

УДК 504.062.2:51

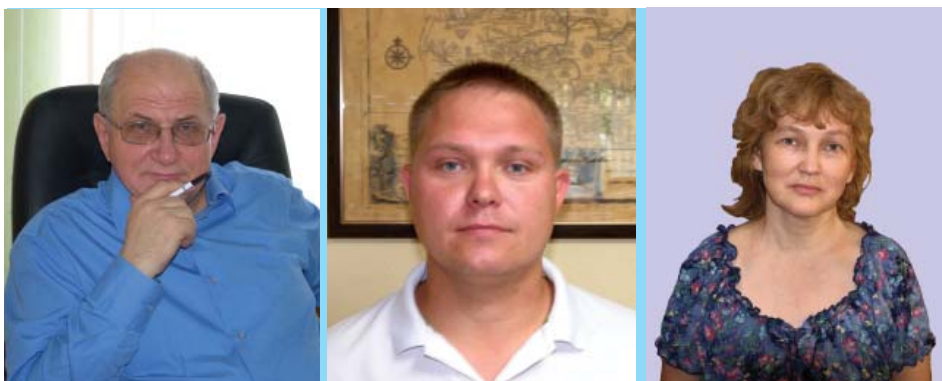
МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ КАСКАДА ВОДОХРАНИЛИЩ БАССЕЙНА РЕКИ УФЫ

© 2013 г. А.П. Лепихин^{1,2}, А.А. Тиунов¹, А.А. Возняк²

¹ Горный институт Уральского отделения Российской академии наук, г. Пермь

² Камский филиал ФГУП «Российский научно-исследовательский институт комплексного использования и охраны водных ресурсов», г. Пермь

Ключевые слова: математическая модель, каскад водохранилищ, р. Уфа.



А.П. Лепихин

А.А. Тиунов

А.А. Возняк

С использованием программного продукта HEC-ResSim 3.0 создана математическая модель функционирования каскада водохранилищ бассейна р. Уфы с учетом требований действующего водного законодательства Российской Федерации в соответствии с современными условиями и перспектив развития водопользования. Модель ориентирована на проведение водохозяйственных, водноэнергетических и гидравлических расчетов при разработке проектов Правил использования водных ресурсов (ПИВР) каскада водохранилищ бассейна р. Уфы.

Водохранилища, как правило, являются наиболее значимыми, системообразующими объектами водосборных территорий, обеспечивающими функционирование большого количества хозяйствующих субъектов. В условиях значительной внутригодовой и междугодовой изменчивости стока необходимо их регулирование. При этом требования отдельных водопользователей к параметрам регулирования водохранилищ часто существенно различаются, что может привести к конфликту интересов. Ситуация значительно усложняется в случае каскада водохранилищ: в условиях большого количества как определяющих факторов, так и параметров управления сложно обеспечить достаточную эффективность регулирования стока. Для

Водное хозяйство России № 4, 2013

Водное хозяйство России

решения данной задачи в настоящее время все чаще разрабатываются математические модели функционирования каскада водохранилищ.

Представлена математическая модель для проведения водохозяйственных, водноэнергетических и гидравлических расчетов при разработке проектов Правил использования водных ресурсов (ПИВР) водохранилищ бассейна реки Уфы: Долгобродское, Нязепетровское, Павловское, Верхне-Уфалейское, Нижне-Уфалейское, Нижне-Сергинское, Михайловское, Бисертское, Артинское, Зюраткульское, Саткинское, Малосаткинское. Наличие в каскаде значительного количества водохранилищ в условиях большого разнообразия водопользователей, выдвигающих свои требования к их регулированию, делает данную работу весьма актуальной.

Несмотря на детальную проработку математических аспектов проблемы [1–15], количество современных программных продуктов, способных эффективно решать эти задачи, пока ограничено [2, 4, 5, 7, 9, 16–18]. В СССР и России активно разрабатывались и разрабатываются системы управления крупнейшими каскадами – Волжско-Камским, Ангаро-Енисейским, Вахшским. Однако учитывая значимость этих каскадов для экономики целых регионов, их существенные различия, данные системы управления изначально разрабатывались применительно к определенному каскаду, а не как универсальная программная оболочка. Из зарубежных программных продуктов управления каскадами водохранилищ наибольшую известность получили MikeBasin [16] – разработка Датского гидравлического института (DHI Water&Environment), программный продукт НЕС-ResSim, а также НЕС-ResPrm [17, 18].

Сопоставительный анализ данных программных продуктов показал, что для рассматриваемого каскада водохранилищ, расположенного в бассейне р. Уфы, наиболее приемлемым представляется построение модели оптимального управления на основе программного продукта НЕС-ResSim 3.0 [18], как наиболее проработанного из этого класса моделей и исходя из соотношения «цена-качество». Данный программный продукт имеет пока малый опыт применения в России, но его отдельные модули и, в частности, модуль расчета волн попусков в нижних бьефах ГЭС в виде программного продукта НЕС-RAS 4.1, используется достаточно широко, только в России, например, с его помощью построены гидравлические модели р. Белой [19], р. Енисей [20], р. Кубани [21], рек Обь, Томь и малых рек Томской области [22, 23].

НЕС-ResSim разработан Гидрологическим Инженерным Центром (Hydrologic Engineering Center – НЕС) Инженерных войск армии США в 2007 г. и предназначен для моделирования гидрологических процессов каскада водохранилищ. Он позволяет построить режимы эксплуатации водохранилищ, которые, с одной стороны, на основе уравнений гидродинамики учи-

тывают физические процессы движения жидкости в руслах рек, с другой – выполняют эксплуатационные требования к прохождению половодий, выработке электроэнергии, обеспечению нужд водоснабжения и экологического качества воды. В программном продукте предусмотрена возможность учета особенностей каждого водохранилища (время года, гидрологические условия, температура воды, положение в каскаде). Процесс создания модели весьма гибок, позволяет проектировать схему развития гидрологических процессов как на обособленном водохранилище, так и на каскаде водохранилищ, располагающихся на водотоке «цепью» или «древом». HEC-ResSim помогает не только в инженерных расчетах при анализе поведения потоков в условиях каскадов водохранилищ, но и в исследованиях, связанных с разработкой оптимальных схем управления водными ресурсами, прогнозирования в реальном времени чрезвычайных ситуаций. Большинство водохранилищ создавались для решения разных задач: снижение угрозы наводнений, обеспечение населенных пунктов и предприятий водой и электроэнергией, создание для населения благоприятные рекреационные условия и др., каждая из которых накладывает ограничения на объем водохранилища, режим его эксплуатации, пропускную мощность ГТС и т. д. Создание оптимальных графиков регулирования водного режима водотока, позволяющих наилучшим образом сочетать требования различных водопользователей, реализуется в данном программном продукте.

HEC-ResSim позволяет показать физическое поведение потока в каскаде водохранилищ наряду с гидравлическими вычислениями характеристик потока. Набор инструментов HEC-ResSim позволяет реализовать объекты практически любой сложности: от единичного водохранилища на реке до развитой речной сети с водохранилищами в каскаде и перебросками стока за пределы бассейна. Пользовательский интерфейс обеспечивает возможность создавать сеть в векторном схематическом и графическом виде с полноценной географической привязкой объектов.

Система водохранилищ представляется как сеть (схема), составленная из четырех типов элементов: узлы, транзитный поток, забор стока и водоемы. *Узлы* – точки слияния потоков, т. е. пункты, где к основному транзитному потоку добавляются внешние потоки; *транзитный поток* – естественный сток воды в русле, а также его потери на фильтрацию в ложе водохранилища, описываемые одним из предлагаемых пользователю способов, заложенных в самой программе; *забор стока* – часть транзитного потока, изымаемого безвозвратно в случае переброски стока или временно в случае использования воды для технологических нужд водопользователей; *водоем* – самый сложный элемент, состоит из чаши водохранилища и дамбы. Особое место отведено в HEC-ResSim ГТС; *дамба* – основа моделирования, опция, которая позволяет пользователю описывать различные способы

транзита водного потока через ГТС: управляемые попуски через сбросные сооружения (щитовые затворы, донные водопропускные сооружения, судоходные шлюзы) и неуправляемые попуски (перелив через гребень ГТС). Два особых типа пропуска (через турбины и насосы) нагружают схему расчета дополнительными функциями, турбины дают возможность вычислить выработку электроэнергии ГЭС, насосное оборудование возвращает часть стока из нижнего в верхний бьеф ГТС, тем самым обратно включая воду в схему выработки электроэнергии. Каждый элемент схемы обеспечивается достаточной информацией, при этом не требуется чрезмерной детализации.

Программный продукт НЕС-ResSim 3.0 состоит из управляющей оболочки; двух расчетных модулей; системы оптимизации управления, визуализации результатов, расчета. Исходный экран представляет ГИС-схему исследуемого водного бассейна с указанием основных водотоков и водохранилищ (рис. 1), что позволяет анализировать исходные данные и результаты расчетов, визуализируя их как в графическом, так и табличном виде.

Расчетные модули: 1) модуль расчета водного баланса водохранилища, его объема, площади зеркала, уровня; 2) модель расчета распространения волн попусков в нижнем бьефе гидроузлов.

Исходные данные первого расчетного модуля:

- обобщенная характеристика морфометрии водохранилища в виде зависимостей $W = f_1(H)$, $F = f_2(H)$, где W – объем водохранилища, F – площадь зеркала водохранилища в зависимости от уровня воды H ;
- критические параметры водоема (мертвый объем водохранилища, отметка ФПУ, уровень НПП);
- все значимые элементы приходной и расходной частей водного баланса, при этом значения их параметров могут задаваться как в виде констант, так и в виде динамических графиков и таблиц.

Исходные данные для второго расчетного модуля:

- схематический план реки и береговой полосы на участке ожидаемого воздействия гидроузла на водный режим;
- морфометрические характеристики водотоков, форма русла, размер поперечного сечения;
- характеристики донных отложений в виде параметра гидравлической шероховатости;
- продольный профиль реки на том же участке с отметками дна и водной поверхности;
- перечень водозаборов с указанием расстояния до створа плотины, допустимыми максимальным и минимальным уровнями воды;
- характеристика застройки и хозяйственного использования прибрежной полосы, последствий их затопления;
- гидравлический уклон водотока.

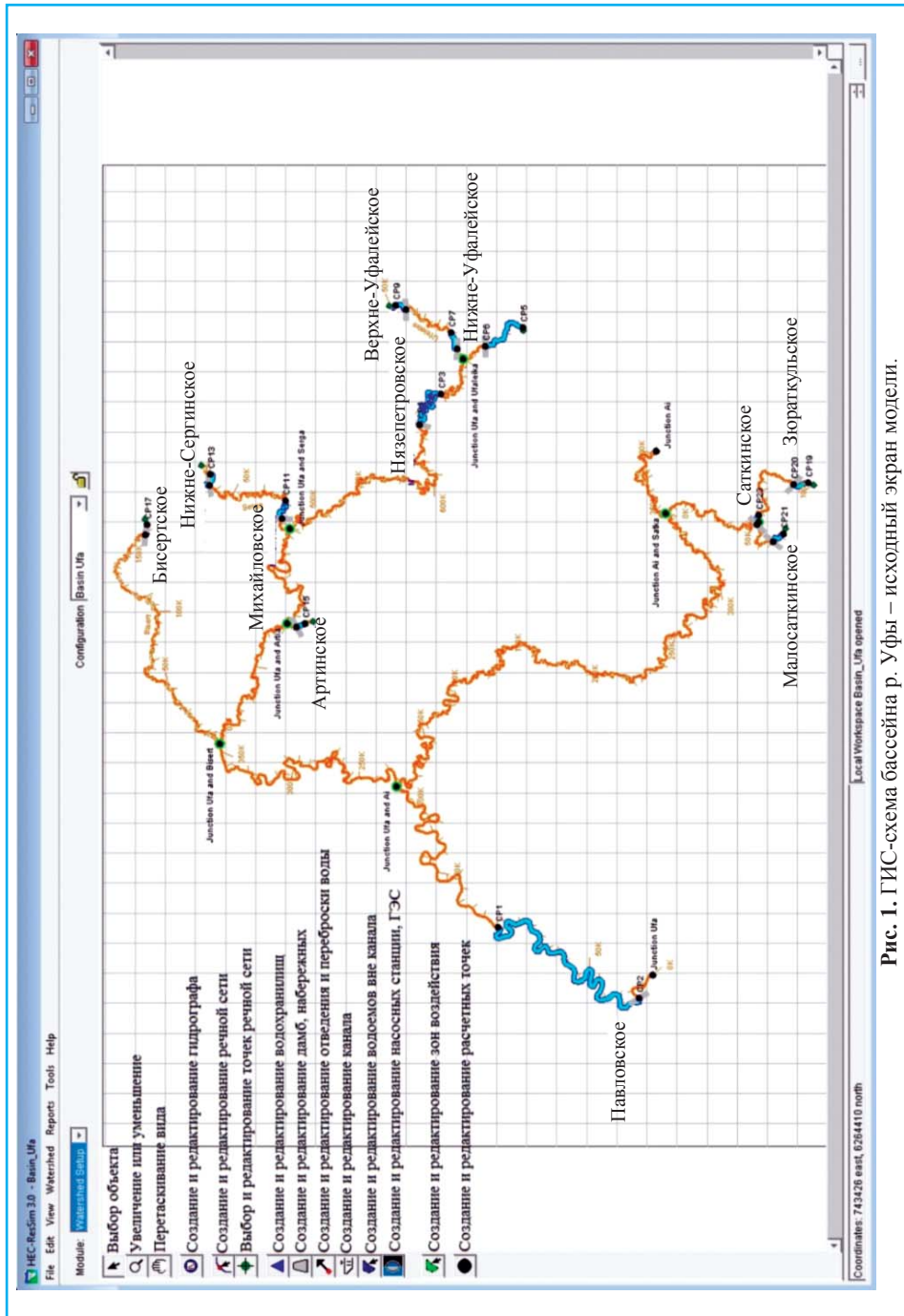


Рис. 1. ГИС-схема бассейна р. Уфы – исходный экран модели.

Исходные данные могут задаваться в виде единых для всего водотока констант и дифференцировано по отдельным участкам как по длине водотока, так и в зависимости от его ширины с выделением русловых и пойменных частей.

Блок оптимизации управления включает: значения предельных, критических характеристик, ограничивающих работу гидроузла, а также диапазон изменения желаемых параметров; правила «изменения» управляемых параметров.

Линейная схема водохозяйственной системы бассейна р. Уфы, для которой адаптировалась модель, с нанесенными на ней водохранилищами, основными водотоками, каналами, насосными и гидроэнергетическими станциями представлена на рис. 2.

Проектирование модели бассейна р. Уфы начинается с нанесения объектов в соответствии со схемой на рис. 2 (речная сеть и водохранилища), далее задаются основные характеристики внесенных в модель объектов. Возможно создание разных сетей водохранилищ с включением различных объектов из набора объектов, созданных на первом этапе, что позволяет производить различные вариации с сетью водохранилищ.

Исходные характеристики каждого объекта задаются в виде таблиц координат кривых зависимости объемов $W(H)$ и площадей зеркала $F(H)$ от уровня воды, величины сбросных расходов $Q = f(H)$ от уровней воды через ГТС, правил эксплуатации водохранилища (основные характеристики работы: НПУ, ФПУ, УМО, максимальные и минимальные расходы сброса и т. д.), на рис. 3 это показано для Павловского водохранилища. На рис. 4 на примере участка р. Уфы от места впадения р. Ай до места выклинивания подпора Павловского водохранилища показано, как задаются основные характеристики по участкам речной сети: длина участка; уклон; средняя ширина на участке; средняя глубина русла; коэффициент шероховатости.

В начальных точках расчета задаются начальные расходы (и/или уровни) и факторы полноты воздействия (изменяется от 0 до 1) их влияния на данную расчетную точку. На этом же этапе задаются параметры, по которым будет осуществляться вывод и сохранение результатов в базу данных для дальнейшей работы с ними с помощью программы HEC-DSSVue 2.0.1, которая позволяет их просматривать и обрабатывать. Ввод расчетных характеристик модели происходит уже в следующем предназначенном для проведения расчетов модуле.

Возможно создание нескольких вариантов расчетов с различными временными рамками и шагом по времени, а также для нескольких наборов условий. В итоге получаем различные выходные данные по расчетным точкам, по участкам рек и по водохранилищам.

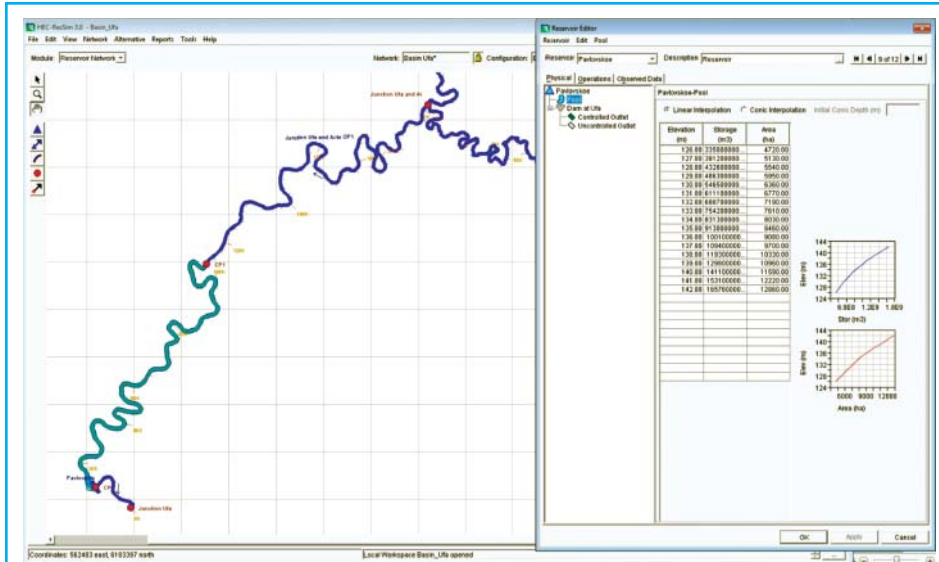


Рис. 3. Таблица кривых объемов и площадей зеркала Павловского водохранилища.

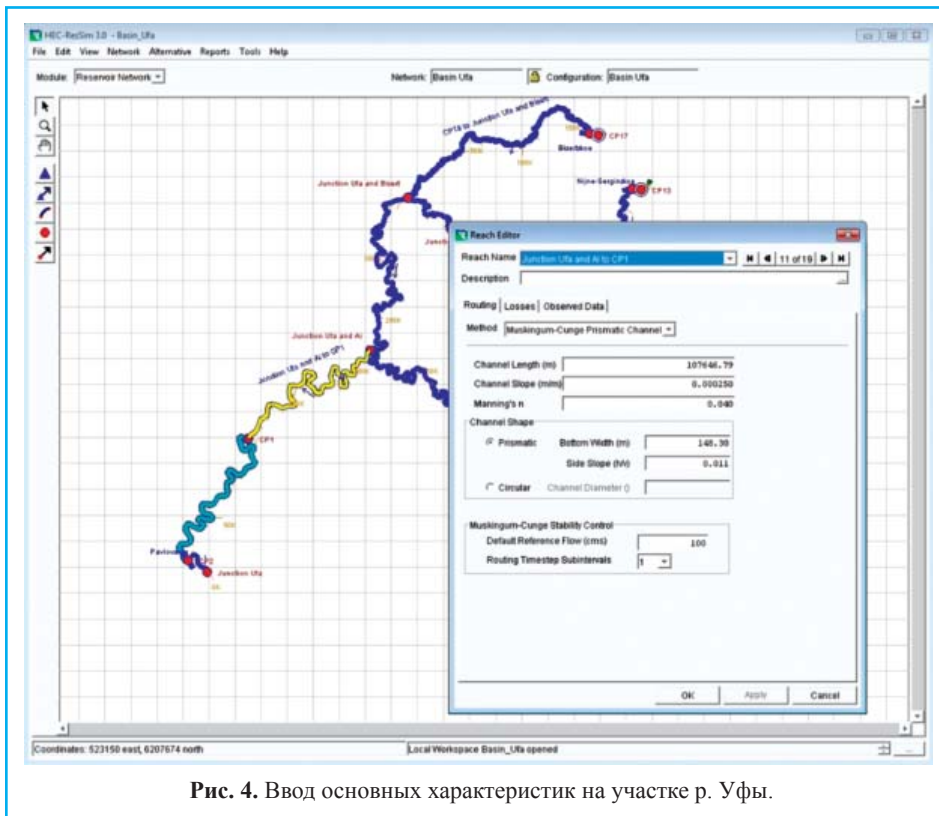


Рис. 4. Ввод основных характеристик на участке р. Уфы.

Результаты расчетов по водохранилищам могут быть выведены в графической и табличной форме (рис. 5):

- расчетные и наблюдаемые уровни воды в водохранилище;
- расчетные объемы и расходы поступающей в водохранилище воды;
- расчетные расходы воды, сбрасываемой из водохранилища для поддержания заданных правил эксплуатации, а также возможные максимальные и минимальные расходы при данных правилах эксплуатации.

Могут быть представлены отдельными графиками (таблицами) расчетные расходы, сбрасываемые из водохранилища через сбросные сооружения и через турбины и насосы.

Для участков рек возможен вывод результатов в виде графиков (таблиц) расходов воды на конец участка при регулировании стока вышерасположенным водохранилищем и при отсутствии регулирования. На рис. 6 показаны графики расходов воды на участке р. Уфы ниже плотины Павловского водохранилища в случае регулирования и нерегулирования прохождения через него воды.

Для расчетных точек вид выходных данных зависит от их местоположения, например, для расчетной точки слияния рек Уфы и Уфалейки результаты выводятся в виде трех графиков расходов воды: поступающих из рек отдельно, общие, совместно образующиеся расходы (рис. 7а). Таблица со значениями всех видов расходов показана на рисунке справа. Для расчетной точки выклинивания подпора верхнего в каскаде водохранилища, например, Нижне-Сергинского, результат выводится в виде графика начального (заданного) расхода воды (рис. 7б). Эти расходы задаются в исходных данных, в модели не рассчитываются.

Для расчетной точки выклинивания подпора каждого следующего водохранилища, при условии расположения этой точки между плотинами соседних водохранилищ, результаты выводятся в виде графиков расходов воды, сбрасываемых из вышерасположенного водохранилища, и расходов бокового притока с территории между верхним и нижним гидроузлами. На рис. 8 показаны графики расходов воды, проходящей через расчетную точку выклинивания подпора Михайловского водохранилища, на которых изображены расходы, поступающие из Нижне-Сергинского водохранилища, и расходы бокового притока Михайловского водохранилища, который задается как начальное условие, а также их совместные расходы.

Таким образом, для решения проблемы построения схем оптимального управления достаточно сложного каскада из 12 водохранилищ, расположенных в бассейне р. Уфы, при разработке ПИВР построена их математическая модель на основе использования программного продукта HEC-ResSim 3.0. На основе данной модели прорабатывались, в первую очередь, схемы наиболее эффективного пропуска экстремальных весенних паводков. В буду-

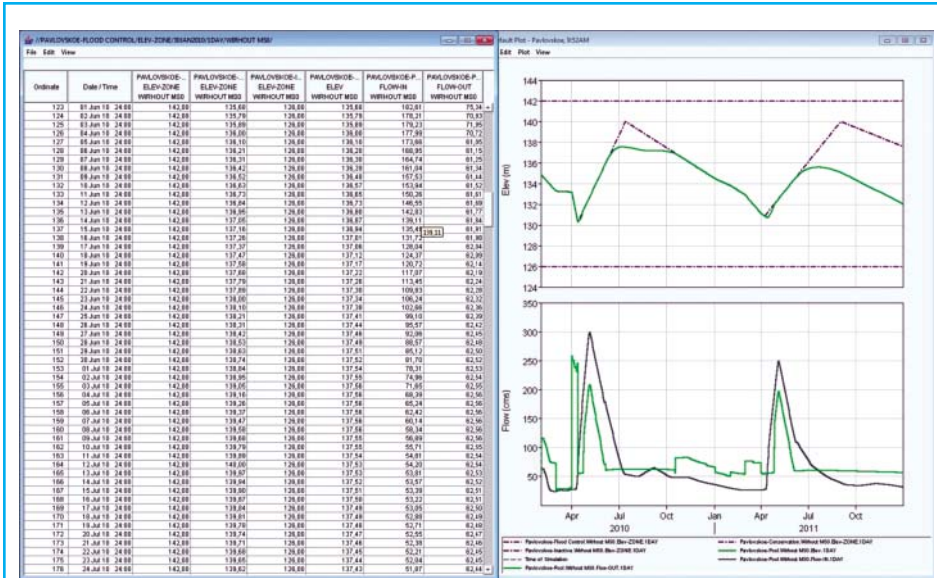


Рис. 5. Графики уровней воды (верхний график) и расходов воды (нижний график) в створе плотины Павловского водохранилища (синяя линия – расходы воды, поступающей в водохранилище; зеленая линия – расчетные расходы, сбрасываемые из водохранилища; слева – таблица со значениями характеристик).

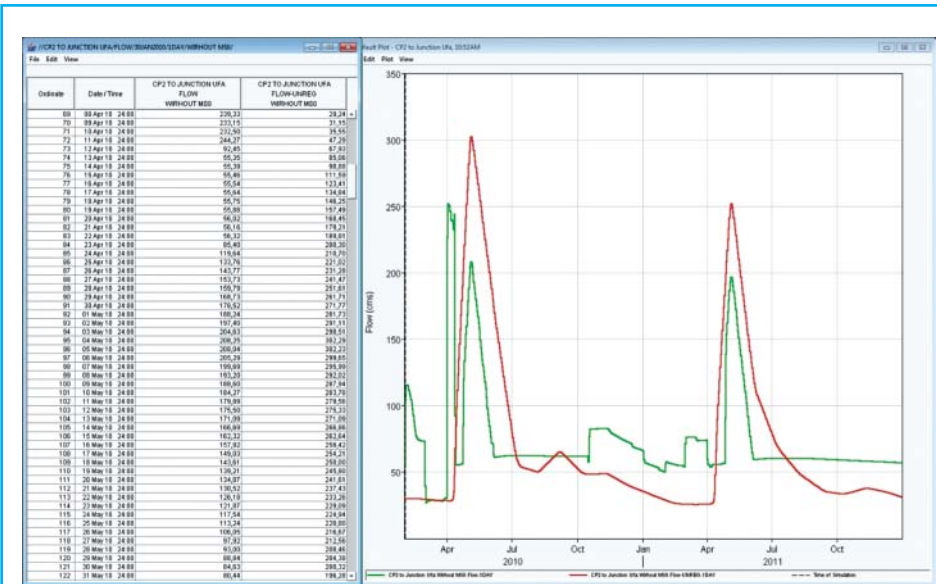


Рис. 6. Графики расходов воды на участке реки Уфы ниже Павловского гидроузла.

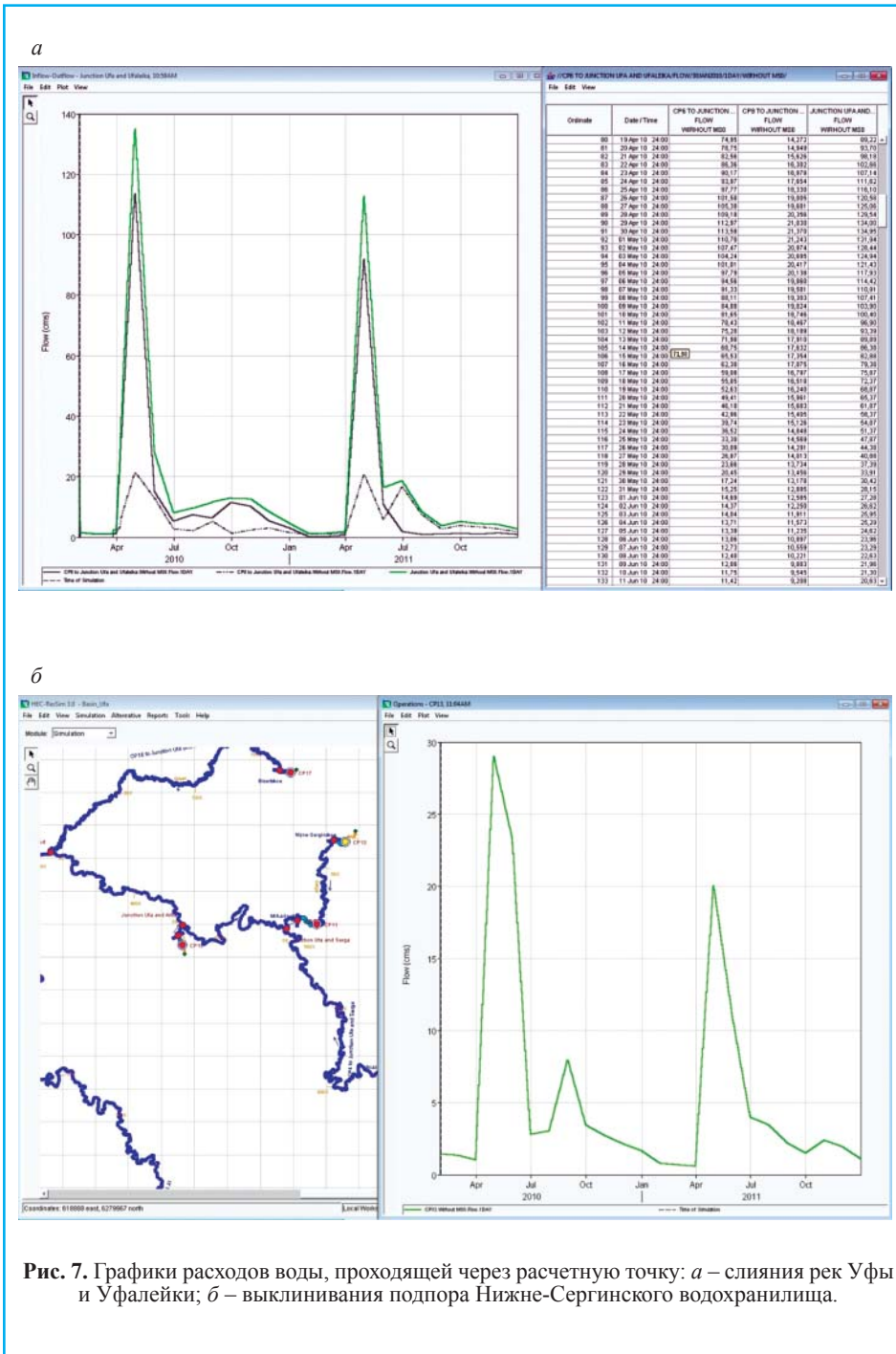


Рис. 7. Графики расходов воды, проходящей через расчетную точку: а – слияния рек Уфы и Уфалейки; б – выклинивания подпора Нижне-Сергинского водохранилища.

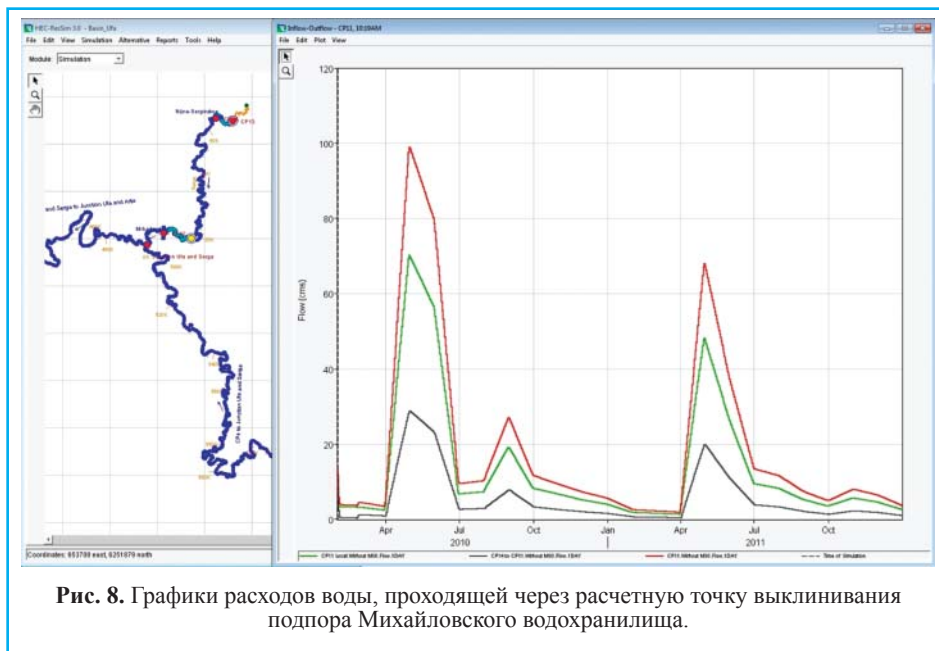


Рис. 8. Графики расходов воды, проходящей через расчетную точку выклинивания подпора Михайловского водохранилища.

щем представляет интерес исследование работы каскада водохранилищ в период глубокой летней межени, какими характеризовались 2009 и 2010 гг. Проведенные варианты водохозяйственные и гидравлические расчеты с использованием разработанной модели бассейна р. Уфы показали, что подобные модели могут быть успешно использованы также и при планировании развития и совершенствования систем управления крупными водохозяйственными комплексами.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Агасандян Г.А. Алгоритмы построения диспетчерских правил управления каскадами водохранилищ // Водные ресурсы. 1985. № 5. С. 34–46.
2. Агасандян Г.А. Программное обеспечение задач управления каскадами водохранилищ бассейна Волги // Сообщ. по прикладной математике. М.: ВЦ РАН, 2001. 31 с.
3. Богатырев В.А., Косолапов А.Е., Косолапова Н.А., Кувалкин А.В., Хлобыстов В.В., Янгулова Н.А Система поддержки принятия решений для управления водными ресурсами в бассейне реки // Вода России. Математическое моделирование в управлении водопользованием / под ред. А.М. Черняева. ФГУП РосНИИВХ. Екатеринбург: Аква-Пресс, 2001. С. 410–423.
4. Бубер А.Л. Разработка гармонизированных диспетчерских графиков управления каскадом ГЭС, удовлетворяющих компромиссному решению заинтересованных водопользователей (на примере Ангарского каскада ГЭС) // Сб. науч. тр. Всерос. конф. устойчивости водных объектов, водосборных и прибрежных территорий, риска их использования. Калининград. 2011. С. 67–74.

5. Григорьев В.К., Левит-Гуревич Л. Компьютерная технология расчетов пропуска половодья на примере Волжско-Камского каскада водохранилищ // «Экстремальные гидрологические события. Теория. Моделирование. Прогноз». Труды междунар. науч. конф. М.: ИВП РАН, 2003. С. 121–125.
6. Кукушкин Н.С., Наврузов С.Т. К проблеме рационального управления каскадом высокогорных гидроэлектростанций // Докл. АН Тадж. ССР. 1988. Т. 31. № 10. С. 641–643.
7. Левит-Гуревич Л.К. Рациональное управление водными ресурсами водохранилищ на примере Волжско-Камского каскада // Известия Самарского научного центра РАН. 2012. Т. 14. № 1(7). С. 243–254.
8. Левит-Гуревич Л.К. Сравнение методов оптимального и диспетчерского управления в процессе последовательного принятия решений на примере работы водохранилищ // Мат-лы Всерос. конф. «Проблемы информатизации общества». Нальчик: Из-во КБ НЦ РАН, 2008. С. 247–251.
9. Наврузов С.Т. Диалоговая имитационная система управления каскадом водохранилищ. Сообщения по прикладной математике. М.: ВЦ АН СССР, 1990. 32 с.
10. Наврузов С.Т. Модельные задачи управления водохранилищами // Прикладные аспекты информатики и матем. методы в экономике. Мат-лы междунар. науч.-практ. конф. Душанбе: ТЭИ, 2008. С. 148–156.
11. Наврузов С.Т. Оптимизационные задачи управления каскадом водохранилищ многоцелевого назначения // Докл. АН Республики Таджикистан. 1997. Т. 39. № 5. С. 125–130.
12. Наврузов С.Т., Чабан А.Н. Построение и оценка диспетчерских правил управления каскадом водохранилищ ирригационно-энергетического назначения // Водные ресурсы. 1988. № 1. С. 129–139.
13. Пращинская В.Г., Ярошевский Д.М., Левит-Гуревич Л.К. Компьютерное моделирование в управлении водными ресурсами. М.: Физматлит, 2002. 406 с.
14. Резниковский А.Ш., Рубинштейн М.И. Диспетчерские правила управления режимами водохранилищ. М.: Энергоатомиздат, 1984. 105 с.
15. Чабан А.Н. Построение эффективных диспетчерских правил управления водохранилищем // Сообщения по прикл. математике. М.: ВЦ АН СССР, 1986. 21 с.
16. Mike Basin A Versatile Decision Support Tool For Integrated Water Resources Management Planning DHI Water & Environment.
17. HEC-ResPRM Prescriptive Reservoir Model Quick Start Guide, Version 1.0, July 2011, Sara O'Connell, Julian Harou with acknowledgments to Beth Faber and Bob Carl // US Army Corps of Engineers, Institute for Water Resources, Hydrologic Engineering Center (HEC). Approved for Public Release. Distribution Unlimited. CPD-95a.
18. HEC-ResSim Reservoir System Simulation User's Manual, Version 3.0, April 2007, Joan D. Klipsch, Marilyn B. Hurst // US Army Corps of Engineers, Institute for Water Resources, Hydrologic Engineering Center (HEC). Approved for Public Release. Distribution Unlimited. CPD-82.
19. Лепихин А.П., Перепелица Д.И., Ляхин Ю.С., Тиунов А.А. Разработка схемы оптимизации использования Юмагузинского и Нугушского гидроузлов // Водное хозяйство России. 2009. № 2. С. 34–48.
20. Никифоров Д.А. Проблемы создания и калибровки цифровых моделей рек и водохранилищ для гидравлических расчетов // Тр. Всерос. научн. конф., посвященной памяти выдающегося ученого гидролога профессора А.В. Рождественского «Современные проблемы стохастической гидрологии и регулирования стока». М.: 2012.
21. Островский В.Т., Кирсанов М.А. Регулирование водного режима Нижней Кубани Тиховским гидроузлом // Восемнадцатое пленарное межвузовское координационное совеща-

- ние по проблеме эрозионных, русловых и устьевых процессов (г. Курск, 28–30 октября 2003 г.). Доклады и краткие сообщения. Курск. 2003. с. 117–118.
22. Земцов В.А., Вершинин Д.А., Инишев Н.Г. Применение имитационных компьютерных моделей участков речной сети для расчета и прогноза полей скорости, стока наносов и русловых деформаций // Тр. Всерос. научн. конф. с международным участием, посвященной 25-летию юбилею Института водных и экологических проблем СО РАН (20–24 августа 2012 г., Барнаул). Барнаул. 2012, с. 34–37.
23. Крыленко И.Н. Водный режим и гидрологическая безопасность освоенных участков рек: автореф. дис. ... канд. геогр. наук. М.: МГУ, 2007. 24 с.

Сведения об авторах:

Лепихин Анатолий Павлович, д. г. н., профессор, заведующий лабораторией, Горный институт Уральского отделения Российской академии наук (УрО РАН), 614007, г. Пермь, ул. Сибирская, 78; директор, Камский филиал ФГУП РосНИИВХ, 614007, г. Пермь, ул. Народовольческая 33; e-mail: lepin49@mail.ru

Тиунов Алексей Александрович, младший научный сотрудник, Горный институт Уральского отделения Российской академии наук (УрО РАН), 614007, г. Пермь, ул. Сибирская, 78; e-mail: anuwiny@hotmail.com

Возняк Анна Анатольевна, к. г. н., старший научный сотрудник, Камский филиал ФГУП РосНИИВХ, 614007, г. Пермь, ул. Народовольческая 33; e-mail: AAVoznyak@gmail.com