. Винокуров, Ю.И. Экологические аспекты развития гидроэнергетики в Сибири [Текст] / Ю.И. Винокуров, **А.Т. Зиновьев**, К.М. Епишев // Ползуновский вестник. – 2011. – № 4/2. – С. 47-51.
17. **Зиновьев, А.Т.** Моделирование процесса затопления пойменных территорий для участков крупных рек со сложной морфометрией русла и поймы [Текст] / **А.Т. Зиновьев**, К.Б. Кошелев // Водное хозяйство России: проблемы, технологии, управление – 2013. – № 6. – С. 17-31.
18. Атавин, А.А. Ледотермический режим нижнего бьефа Новосибирского гидроузла [Текст] / А.А. Атавин, **А.Т. Зиновьев**, А.А. Кудишин // Водные ресурсы. – 2014. – № 2. – С. 21-34.
19. **Зиновьев, А.Т.** Геоинформационное обеспечение для решения гидрологических задач [Текст] / **А.Т. Зиновьев**, О.В. Ловцкая, Н.А. Балдаков, А.В. Дьяченко // Вычислительные технологии. – 2014. – Т. 19. – № 3. – С. 17-31.

Программные продукты, зарегистрированные в РОСАПО

20. **Зиновьев, А.Т.** Свидетельство об официальной регистрации программ для ЭВМ № 2006610297 «Гидротермика-1DV (HT1DV)» / **А.Т. Зиновьев** // Заявка

№ 2005612513. Дата поступления 04.10.05. Зарегистрировано в Реестре программ для ЭВМ 16.01.06.

21. **Зиновьев, А.Т.** Свидетельство об официальной регистрации программ для ЭВМ № 2006611428 «Гидроледотермика-1ДН (Польня)» / **А.Т. Зиновьев**, А.В. Кудишин, А.А. Атавин // Заявка № 2006610634. Дата поступления 03.03.06. Зарегистрировано в Реестре программ для ЭВМ 26.04.06.

22. **Зиновьев, А.Т.** Свидетельство об официальной регистрации программ для ЭВМ № 2014619215 «Расчет динамики концентрации загрязняющих веществ в воде водохранилища (Ложе-М 1.0)» / **А.Т. Зиновьев**, Н.А. Балдаков // Заявка № 2014615445. Дата поступления 04.07.14. Зарегистрировано в Реестре программ для ЭВМ 11.09.14.

23. **Зиновьев, А.Т.** Свидетельство об официальной регистрации программ для ЭВМ № 2014619217 «Моделирование гидрохимических и гидрофизических процессов в глубоких водохранилищах на этапах их заполнения и проектной эксплуатации: формирование плотностной стратификации, переноса растворенного кислорода и фенолов (HT1DV_QUALITY)» / **А.Т. Зиновьев**, К.Б. Кошелев // Заявка № 2014615449. Дата поступления 06.07.14. Зарегистрировано в Реестре программ для ЭВМ 11.09.14.

Статьи в журналах, сборниках, материалах конференции

24. **Zinoviev, A.T.** Mathematical modelling of temperature stratification in a deep water basin [Text] / **A.T. Zinoviev**, A.A. Kuzmin, I.E. Masliev // Application of Computers in Hydrotechnics and Water Source Protection : Proc. Intern. conf. (5-8 October 1990, Varna, Bulgaria). – Varna: BAS, 1990. – P. 346-355.

25. Bocharov, O.B. Mathematical modelling of hydrothermal processes of deep-water reservoirs [Text] / O.B. Bocharov, O.F. Vasiliev, **A.T. Zinoviev** // Refined flow. Modeling. Vol. C: Proc. XXIV IAHR Congress (9-13 September 1991, Madrid, Spain). – Madrid: CEDEX, 1991. – P. 467-476.

26. Vasiliev, O.F. Mathematical modeling of sedimentation in deep reservoir [Text] / O.F. Vasiliev, Yu.N. Kopylov, A.A. Kuzmin, **A.T. Zinoviev** // Advances in Hydro-Science and Engineering. Edited by Sam S.Y. Wang. – Washington, 1993. - Vol. 1. - Part A. – P. 853-859.

27. **Atavin, A.A.** Mathematical modelling of hydrotechnical impact construction influence on hydrothermal and ice cover behavior of rivers [Text] / A.A. Atavin, **A.T. Zinoviev**, A.V. Kudishin // Advances in Hydro-Science and Engineering. Edited by Sam S.Y. Wang. – Washington, 1993. – Vol. 1. – Part A. – 1993. – P. 1019-1024.

28. **Зиновьев, А.Т.** Математическое моделирование динамических процессов в глубоком водохранилище [Текст] / **А.Т. Зиновьев**, П.В. Иванов, Ю.Н. Копылов, А.А. Кузьмин, И.Е. Маслиев / Вычислительные технологии. – Новосибирск: Изд-во ИВТ СО РАН, 1993. – С. 104-113.

29. Atavin, A.A. Mathematical modeling of hydrotechnical construction influence on hydrothermal and ice cover behavior of rivers [Text] / A.A. Atavin, **A.T. Zinoviev**, A.V. Kudishin // Inzynieria Srodowiska VIII: Zeszyty Naukowe Akademii Rolniczej we Wroclawiu. – 1996. - NR 301. – P. 15-23.
30. Атавин, А.А. Математическое моделирование гидроледотермического режима зарегулированного участка реки [Текст] / А.А. Атавин, **A.T. Зиновьев**, А.В. Кудишин // Фундаментальные проблемы воды и водных ресурсов на рубеже третьего тысячелетия: матер. Междунар. науч. конф. (3-7 сентября 2000 г., г. Томск). – Томск: Изд-во ТФ ИГНГ СО РАН, 2000. – С. 371-375.
31. **Зиновьев, А.Т.** Моделирование температурной стратификации Телецкого озера [Текст] / **A.T. Зиновьев** // Основные закономерности глобальных и региональных изменений климата и природной среды в позднем кайнозое Сибири. Вып. 1. – Новосибирск: Изд-во ИАЭ СО РАН, 2002. – С. 212-216.
32. **Zinoviev, A.T.** The use of mathematical modeling methods to minimize hydraulic engineering impact on the environment [Text] / **A.T. Zinoviev** // The West Exploitation and Sustainable Development: Proc. II Intern. Simposium (2-5 August 2005, Urumqi, China). – Urumqi, 2005. – P. 5-7.
33. **Зиновьев, А.Т.** Кислородный режим Телецкого озера: моделирование и натурные данные [Текст] / **A.T. Зиновьев**, В.В. Кириллов, К.В. Марусин // Фундаментальные проблемы изучения и использования воды и водных ресурсов: матер. Всерос. науч. конф. (20-24 сентября 2005 г., г. Иркутск). – Иркутск: Изд-во ИГ СО РАН, 2005. – С. 416-418.
34. **Зиновьев, А.Т.** Программный продукт для математического моделирования гидротермических процессов в водохранилищах [Текст] / **A.T. Зиновьев**, Н.В. Зиновьев, К.В. Марусин // Современные проблемы водохранилищ и их водосборов. Т. I: тр. междунар. науч.-практ. конф. в 3 т. (28 мая-1 июня 2007 г., г. Пермь). – Пермь: Изд-во ПГУ, 2007. – С.77-81.
35. Васильев, О.Ф. Моделирование гидрологических и гидрофизических процессов в озерах и водохранилищах [Текст] / О.Ф. Васильев, **A.T. Зиновьев**, Т.Э. Овчинникова, А.Н. Семчуков // Hydrological impact of climate change: Proc. British-Russian conf. (13-15 June, 2007, Novosibirsk, Russia). – Barnaul, IWEP SB RAS, 2009. – P. 57-67.
36. Васильев, О.Ф. Водохозяйственные аспекты создания крупных высоконапорных ГЭС в условиях Сибири и способы их анализа / О.Ф. Васильев, **A.T. Зиновьев** [Текст] // Водные проблемы крупных речных бассейнов и пути их решения: тр. Всерос. науч. конф. (6-11 июля 2009 г., г. Барнаул). – Барнаул: Изд-во Агентство рекламных технологий, 2009. – С. 432-444.
37. **Зиновьев, А.Т.** Прогноз изменения качества водной среды р. Нижняя Тунгуска на перспективу строительства Эвенкийской ГЭС [Текст] / **A.T. Зиновьев**, К.Б. Кошелев, К.В. Марусин // Современные проблемы водохранилищ и их во-

- досборов. Т. I: тр. Междунар. науч.-практ. конф. в 2 т. (26-28 мая 2009 г., г. Пермь). – Пермь: Изд-во ПГУ, 2009. – С. 230-235.
38. **Зиновьев, А.Т.** Прогноз изменения ледотермического режима р. Нижняя Тунгуска на участке нижнего бьефа Эвенкийской ГЭС [Текст] / **А.Т. Зиновьев**, А.В. Кудишин // Современные проблемы водохранилищ и их водосборов. Т. I: тр. Междунар. науч.-практ. конф. в 2 т. (26-28 мая 2009 г., Пермь). – Пермь: Изд-во ПГУ, 2009. – С. 35-40.
39. **Зиновьев, А.Т.** Использование методов математического моделирования для оценки проектных решений при создании крупных водохранилищ [Электронный ресурс] / **А.Т. Зиновьев** // ЭКО-бюллетень ИнЭка. – 2009. – № 4 (135). – Режим доступа: www.ineca.ru/?dr=bulletin/arhiv/0135&pg=011.
40. **Зиновьев, А.Т.** Прогнозирование последствий создания крупных водохранилищ в условиях Сибири / **А.Т. Зиновьев**, А.В. Кудишин, К.Б. Кошелев [Текст] // Научные основы экологического мониторинга водохранилищ. Вып. 4. – Хабаровск: Изд-во ИВЭП ДВО РАН, 2010. – С. 65-69.
41. Васильев, О.Ф. Водно-экологические проблемы создания и эксплуатации крупных ГЭС в условиях Сибири [Текст] / О.Ф. Васильев, Ю.И. Винокуров, **А.Т. Зиновьев** // Фундаментальные проблемы воды и водных ресурсов: матер. III Всерос. науч. конф. (24-28 августа 2010 г., г. Барнаул). – Барнаул: Изд-во ИВЭП СО РАН, 2010. – С. 634-638.
42. Атавин, А.А. Ледотермические процессы в нижних бьефах ГЭС и гидроузлов. Модели, прогнозы и оценки [Текст] / А.А. Атавин, **А.Т. Зиновьев**, К.Б. Кошелев, А.В. Кудишин // Фундаментальные проблемы воды и водных ресурсов: матер. III Всерос. науч. конф. (24-28 августа 2010 г., г. Барнаул). – Барнаул: Изд-во ИВЭП СО РАН, 2010. – С. 596-600.
43. **Зиновьев, А.Т.** Некоторые вопросы компьютерного моделирования гидроледотермических процессов в озерах и водохранилищах: информационное обеспечение, математическое моделирование, сопоставление с экспериментом [Текст] / **А.Т. Зиновьев**, К.Б. Кошелев, О.В. Ловцкая, К.В. Марусин // Современные проблемы водохранилищ и их водосборов. Т. 1: тр. Междунар. конф. в 4 т. (17-20 мая 2011 г., г. Пермь). – Пермь: Изд-во ПГУ, 2011. – С. 85-90.
44. Атавин, А.А. Гидро – и ледотермические процессы в нижнем бьефе Новосибирской ГЭС. Моделирование и эксперимент [Текст] / А.А. Атавин, **А.Т. Зиновьев**, К.Б. Кошелев, А.В. Кудишин // Ледовые и термические процессы на водных объектах России: тр. III Всерос. конф. (6-11 июня 2011 г., г. Онега). – М.: Изд-во ИВП РАН, 2011. – С. 13-17.
45. **Зиновьев, А.Т.** Моделирование физико-химических процессов в Телецком озере для решения задач мониторинга [Текст] / **А.Т. Зиновьев**, К.Б. Кошелев, К.В. Марусин // Устойчивость водных объектов, водосборных и прибрежных территорий, риски их использования: тр. Всерос. конф. (25-30 июля 2011 г., г. Калининград) – Калининград: Изд-во Капрос, 2011. – С. 90-97.

46. **Зиновьев, А.Т.** Оценка негативных водно-экологических ситуаций при строительстве крупных сибирских водохранилищ с использованием математических методов и ГИС-технологий (на примере Эвенкийского водохранилища) [Текст] / **А.Т. Зиновьев**, К.Б. Кошелев, А.В. Кудишин // Безопасность и живучесть технических систем. Т. 1: тр. IV Всерос. конф. (9-13 октября 2012 г., г. Красноярск) – Красноярск: Изд-во ИФ СО РАН, 2012. – С.72-76.
47. **Зиновьев, А.Т.** Комплексные гидрофизические исследования Телецкого озера [Текст] // **А.Т. Зиновьев**, К.В. Марусин, А.В. Дьяченко, Р.Ю. Гнаатовский, В.В. Блинов / Современные проблемы водохранилищ и их водосборов. Т. 1: тр. Междунар. науч.-практ. конф. в 3 т. (28-29 мая 2013 г., г. Пермь) – Пермь: ПГУ, 2013. – С. 197-202.
48. **Зиновьев, А.Т.** Комплекс моделей для прогноза ледотермического режима водохранилищ и нижних бьефов ГЭС [Текст] / **А.Т. Зиновьев**, К.Б. Кошелев, А.В. Кудишин // Ледовые и термические процессы на водных объектах России: тр. IV Всерос. конф. (24-29 июня 2013 г., г. Рыбинск) – М.: Изд-во КЮГ, 2013. – С. 23-29.