

ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ  
УЧРЕЖДЕНИЕ НАУКИ  
ИНСТИТУТ ВОДНЫХ ПРОБЛЕМ РОССИЙСКОЙ АКАДЕМИИ НАУК



На правах рукописи

Никифоров Дмитрий Андреевич

МОДЕЛИРОВАНИЕ УРОВЕННОГО РЕЖИМА  
ВОДОХРАНИЛИЩ РЕКИ ЕНИСЕЙ

Специальность 25.00.27. – Гидрология суши, водные ресурсы, гидрохимия

АВТОРЕФЕРАТ

на соискание ученой степени

кандидата технических наук

Москва – 2016

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном учреждении науки  
Институте водных проблем Российской академии наук (ИВП РАН)

**Научный руководитель:** **Левит-Гуревич Леонид Копелевич**  
*кандидат технических наук*  
(специальность – Инженер-гидротехник, математик)

**Официальные оппоненты:** **Александровский Алексей Юрьевич**  
*доктор технических наук, профессор*  
Федеральное государственное бюджетное  
образовательное учреждение высшего  
образования "Национальный исследовательский  
университет "МЭИ", Институт электроэнергетики  
(ИЭЭ), Кафедра гидроэнергетики и  
возобновляемых источников энергии (ГВИЭ)  
**Жук Виктор Архипович**  
*кандидат географических наук, доцент*  
Федеральное государственное бюджетное  
образовательное учреждение высшего  
профессионального образования «Московский  
государственный университет имени М.В.  
Ломоносова», Географический факультет,  
Кафедра гидрологии суши

**Ведущая организация:**  
Федеральное государственное бюджетное учреждение «Государственный  
океанографический институт имени Н.Н. Зубова» (ФГБУ "ГОИН")

Защита состоится «17» ноября 2016 года в 14:00 часов на заседании  
Диссертационного совета Д002.040.01 при ИВП РАН по адресу: 119333, Москва,  
ул. Губкина, д. 3.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке и на сайте ИВП РАН.  
Отзывы на автореферат (в двух экземплярах, заверенные печатью) просим  
направлять по адресу: 119333, Москва, ул. Губкина, д. 3. Институт водных проблем  
РАН, ученому секретарю диссертационного совета Д002.040.01.

Автореферат разослан «    » сентября 2016 года.

Ученый секретарь Диссертационного совета,  
Доктор геолого-минералогических наук, профессор



Р.Г. Джамалов

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

### **Актуальность темы исследований.**

Гидравлические расчеты необходимы для прогнозирования уровня режима в естественных условиях, используются при планировании режимов работы водохранилищ и оперативном их управлении, оценке уровней воды, мониторинге водохозяйственной ситуации, определении параметров гидротехнических сооружений на реке, отслеживании последствий аварий, анализе хода уровней воды при различных гидрологических условиях в водном объекте, при водохозяйственных расчетах, расчетах запасов воды в водохранилище, управления стоком и сбросами, уточнения диспетчерских графиков, предотвращения чрезвычайных ситуаций при превышении максимальных уровней, что способно нарушить работу гидроузлов, или при падении уровней ниже допустимых, расчет и уточнение зон затопления и др.

Объектами исследования настоящей работы являются три водохранилища р. Енисей: Саяно-Шушенское, Майнское и Красноярское с речными участками. Построены и подготовлены гидравлические модели для моделирования уровня режима этих участков в одномерном программном комплексе гидравлических расчетов HEC-RAS. Программный комплекс является разработкой американского комплекса военных инженеров (J. Warner, G. Brunner, B. Wolfe, S. Piper). Программа предназначена для расчета гидравлических параметров водных объектов: рек, водохранилищ, каналов, расчета гидрохимических параметров и характеристик движения наносов. Комплекс дает возможность рассчитывать параметры потока при установившемся и неустойчивом режиме движения воды. Построение моделей водных объектов производится путем последовательного ввода различных видов информации в программный комплекс.

При работе в любом программном комплексе возникает необходимость калибровки параметров гидравлической модели водного объекта. Необходимость изменения параметров возникает в виду невозможности модели в полной мере учесть все особенности морфометрии, гидравлического и гидрологического режимов водного объекта. Корректировка, уточнение и изменение параметров с проверкой корректности результатов гидравлических расчетов, есть калибровка параметров цифровой гидравлической модели водного объекта. В работе

приведено описание построения модели в используемом программном комплексе, методик, путей и подходов калибровки параметров модели до получения удовлетворительных результатов расчетов и их анализ. Подготовка гидравлических моделей водных объектов направлена на создание постоянно действующих по запросам пользователей моделей участков рек, водохранилищ, водоемов для решения научных и практических задач.

**Цель работы** заключается в построении постоянно действующих компьютерных моделей зарегулированных участков реки Енисей в программном комплексе HEC-RAS и корректировка их параметров для проведения гидравлических расчетов, разработка методики проведения гидравлических расчетов при недостаточности данных гидрологических наблюдений.

В соответствии с целью исследования в работе решались следующие **задачи**:

1 Анализ литературных источников в области гидравлического моделирования;

2 Сбор, анализ, адаптация, корректировка исходных данных по водным объектам;

3 Анализ необходимой гидрологической и общегеографической информации, расчет гидрологических характеристик исследуемого водного объекта;

4 Постановка задачи и проблемы калибровки параметров водного объекта, выбор метода калибровки параметров, анализ пошаговых методов калибровки параметров с выделением их достоинств и недостатков;

5 Выявление путем экспериментальных расчетов степени влияния изменений различных параметров и характеристик гидравлической модели на результаты расчетов;

6 Проверка и анализ точности расчетов на независимом многолетнем материале;

7 Разработка рекомендаций по корректировке морфометрических характеристик и значений шероховатости поперечных профилей водного объекта при проведении калибровки параметров;

8 Описание процесса калибровки параметров компьютерных гидравлических моделей водных объектов, структуризация процесса и формализация его в виде набора пошаговых вычислительных действий;

9 Калибровка параметров моделей Красноярского, Майнского и Саяно-Шушенского водохранилищ с естественными участками русла реки Енисей по методике проведения калибровки параметров, достижение удовлетворительных результатов, получение и описание итоговых результатов;

10 Анализ результатов расчетов уровенного режима участков реки Енисей при повышенном стоке и недостаточности данных натуральных наблюдений.

**Положения, выносимые на защиту:**

1 Использование описанных в диссертации подходов и путей структуризации и адаптации исходных данных при их анализе сокращает время построения модели водного объекта в программном комплексе HEC-RAS и позволяет избегать грубых ошибок расчета;

2 Применение разработанной методики проведения процесса калибровки параметров, предназначенной для расчета установившегося и неустановившегося движения воды в водных объектах, позволяет обоснованно и целенаправленно достигать удовлетворительной точности гидравлических расчетов участков рек с водохранилищем;

3 Разработанный метод калибровки параметров гидравлических моделей водных объектов, учитывающий объемные характеристики водохранилища, дополняет основную методику калибровки параметров гидравлической модели, построенной в HEC-RAS при недостаточности данных гидрологических наблюдений;

4 Формализация разработанной методики калибровки параметров гидравлических моделей участка реки с водохранилищем до алгоритмов вычислительных действий позволяет обобщить процесс калибровки параметров и расширить возможность его применения;

5 Использование разработанной методики калибровки для построения модели Красноярского водохранилища и проведения гидравлических расчетов для многолетнего периода, позволяет получить гидрографы уровней воды за период открытого русла, соответствующие удовлетворительной точности расчетов.

**Научная новизна исследования** состоит в проведении гидравлических расчетов участков рек с водохранилищем. Ведется учет объемных характеристик водохранилища для достижения удовлетворительных результатов расчетов при

недостаточности данных натуральных наблюдений. Описываются возможности итерационной корректировки непосредственно морфометрических параметров поперечных сечений русла и водохранилищ. Даются описания пошагового процесса создания гидравлических моделей участков рек и водохранилищ для расчета уровней воды при установившемся и неуставившемся движениях воды в HEC-RAS. Методика калибровки параметров водного объекта представлена в алгоритмической форме.

**Теоретическая значимость диссертационного исследования** заключается в разработке схем использования программного комплекса гидравлических расчетов HEC-RAS для больших рек России на примере р. Енисей. Приводится формализация процесса корректировки калибровочных параметров компьютерных моделей для гидравлических расчетов и сведение его к алгоритмам вычислительных действий.

**Практическая значимость диссертационного исследования** заключается в подготовке и осуществление гидравлических расчетов при заданных исходных данных для различных сценариев режима расходов поступления воды в водный объект, при разных вариантах обеспеченности исходной информацией. Создание рабочих моделей гидравлических расчетов для участков больших рек, на которых производится управление стоком, является актуальной практической задачей. Результаты работы позволяют говорить о том, что используемый комплекс гидравлических расчетов HEC-RAS подходит для использования на больших реках России, даже при недостаточности или низком качестве исходной информации.

**Методы исследования.** Основным методом расчетов является одномерное гидравлическое моделирование. Разработка поставленной задачи исследования состоит в выполнении расчетных экспериментов на основании натуральных данных гидрологических наблюдений, формализации и формулировке путей проведения ручной и, в перспективе, автоматизированной калибровки параметров гидравлической модели.

Инструментом расчетов является программный комплекс гидравлических расчетов HEC-RAS, обоснованность применения которого подтверждается его широким использованием в различных физико-географических условиях, с водными объектами различного масштаба и конфигурации.

**Научная обоснованность и достоверность** результатов и выводов исследования в диссертации подтверждается результатами моделирования выбранных водных объектов и проведением калибровки их параметров при расчетах в используемом программном комплексе. Полученные компьютерные модели водных объектов, позволяют получать приемлемые результаты гидравлических расчетов, корректность которых проверялась на независимом материале с оценками точности конечных результатов моделирования и указанием погрешности расчетов.

**Личный вклад автора.** Результаты, представленные в диссертационной работе, получены автором самостоятельно и в работе с соавторами. В выполненных и опубликованных в соавторстве работах автору принадлежит равное участие в постановке и решении вопросов, сборе, анализе и подготовке данных по ряду водных объектов, проведении расчетов, обработке и обобщении материалов и результатов.

**Апробация работы.** Основные положения диссертационной работы были доложены на 11 российских и зарубежных научных школах и конференциях.

**Публикации.** По теме диссертационной работы опубликовано 15 печатных работ, в том числе 3 в научных изданиях, рекомендованных ВАК РФ.

**Структура и объем диссертации.** Диссертация, объемом 177 страниц, состоит из введения, пяти глав, заключения. Текст исследования иллюстрирован 62 рисунками, содержит 26 таблиц. Библиографический список включает в себя 109 наименований. В диссертационную работу включено 6 приложений.

## КРАТКОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во **Введении** представлена общая характеристика работы, обоснована актуальность проблемы исследования, сформулированы цель и задачи исследования, описана научная новизна, теоретическая и практическая значимость диссертационной работы, сформулированы положения, выносимые на защиту, описаны обоснованность и достоверность результатов, полученных в работе.

В **Главе 1** дается общее описание истории моделирования, анализ литературных источников, постановка задачи калибровки параметров, ее основные принципы и необходимость.

В *первом разделе* описываются основные этапы развития математического гидрологического и гидравлического моделирования. Приводится анализ работ по формированию речного стока и гидравлике русла ряда авторов, в которых рассматриваются аспекты калибровки параметров гидравлических моделей: Э.А. Бондарев, А.В. Вервей, А.Ф. Воеводин, А.Н. Гельфан, В.Н. Демидов, Л.С. Кучмент, Ж.А. Кюнж, Ю.Г. Мотовилов, В.С. Никифоровская, В.Г. Романов, Ф.М. Холли, Р.И. Черкезов и др. Заостряется внимание на различиях в подходах к калибровке параметров гидравлических моделей.

Во *втором разделе* рассмотрено применение математического моделирования в гидрологии и гидравлике - изучение процессов формирования стока с неизученных бассейнов, прогнозная оценка изменений стока под влиянием изменений ландшафтов и климата, оперативный краткосрочный и долгосрочный прогнозы уровенного режима в разных фазах режима стока и др. Показано, что цифровая математическая модель является упрощенным аналогом процесса или явления, происходящего в реальности.

В *третьем разделе* дается формальное описание гидравлического расчета и необходимой информации. Гидравлический расчет определяет величины уровней и расходов воды по заданным створам в русле реки и на пойме. Используются одномерные, двумерные, трехмерные схемы расчета гидравлических характеристик параметров водного объекта. На практике в большинстве случаев, как и в настоящей работе, используются одномерные математические модели при расчете гидравлических характеристик потока в естественном русле, а также на поймах. Рассматриваются основные характеристики гидравлических расчетов в

естественном русле с целью систематизации условий расчета, что отражается в условиях калибровки параметров гидравлических моделей. В практике применяются методы расчетов гидравлических характеристик установившегося по уравнению Шези (1), - и неустановившегося движения воды по дифференциальным уравнениям Сен-Венана (2).

$$V = C\sqrt{RI} \quad C = \frac{1}{n}R^y \quad y = 2,5\sqrt{n} - 0,13 - 0,75\sqrt{R}(\sqrt{n} - 0,1) \quad (1)$$

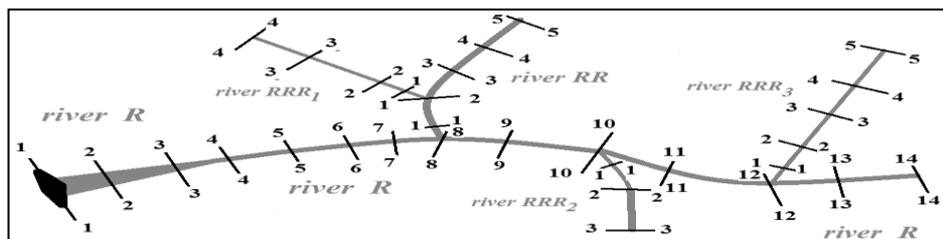
$$\begin{cases} \frac{\partial Q}{\partial s} + \frac{\partial W}{\partial t} = q \\ i - \frac{\partial H}{\partial s} = \frac{\alpha}{g} \left( V \frac{\partial V}{\partial s} + \frac{\partial V}{\partial t} \right) + \frac{V^2}{C^2 R} + \frac{qV}{gW} \end{cases} \quad (2)$$

где  $C$  – коэффициент сопротивления (коэффициент Шези),  $R$  – гидравлический радиус,  $y$  – показатель степени, зависящий от величины коэффициента шероховатости и гидравлического радиуса,  $I$  – гидравлический уклон,  $n$  – коэффициент шероховатости,  $W$  – площадь сечения, Первое уравнение в системе уравнений Сен-Венана называется уравнением неразрывности потока, где  $Q$  – расход воды,  $t$  – время,  $s$  – шкала расстояния,  $q$  – боковой приток на единицу длины реки. Второе уравнение представляет собой уравнение движения, определяющее гидравлический уклон потока между створами в результате учета гидравлических сопротивлений русла, здесь  $i$  – уклон дна,  $H$  – глубина потока,  $V$  – скорость потока,  $g = 9,81$ ,  $\alpha$  – коэффициент Кориолиса, связанный с неравномерным распределением скорости потока по сечению, обычно равен 1.1. Для однозначного определения искомых параметров течения должны быть заданы начальные и граничные условия, а также условия сопряжения элементов системы. Вид этих условий зависит от принятой схемы расчета. На каждом выделенном расчетном участке реки, различают верхний створ ( $M\bar{e}n$ ), нижний створ ( $M\bar{e}1$ ), створы впадения притоков. Приведены общие схемы расчета и рассмотрены общие этапы подготовки гидравлической модели водного объекта в HEC-RAS.

В четвертом разделе приводится подробное описание программного комплекса HEC-RAS с основными расчетными схемами и принципами расчетов по гидравлическому блоку и функциям программного комплекса, включая различные этапы работы в нем. Отдельно рассмотрены основные некорректности и допущения, возникающие в процессе построения гидравлической модели водного объекта.

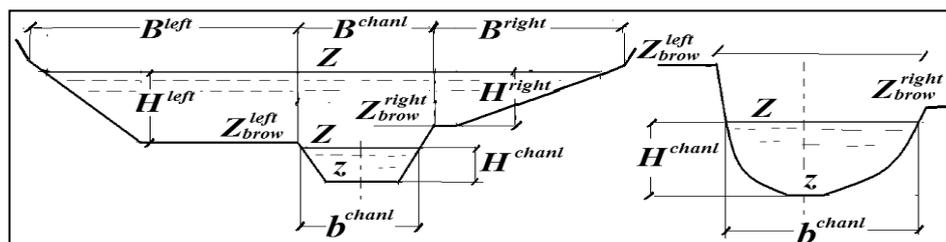
В **Главе 2** приводится детальная физико-географическая и гидрологическая характеристика бассейна реки Енисей – основного объекта исследования. Подобное описание водного объекта помогает корректно и с учетом большинства особенностей гидрологических режимов подойти к процессу калибровки параметров. Даны характеристики географического положения, уровня режима реки до создания водохранилищ и после, рассмотрено влияние каскада водохранилищ на уровень режим и другие характеристики.

В **Главе 3** диссертации пошагово описывается схема построения компьютерной гидравлической модели водного объекта для блоков установившегося и неустановившегося движения воды в HEC-RAS, приведен набор параметров и информации, необходимой для создания и корректной работы модели, показаны примеры табличных и графических отображений результатов расчетов. Описывается структура расчетного участка (рис. 1), различные ее варианты: с поймой и без, с фуражками русла и пр. Уделяется внимание отдельным частям водного объекта и его параметрам как элементам расчетного участка: водохранилище с нормативными уровнями, не зарегулированный водоем, речной участок, значения шероховатости, морфометрии и пр. Приводятся принцип и рекомендации по выбору расчетных створов.



**Рис. 1.** Схема расчетного гидравлического участка с нумерацией створов

На профиле поперечного сечения по заданным абсолютным высотным отметкам прослеживается общее строение поймы и русла (рис. 2). Сечение поймы состоит как бы из двух частей: «горизонтальной» и «наклонной», - или одной из них; русло может быть трапециевидальной или иной неправильной формы.



**Рис. 2.** Схема поперечного сечения русла и поймы, левой и правой

здесь  $H$  – глубина,  $B$  – ширина русла,  $z$  – отметки дна,  $Z$  – отметки левой и правой бровок

Для водохранилища, входящего в состав рассматриваемого участка реки, задаются отметки нормативных уровней: нормальный подпорный  $Z^{norm}$  (НПУ), мертвого объема  $Z^{dead}$  (УМО), форсированный  $Z^{force}$  (ФПУ), по заданной кривой объемов водохранилища можно получить большее число значений объемов для разных уровней воды у плотины.

Подробно описан инструмент автоматического изменения морфометрии поперечных профилей русла реки и ложа водохранилища. Основное внимание в главе уделено особенностям построения модели и проведению гидравлического расчета с последующей калибровкой параметров. Общая схема подготовки цифровой модели реки: 1) выделение расчетных участков на реке и определение мест расположения расчетных створов; 2) измерение и проверка расстояний между створами ( $L$ ), оцифровка поперечных сечений русла реки ( $H, B, b, z, Z$ ), определение значений параметра шероховатости ( $n$ ); 3) Ввод данных в модель.

**Глава 4** полностью посвящена обоснованию, разработке и выбору методики калибровки параметров цифровой гидравлической модели водного объекта в зависимости от качества и полноты имеющейся исходной информации.

С *первого по пятый разделы* даются описания понятий, принципы, виды, необходимость и задачи калибровки параметров. Калибровкой параметров гидравлической модели водного объекта назовем уточнение параметров цифровой модели с целью максимального приближения полученных по расчетам уровней к фактическим уровням воды на постах наблюдений в соответствующих гидрологических условиях, а также к выверенным объемам водохранилища (и водоемов) рассматриваемого участка реки с водохранилищем. Описываются виды погрешностей и неточностей расчета, как устранимые, так и неустраняемые: 1) исходной гидрологической и морфометрической информации; 2) методов расчета; 3) недостаток/отсутствие или переизбыток данных; 4) структуры рельефа местности; 5) систем расчета в модели; 6) работы геометрического блока. Задача калибровки параметров сводится к минимизации функции  $F$ , состоящей из квадратов относительных отклонений вычисленных уровней от фактических на пунктах наблюдений  $F_z$  (3) по участкам, суммы относительных отклонений вычисленных объемов по водохранилищу от заданных  $F_v$  (4) и суммы отклонений

результатирующих морфометрических параметров и шероховатости от начально заданных  $f = f_l + f_n + f_z + f_h + f_b$  (5), причем для установившегося движения воды в общем случае запишется выражение:  $F = p_z \times F(z) + p_v \times F(V) + p_f \times f \rightarrow \min$ ,  $p_z + p_v + p_f = 1$ , где  $p$  – весовые коэффициенты предпочтения по видам калибровки параметров.

$$F_z = \sum_{t=1}^T \sum_{j=1}^J \left\{ \left[ z_j^{\text{расч}}(t) - z_j^{\text{факт}}(t) \right] / \Delta_z \right\}^2, \quad \text{где} \quad \Delta_z = \sum_{t=1}^T \left[ \left( z_m^{\text{факт}}(t) - z_1^{\text{факт}}(t) \right) / m(T) \right] \quad (3)$$

здесь  $z_j^{\text{расч}}, z_j^{\text{факт}}$  – расчетный и фактический уровень воды в створе наблюдений  $j$ ;  $j$  – порядковый номер из общего числа  $J$  створов наблюдений;  $t$  – время в сутках;  $T$  – общее время проведения расчета;  $m$  – число створов наблюдений уровней, по которым проводится калибровка  $m=1,2,\dots,M$ . Функция  $F_z$  задается по выделенным участкам реки примерно однородным по морфометрии и уклонам, исключая приплотинные участки водохранилищ, где  $z_m^{\text{факт}}(t) \cong z_1^{\text{факт}}(t)$ . Функция  $F_v$  в общем случае состоит из суммы оценок разницы рассчитанных и фактических объемов водохранилища на разных уровнях от уровня мертвого объема (УМО) до форсированного подпорного уровня (ФПУ) через выбранный шаг  $\Delta_z$ :

$$F_v = \frac{1}{m} \sum_{j=0}^m \left[ \left( V_{\text{УМО}+j \times \Delta_z}^{\text{расч}} + V_{\text{УМО}+j \times \Delta_z}^{\text{факт}} \right) / V_{\text{УМО}+j \times \Delta_z}^{\text{факт}} \right]^2 \quad (4)$$

где градация уровней  $z = z_{\text{УМО}} + j \times \Delta_z$  охватывает дискретно диапазон уровней от уровня мертвого объема до форсированного подпорного уровня. Шаг изменения по высоте  $\Delta_z$  для кривой объемов водохранилища для плотин различной высоты может быть разным, в зависимости от требований к проводимым расчетам и точности исходной информации. Оценки близости корректируемых параметров базовой гидравлической модели к исходным данным  $f$  являются общими для всех видов калибровочных параметров:  $\bar{X}(x_1, x_2, x_3, \dots, x_n)$ , – расстояния между створами ( $L$ ), шероховатости ( $n$ ), высотные отметки поперечных сечений ( $Z$ ), расстояния точек сечения от левой точки каждого профиля, ширины ( $B$ ) русла, левой и правой пойм, глубины ( $H$ ):

$$f_x = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \left( \frac{x_i^{\text{расч}} - x_i^{\text{факт}}}{x_i^{\text{факт}}} \right)^2 \quad (5)$$

где  $x_i$  – калибровочный параметр,  $n$  – общее число калибровочных параметров, *расч* – обозначение расчетной величины, *факт* – обозначение фактической величины. Расчет производится для каждого калибровочного параметра для одного створа, далее полученные результаты суммируются. Стоит учитывать погрешности и границы изменения калибровочных параметров в модели. Для характеристик морфометрии принимаются значения допустимых погрешностей, равные 10% ( $0 \leq \Delta \leq 10\%$ , где  $\Delta$  – величина погрешности для параметра  $X$ ,  $X$  – значение параметра). Границы изменения параметров (ширины русла, глубины, расстояний между створами, длин расчетных участков) могут быть заданы аналогично, с учетом и исходя из величин погрешностей:  $X_{\min} \leq X \leq X_{\max}$ , всегда  $X_{\min} \geq 0$ . Для значений шероховатости возможно задать только границы изменения параметра, в общем случае, он может изменяться от 0,025 до 0,20.

Определение  $F$  связано с большим числом трудоемких вычислений, целесообразно уменьшать число калибруемых параметров. Для упрощения большое число параметров калибровки разбивается на группы: морфометрия, расстояния между створами, значения шероховатости. Уменьшение числа параметров достигается путем: 1) рационального закрепления расчетных створов на рассматриваемом участке реки; 2) группировки створов по однородным локальным участкам с одинаковыми значениями шероховатости по створам для русла и поймы; 3) изменения параметров поперечных створов локального участка в процессе калибровки в одинаковой степени; 4) выделения равномерно расширяющихся, равномерно сужающихся участков.

При калибровке параметров гидравлической модели водного объекта необходимо выполнение основных условий: 1) требование близости расчетных и фактических уровней воды на постах наблюдений; 2) требование близости объемных характеристик водохранилища и водоемов на участке реки. Помимо основных условий, можно выделить дополнительные, которые должны быть учтены в функции  $F$  через  $f$ . Учитывая множественность параметров калибровки на каждом выделенном створе, для корректировки выбираются створы и параметры, изменение которых в максимальной степени ведет к сокращению невязок по всем поставленным условиям калибровки параметров. При этом

целесообразно на каждом шаге выбирать створ (или группу створов) и параметры одного вида, изменение которых в наибольшей степени уменьшает функцию  $F$ .

В разделах шестой – тринадцатый даются обоснования выбора изменяемых калибруемых параметров, описываются целесообразность и пути изменения, показаны варианты формализации процедуры калибровки и сведения процесса к набору последовательных действий. Формализация и последующее обобщение пошагового процесса калибровки параметров гидравлической модели состоит в выборе створов и параметров, которые целесообразно корректировать, внесении исправлений в модель, проведении гидравлического расчета, вычислении  $F$  и анализе точности проведенной калибровки параметров. В общем случае калибровки параметров модели для гидравлических расчетов при установившемся движении воды калибровка ведется по уровням  $z$  в створах наблюдений, рассматриваются отклонения расчетных от фактических уровней на этих створах; при неустановившемся движении оцениваются среднеквадратические отклонения  $z(t)$  в расчетные интервалы времени или максимум абсолютной разбежки уровней. Каждый последующий расчет – новая итерация. При выборе створов и параметров для корректировки рассматривается функция  $F$  оценки отклонений уровней и объемов, как функция  $F(X)$  от калибруемых параметров  $X$ : шероховатость, ширина, глубина русла, расстояния. Изменение параметров поперечного сечения однонаправленно – изменение каждого из них ведет к одинаковому по своему направлению изменению уровня на створе. Физические соображения и проведенные расчеты позволяют говорить, что функция  $F(X)$  имеет единственный минимум, в общем случае  $F_{\min}(X) \geq 0$ . При  $F_{\min}(X) \gg 0$  следует добавить створы и гидрологическую информацию. Каждый шаг калибровки параметров начинается с вычисления влияний каждого калибруемого параметра на каждом створе на  $F$ , общая оценка целесообразности корректировки параметра  $X$  является взвешенной оценкой целесообразности изменения параметра по его влиянию отдельно на уровни  $dZ/dx$  в данном створе и на объем  $dV/dx$  соответствующего водоема в зависимости от типа параметра. Оценки целесообразности корректировок отдельного параметра можно получить исходя и с помощью формулы Шези (1), откуда получаем:

$$\frac{dZ}{dz} = 1, \quad \frac{dZ}{dn} = \frac{3}{5n} \times A(n, B, L), \quad \frac{dZ}{dB} = -\frac{3}{5B} \times A(n, B, L), \quad \frac{dZ}{dL} = \frac{3}{10L} \times A(n, B, L) \quad (6)$$

$$dV/dz = B \times L; \quad dV/dH = B \times L/2; \quad dV/dB = H \times L/2; \quad dV/dn = 0; \quad (7)$$

$$A(n, B, L) = \left( \frac{nQ}{\alpha B} \times \sqrt{\frac{L}{\Delta Z}} \right)^{\frac{3}{5}}; \quad L = L_{i+1, i-1} / 2; \quad \Delta Z = Z_{i+1} - Z_{i-1} \quad (8)$$

Оценки (6-8) могут быть даны в целом по реке и аналогично для русла, для левой и правой поймы в отдельности. Далее путем суммирования определяются оценки для групп створов, выделенных, как описывалось выше. Выбираются группы створов и параметры с максимальными оценками целесообразности изменений. Изложенный подход к формализации калибровки параметров требует большого объема вычислений, как и весь процесс калибровки параметров по методу малых шагов. Выбор параметров и створов для корректировки на каждом шаге калибровки должен проводиться с учетом эвристических соображений (географические особенности, погрешности) и опыта пользователя в гидравлических расчетах.

Проведенные расчеты позволяют говорить, что внесенные в формулировку задачи калибровки требования минимизации отклонений  $f$  обеспечивают соблюдение всей логики изменения калибровочных параметров в допустимых границах их изменения. Корректируются параметры одного вида, переход к изменению другого вида параметров калибровки определяется достижением определенного результата при однонаправленных изменениях, когда рассматриваемый вид параметров приводит к изменению результата менее чем на 1-2% для морфометрии и 10-15% для шероховатости.

Практические исследования показали, что для равнинных и для горных участков рек набор калибруемых параметров для минимизации отклонения рассчитанных и фактических уровней воды не отличается. Корректируются: 1) длины участков между створами; 2) ширина створов; 3) шероховатость русла и поймы водного объекта одновременно; 4) высотные отметки продольного участка реки; 5) форма русла; 6) шероховатость русла; 7) шероховатость поймы. Изменяется степень влияния параметров для равнинных и горных рек. Для водохранилищ набор калибровочных параметров аналогичен, за исключением параметра шероховатости, с изменения которого начинается калибровка.

Технология проведения калибровки весьма удобна и практична, когда она ведется по видам параметров, перечисленным выше, одновременно на некотором числе створов. Контроль уровней проводится после каждого расчета. Удовлетворительность расчетных данных калибровки в отношении уровней оценивается по величине максимума абсолютной разности уровней воды, расчетных и измеренных, или по их среднему квадратичному отклонению:

$$\sigma = \max |\Delta| = \max \sqrt{\Delta^2}, \quad \sigma = \sqrt{\sum_1^n \frac{(\Delta^2)}{n}}, \quad \sigma = \frac{\left( \sum_1^n \frac{|(z_{\text{факт}} - z_{\text{расч}})|}{z_{\text{факт}}} \right)}{n}, \% \text{ м} \quad (9)$$

где  $\Delta = (z^{\text{расч}} - z^{\text{факт}})$  - отклонение вычисленных и измеренных уровней на постах наблюдений.

В отношении объемов водохранилища удовлетворительность результата калибровки оценивается по величине относительной разности в % расчетных и проектных величин  $\left| \frac{V_{\text{УМО}}^{\text{расч}+\Delta z} - V_{\text{УМО}}^{\text{факт}+\Delta z}}{V_{\text{УМО}}^{\text{факт}+\Delta z}} \right|$ , аналогично для НПУ, ФПУ и других значений  $\Delta z$ . Приемлемым отклонением при расчетах уровней водной поверхности считаются величины 5-35см., в общем случае. При расчетах объемов водохранилищ – 5-7%.

Последовательность действий калибровки параметров гидравлической модели по итерациям имеет вид:

Общий алгоритм калибровки: **1)** Вычисление среднеквадратичных оценок разбежки вычисленных и фактических величин → **2)** Проверка точности приближения к решению /если значения удовлетворительны – переход к пункту **10/** → **3)** Вычисление для каждого створа оценок по числу варьируемых параметров → **4)** Выбор створов и параметров для изменения → **5)** Суммирование положительных оценок параметров → **6)** Определение количественного значения изменения выбранных для вариации параметров → **7)** Корректировка данных модели → **8)** Проведение гидравлического расчета по откорректированной модели → **9)** Переход к пункту **1** → **10)** Конец алгоритма.

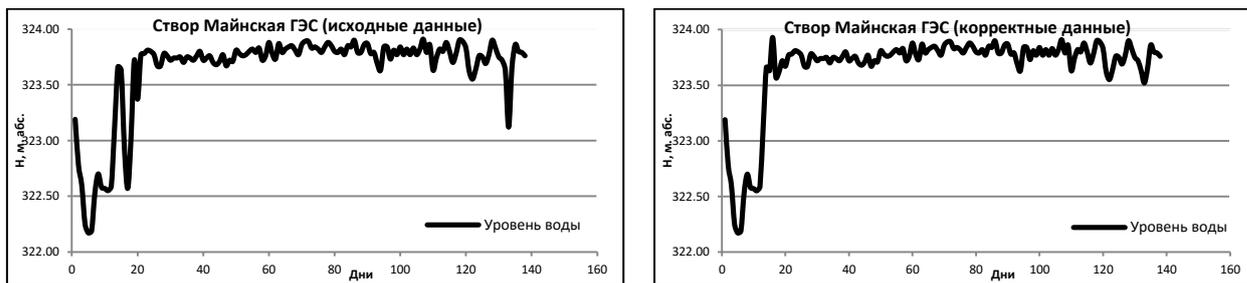
Эвристический алгоритм калибровки: **1)** → **2)** Проверка точности /если значения удовлетворительны – переход к пункту **8/** → **3)** Перебор в определенном порядке всех заданных створов наблюдений: *3.1)* Если вычисленные уровни превышают заданные фактические, - необходимо искать створ выше и ниже по

течению, на котором возможно расширение площади живого сечения; 3.2) Если на створе наблюдений вычисленные уровни лежат ниже заданных фактических, - искать створ выше по течению, на котором возможно сужение площади живого сечения; 3.3) Если рассматриваемый створ(ы), на которых намечены корректировки параметров по предыдущим пунктам, лежат в водохранилище, то: 3.3.1) Если вычисленный объем водохранилища превышает фактический более чем на 5-7%, то из всех намеченных к корректировкам параметров рассмотренных в п. 3.1 и 3.2 створах отбираются параметры, уменьшающие площадь живого сечения; 3.3.2) Если вычисленный объем водохранилища меньше фактического более чем на 5-7%, то из всех намеченных к корректировкам параметров рассмотренных в п. 3.1 и 3.2 створах отбираются параметры, увеличивающие площадь живого сечения; 3.3.3)/3.3.4) Если на рассматриваемой итерации калибровки вычисленный объем водохранилища меньше/больше фактического более чем на 5-7%, и нет створов, параметры которых следует корректировать для улучшения, - следует изменять параметры всех створов водохранилища в пределах погрешности измерений; → 4) → 5) → 6) → 7) Переход к пункту 1 → 8) Конец алгоритма.

Калибровка параметров гидравлической модели начинается с использования блока установившегося движения воды и расчетов с использованием объемных характеристик водохранилища, после ведется расчет в блоке неустановившегося движения. Целесообразно и обоснованно использование методов малых шагов, при рассмотрении применимости используемого программного комплекса при различных расходах воды.

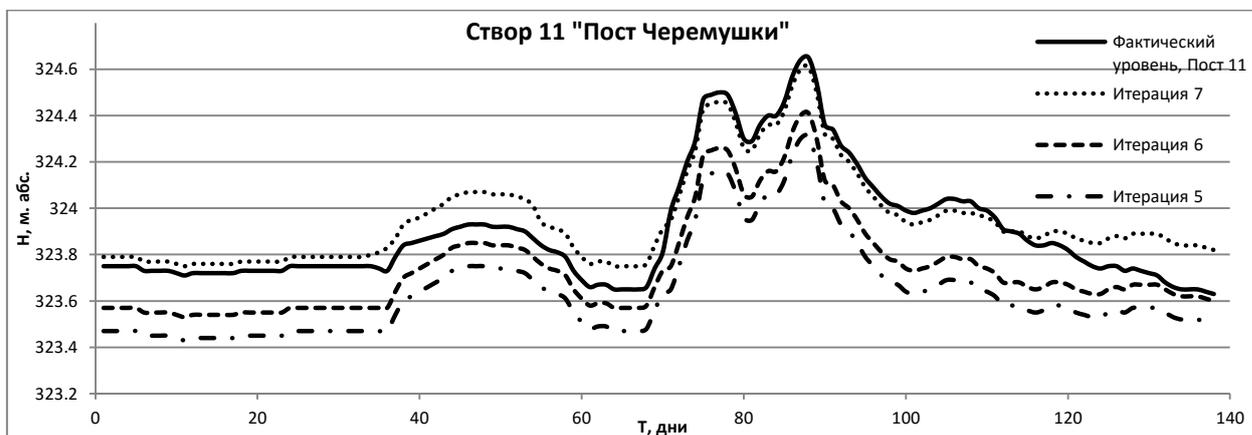
В *четырнадцатом разделе* приведен пример подготовки исходной гидрологической информации и проверка ее на предмет ошибок для гидравлических расчетов участка Майнского водохранилища на р. Енисей. Так же приведен пример пошагового построения гидравлической модели и изменения результатов расчетов при проведении процесса калибровки параметров итерационно по описанным выше методам. Для начала проверяется корректность и адекватность исходной информации. Показан предварительный анализ расходов и уровней воды. На графике исходной информации видны точки, «отскакивающие»

от общего хода уровней. С такой ситуацией сталкиваемся при анализе данных уровней воды за 2010г. (рис. 3), исправление проводится вручную.



**Рис. 3.** Пример возможных некорректностей в исходных данных уровней воды

Рисунок 4. иллюстрирует проведение процедуры калибровки параметров Майнского водохранилища. Рассмотрены результаты улучшения расчетов при каждой итерации, что наглядно показывает степень приближения к желаемой точности с каждой итерацией (пример пост № 11 Черемушки в виде графика).



**Рис. 4.** Пример результатов расчетов при калибровке параметров

В итоге расчетные и фактические графики хода уровней воды должны быть максимально близкими, с синхронными максимумами и минимумами уровней воды, волн половодья и паводков. Стоит учитывать, что даже при неполном совпадении графиков, результат может считаться удовлетворительным (рис. 8).

В **Главе 5** рассматриваются гидравлические модели Красноярского, Майнского и Саяно-Шушенского водохранилищ с участками русла р. Енисей, приведены основные результаты расчетов.

*Гидравлическая модель Красноярского водохранилища.* При моделировании уровня режима, предварительно дано подробное гидрологическое описание водохранилища как объекта исследования; по намеченным 153 створам построена гидравлическая модель, проведены расчеты по двум блокам данных: 1995-1999гг. – для калибровки параметров модели; 2001-2005гг. – для проверки работы

гидравлической модели. При калибровке учитывались объемные характеристики водохранилища. Исходной информацией описания рельефа поперечных профилей и расположения их по длине водохранилища являются цифровые данные промеров, карты местности М:1:50000 для всех рассматриваемых водных объектов. В результате моделирования установившегося движения получены удовлетворительные результаты расчетов для опорных постов (табл. 1).

**Таблица 1.** Результаты расчетов с использованием блока установившегося движения воды

| № | Опорный пост, название | Расход воды, м <sup>3</sup> /сек                          |       |       |       |       |       |       |
|---|------------------------|---|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
|   |                        | 1000  | 2000  | 3000  | 3500  | 6000  | 10000 | 12000 |
|   |                        | $\Delta z = z_{\text{расч}} - z_{\text{факт}}, \text{ м}$ |       |       |       |       |       |       |
| 1 | пос. Никитино          | +0,19   | +0,26 | +0,04 | +0,02 | +0,01 | +0,01 | +0,01 |
| 2 | д. Подсинее            | +0,05   | +0,02 | +0,08 | +0,09 | +0,07 | +0,05 | +0,05 |
| 3 | д. Селиваниха          | +0,08   | +0,1  | +0,05 | +0,07 | +0,03 | +0,09 | +0,09 |
| 4 | р.п. Краснотуранск     | +0,32   | +0,24 | +0,15 | +0,13 | +0,15 | +0,09 | +0,09 |
| 5 | р.п. Енисей            | +0,32   | +0,24 | +0,15 | +0,13 | +0,15 | +0,09 | +0,09 |

Незначительное изменение уровней воды на створах, относящихся к водохранилищу (№4,5), объясняется большими площадями живого сечения относительно площадей живого сечения речного участка водного объекта, малыми скоростями течения, незначительными уклонами и большими объемами воды.

При калибровке параметров гидравлической модели для минимизации отклонения рассчитанного объема водохранилища от фактического получены удовлетворительные значения погрешностей расчета (табл. 2).

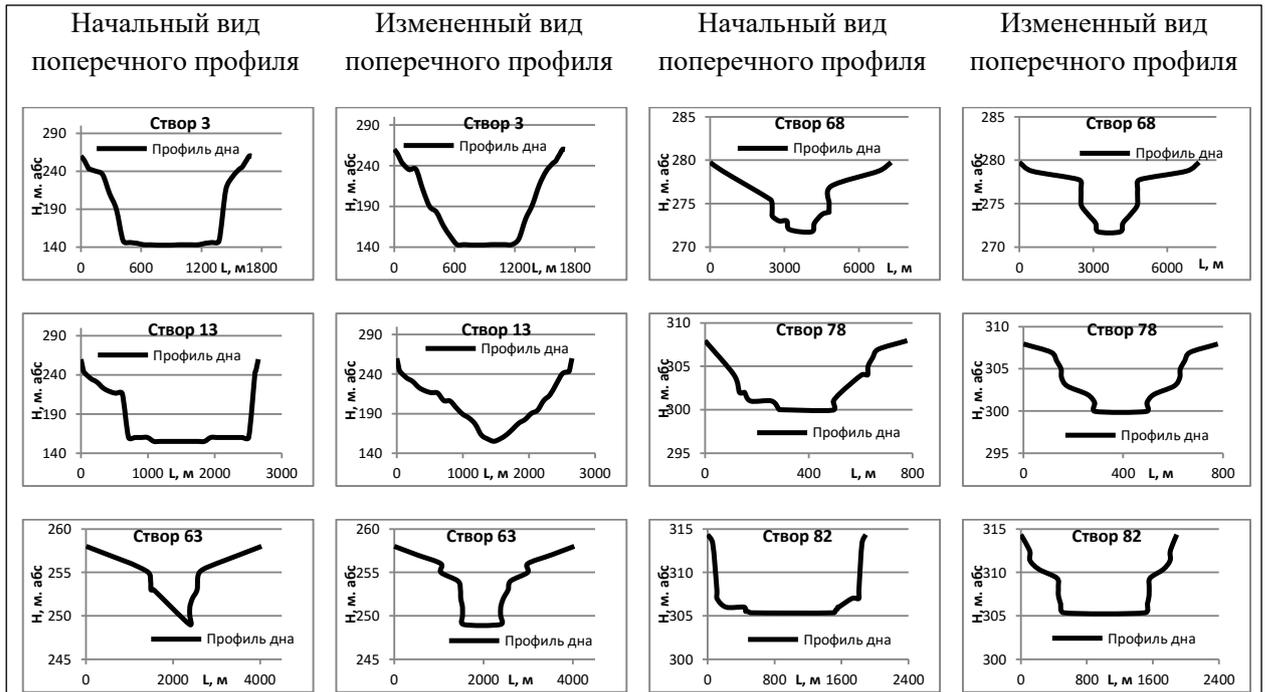
**Таблица 2.** Результаты точности калибровки параметров с использованием объемных характеристик водохранилища

| Величина | Объем расчетный, км <sup>3</sup> | Объем фактический, км <sup>3</sup> | $\Delta$ , % |
|----------|----------------------------------|------------------------------------|--------------|
| НПУ      | 68,31                            | 73,30                              | 6,81         |
| ПО       | 29,28                            | 30,40                              | 3,68         |

Калибровка параметров проводилась с изменениями значений шероховатости и морфометрических характеристик поперечных сечений русла водного объекта. Для иллюстрации проведенных изменений морфометрии поперечных створов приведен рисунок 5.

Полученные в процессе калибровки параметры морфометрии поперечных профилей русла водного объекта имеют в большей степени логичную форму, по

сравнению с данными изначально, что объясняется некорректностью и неточностью исходной информации.



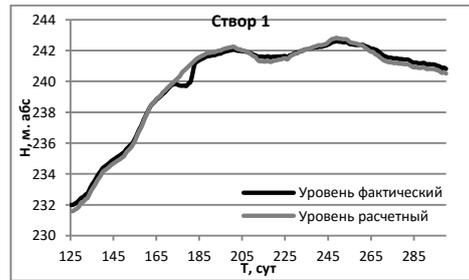
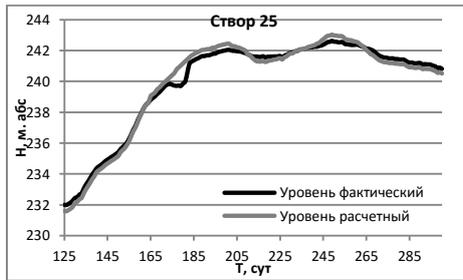
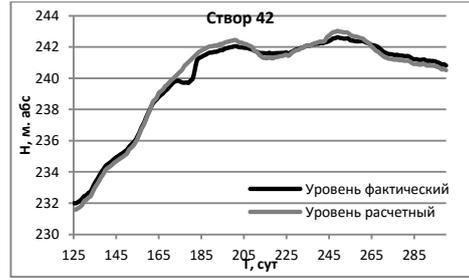
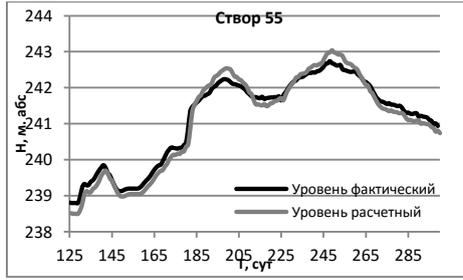
**Рис. 5.** Иллюстрация исходных и измененных поперечных профилей водного объекта

Результаты проведенных гидравлических расчетов выражены в виде графиков хода уровней воды за выбранные промежутки времени – по годам за период открытого русла при использовании блока неустановившегося движения (рис. 7). Контроль полученных данных проводился для четырех постов: Створ 55 д. Селиваниха; Створ 42 р.п. Краснотуранск; Створ 25 р.п. Енисей; Створ 1 плотина Красноярской ГЭС. Отклонение 0,25-0,38м. считается приемлемым.

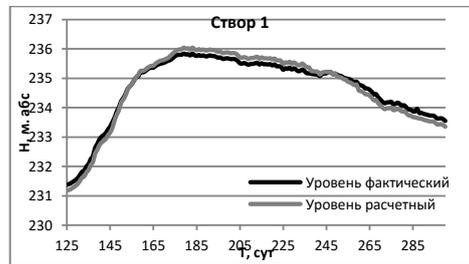
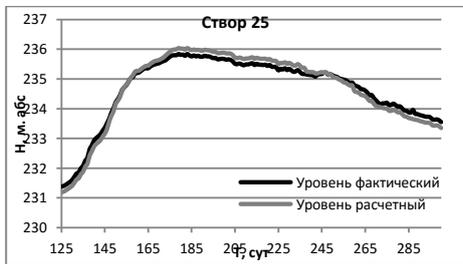
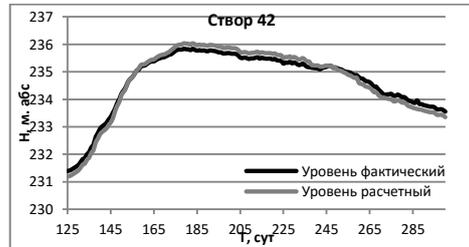
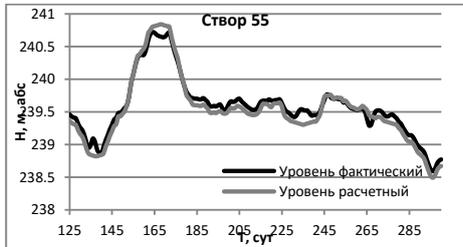
По итогам расчетов можно сделать вывод, что для лет, характеризующихся средними значениями стока и сбросов воды, достаточна калибровка параметров для одного - двух лет, остальные годы со средними показателями расходов воды будут при расчете укладываться в средние значения погрешностей расчета при уточненной морфометрии: площади сечения русла и значения шероховатости.

Калибровка параметров модели для лет с повышенным или пониженным стоком должна проводиться для повышения качества выходных данных расчета, связано это с тем, что при прохождении высоких или, наоборот, низких расходов при калибровке параметров морфометрии и значений шероховатости они будут уточняться, аналогично проведению калибровки параметров при установившемся движении воды.

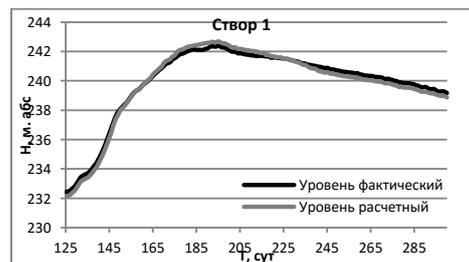
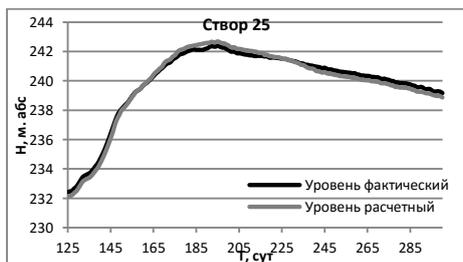
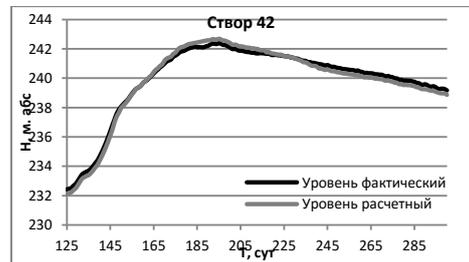
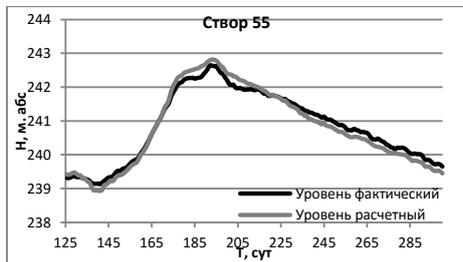
1995 г

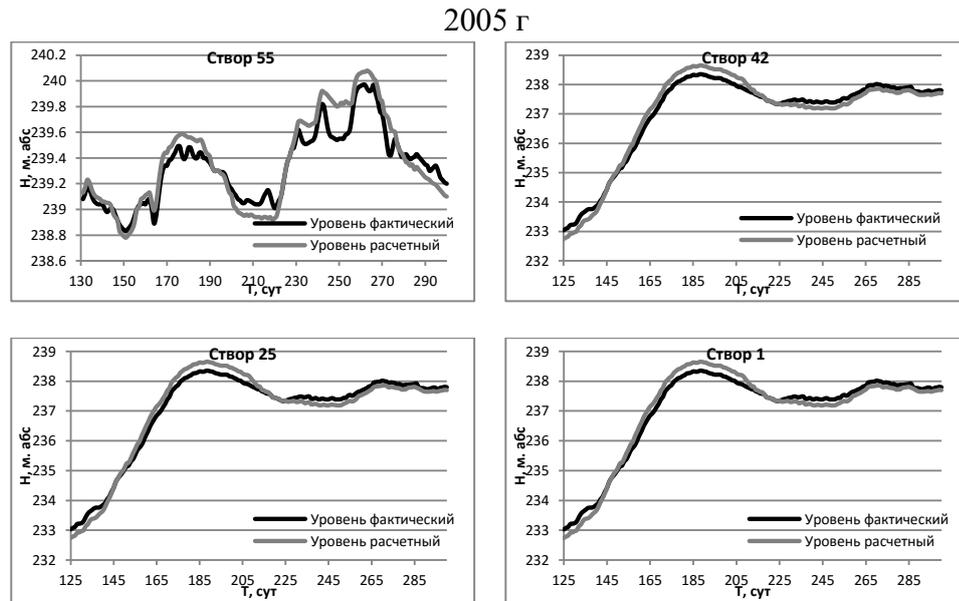


2001 г



2004 г





**Рис. 7.** Пример хода уровня воды Красноярского водохранилища

В данном случае 1995г. (калибровочный) и 2004г. (проверочный) являются годами повышенного стока, что при калибровке параметров учитывается и позволяет корректно откалибровать и проверить параметры морфометрии и шероховатости. Для этих лет погрешность расчета незначительно больше, чем для лет со средними значениями стока, но происходит уточнение верхних границ русла, в некоторых случаях поймы. В данном случае анализ многоводного года более актуален, чем маловодного, параметры гидравлической модели при средних расходах воды были уточнены в большом объеме при проведении расчетов с использованием блока установившегося движения воды. Для лет повышенной водности наблюдается тенденция к незначительному завышению расчетных значений по сравнению с фактическими, что может объясняться недостаточной точностью исходных данных. Величины погрешностей лежат в допустимых пределах, как для калибровочного, так и для проверочного года, и дальнейшего уточнения не требуют. После проведения пошаговой последовательной калибровки параметров гидравлической модели Красноярского водохранилища и проверки результатов калибровки на независимом материале, полученная итоговая модель готова к использованию для практических и научных нужд.

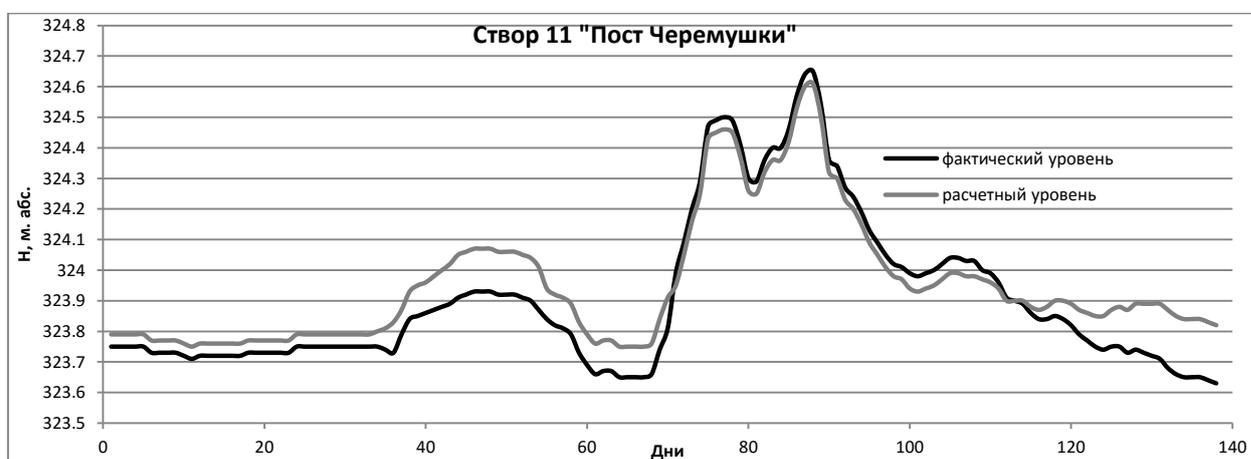
*Гидравлическая модель Майнского водохранилища.* Исходной являются режимные наблюдения за уровнями и расходами воды на гидроэлектростанциях за 2006 и 2010гг. и в створе 11 п. Черемушки.

Итоговые данные расчета с использованием блока установившегося движения воды приведены в таблице 3. Отклонение 0,19м. считается приемлемым.

**Таблица 3.** Пример конечного расчета после калибровки параметров модели с использованием блока установившегося движения воды в пр. комплексе НЕС-RAS

| Итерация |                 |                 |                 |
|----------|-----------------|-----------------|-----------------|
| Пост     | Н, м. асб. Факт | Н, м. асб. Расч | $\Delta=P-\Phi$ |
| 15       | 325.18          | 325.57          | 0.39            |
| 11       | 325.18          | 325.12          | -0.06           |
| 1        | 323.80          | 323.80          | 0.00            |
|          |                 | $\sigma$ , м    | 0.19            |

В результате моделирования с использованием блока неустановившегося движения получен график хода уровней воды за выбранные промежутки времени. Контроль полученных данных проводился для створа 11 п. Черемушки гидрометрических наблюдений. После калибровки параметров модели Майнского водохранилища по гидрологическим данным 2006г., проводится проверка корректности работы модели на заранее подготовленном независимом материале с гидрологическими данными за 2010г. Итоговые результаты калибровки параметров представлены на рисунке 8. Среднее квадратичное отклонение 0,15-0,20м. считается приемлемым.



**Рис. 8.** Визуализация итоговых результатов калибровки параметров для створа 11

*Гидравлическая модель Саяно-Шушенского водохранилища.* Исходной информацией являются данные объемов водохранилища. Производится калибровка параметров гидравлической модели до достижения удовлетворительной точности совпадения объемов.

В результате получена таблица отклонений расчетных объемов водохранилища от фактических (табл. 4).

**Таблица 4. Итоговые результаты калибровки параметров Саяно-Шушенского вдхр.**

| Уровень, м. абс. | Объемы водохранилища, км <sup>3</sup> |                       |           |
|------------------|---------------------------------------|-----------------------|-----------|
|                  | Фактические, м. абс.                  | Рассчитанные, м. абс. | Ошибка, % |
| 540              | 31.33                                 | 30.06                 | 3.50%     |
| 539              | 30.71                                 | 29.43                 | 3.71%     |
| 530              | 25.81                                 | 24.71                 | 3.90%     |
| 520              | 21.72                                 | 20.48                 | 5.70%     |
| 510              | 18.64                                 | 17.35                 | 6.90%     |
| 500              | 16                                    | 14.88                 | 7.00%     |

Как показано, погрешность расчетов составляет 7% и менее, что приемлемо и дальнейшая калибровка параметров модели Саяно-Шушенского водохранилища не требуется. Среднеквадратичная погрешность уровней воды на постах наблюдений составляет 0,06м.,  $\sigma_{\max} = 0,17$  м.

В **Заключении** сформулированы основные **результаты работы и выводы**:

1 Построены гидравлические модели Саяно-Шушенского, Майнского, Красноярского водохранилищ с речными участками и проведены расчеты уровня режима в программном комплексе HEC-RAS с использованием схем калибровки параметров и использованием описанных в работе подходов до достижения удовлетворительной точности расчетов;

2 Проведен анализ исходных данных для описания моделируемых водных объектов, необходимая для проведения расчетов информация структурирована и адаптирована под используемый программный комплекс;

3 Даны практические рекомендации и методы по ведению процесса калибровки параметров моделей гидравлических расчетов, предназначенных для расчета установившегося и неустойчивого движения воды в водных объектах для участков рек и водохранилищ, изложен метод и рекомендации проведения корректировки параметров;

4 Даны практические рекомендации и методы по ведению процесса калибровки параметров моделей гидравлических расчетов при недостаточности данных гидрологических наблюдений, с калибровкой параметров гидравлической модели при заданных объемных характеристиках водохранилища;

5 Получены гидрографы уровней воды Красноярского водохранилища для многолетнего периода при проведении гидравлических расчетов в программном комплексе HEC-RAS.

**СПИСОК РАБОТ, ОПУБЛИКОВАННЫХ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ**

*Статьи в научных журналах, рекомендованных ВАК:*

1 Левит-Гуревич Л.К., Д.А. Никифоров. «Анализ процесса идентификации параметров морфометрии рек и водохранилищ в компьютерных моделях гидравлических расчетов (результативность и однозначность калибровки)» // Известия Самарского научного Центра Российской академии наук. 2015. Том 17, номер 6. Самара: изд-во Самарского научного Центра РАН. 2015. С. 116-122.

2 Никифоров Д.А. «Проблемы создания гидрхимических моделей рек и водохранилищ на примере Москвы реки с использованием программного комплекса НЕС-RAS» // Известия Самарского научного Центра Российской академии наук. Том 16, номер 1(4): Самара. – 2014 – изд-во Самарского научного Центра РАН, - С. 1003-1008;

3 Никифоров Д.А. «Методика калибровки гидравлических моделей рек и водохранилищ» // Известия Самарского научного Центра Российской академии наук. 2015. Том 17, номер 6. Самара: изд-во Самарского научного Центра РАН. 2015. С. 128-134.

Никифоров Дмитрий Андреевич

АВТОРЕФЕРАТ  
диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

**Моделирование уровня режима водохранилищ реки Енисей**

---

Подписано в печать 00.00.16 Формат 60x90 1/16. Гарнитура Times.

Печать цифровая. Усл.печ.л. 1.0. Тираж 150 экз. Заказ №1.

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт водных  
проблем Российской академии наук (ИВП РАН)

119333, Москва, ул. Губкина, дом. 3

Отпечатано ИВП РАН

---