

## ОТЗЫВ ОФИЦИАЛЬНОГО ОППОНЕНТА

**Жука Виктора Архиповича**

на диссертацию **Никифорова Дмитрия Андреевича** «*Моделирование уровня режима водохранилищ реки Енисей*», представленную на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 25.00.27 — *Гидрология суши, водные ресурсы, гидрохимия*.

### 1. АКТУАЛЬНОСТЬ ТЕМЫ ДИССЕРТАЦИОННОГО ИССЛЕДОВАНИЯ

Разработка новых методов и схем гидрологических расчетов уровней и расходов воды всегда относились к важнейшим проблемам речной гидрологии и поэтому исследования в этой области актуальны. Их актуальность тесным образом связана с наметившимся несоответствием существующих методов гидрологических расчетов и прогнозов стока сегодняшнему состоянию сети гидрометеорологического мониторинга. В условиях уже заметных глобальных изменений климатических условий, нарушениях однородности рядов наблюдений из-за значительной антропогенной нагрузки на отдельные речные водосборы, вызывающей изменения их водного режима, расчеты речного стока с использованием существующих традиционных методов становятся малоэффективными.

Успешное решение многих гидрологических задач требует разработки новых методических средств. В частности, невозможно обойтись без гидравлических расчетов при планировании режимов работы водохранилищ, при составлении и уточнении диспетчерских графиков управления водохранилищами, при мониторинге складывающейся водохозяйственной ситуации на водном объекте. Она ведет к созданию постоянно действующих по запросам пользователей моделей водных объектов гидравлических расчетов – участков рек, водохранилищ и водоемов.

В рецензируемой работе для участков реки Енисей с тремя водохранилищами, обладающих сложной гидрографической сетью и многофакторным режимом динамики потоков, на основе программного комплекса гидравлических расчетов HEC-RAS 4.1.0. предлагается методика моделирования их уровня режима. Важным признаком данного комплекса является наличие автоматизированной системы обработки и управления пространственно-распределенной информацией. В зарубежной практике уже накоплен некоторый опыт успешного использования различных модификаций этого комплекса.

В диссертации, на основе комплекса, проводится построение гидравлических моделей для верхних бьефов трех водохранилищ р. Енисей, позволяющих осуществлять моделирование уровня режима при установившемся и неустойчивом движении воды на их речной и водохранилищной части. Основные усилия автора диссертации были направлены на решение вопросов определения параметров гидравлической модели, на разработку методов их калибровки при ограниченной морфометрической и гидрометрической информации и подготовку моделей к использованию в оперативной практике эксплуатации гидроузлов.

### 2. ОЦЕНКА СОДЕРЖАНИЯ ДИССЕРТАЦИОННОЙ РАБОТЫ

Диссертационная работа состоит из пяти глав, введения, заключения и шести приложений (объемом 158 стр.). Основной текст диссертации, объемом 177 страниц, иллюстрирован 62 рисунками и содержит 26 таблиц. Список литературы включает 109 наименований.

Во **введении** представлена общая характеристика работы, указана

актуальность темы исследования, сформулирована цель и задачи исследования, очерчены рамки предстоящего исследования, излагаются научная новизна, теоретическая и практическая значимость диссертационной работы, сформулированы положения, выносимые на защиту, обосновывается достоверность полученных результатов.

Целью диссертационного исследования является адаптация программного комплекса HEC-RAS для построения гидравлических моделей зарегулированных участков р. Енисей, позволяющих рассчитывать уровенный режим реки и водохранилищ, с корректировкой параметров моделей.

Для достижения цели исследования в работе решался целый ряд задач, связанных с изучением вопросов в области гидравлического моделирования и обозначением среди них места используемого вычислительного комплекса, анализом водного режима трех водохранилищ р. Енисей, созданием информационной основы исследования: базы картометрических, физико-географических, гидрологических и морфометрических данных, разработкой методических средств автоматизированной обработки в программном комплексе разнородных данных из различных источников, разработкой гидравлических моделей трех водохранилищ с проверкой результатов моделирования на независимом материале, выбором метода калибровки параметров и ее исполнение с оценкой эффективности используемых приемов, определением границ применимости моделей и спектра воспроизводимых гидрологических явлений.

В работе исследуется верхняя часть реки Енисей (водохранилища с участками рек), как объект гидравлического моделирования. Основными объектами выступают три участка: г. Кызыл – плотина Саяно-Шушенской ГЭС (Саяно-Шушенское водохранилище с участком р. Енисей в естественном состоянии у г. Кызыл), плотина Саяно-Шушенской ГЭС – плотина Майнского водохранилища (Майнское водохранилище) и плотина Майнского водохранилища – плотина Красноярского водохранилища (Красноярское водохранилище с естественным участком р. Енисей в верховьях).

**В первой главе изложено современное состояние проблемы** описания движения воды в реках и водохранилищах и колебаний их уровней. На основе обширного литературного обзора и анализа публикаций по теме диссертационного исследования показан сегодняшний уровень решения проблемы. Особое внимание уделено вопросам моделирования водного режима и оценке параметров моделей.

В современной практике гидрологического моделирования ведущую роль играют гидродинамические методы расчета неустановившегося движения. Наиболее употребительной гидродинамической моделью движения воды в речных руслах и системах регулирования стока являются уравнения Сен-Венана и упрощенные методы на основе адвективно-диффузионной модели, уравнения кинематической волны и др.

К настоящему времени разработан ряд программных комплексов, позволяющих решать с помощью гидравлических моделей большой круг гидрологических задач, связанных с руслом и долиной реки. Они используются в расчетах режимов водохранилищ, оперативное управления которых, в дополнение к диспетчерскому графику, требует постоянной проверки уровенного состояния водохранилищ и естественных участков реки.

К числу наиболее популярных моделей такого рода можно отнести отечественные программные комплексы FLOOD, RIVER, STREAM\_2D (Беликов и др., 2002, 2014).

Из зарубежных комплексов в нашей стране получил некоторое распространение разработанный в Датском Гидравлическом Институте (DHI) программный комплекс MIKE11, предназначенный для решения широкого круга практических задач в рамках одномерной схематизации процессов движения воды в русловой сети. Имеется еще

целый ряд более специализированных моделей: Delft 3D Института гидравлики (г. Дельфт, Нидерланды), французский TELEMAC, британские ISIS и HYDROLOG, американские серии HY и HEC. Больше внимание уделено описанию программного комплекса гидравлических расчетов HEC-RAS американского корпуса военных инженеров (в приложении 6 имеется еще 13 страниц).

Гидравлические модели отличаются друг от друга, в основном, способом схематизации расчетной области и набором дополнительных блоков. При расчете гидрологических параметров большинство моделей используют систему дифференциальных уравнений Сен-Венана, уравнения мелкой воды, методы конечных разностей, формулы осреднения и приведения, или осуществляют расчет последовательно по блокам данных. При построении модели течений каждый объект требует специфического подхода. К главным особенностям участков реки с водохранилищем является наличие двух(трех) зон и наличие переменного подпора с его влиянием на уровни воды при различной водности реки, смена направления и скоростей течения при выходе воды на пойму реки.

Численные методы решений уравнений модели и методы калибровки их параметров по наблюдениям за водным режимом хорошо разработаны и апробированы для многих крупных речных систем, однако применение этих уравнений, требует детальной информации о пространственной изменчивости геометрических и гидравлических характеристик речных русел, либо же о пространственно-временных изменениях движения воды. Продолжается разработка новых методов определения параметров моделей. В частности, в пионерной работе Р.И. Черкезова(2012) сделана попытка применения статистического аппарата нейронных сетей к задаче поиска параметров гидравлической модели. Для получения численного решения здесь использовалась серия прямых гидравлических расчетов сходных между собой вариантов гидрологических данных расходов между заданными створами(обучение нейронов). Калибровка модели для гидравлических расчетов участка реки с водохранилищем представляет собой, по сути, решение обратной задачи.

Если гидравлический расчет по модели определяет уровни воды в заданных расчетных створах по заданной морфометрии, т.е. по описанию поперечных профилей створов и гидрологическим данным, то обратная задача должна определить морфометрию участка реки на выделенных створах по заданным уровням воды при заданных гидрологических данных.

Решение обратных задач для уравнения Сен-Венана, было положено в отечественной гидрологической практике работой В.И. Корня и Л.С. Кучмента(1973), где было произведено определение геометрических и гидравлических характеристик русла по наблюдениям за расходами и уровнями в достаточно большом числе створов путем применения метода обращения разностных схем и путем решения интегральных уравнений.

Во **второй главе** приводится физико-географическое, ландшафтное и гидрологическое описание исследуемого бассейна реки Енисей. Дана общая характеристика уровенного режима реки по данным многолетних наблюдений на гидрологических станциях. После ввода в строй Саяно-Шушенской(1978), Майнской(1984) и Красноярской ГЭС (1967г.), с образованием одноименных водохранилищ, ход уровней воды определяется режимом работы ГЭС, происходит выравнивание годового хода уровней воды за счет перераспределения водности. После регулирования стали более выраженными периоды наполнения и сброса воды из водохранилищ и произошло значительное повышение уровней воды.

По данным многолетних наблюдений за стоком определены квантили редкой

повторяемости расходов воды – 1% и 95 %, для расчета рядовых и экстремальных сценариев притока воды к водохранилищам при расчетах их уровненного режима.

**В третьей главе** описана схема построения компьютерной гидравлической модели водного объекта в программном комплексе HEC-RAS и указан набор информации необходимой для работы модели. Модель составляется для расчетных участков реки - для части реки, которая берется в рассмотрение для проведения гидравлических расчетов. Он может включать в себя водохранилище, часть русла реки без водохранилища или водохранилище с русловым участком вместе. Калибровка модели и расчет производится для такого участка. Для рассматриваемого участка р. Енисей созданы три различные гидравлические модели – для Саяно-Шушенского, Майнского и Красноярское водохранилищ. Разделение участка моделируемой реки на три различные модели дает возможность более точно производить калибровку каждой модели до достижения удовлетворительной точности расчетов.

Исходная информация, для модели делится на два вида: базовая и гидрологическая информация для оперативных расчетов. Подготовка базовой информации проводится в несколько этапов: сбор информации и данных, нахождение и анализ картографической информации, выделение расчетных участков, выделение локальных участков, расстановка расчетных створов, определение морфометрических характеристик поперечных сечений расчетных створов, ввод информации в программный комплекс, расчет, калибровка, проверка корректности работы модели на независимых данных. На картографической основе производится выделение расчетного участка реки, разделенного на локальные участки с определенными однородными морфометрическими характеристиками. Гидравлические расчеты проводятся по выделенным расчетным участкам реки последовательно в соответствии с технологией управления водохранилищами в каскаде. Следует учитывать, что программа HEC-RAS не учитывает многорукавности реки, - в исходной информации можно задать лишь одно основное русло, что может слишком «осреднить» результаты моделирования на русловых многорукавных участках, особенно при высоких уровнях воды.

**В четвертой главе** изложена методика калибровка параметров цифровой гидравлической модели. Мотивируя калибровку параметров модели, автор классифицирует возможные погрешности и неточности модельного расчета по вариантам их возникновения и возможностям устранения. Это могут быть различные погрешности в гидрологической, морфометрической и другой информации или связан со структурой самой модели или при численном решении уравнений. Излишняя подробность данных в гидродинамической модели также может вызывать появление неточностей и некорректностей при расчете. В главе показана система проведения калибровки для гидравлического блока обработки информации программного комплекса HEC-RAS. Калибровка параметров рассматривается как обратная задача гидравлического расчета. Этап калибровки параметров расчетного участка реки представляет собой основной по сложности этап при подготовке гидравлической модели. Цифровая гидравлическая модель реки для расчетов установившегося и неустановившегося движения воды состоит из данных геометрии реки и пойм, поперечных сечений, значений параметров шероховатости, граничных и начальных условий по уровням и расходам, ряда других данных. Предполагается, что параметры поперечных сечений можно менять в определенных разумных пределах, сохраняя форму русла и пойм. Значения параметра шероховатости также меняются в соответствии с характеристикой поверхности в заданных пределах.

Получаемые при математическом моделировании уравнения содержат коэффициенты, связанные с физическими характеристиками среды: площади сечений, коэффициенты гидравлического сопротивления, включающие в себя в свою очередь смоченный

периметр и коэффициенты шероховатости. То есть, уравнения Сен-Венана включают в себя морфометрические описания водного объекта на выделенных створах. Сложность калибровки параметров во многом зависит от качества данных, получаемых с гидрологических постов, карт и других материалов, которые ложатся в основу картографической, базовой и оперативной гидрологической информации. В главе автор предлагает схемы сокращения числа калибровочных параметров. Проведена калибровка параметров гидравлической модели водного объекта на примере искусственного водотока.

**В главе 5** последовательно рассматриваются гидравлические модели Красноярского, Майнского и Саяно-Шушенского водохранилищ. Красноярское водохранилище рассматривается как основной объект гидравлического моделирования уровня режима рассматриваемого участка р. Енисей. Калибровка параметров модели Красноярского водохранилища выполнялась по данным наблюдений за 1995-99 гг., а проверка эффективности моделирования по объемам воды за 2001-05 гг. Корректировались коэффициенты шероховатости и отметки поперечных профилей русла. В результате достигнуто приемлемое для использования качество моделирования.

Небольшая Майнская ГЭС является в каскаде контррегулятором. Основная ее задача — сглаживать колебания уровня реки в нижнем бьефе Саяно-Шушенской ГЭС. Приток воды в Майнское водохранилище осуществляется только в виде сбросов с Саяно-Шушенской ГЭС, боковая приточность на всем протяжении не оказывает существенного влияния на объем воды в водохранилище, что упрощает работу с этим водным объектом при создании и калибровке параметров гидравлической модели. Калибровка выполнена по данным 2006 г., а проверка качества моделирования — по данным 2010 г. Сведения о рельефе получены по промерам, а сведения о уровнях и расходах — по данным ГЭС. Выполненная по одному году калибровка параметров привела к приемлемым результатам модели, полученным на независимом материале.

Гидравлическая модель Саяно-Шушенского водохранилища. Плотина ГЭС образует крупное Саяно-Шушенское водохранилище площадью 621 км<sup>2</sup>, общим объемом в 31 км<sup>3</sup>. Для проведения гидравлических расчетов, все водохранилище было разделено на 34 створа, дополнительно выделялись створы крупных заливов, образованные притоками — реками, впадающими в Саяно-Шушенское водохранилище. Калибровка параметров Саяно-Шушенского водохранилища производилась путем изменения калибровочных параметров при различном его наполнении и различных объемах сбросов и нижний бьеф. Калибровка параметров участка естественного русла р. Енисей проведена по проектным кривым свободной поверхности в нескольких нижних створах участка естественного русла для расходов разной обеспеченности, а также по данным уровням реки у г. Кызыл за 2006 год от 1-го апреля до 31 октября. В результате калибровки достигнуты приемлемые для практического применения результаты.

**В Заключение** сформулированы основные результаты, полученные в ходе работы над диссертацией.

Подводя итог, необходимо отметить, что диссертация Д.А.Никифорова представляет собой законченное и качественное научное исследование. Диссертация содержит крупные обобщения, важные научные и практические результаты и свидетельствует о высокой квалификации ее автора при решении сложных задач моделирования речного стока. Содержание автореферата полностью соответствует тексту диссертации и дает исчерпывающее представление о самой работе и полученных результатах.

### **3. НОВИЗНА НАУЧНЫХ ПОЛОЖЕНИЙ, ВЫВОДОВ И РЕКОМЕНДАЦИЙ**

Новизна выполненного исследования состоит в разработке технологической цепи, позволяющей выполнять оперативные расчеты изменения уровней водохранилища, выполнять имитационные расчеты при различном водном режиме, выполнять корректировку параметров модели при недостаточности исходных данных режимных наблюдений за уровнем режимом.

На основе программного комплекса HEC-RAS выполнено гидравлическое моделирование установившегося и неустановившегося движения воды в водных объектах на зарегулированных участках реки Енисей, - Красноярское, Майнское и Саяно-Шушенское водохранилища с участками реки в естественном состоянии, в различных условиях водности.

Проведена структуризация необходимой информации для расчетов уровней и расходов воды по видам и степени важности для модели, ее адаптация под используемый программный комплекс.

Разработаны рекомендации и общие схемы калибровки параметров гидравлической модели водного объекта с корректировкой исходных морфометрических характеристик и значений шероховатости русла и поймы;

#### **4. ДОСТОВЕРНОСТЬ И ОБОСНОВАННОСТЬ НАУЧНЫХ ПОЛОЖЕНИЙ, ВЫВОДОВ И РЕКОМЕНДАЦИЙ, СФОРМУЛИРОВАННЫХ В ДИССЕРТАЦИИ**

Научная обоснованность и достоверность положений и выводов диссертационного исследования подтверждаются успешными результатами моделирования водного режима различных водных объектов, использованием современных методов сбора и первичного анализа исходных данных, статистическими оценками конечных результатов эффективности моделирования с проверкой его качества на независимом материале. Результаты расчетов обработаны и интерпретированы с помощью современных геоинформационных технологий.

Используемые в рамках данной работы методики и положения при создании гидравлических моделей конкретных водных объектов подвергались проверке с указанием погрешности расчетов. Разработанные схемы калибровки и корректировки параметров гидравлической модели, могут быть расширены и распространены на другие водные объекты. Выводы и рекомендации соответствуют полученным в работе результатам.

#### **5. НЕДОСТАТКИ РАБОТЫ, ЗАМЕЧАНИЯ**

К диссертации имеется ряд замечаний, носящих методический и редакционный характер:

- в работе отсутствует карта или плановая схема исследуемого участка реки с расположением и очертаниями исследуемых водохранилищ и сетью станций гидрологических наблюдений с данными о периоде наблюдений;

- стр. 59. « Важнейшим этапом подготовки базовой цифровой модели реки для гидравлических расчетов является подготовка данных по поперечным сечениям реки на выделенных створах, т.е. профилей естественного русла реки с поймами (левой и правой)...». А для неизученной реки как задаются профили?

- учитывая малый объем имеющейся гидрологической информации, для проверки устойчивости параметров модели целесообразно было бы поменять калибровочный массив данных с проверочным;

- слишком детально описана последовательность расчета по модели (глава 3) и очень большой объем занимают приложения, имеются близкие совпадения с основным текстом;

- в главе 2 и в приложении 2 «Основные физико-географические и гидрологические характеристики бассейна реки Енисей» излишне подробно описан климат и гидрографические характеристики всего бассейна р. Енисей.
- приложение 6 (324-336 стр.). Модель ДНІ МІКЕ 11 в работе не используется и ее подробное описание кажется излишним;
- характеристики годового стока р. Енисей и его притоков приведены в таблице 2.5. В них представлены значения годового стока для замыкающих постов обеспеченности 1% и 95 %. Неясно, почему для расчета кривой обеспеченности на постах основной реки назначено  $C_s/C_v = 2.5$ , а для притоков  $C_s/C_v = 2.0$ .
- в автореферате в Заключении(пункт 5) «Получены гидрографы уровней воды ...». Вероятно, досадная описка.
- в работе не указаны конкретные области применения полученных результатов;

## 6. ПОЛНОТА ИЗЛОЖЕНИЯ МАТЕРИАЛОВ ДИССЕРТАЦИИ В ПУБЛИКАЦИЯХ СОИСКАТЕЛЯ

Автором по теме диссертации было опубликовано 8 работ, 3 из которых - в журналах, рекомендованных ВАК для публикации результатов диссертационного исследования (одна в соавторстве). Остальные – в сборниках и материалах различных конференций. Результаты диссертации в основном опубликованы.

Основные положения диссертационной работы докладывались также на научных школах и конференциях.

## 7. ВЫВОДЫ, СООТВЕТСТВИЕ ДИССЕРТАЦИИ КРИТЕРИЯМ, УСТАНОВЛЕННЫМ ПОЛОЖЕНИЕМ О ПОРЯДКЕ ПРИСУЖДЕНИЯ УЧЕНЫХ СТЕПЕНЕЙ

В заключение можно констатировать, что рассматриваемая диссертационная работа соответствует требованиям ВАК РФ - в ней решена важная в научном и практическом отношении задача адаптации программного комплекса НЕС-RAS для моделирования уровня режима водохранилищ реки Енисей.

Автор работы – Д.А. Никифоров заслуживает присуждения искомой ученой степени кандидата технических наук по специальности 25.00.27 – гидрология суши, водные ресурсы, гидрохимия.

Диссертация Никифорова Д.А. «Моделирование уровня режима водохранилищ реки Енисей», представленная на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 25.00.27 «Гидрология суши, водные ресурсы, гидрохимия», является законченной научно-квалификационной работой, основанной на оригинальном фактическом материале, в которой решен комплекс задач, связанных с получением оптимальных параметров гидравлического блока программного комплекса НЕС-RAS для расчета уровней трех водохранилищ на р.Енисей.

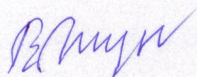
Диссертационная работа выполнена на высоком научном уровне. Полученные автором новые результаты, имеют теоретическое и практическое значение и могут быть использованы в задачах расчета динамики уровней других крупных водохранилищ при их недостаточной гидрологической и геоморфологической изученности.

По объему научных исследований, научной новизне, теоретической и практической значимости, полученных автором, диссертационная работа **Никифорова Дмитрия Андреевича** полностью соответствует всем требованиям п. 7. «Положения о порядке присуждения ученых степеней», утвержденного Постановлением Правительства РФ от 30 января 2002 г. № 74, в редакции постановления Правительства РФ от 20.06.2011 г. № 475, предъявляемым к кандидатским диссертациям, а ее автор

достоин присуждения искомой степени кандидата технических наук по специальности 25.00.27 — Гидрология суши, водные ресурсы, гидрохимия.

**Официальный оппонент**

Доцент, кандидат географических наук



Жук Виктор Архипович

---

**Сведения о составителе отзыва:**

Ф.И.О.: Жук Виктор Архипович

119991, г. Москва, ГСП-1, Ленинские горы, МГУ, географический факультет

Телефон: +7 495 939 15 33

E-mail: [vajouk@mail.ru](mailto:vajouk@mail.ru)

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова», географический факультет, кафедра гидрологии суши

Должность: доцент

*Подпись руки Жука В.А. заверяю*

Декан географического факультета МГУ,  
член-корреспондент РАН



С.А. Добролюбов

