

УДК 556.555:3.048:51

РАЦИОНАЛЬНОЕ УПРАВЛЕНИЕ ВОДНЫМИ РЕСУРСАМИ ВОДОХРАНИЛИЩ НА ПРИМЕРЕ ВОЛЖСКО-КАМСКОГО КАСКАДА

© 2012 Л.К. Левит-Гуревич

Институт водных проблем РАН, г. Москва

Поступила в редакцию 14.05.2012

Режим управления водохранилищами водохозяйственной системы рек устанавливается на период времени в гидрологическую фазу притока или более в виде среднесуточных сбросных расходов. На практике осуществляется процесс управления, при котором через определенные интервалы времени в заданное число суток проводятся расчеты режима работы водохранилищ на основе данных по водохозяйственным условиям и полученному на тот момент прогнозу притока. В настоящее время управление проводится с использованием составленных заранее диспетчерских графиков. В статье рассматриваются оптимизационные задачи выбора рационального режима управления водохранилищами в каскаде. Выделены две основные задачи: пропуск половодья или паводка и использование водных ресурсов в период межени, а также ряд вспомогательных задач расчета водохранилищ. Оптимизация проводится по методу динамического программирования. Оптимальное (рациональное) управление не исключает диспетчерского; в совокупности два вида управления всегда обеспечивают приемлемый результат: в спокойном состоянии и в сложных гидрологических условиях, несмотря, зачастую, на неопределенность и неточность прогнозов притока.

Ключевые слова: каскад водохранилищ, диспетчерский график, рациональное управление, половодье, межень, прогноз притока, оптимизация, динамическое программирование

Проблема регулирования стока и управления водными ресурсами водохранилищ разрабатывались многими отечественными и зарубежными исследователями [1-4, 7,10,12, 14-19, 21]. Управление водными ресурсами, определяющее среднесуточные сбросные расходы водохранилищ, называют по установившейся терминологии *оперативным управлением*. Существует также внутрисуточное управление, которое обеспечивает графики водопотребления и водопользования внутри суток. Однако по-нашему мнению выбор среднесуточных сбросных расходов водохранилищ целесообразней назвать *режимным управлением*, поскольку именно *режим* работы водохранилищ по среднесуточным сбросным расходам определяется на достаточно долгий срок и позволяет оценить работу водохранилищ в целом. Оперативным же управлением следует обозначить именно управление внутри суток, состоящее из конкретных манипуляций пропускными отверстиями гидроузлов.

Инструменты выбора среднесуточных сбросных расходов, подразделяются на *диспетчерский* и *рациональный* виды управления. Диспетчерское управление позволяет осуществлять функционирование водохранилищ в отсутствии гидрологической информации, недостаточной заблаговременности и точности прогнозов. Управление реализуется по диспетчерским графикам,

представляющим собой однозначную по зонам зависимость среднесуточного сбросного расхода от уровня у плотины гидроузла по календарным датам. Построение диспетчерских графиков - проблема водохозяйственных расчетов, в основе лежит стохастическая задача математического программирования с минимумом ущербов по многолетнему набору гидрографов притока, в принципе, всего диапазона обеспеченностей объема притока [1, 15, 16, 18, 19, 21]. Однако диспетчерские графики могут не обеспечить управление в чрезвычайных условиях, при изменениях хозяйственных ситуаций. Принципиально нельзя построить графики управления для всех случаев эксплуатации крупной речной системы. Компьютер позволяет внедрять методы рационального управления, где выполняются многократные расчеты по прогнозам притока и условиям водопользования. Излагаемый материал обобщает работы [7, 10, 14] и др.

Прогнозно-ситуационное управление водохранилищами. Технология принятия решений по управлению отдельными водохранилищами и каскадами на крупных реках, основана на принципах дискретности принятия решений, учета сложившейся водохозяйственной обстановки (ситуации) и прогнозов притока, и может быть названа *прогнозно-ситуационным управлением*. Процесс ситуационного управления проводится для периода определенной гидрологической фазы стока реки (половодье, паводок, летне-осенний и зимний меженные периоды) и начинается с получения информации о прогнозе бокового притока к водохранилищам, условиям водопотребления и

Левит-Гуревич Леонид Константинович, кандидат технических наук, старший научный сотрудник лаборатории управления водными ресурсами. E-mail: Lev-Gur@Yandex.ru

водопользования и данных начального состояния (уровней) водохранилищ на дату расчета. Официальные прогнозы бокового притока к водохранилищам задаются в виде диапазона величин (минимум – максимум) в квартальном и месячном интервалах времени и распределяются по суткам [4, 11]. Проводится серия водохозяйственных расчетов режима управления по разным вариантам прогноза от минимума до максимума. В результате расчетов определяется режимы сбросов водохранилищ в продолжение заданного периода, соответствующие вариантам прогноза бокового притока и поставленным водохозяйственным условиям. Результаты одного из расчетов предлагаются для реализации управления. При реализации варианта отслеживается состояние водохранилищ путём мониторинга уровней, сбросных расходов, показателей водопотребления и водопользования, проводятся расчеты «восстановления» стока, т.е. определяется фактический боковой приток к водохранилищам. Если фактический боковой приток систематически отличается от ранее прогнозируемого, следует заменить взятый для реализации вариант

управления другим, для которого принятый прогноз притока в большей мере соответствует складывающемуся фактическому. При значительных отличиях или получении нового официального прогноза выполняется новая серия расчетов с новыми вариантами прогноза и начальными данными. Цикл управления повторяется.

Прогнозно-ситуационное управление может осуществляться с использованием диспетчерских графиков и/или расчетов рационального управления. Рациональное управление не требует отказа от диспетчерских графиков - в случае «спокойных» условий, т.е. без резких изменений последовательных прогнозов и без нарушений установленного режима водопользования, результаты оптимизационных расчетов сравнимы с результатами управления по диспетчерским графикам. При неясных прогнозах (особенно, в начале гидрологических фаз) следует использовать диспетчерские графики, но в сложных условиях притока или смены режима водопользования сказывается преимущество рационального управления.

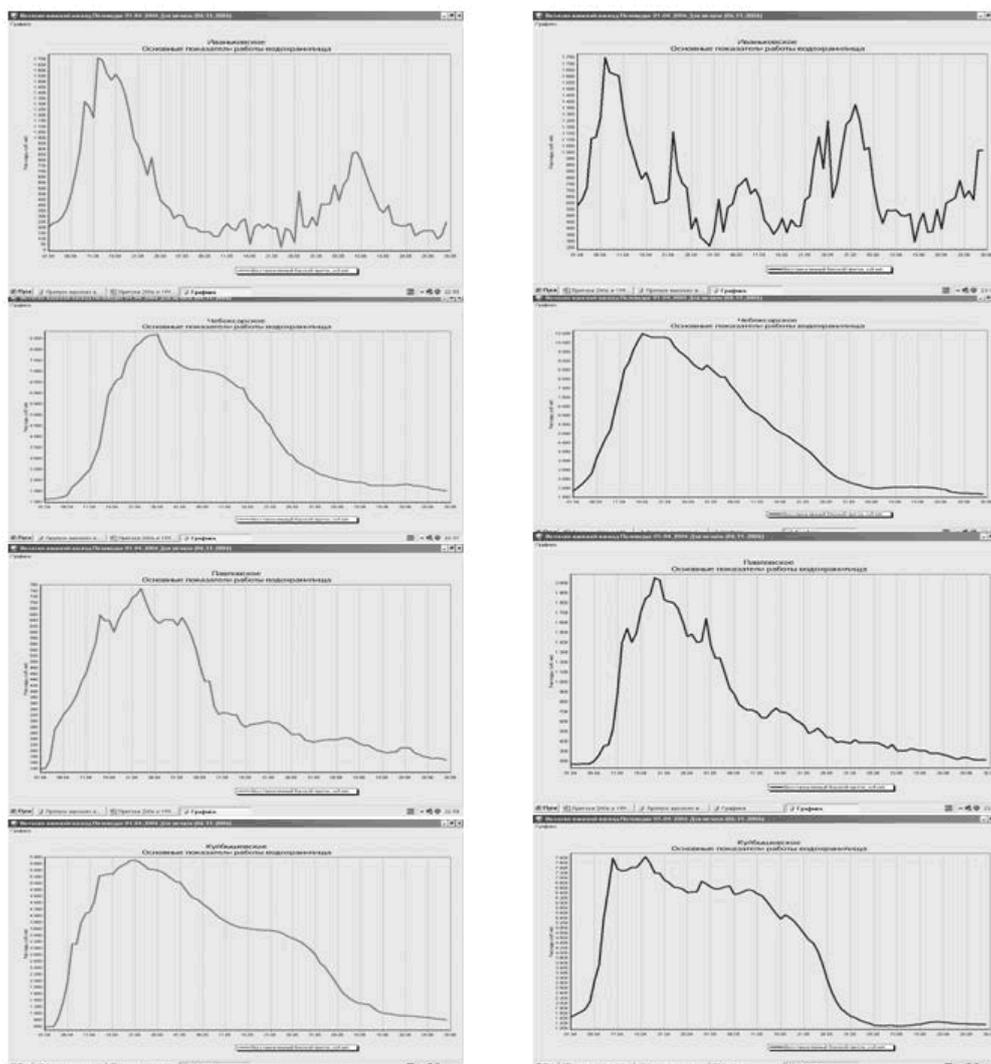


Рис. 1. Сравнение гидрографов фактического бокового притока к водохранилищам Волжско-Камского каскада в маловодный 2006 г. (общий сток 124,07 км³), левый столбец, и многоводный 1991 г. (сток 201,3 км³), правый столбец. По рядам: Иваньковское, Чебоксарское, Павловское, Жигулевское водохранилища

Природно-климатические фазы и хозяйственные периоды циклически повторяются по годам. Повторяются основные черты гидрологического формирования речного стока, форма гидрографов притока в каждую фазу в основном повторяется - изменчивость формы гидрографа меньше изменчивости общего объема притока. Примеры на рис. 1 подтверждают сказанное: 1991 г. был существенно многоводным, 2006 г. маловодный, а формы гидрографов притока к водохранилищам схожи до деталей. Такое обстоятельство позволяет шаг за шагом при прогнозном управлении водохранилищами сужать диапазон прогнозов, и эта возможность является основой того, что использование рациональных решений, в принципе, эффективней использования только диспетчерских графиков [12].

Постановка проблемы. Рассматривается режимное управление пропуском половодий и паводков и управление водохранилищами в летне-осенний и зимний меженные периоды. В водопотреблении различают: питьевое и коммунальное водоснабжение, разные виды промышленного водопотребления, разные виды орошения. Выделение разных видов водопотребления имеет цель агрегирования их характеристик: внутригодового распределения, степени возврата воды, показателей надежности. Часть отраслей функционирует как распределенные по длине водохранилищ; крупные водопотребители выделяются с привязкой к определенным створам водохранилищ. В водопользовании достаточно учесть три вида: гидроэнергетика, рыбное хозяйство, водный транспорт. Пропуск через гидроузлы весенних половодий и дождевых паводков преследует цель наполнить водохранилища, не превышая регламентированных уровней верхних и нижних бьефов и максимальных расходов гидроузлов. При прогнозе высокого половодья предусматривается предварительная срабатывание водохранилищ для увеличения противопаводкового эффекта. Порядок использования водных ресурсов в маловодную часть года состоит в удовлетворении потребности водоснабжения, соблюдения минимальных санитарно-экологических расходов и расходов, обеспечивающих работу водозаборов в нижних бьефах, выполнении требований рыбного хозяйства и водного транспорта к навигационным глубинам, гарантированной энергоотдачи ГЭС, а зимой – в обеспечении благоприятных условий зимующих подо льдом рыб, безопасного отстоя судов. Стохастическая природа стока, ограниченность объемов водохранилищ находятся для многих речных систем в противоречии с требованиями водопользования и водопотребления. Поэтому при рационализации управления для максимального эффекта в целом неизбежно ущемление интересов разных компонентов водохозяйственных систем.

Основным методом регулирования водохранилищем волны половодья является метод *срезки*. Он заключается в предварительном снижении уровня до предполоводной сработки, а затем поддержания величины среднесуточных сбросных расходов ниже расхода притока - вследствие этого

происходит наполнение водохранилища волной притока до определенного уровня. После спада волны половодья уровень водохранилища не выше нормального подпорного уровня (НПУ) поддерживается до конца периода. Существуют транзитные водохранилища, у которых среднесуточный сбросной расход регулируется с целью поддержания уровня НПУ с приемлемой точностью - метод *поддержания уровня*. К концу половодья каждое водохранилище максимально наполняется. Водоохранилища сезонного регулирования каскада должны наполняться до НПУ, водохранилища многолетнего регулирования наполняются максимально с учетом того, что нижние сезонные водохранилища каскада должны быть заполнены до НПУ.

Основным методом регулирования водных ресурсов водохранилищ в меженный период является *компенсационное регулирование*, при котором водные ресурсы вышележащего водохранилища используются для поддержания водоотдачи и нормативного состояния нижележащих водохранилищ. Компенсационное регулирование состоит в *поддержании гарантированной величины сбросного расхода* вышележащего водохранилища. На условия, складывающиеся на водохранилищах в периоды летней или зимней межени, существенную роль играют результаты управления водохранилищами в периоды половодья и паводка, особенно если эти периоды оказываются маловодными по своим шкалам водности. Наоборот, состояния водохранилищ после меженного периода могут влиять на условия пропуска последующего периода высоких вод. Эти пограничные уровни между периодами управления по гидрологическим фазам притока связывают смежные по времени периоды управления и могут быть названы *смежными уровнями* водохранилищ. Целесообразно к концу каждого периода управления достигать смежных уровней. Смежные уровни на конец половодий указаны выше, уровни на конец межени могут быть определены по многолетним наблюдениям.

В рамках решений по управлению водохранилищами формулируются три задачи: 1) выбор рациональных режимов пропуска половодья или паводка по каскаду водохранилищ, 2) выбор рациональных режимов использования водных ресурсов водохранилищ в меженный период, 3) моделирование функционирования водохранилищ при управлении по диспетчерским графикам. При расчетах рационального управления рассматривается период одной фазы речного стока, при моделировании диспетчерского управления продолжительность периода не ограничивается. В алгоритмах выделяются вспомогательные «подзадачи» второго и третьего уровней, осуществляющие отдельные расчеты в виде «расчетных процедур». Процедуры рассматриваются как самостоятельные задачи, имеющие свои формулировки и решения.

Существует ряд программных систем и комплексов, которые могут быть использованы при прогнозном-ситуационном управлении водохранилищами. Известны программы водохозяйственных балансов, в которых учитывается (не выбирается!)

режим работы водохранилищ путем непосредственного задания сбросных расходов [6]. Однако эффективность компьютеризации достигается только с автоматизацией самого выбора режима работы водохранилищ. Первый опыт в этом отношении был дан в [2]. Работа, однако, не получила развития, поскольку исходила методически от водохозяйственных приемов управления без полной математической модели, не охватывая нужных практике моментов в целом. Действенным примером является автоматизированная информационно-управляющая система «Водные ресурсы» [4], предназначенная для выбора режимов работы каскада водохранилищ и исследований. В основе этого программного комплекса лежат программный блок прогнозов бокового притока к водохранилищам ЕСОМАГ [13] и блок моделирования работы водохранилищ при заданных диспетчерских правилах с возможностью их корректировок. Система «Водные ресурсы» давно используется для расчета режимов работы водохранилищ Волжско-Камского каскада (ВКК). По излагаемой в статье формализации подготовлена программная система «Каскад» [7, 10, 14], которая нацелена на автоматическое построение сбросных гидрографов при выборе оптимальных режимов пропуска половодья и работы водохранилищ в межень. Система, однако, находится ещё в стадии доработок. Независимо от того, какая используется программа, в результате расчетов должны определяться: среднесуточные сбросные расходы водохранилищ, посуточный ход уровней у плотин, объемы водохранилищ, площади и глубины затоплений, максимально возможные мощности ГЭС, объемы водопотребления в сумме и по отраслям.

Технические условия управления водохранилищами. Превалирующее число речных систем с каскадами водохранилищ имеет плановую структуру в виде графа-дерева: вода из водохранилища поступает в одно нижележащее водохранилище или низовья реки; существуют русловые водохранилища, для которых необходим учет динамической емкости и времени «добегания» (условное название времени хода волны попуска по реке, не является строгим научным термином гидравлики); физическая подоплека гидрологических процессов по фазам стока схожа; везде существует распределенный боковой и сосредоточенные притоки; способы водопользования одинаковы; прослеживается возможность свести условия водопользования к условиям верхнего и нижнего бьефов гидроузлов. Водохозяйственные участки ограничены створами плотин, на дереве речной системы каждый участок имеет не больше двух (редко трех) вышележащих водохранилищ. Водохранилище делится характерными створами на отрезки для гидравлического расчета.

Режим работы водохранилищ рассматривается в продолжение одной гидрологической фазы. Даты начала и конца гидрологических фаз притока имеют вероятностный характер вокруг некоторых средних дат. Рассматриваются периоды в пределах этих средних дат. Водохозяйственные расчеты

ведутся посуточно, рассматриваются среднесуточные сбросные расходы и водоотдача водохранилищ. Начало-конец суток условно. Функционирование водохранилища характеризуется его нормативными уровнями: нормальный подпорный уровень (НПУ), форсированный уровень (ФПУ), уровень мертвого объема (УМО). ФПУ устанавливается по соображениям безопасности сооружений гидроузла, превышение его недопустимо. Недопустимо понижение уровня ниже УМО водохранилищ. Нежелательно превышение НПУ, допустимы лишь вынужденные кратковременные превышения. Однако при пропусках высоких половодий зачастую целесообразно удержание уровня выше НПУ некоторое время в том или ином водохранилище для возможности облегчить водохозяйственную ситуацию на нижележащих водохранилищах. Аналогично НПУ удобно ввести выше УМО величину нормального сработанного уровня (НСУ) (гарантированной водоотдачи) у плотины гидроузла, понижение уровня ниже которого нежелательно, допустимы лишь вынужденные снижения.

Статические водохранилища озерного типа или короткие русловые водохранилища характеризуются зависимостью объема и площади зеркала водохранилища от уровня у плотины гидроузла, которую с приемлемой точностью можно принять однозначной. При функционировании крупных русловых водохранилищ при пропуске расходов образуется динамическая емкость - при одном и том же уровне у плотины в зависимости от расхода наблюдается разный гидравлический уклон водной поверхности, - связь объема водохранилища и уровня у плотины неоднозначна. При расчетах водохранилищ должны учитываться существенные факторы водного баланса: водоотведение (сбросные, возвратные воды), фильтрационные потери, потери на испарение и льдообразование, межбассейновые переброски, судоходные шлюзы, чья работа в навигацию измеряется среднесуточными расходами шлюзования. Расчетные сбросные расходы водохранилищ не должны быть ниже минимальных санитарно-экологических расходов по гидрологическим фазам притока и должны удовлетворять необходимым навигационным и другим хозяйственным требованиям, которые задаются диапазонами сбросных расходов. Сбросные расходы не должны превышать пропускной способности гидроузлов. По причине возможной деформации берегов при быстрых изменениях уровня, особенно в период половодья, амплитуда изменения уровней и сбросных расходов некоторых водохранилищ по суткам и внутри суток ограничивается. Условия обеспечения уровней на разных створах водохранилища сводятся к обеспечению определенного уровня верхнего бьефа водохранилища ниже НПУ, опускаться еще ниже которого нежелательно, и к обеспечению заданных диапазонов уровней и/или расходов нижних бьефов вышележащих водохранилищ по отношению к данному (т.е. на удаленных верхних бьефах водохранилища). Желательно обеспечить график суточной выработки электроэнергии каждой ГЭС каскада.

В замыкающем створе каскада водохранилищ может быть выставлено требование выполнить гидрограф сбросного расхода определенной формы. Гидрограф сбросных расходов из замыкающего створа оценивается в отношении требований низовой реки. Форма такого гидрографа, как правило, представляет собой несколько «полок» сбросного расхода с линейными переходами между ними. Каждая «полка» имеет определенную цель регулирования. Например, для условий низовой р.Волги сбросные расходы Волгоградского гидроузла характеризуются «сельскохозяйственной полкой» расходов, предназначенной для затопления пойм и ильменей, «рыбной» полкой расходов, предназначенной для поддержания уровней воды в нижнем бьефе замыкающего водохранилища в период нереста рыбы; «меженные полки» предназначены для поддержания навигационных уровней, водоснабжения и пр.

Технические условия функционирования водохранилищ и работы гидроузлов распределяются на *строгие* и *мягкие*. Строгие условия на ФПУ и УМО, пропускную способность гидроузлов должны быть выполнены при расчетах безусловно. Мягкие условия имеют характер желательности и при решении оптимизационных задач учитываются в критериях оптимизации, посредством которых могут существенно влиять на результат, но не обязаны быть выполнены строго. Следует отметить существование ряда неформальных условий управления: избегать частого изменения среднесуточных сбросных расходов, когда скачки притока значительны, спрямлять сбросной гидрограф на отдельных интервалах времени и др. Выполнение таких условий вне водной формализации относится к сервисным возможностям программной реализации, когда пользователь может управлять расчетом, указывая в начале счета состав дополнительных вычислений, предназначенных для удовлетворения условий.

Формализация проблемы управления водохранилищами. Введем следующие обозначения: t – даты; t_0 , T – даты начала и конца периода управления; i – нумерация водохранилищ, $i=1,2,\dots,I$; i^+ , i^- – непосредственно вышележащие водохранилища, откуда вода поступает в i -е (водохранилища-«родители»); i_0 – водохранилище, непосредственно нижележащее i -му; $J(i)$ – множество всех водохранилищ выше i -го, включая само i -е. Далее все уровни в м, расходы в м³/с, время в сутках, слои потерь в мм: $Z_i(t)$ – ход уровней у плотины i -го гидроузла; $Z_{it}=Z_i(t)$ – текущий уровень на условный конец-начало суток; Z_i^{dead} – уровень мертвого объема УМО; Z_i^{norm} – НПУ водохранилища; Z_i^{force} – ФПУ; ΔZ_i – допустимое изменение за сутки уровня у плотины; ΔZ_i^{Bief} – допустимая разница отметок бьефов; Z_i^T – уровень наполнения водохранилища к концу периода управления; $Z_i^{lowBief}(t)$ – ход уровня нижнего бьефа гидроузла водохранилища; Z_i^{min} – уровень сработки

водохранилища перед наполнением в половодье, Z_i^{max} – максимальное наполнение в половодье, Δt_i – задержка в сутках максимального уровня в половодье; Z_i^{gmt} , Z_i^{inf} – уровни гарантированной водоотдачи (или НСУ) и дополнительного сброса в меженный период.

$Q_i(t)$ – гидрограф среднесуточных сбросных расходов i -го водохранилища, средний расход за определенные сутки – $Q_{it} = Q_i(t)$; $W_i = 86400 \times \sum_{t_0}^T Q_{it}$ – объем сбросного гидрографа; $q_i(t)$ – гидрограф бокового притока среднесуточных расходов, $q_{it}=q_i(t)$; ΔQ_i – допустимое изменение за сутки сбросного расхода; $Q_i^{max}(Z)$ – пропускная способность гидроузла, зависит от Z верхнего бьефа (редко и от Z нижнего бьефа); $G_i(t)$ – гидрограф среднесуточных расходов водопотребления $G_{it}=G_i(t)$; G_{it}^{norm} – нормативный расход водопотребления; Δq_{it} – потери/дополнительный приток и гидрограф потерь $\Delta q_i(t)$; $Q_i^{san}(t)$, $Q_{it}^{san}=Q_i^{san}(t)$ – минимальные санитарно-экологические сбросы; $Q_i^{gmt}(t)$ – гарантированный гидрограф сброса из водохранилища в межень.

$\bar{\theta}_i$ – вектор времени «добегания» в сутках расходов воды в i -м водохранилище, в рассматриваемых задачах принято допущение постоянства времени «добегания» в водохранилищах от характерных створов до плотины гидроузла; $Q_i^h(t, \bar{\theta}_i)$ – гидрограф притока, смещенный к створу гидроузла водохранилища; $V_i(t)$ – изменение объема водохранилища по датам на условное начало суток, $V_{it}=V_i(t)$; Z_i^{use} – уровень верхнего бьефа гидроузла, опускаться ниже которого нежелательно; желаемый диапазон уровней $Z_i^{use_min}$, $Z_i^{use_max}$ и расходов водопользования $Q_i^{use_min}$, $Q_i^{use_max}$ в нижнем бьефе; $Y_i(t)$, $Y_i^{fact}(t)$ – графики заданной и фактической возможной выработки электроэнергии ГЭС.

E_{it}^W – оценка обеспечения водопотребления в сутки t из водохранилища i ; E_{it}^{ZZ} , E_{it}^{OZ} , E_{it}^{OO} – оценки обеспечения условий водопользования в t -е сутки по уровню верхнего бьефа гидроузла, по диапазону уровней и диапазону расходов нижнего бьефа гидроузла; E_{it}^{PS} – оценка работы ГЭС рассматриваемого водохранилища в сутки; E_{it}^{norm} , E_{it}^{gmt} – оценки условий нежелательности превышения уровня НПУ и опускания уровня ниже уровня гарантированной водоотдачи; E_{it}^T – оценка достижения установленного уровня на конец периода; E_i – оценка сбросного гидрографа из устьевых водохранилищ каскада.

Относительные оценки обеспечения водопотребления, условий водопользования, работы ГЭС, достижения установленного уровня на конец периода, сбросного гидрографа из замыкающего водохранилища каскада вычисляются как отношения фактических величин показателя к установленной или нормированной величине (ниже общим номером даны основные оценки):

$$\left. \begin{aligned}
 E_{it}^W &= G_{it} / G_{it}^{norm}; & E_{it}^{PS} &= Y_i^{fact}(t) / Y_i(t); & E_{it}^{ZZ} &= [\min(Z_i^{use}, Z_{it}) - Z_i^{dead}] / (Z_i^{use} - Z_i^{dead}); \\
 E_{it}^{OZ} &= [\min(Z_i^{use_min}, Z_{it}) - Z_i^{dead}] / (Z_i^{use_min} - Z_i^{dead}) + (Z_i^{use_max} - Z_i^{dead}) / [\max(Z_i^{use_max}, Z_{it}) - Z_i^{dead}] - 1; \\
 E_{it}^{OO} &= \min(G_{it}^{use_min}, Q_{it}) / G_{it}^{use_min} + G_{it}^{use_max} / \max(G_{it}^{use_max}, Q_{it}) - 1; \\
 E_{it}^{norm} &= (Z_i^{norm} - Z_i^{dead}) / [\max(Z_i^{norm}, Z_{it}) - Z_i^{dead}]; & E_{it}^{gmt} &= [\min(Z_i^{gmt}, Z_{it}) - Z_i^{dead}] / (Z_i^{gmt} - Z_i^{dead})
 \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

Относительные величины оценок позволяют объединить разнородные характеристики функционирования водохранилищ и показатели разных статей водопользования и в единую оценку качества управления. Оценки обеспечения того или иного условия $E_{it}=1$ при выполнении этого условия и $E_{it}<1$ при его невыполнении, причем, чем острее это невыполнение, тем меньше оценка. Однако оценки качества управления не являются аддитивными, т.е. суммируемыми, и непосредственно использовать их в оптимизационной задаче предлагаемым ниже методом сложно. Обратные же оценкам качества величины можно интерпретировать как условные ущербы $D=(1-E)/E$, которых можно суммировать. Действительно, всякое нарушение условий управления влечет за собой ущерб; при оценке качества $E=1$ ущербы нулевые, но чем ниже $E<1$, тем выше ущербы. Виды ущербов соответствуют видам оценок качества – $D_i^W, D_i^{ZZ}, D_i^{OZ}, D_i^{OO}, D_i^{PS}, D_i^{norm}, D_i^{gmt}, D_i^T, D_i$. Соотношения

$$\sum_i r_i = 1; \quad \alpha_i + \beta_i + \gamma_i = 1 \quad \forall i; \quad \sigma_i^W + \sigma_i^Z + \sigma_i^{PS} + \sigma_i^T + \sigma_i^I = 1 \quad \forall i \quad (2)$$

Критерий в задачах оптимизации выбора режима управления водохранилищами – минимум суммы условных ущербов (В задаче моделирования водохранилищ функция качества вычисляется

$$K = \left\{ \begin{aligned}
 &\sigma^W \sum_i \{r_i [\alpha_i D_i^W + \beta_i D_i^{ZZ} + \alpha_i D_i^{gmt} + \beta_i D_i^{OZ} + \gamma_i D_i^{OO}]\} + \\
 &+ \sigma^{PS} \sum_i \{r_i D_i^{PS}\} + \sigma^Z \sum_i \{r_i D_i^{norm}\} + \sigma^T \sum_i \{r_i D_i^T\} + \sigma^I D_I
 \end{aligned} \right\} \rightarrow \min \quad (3)$$

Вычисления E и D позволяют не рассматривать экономику водопользования детально, оценивая реальные ущербы от невыполнения условий управления приближенно. При помощи таких условных ущербов и экспертных коэффициентов дан близкий к адекватному критерий с использованием рассчитываемых уровней и расходов.

Математическая модель управления водохранилищами. Задача пропуска половодья: задан прогноз притока к водохранилищам в даты от начала до конца половодья (паводка), рассчитать гидрографы сбросных расходов водохранилищ, ход уровней у плотин, возможные мощности ГЭС среднесуточные и др. показатели водопользования

$$Z_i^{dead} \leq Z_i(t) \leq Z_i^{force} \dots (a); \dots Z_i^{dead} \leq Z_i(t) \leq Z_i^{norm} \quad (b) \quad (4)$$

$$|Z_i(t+1) - Z_i(t)| \leq \Delta Z_i \quad (5)$$

$$|Q_i(t+1) - Q_i(t)| \leq \Delta Q_i \quad (6)$$

$$Z_i(t) - Z_i^{lowBief}(t) \leq \Delta Z_i^{Bief} \quad (7)$$

между условными ущербами разных видов регулируются экспертными коэффициентами ранжирования.

r_i - экспертная оценка «важности» i -го водохранилища в речной системе; α_i - оценка приоритета водопотребления в хозяйственной деятельности на водохранилище; β_i - оценка приоритета условий водопользования по уровням верхнего бьефа гидроузла; γ_i - оценка приоритета условий водопользования по расходам удаленных верхних бьефов гидроузлов; $\sigma^W, \sigma^Z, \sigma^{PS}, \sigma^T, \sigma^I$ - экспертные коэффициенты приоритета направлений функционирования водохранилищ: хозяйственной эксплуатации водных ресурсов (водопотребление и водопользование), степени строгости соблюдения нормативных уровней, использования водохранилищ для выработки электроэнергии, достижения смежных уровней к концу периода управления. Коэффициенты нормированы:

как пользовательская информация). Целесообразно записать единый критерий для двух рассматриваемых задач учитывая, однако, что приоритеты в разных задачах различны:

с минимумом суммарного ущерба при выполнении всех технических условий работы водохранилищ. Задача выбора рационального режима использования водных ресурсов водохранилищ в маловодный период межени формулируется: рассчитать гидрографы сбросных расходов из водохранилищ каскада при выполнении всех технических условий работы водохранилищ, максимально возможном удовлетворении водопотребления и условий водопользования при минимальном суммарном ущербе при управлении водохранилищами. Ограничения и условия работы водохранилищ даны совместно для двух задач:

$$Q_{it}^{san} \leq Q_{it} \leq Q_i^{max}(Z) \tag{8}$$

$$\Delta q_{it} = (L_{it}^{melt} - L_{it}^{evap} - L_{it}^{filtr} - L_{it}^{ice}) / 86400 \tag{9}$$

$$V_{it} - V_{i,t-1} = (Q_{it} + Q_{i,t} + q_{it} - Q_{it} - G_{it} + \Delta q_{it}) \times 86400 \tag{10}$$

$$Q_i^h(t, \theta_i) = Q_i(t, \theta_i) + Q_{i,t}(t, \theta_{i,t}) + q_i(t, \theta_i) - G_i(t, \theta_i) + \Delta q_i(t, \theta_i) \tag{11}$$

$$\overline{Z}_{i,t} = \mathbf{H} \{ Q_{it}, Q_{i,t}, Q_{i,t}, G_{it}, q_{it}, \Delta q_{it}, \overline{Z}_{i,(t-1)}, \overline{Q}_{i,(t-1)} \} \tag{12}$$

$$Q_i(t) = \mathbf{R} \{ Q_i^h(t, \overline{\theta}_i), Z_i^{min}, Z_i^{max}, \Delta t_i, Z_i^T, Q_i^o \} \tag{13}$$

$$Q_i(t) = \rho \{ Q_i^h(t, \overline{\theta}_i), Q_i^{gmt}(t), Z_i^{gmt}, Z_i^{inf} \} \tag{14}$$

$$Y_i^{fact}(t) = \mathbf{Y} \{ Z_i(t), Q_i(t), Z_i^{LowBief}(t) \}; \quad Y_{i,t}^{fact}(t) = \mathbf{Y} \{ Z_{i,t}(t), Q_{i,t}(t), Z_{i,t}^{LowBief}(t) \} \tag{15}$$

Здесь: (4) – допустимость уровней для задач пропуска половодий (а) и работы водохранилищ в межень (б); (5),(6) – допустимость суточных перепадов уровней и сбросного расхода в период половодья; (7) – допустимость разницы уровней верхнего и нижнего бьефов гидроузлов, причем $Z_i^{lowBief}$ связано с Z_{i_0} нижнего водохранилища i_0 , а для замыкающего водохранилища с кривой Z_i^Q низовья реки; (8) – допустимость сбросных расходов, исходя из обеспечения санитарно-экологических расходов и пропускной способности гидроузла; (9) – дополнительный приток или потери из водохранилищ, где L_{it}^{evap} , L_{it}^{filtr} , L_{it}^{ice} – суточный объем потерь на испарение, фильтрацию, льдообразование, L_{it}^{melt} – дополнительный объем притока от таяния льда (разные виды указанных объемов играют разную роль в периоды пропуска половодья и межени); (10) – суточный водный баланс участка водохранилища; (11) - уравнение расчета гидрографа суммарного притока к водохранилищу, смещенного к створу гидроузла; (12) - обобщенная запись гидравлического расчета хода уровней по гидравлическим отрезкам водохранилища, где $s=0, \dots, S_i$ – нумерация створов-границ гидравлических отрезков, включая створ плотины водохранилища i и створов вышележащих плотин, $\overline{Z}_{i,(t-1)} = \{ Z_{i,s,(t-1)} \}$, $\overline{Q}_{i,(t-1)} = \{ Q_{i,s,(t-1)} \}$ – векторы начальных, т.е. на конец $(t-1)$ -х суток уровней и расходов по отрезкам, $\overline{Z}_{i,t} = \{ Z_{i,s,t} \}$, $\overline{Q}_{i,t} = \{ Q_{i,s,t} \}$ – результат расчета, векторы уровней и расходов на конец суток t ; (13) – обобщенная запись процедуры расчета в задаче пропуска половодий сбросного гидрографа из водохранилища, где Q_i^o – начальный сбросной расход; (14) – обобщенная запись процедуры расчета в задаче оптимального использования водных ресурсов в межень сбросного гидрографа из водохранилища; (15) - обобщенная запись расчета суточной выработки электроэнергии ГЭС: при расчете рассматриваемого водохранилища i определяются электроэнергия ГЭС водохранилищ-«родителей» i^- и i^+ . Выработка энергии ГЭС замыкающего водохранилища каскада вычисляется с использованием заданной кривой $Q(Z)$ зависимости расхода от уровня в нижнем бьефе плотины гидроузла. В систему (4)-(14) входят только

строгие ограничения; мягкие, желаемые условия водопользования по уровням и расходам учитываются оценками, входящими в критерий оптимизации (3).

Решение задачи пропуска высоких вод. На рис.2 показана характерная схема половодья в водохранилище: входной и сбросной гидрографы расходов и ход уровней у плотины. Различают три фазы: подъем, основная волна и спад половодья. На ходе уровня можно видеть: Z_i^{min} - сработку водохранилища к началу основной волны притока, Z_i^{max} - максимальное на конец основной волны притока наполнение водохранилища, Z_i^T - наполнение к концу половодья. Также необходимой характеристикой сбросного гидрографа является величина общего его объема W_i . Для полного описания формы сбросного гидрографа следует добавить величину задержки максимального уровня в начале фазы спада половодья Δt_i . Для любого заданного варианта входного гидрографа, определяющего W_i , и параметров Z_i^{min} , Z_i^{max} , Z_i^T , Δt_i однозначно конструируется сбросной гидрограф с точностью до средних значений расходов на фазах подъема, основной волны и спада.

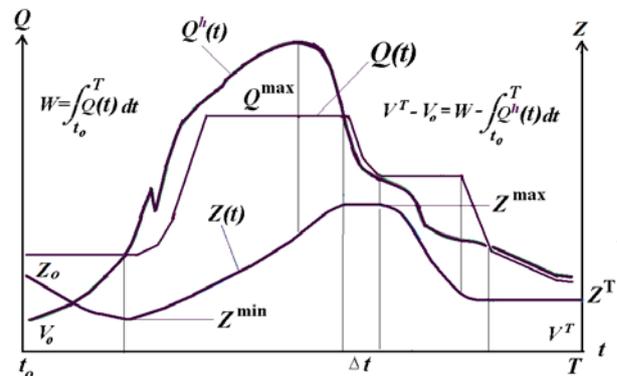


Рис. 2. Схема пропуска половодья в водохранилище

На свойстве однозначности построения сбросного гидрографа основан метод решения задачи. Используется метод динамического программирования [5] с шагами перебора водохранилищ от истоков реки к устью, к замыкающему водохранилищу. Для каждого водохранилища рассматривается весь период половодья, рассматриваются варианты сбросных гидрографов с

вышерасположенных водохранилищ, и для каждого рассматриваются варианты перечисленных выше параметров. Для каждого варианта гидрографов притока и параметров Z_i^{min} , Z_i^{max} , Z_i^T , Δt_i генерируется гидрограф сбросного расхода водохранилища объемом W_i . Построение гидрографа сбросных расходов водохранилища проводится процедурой R , по процедуре H ведутся гидравлические расчеты на участке водохранилища, проверяются технические условия работы водохранилища и гидроузла (4)-(7), отбрасываются варианты, им не удовлетворяющие. Вычисляется суммарный условный ущерб пропуска половодья с учетом ущербов работы вышележащих водохранилищ, т.е. ущерб всей пройденной по шагам части каскада. Отбраковываются варианты с большим ущербом при тех же параметрах Z_i^{min} , Z_i^{max} , Z_i^T , Δt_i , и в памяти компьютера остается вариант с минимальным ущербом.

Время задержки максимального уровня водохранилищ является параметром, противоречащим «Правилам использования водных ресурсов водохранилищ» с требованием скорейшего восстановления нормального уровенного состояния водохранилища. Однако задержка уровня выше НПУ может облегчить пропуск половодья на нижележащих водохранилищах, поэтому этот параметр остается в задаче при построении сбросного гидрографа как ограниченно варьируемый несколькими сутками параметр. Другие параметры варьируются в пределах: $Z_i^{dead} \leq Z_i^{min} \leq Z_i^{norm}$, $Z_i^{min} \leq Z_i^{max} \leq Z_i^{force}$. Параметр Z_i^T зависит от перечисленных величин следующим образом. Условием наполнения водохранилищ сезонного регулирования к концу половодья является уровень НПУ, т.е. $Z_i^T \leq Z_i^{norm}$. Водохранилища многолетнего регулирования не

обязательно наполняются ежегодно до НПУ, но если $Z_i^{max} \geq Z_i^{norm}$ то $Z_i^T = Z_i^{norm}$, если же $Z_i^{max} \leq Z_i^{norm}$, то $Z_i^T = Z_i^{max}$. Таким образом, Z_i^T определено, остаются варьируемыми не четыре, а три параметра W_i , Z_i^{min} , Z_i^{max} .

Построив варианты гидрографа сбросного расхода из одного водохранилища, переходим к рассмотрению нижележащего, и так далее до замыкающего водохранилища. Варианты сбросного гидрографа запоминаются в памяти компьютера в табличном виде по порядку нумерации. Для каждого построенного гидрографа запоминаются также ссылочные номера сбросных гидрографов водохранилищ-«родителей», порождающие построенный сбросной гидрограф. Для вариантов сбросного гидрографа устьевого водохранилища строятся и оцениваются сбросные гидрографы специального вида на устьевой участок реки. Определяется наилучший вариант с максимумом оценки качества управления всем каскадом, и по ссылочным номерам от выбранного варианта устьевого водохранилища восстанавливаются сбросные гидрографы всех вышележащих водохранилищ.

Варианты решений с ущербами всех вышележащих i -х водохранилищ и ссылочными номерами содержатся в таблицах $K_{J(i)}[Z_i^{min}, Z_i^{max}, W_i]$, $i = \bar{1}, I$. Для водохранилищ-истоков таблицы строятся только с учетом их собственных ущербов. Пусть в процессе расчета построены таблицы оценок $K_{J(i)}$ и $K_{J(i^*)}$ для i^* , i^* - «родителей» i -го водохранилища. Тогда таблица $K_{J(i)}$ для i -го водохранилища строится по рекуррентному соотношению:

$$K_{J(i)}[Z_i^{min}, Z_i^{max}, W_i] = \min\{K_{J(i^*)}[Z_{i^*}^{min}, Z_{i^*}^{max}, W_{i^*}] + K_{J(i^{**})}[Z_{i^{**}}^{min}, Z_{i^{**}}^{max}, W_{i^{**}}] + r_i \times D_i[...]\} \quad (16)$$

где минимум каждого варианта $K_{J(i)}$ с определенным сбросным гидрографом $Q(t)$ водохранилища, описываемого параметрами Z_i^{min} , Z_i^{max} , W_i берется по всем вариантам параметров Z_i^{min} , Z_i^{max} , W_i и

$Z_{i^*}^{min}$, $Z_{i^*}^{max}$, W_{i^*} , описывающих гидрографы $Q_{i^*}(t)$, $Q_{i^{**}}(t)$ сбросов водохранилищ-родителей. Функция D_i расчета ущербов:

$$D_i[...]= \left\{ \begin{aligned} &\sigma^W [\alpha_i D_i^W + \beta_i D_i^{ZZ} + \alpha_i D_i^{gmt} + \beta_{i^*} D_i^{OZ} + \gamma_{i^*} D_i^{OO}] + \\ &+ \sigma^{PS} \{r_{i^*} D_{i^*}^{PS} + r_{i^{**}} D_{i^{**}}^{PS}\} / r_i + \sigma^Z D_i^{norm} + \sigma^T D_i^T \end{aligned} \right\} \quad (17)$$

Решение задачи управления водохранилищами в межень. В задаче пропуска половодий строятся варианты сбросного гидрографа водохранилища целиком за расчетный период. В задаче использования водных ресурсов в межень рассматривается режим работы водохранилища посуточно, поскольку возможен дефицит водных ресурсов и снижение водоотдачи, заранее определить эти интервалы времени в сутках не представляется возможным, как и определить потери, зависящие от режима притока и сбросов, которые ещё только определяются в процессе расчета водохранилища. Правила управления водными ресурсами водохранилища описываются тремя переменными – гарантированный гидрограф сбросного расхода $Q_i^{gmt}(t)$,

условный уровень гарантированной водоотдачи Z_i^{gmt} (что представляет собой предложенный ранее нормальный сработанный уровень НСУ) и условный уровень аккумуляции излишков притока Z_i^{inf} . Если текущий уровень выше гарантированного, водоотдача удовлетворяется полностью; ниже этого уровня расход водоотдачи водопотребления и водопользования урезается в степени пропорциональной глубине до УМО. При УМО полезная водоотдача нулевая.

Далее, суточный водохозяйственный баланс водохранилища с выполнением гарантированного сбросного расхода при повышении объема водохранилища выявляет излишки притока, которыми можно распорядиться по разному. При уровне

водохранилища ниже Z_i^{inf} эти излишки полностью остаются в водохранилище. При уровне выше Z_i^{inf} излишки притока сбрасываются дополнительно к гарантированному сбросному расходу пропорционально глубине $(Z_i^{norm} - Z_i)$. При НПУ излишек притока сбрасывается полностью. Уровни $Z_i^{norm} \geq Z_i^{inf} \geq Z_i^{grnt} \geq Z_i^{dead}$ постоянны для всего периода межени.

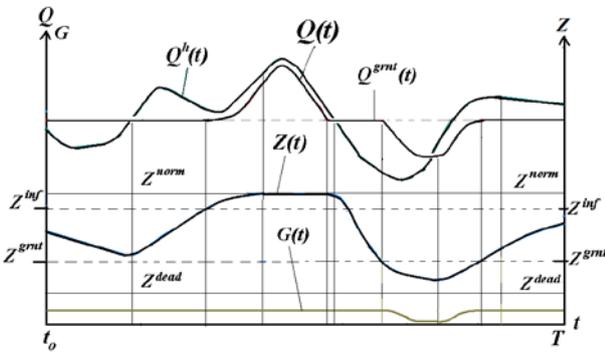


Рис. 3. Схема управления водными ресурсами водохранилища в межень

$$Q_i^{comp}(t) = Q_{i_0}^{comp}(t) + \max[G_{i_0}(t), Q_i^{san}(t), Q_{i_0}^{use-min}(t)] \quad (18)$$

Построение сбросного гидрографа водохранилища по суткам за весь период межени при заданных $Q_i^{grnt}(t)$, Z_i^{grnt} , Z_i^{inf} проводится в рамках процедуры р по изложенным выше принципам.

Для решения оптимизационной задачи используется метод динамического программирования [5]. Решение задачи проводится заполнением таблиц «сверху–вниз» от водохранилищ-истоков каскада до устьегого водохранилища. Процесс расчетов аналогичен решению оптимизационной задачи пропуска половодий, но используются другие «переменные состояния», по терминологии метода: уровни гарантированной водоотдачи Z_i^{grnt} ,

$$K_{J(i)}[Z_i^{grnt}, Z_i^{inf}, \omega_i] = \min\{K_{J(i^*)}[Z_i^{grnt}, Z_i^{inf}, \omega_i] + K_{J(i^{**})}[Z_i^{grnt}, Z_i^{inf}, \omega_i] + r_i \times D_i[\dots]\} \quad (19)$$

Минимальный вариант i -го водохранилища, описываемого параметрами Z_i^{grnt} , Z_i^{inf} , ω_i сбросного гидрографа $Q_i(t)$, берется по вариантам Z_i^{grnt} , Z_i^{inf} , ω_i и $Z_{i^*}^{grnt}$, $Z_{i^*}^{inf}$, ω_{i^*} гидрографов «родителей» $Q_{i^*}(t)$, $Q_{i^{**}}(t)$. Таблицы запоминаются, в последней таблице для устьегого водохранилища берется вариант $\min K_{J(i)}$. По ссылочным номерам восстанавливается режим всего каскада.

Вспомогательные задачи. Проблемы второго уровня. В рамках изложенных моделей решаются вспомогательные задачи, названные выше процедурами, имеющие самостоятельные формулировки и методы. Это модели второго уровня по отношению к основным оптимизационным моделями. Задачи решаются многократно в процессе основных расчетов и к ним предъявляются требования быстроты расчета (что достижимо при

Гарантированный гидрограф сбросного расхода $Q_i^{grnt}(t)$ принимается как доля $0 \leq \omega \leq 1$ от гидрографа полной компенсации $Q_i^{comp}(t)$ нижележащих водохранилищ, т.е. $Q_i^{grnt}(t) = \omega Q_i^{comp}(t)$. Гидрограф полной компенсации строится как сумма всех гидрографов водопотребления и водопользования водохранилищ, ниже данного, включая оценку Q_i^{PS} - требуемых сбросных гидрографов ГЭС для выработки заданного графика среднесуточной мощности. Таким образом, гидрографом $Q_i^{comp}(t)$ данное водохранилище полностью компенсирует работу нижележащих. Построение $Q_i^{comp}(t)$ проводится перебором водохранилищ в порядке против течения - от замыкающего водохранилища, для которого $Q_i^{comp}(t)$ равно требуемому расходу в низовья реки, до водохранилищ-истоков по рекуррентному соотношению:

аккумуляции излишков Z_i^{inf} и доля ω_i от гидрографа полной компенсации.

Пусть таблицы $K_{J(i)}[Z_i^{grnt}, Z_i^{inf}, \omega_i]$, $i = \overline{1, I}$, содержат варианты оптимальных оценок для любого i -го и всех вышерасположенных к нему водохранилищ. Пусть в процессе расчета «сверху–вниз» построены таблицы оценок $K_{J(i^*)}$ и $K_{J(i^{**})}$ для i^*, i^{**} , - «родителей» i -го водохранилища. Таблица оценок $K_{J(i)}$ строится по рекуррентному соотношению:

упрощении решений), вместе с тем адекватности результатов.

Гидравлический расчет водохранилища H - важнейшая вспомогательная задача методики выбора режима управления каскадом водохранилищ, заключается в определении хода уровня по суткам в створе плотины гидроузла, а также на промежуточных створах участка, разбитого ими на отрезки. При гидравлических расчетах должна решаться задача неустановившегося медленно изменяющегося движения воды по системе Сен-Венана, состоящей из уравнений движения и объемов [20]. Уравнения движения заранее табулируются в виде табличных номограмм зависимости расходов от уровней для каждого отрезка. Для гидравлического расчета принят метод мгновенных режимов медленно изменяющегося движения воды в открытом русле [8]. Метод заключается в построении по суточным интервалам гидравлических поверхностей, удовлетворяющих уравнениям движения по

выделенным отрезкам водохранилища, с увязкой поверхностей для удовлетворения уравнениям объемов на каждом отрезке. Проводится два этапа решения [7]. Сначала строится поверхность, удовлетворяющая уравнению движения на каждом отрезке и общему уравнению объема всего водохранилища. На втором этапе перебор отрезков с направленным изменением уровней на створах по [9] достигает решения, удовлетворяющее уравнение объемов на каждом отрезке. Практические расчеты показали, что результат уже первого этапа приемлем.

Построение гидрографа сбросных расходов водохранилища при пропуске половодья проводится для заданных величин Z^{min} сработки уровня перед основной волной, Z^{max} максимального наполнения, времени Δt удержания максимального уровня и достижения уровня Z^T в конце периода. Сбросной гидрограф конструируется в порядке действий:

1. Определяются даты сработки и наполнения водохранилища в пределах Z^{min} и Z^{max} на основной волне притока, учитывая, что пик половодья срезается постоянным расходом сброса. Проводится дихотомия от нуля до пика притока.

2. От начальной даты до даты сработки уровня по известным из гидравлических расчетов объемам водохранилища определяется сбросной гидрограф, который ищется в виде $Q(t)=q_0+q_1t+q_2t^2+q_3t^3$ или ломанной линии, максимально приближенных к гидрографу притока у плотины, с переводом водохранилища от начального объема к объему предварительной сработки. Решается задача минимизации суммы квадратов.

3. Для поддержания максимального уровня водохранилища в течение Δt суток проводится режим копирования гидрографа притока.

4. На последней фазе сбросной гидрограф конструируется либо по п. 2 максимального приближения к гидрографу притока, либо по принципу поддержания достигнутого уровня с переводом водохранилища из состояния полного наполнения в состояние, определенное гидравлическим расчетом при уровне Z^T у плотины к концу периода половодья.

Расчет снижения водоотдачи из водохранилища проводится в процессе посуточных расчетов водохранилища в межень при возникновении дефицита водных ресурсов в водохранилище, т.е. при уровне ниже Z_i^{gmt} . Определяется снижение общей суточной водоотдачи по сравнению с нормативной, это снижение распределяется между отраслями водопотребления и гидроэнергетикой с помощью таблиц решений по правилу приоритета.

Расчет суточной мощности и выработки электроэнергии ГЭС проводится в рамках процедуры U по известным методикам гидроэнергетики [3, 17].

Построение сбросного гидрографа из замыкающего водохранилища состоит в том, что в гидрограф притока, смещенный к створу замыкающего водохранилища, вписывается требуемый сбросной гидрограф по форме последовательности «полок» расхода с заданными допущениями.

Используется оптимизационная задача последовательного подбора параметров «полок» с критерием максимального приближения к гидрографу притока.

Посуточная детализация суммарного прогноза притока. Прогноз притока к водохранилищам обычно задается диапазоном суммарного ожидаемого объема (минимум-максимум). Для распределения взятого варианта суммарного объема притока по суткам применяется метод гидрологического подобия с выбором года-аналога из всей совокупности лет, гидрологические данные по которым известны, и другим особенностями [11].

Волжско-Камский каскад водохранилищ. В Волжско-Камский каскад водохранилищ ВКК входят водохранилища (рис. 3): 1 - Ивановское, 2 - Угличское, 3 - Рыбинское, 4 - Шекнинское (Верхняя Волга), 5 - Горьковское, 6 - Чебоксарское, 7 - Жигулевское (Средняя Волга), 8 - Павловское (Уфа), 9 - Камское, 10 - Воткинское, 11 - Нижнекамское (Кама), 12 - Саратовское, 13 - Волгоградское (Нижняя Волга).



Рис. 4. Схема Волжско-Камского каскада водохранилищ

На основе изложенных выше методов для ВКК реализована компьютерная система, которая требует адаптации к методам реального управления путем ввода сервисных условий, включения новых подзадач, расчетных процедур и пр. Правильность принятых методов расчета подтверждается (рис. 5).

Выводы:

1. Математические модели рационального режима работы водохранилищ в каскаде основаны на принципах регулирования стока рек водохранилищами и охватывают практически все технические

условия и характерные особенности работы водохранилищ в разные гидрологические фазы стока.

2. Предложенные методы решения задач оцениваются по трудоемкости их программной реализации в отношении распределения информации в памяти компьютера и объема вычислений. Необходимая информация: параметры водохранилищ, годовые данные по водопотреблению и водопользованию, многолетние гидрологические данные суточного притока, варианты расчета в соответствии с методами расчетов. Общий объем данных для

водохранилищ одной реки числом два-три десятка допустим для распределения информации всех указанных видов в памяти компьютера. Алгоритмы расчета в соответствии с методами решений включают в себя большое число процедур разных уровней, но обозримы. Объем вычислений зависит от числа вариаций параметров, и может быть большим. Однако при достаточных для практики вариациях быстродействие компьютера обеспечивает приемлемое время счета.

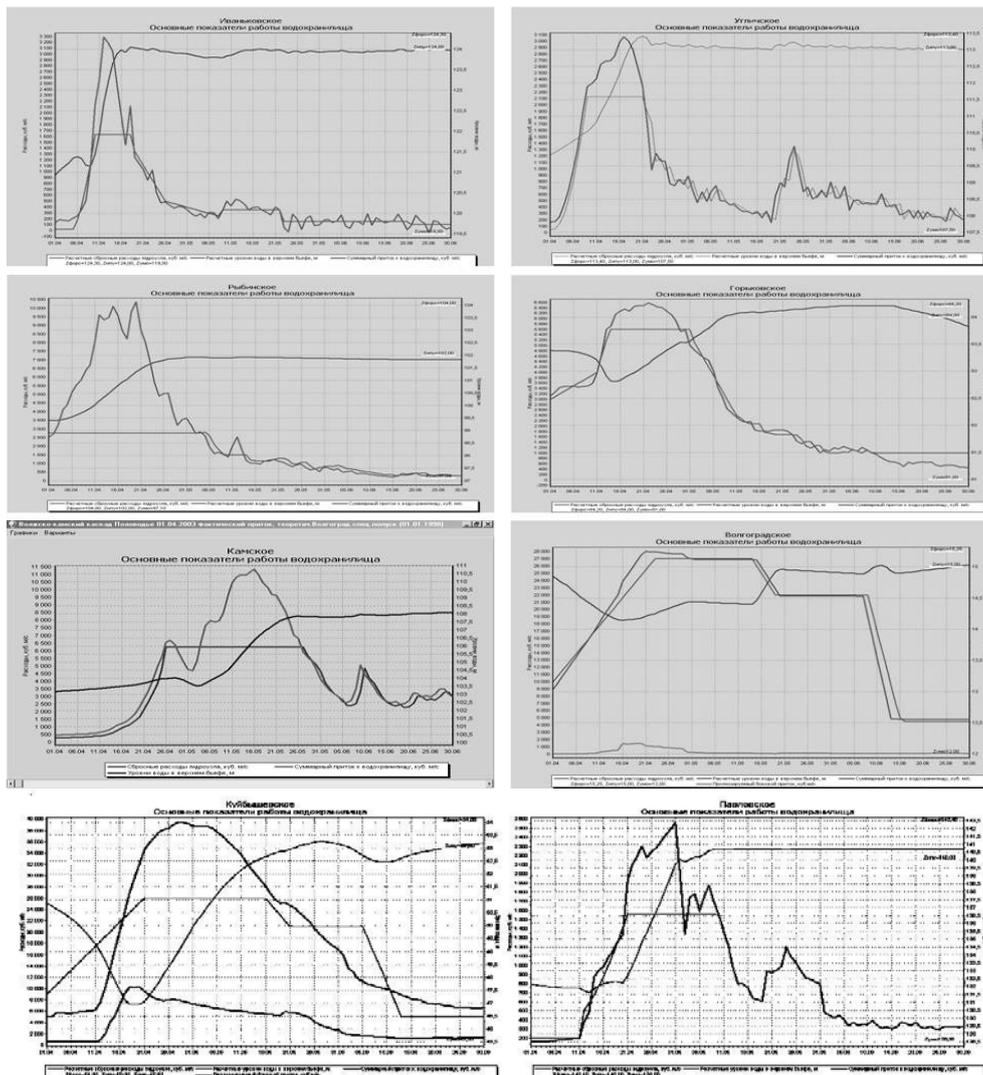


Рис. 5. Примеры построенных компьютером режимов пропуска паводков по Волжско-Камскому каскаду водохранилищ: гидрограф суммарного притока характеризуется наличием пика, у сбросного гидрографа есть горизонтальная полка расходов, ход уровней у плотины водохранилища к концу периода приводит к НПУ. Водоохранилища слева направо: Ивановское, Угличское, Рыбинское, Горьковское, Камское, Волгоградское, Куйбышевское, Павловское

3. Оптимизационные расчеты хорошо вписываются в технологию принятия решений по управлению водохранилищами в рамках процесса прогнозно-ситуационного управления. Рациональные режимы не противоречат управлению водохранилищами по диспетчерским графикам. Диспетчерские и оптимизационные расчеты дополняют друг друга, обеспечивая выбор режима работы водохранилищ в спокойных и в чрезвычайных условиях.

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. Асарин, А.Е. Водноэнергетические расчеты / А.Е. Асарин, К.Н. Бестужева. – М., Энергоатомиздат, 1986. 224 с.
4. Беднарук, С.Е. Матушка-Волга. Интервью с директором Центра Регистра и Кадастра // «Государственное управление ресурсами». 2007. №4 (22). С. 10-23.
5. Беллман, Р. Динамическое программирование (пер. с англ.). – М.: ИЛ, 1960. 456 с.
6. Богатырев, В.А. Система поддержки принятия решений для управления водными ресурсами в бассейне реки / В.А. Богатырев, А.Е. Косолапов, Н.А. Косолапова и др. // Вода России. Математическое моделирование в управлении водопользованием. Под ред. А.М. Черняева. ФГУП РосНИИВХ. – Екатеринбург: Аква-Пресс, 2001. С. 410-423.
7. Григорьев, В.К. Компьютерная технология расчетов пропуска половодья на примере Волжско-Камского каскада водохранилищ / В.К. Григорьев, Л.К. Левит-Гуревич // «Экстремальные гидрологические события. Теория. Моделирование. Прогноз». Труды междунар. конф. 3-6 ноября 2003 г. Институт водных проблем ИВП РАН. – М., 2003. С. 121-125.
8. Грушевский, М.С. Неустановившееся движение воды в реках и каналах. – Л.: Гидрометеоздат, 1982. 288 с.
9. Левит-Гуревич, Л.К. Метод гидравлического расчета в естественном русле с целью выбора противопаводковых мероприятий // Водные пути и русловые процессы. – М.: Труды Академии водохозяйственных наук. 1996. Вып. 3. С. 71-77.
10. Левит-Гуревич, Л.К. Формализация расчетов пропуска половодья в системе водохранилищ. В кн. «Экстремальные гидрологические события. Теория. Моделирование. Прогноз». Труды междунар. конф. 3-6 ноября 2003 г. Институт водных проблем ИВП РАН. – М., 2003. С. 136-141.
11. Левит-Гуревич Л.К. Компьютерная реализация метода подобия для прог-ноза притока к водохранилищам // Материалы конференции «Экстремальные гидрологические события в Арало-Каспийском регионе». – М., 2006. С. 124-129.
12. Левит-Гуревич, Л.К. Сравнение методов оптимального и диспетчерского управлений в процессе последовательного принятия решений на примере работы водохранилищ // Материалы Всероссийской конференции «Проблемы информатизации общества». – Нальчик, из-во КБНЦРАН, 2008. С. 247-251.
13. Мотовилов, Ю.Г. Информационно-моделирующий комплекс ЕСОМАГ для речных бассейнов // Доклады, VI Всероссийский гидрологический съезд, Секция 5. Гидрофизические явления и процессы. – СПб., Гидрометеоздат, 2004. С. 139-140.
14. Обоснование стратегий управления водными ресурсами. – М.: Научный мир, 2006. 336 с.
15. Пряжинская, В.Г. Компьютерное моделирование в управлении водными ресурсами / В.Г. Пряжинская, Д.М. Ярошевский, Л.К. Левит-Гуревич. – М.: Физматлит, 2002. 406 с.
16. Резниковский, А.Ш. Диспетчерские правила управления режимами водохранилищ / А.Ш. Резниковский, М.И. Рубинштейн. – М.: Энергоатомиздат, 1984. 105 с.
17. Цветков, Е.В. Оптимальные режимы гидро-электростанций в энергетических системах / Е.В. Цветков, Т.М. Алабышева, Л.Г. Парфенов. – М.: Энергоатомиздат, 1984. 304 с.
18. Чабан, А.Н. Построение эффективных диспетчерских правил управления водохранилищем // Сообщения по прикл. математике. – М.: ВЦ АН СССР, 1986. 21 с.
19. Хранович, И.Л. Управление водными ресурсами. Поточковые модели. – М.: Научный мир, 2001. 296 с.
20. Штернлихт, Д.В. Гидравлика. Учебник. – М.: «КолосС», 2005. 656 с.
21. Daniel, P. Water Resources Systems, Planning and Management (Introduction to Methods, Models, Applications) / P. Daniel, D. Loucks, E. van Beer. – UNESCO Publ., 2005. 680 p.

RATIONAL WATER RESOURCES MANAGEMENT OF RESERVOIRS ON THE EXAMPLE OF VOLGA-KAMA CASCADE

© 2012 L.K. Levit-Gurevich

Institute of Water Problems RAS, Moscow

Management regime of reservoirs by rivers water economic system in hydrological phase time of inflow or more in the form of daily average overflow rate is established. In practice are carried management process at which through fixed time calculations of reservoirs regimes out to the given number of days on the basis of aquacultural conditions data and forecast of inflow received at that time is carried out. Now management is carried out with use of made in advance dispatching schedules. In article optimizing problems of choice the rational management by reservoirs in the cascade are considered. Two primal problems are allocated: the high water or high water admission and use of water resources during the low water period, and also a number of auxiliary problems of calculation of reservoirs. Optimization is carried out on method of dynamic programming. Optimum (rational) management doesn't exclude the dispatching; in aggregate two types of management always provide acceptable result: in a quiet condition and in the composite hydrological conditions, without watching, often, at indeterminacy and discrepancy of forecasts of inflow.

Key words: *reservoirs cascade, dispatching schedule, rational management, high water, low water, inflow forecast, optimization, dynamic programming*