

6  
А-59

МИНИСТЕРСТВО ЭНЕРГЕТИКИ И ЭЛЕКТРИФИКАЦИИ СССР  
ГЛАВНИИПРОЕКТ  
КАЗАХСКИЙ НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ИНСТИТУТ ЭНЕРГЕТИКИ

На правах рукописи

БАЙШЕВ БАХМЕТ БАЙШЕВИЧ

МЕТОДИКА РАСЧЕТОВ МНОГОЛЕТНЕГО РЕГУЛИРОВАНИЯ  
СТОКА ВОДОХРАНИЛИЩЕМ В КАСКАДЕ

Специальность 05.14.09 - Гидравлика  
и инженерная гидрология

Автореферат  
диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Алма-Ата, 1975

МИНИСТЕРСТВО ЭНЕРГЕТИКИ И ЭЛЕКТРИФИКАЦИИ СССР  
ГЛАВНИИПРОЕКТ  
КАЗАХСКИЙ НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ИНСТИТУТ ЭНЕРГЕТИКИ

На правах рукописи

БАЙШЕВ БАЯХМЕТ БАЙШЕВИЧ

МЕТОДИКА РАСЧЕТОВ МНОГОЛЕТНЕГО РЕГУЛИРОВАНИЯ  
СТОКА ВОДОХРАНИЛИЩЕМ В КАСКАДЕ

Специальность 05.14.09 - Гидравлика  
и инженерная гидрология

Автореферат

диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Алма-Ата, 1975



Работа выполнена в лаборатории регулирования речного стока КазНИИ энергетики.

Научный руководитель - доктор технических наук  
В.А.Киктенко

Официальные оппоненты:

академик АН КазССР,  
доктор технических наук профессор В.П.Захаров  
кандидат технических наук,  
старший научный сотрудник Д.М.Маматканов

Ведущее предприятие -

Казахский филиал Всесоюзного института Гидропроект  
им.С.Я.Жук

Автореферат разослан "15" мая 1975 г.

Защита состоится "17" июня 1975 г. на заседании  
Ученого Совета КазНИИ энергетики.

Отзывы (в 2-х экземплярах, заверенные и скрепленные  
печатью) просьба направлять по адресу:

480012, г.Алма-Ата, 12, ул.Космонавтов, 85, Совет КазНИИЭ.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке  
КазНИИ энергетики.

Ученый секретарь Совета  
КазНИИ энергетики  
доктор технических наук

М.И.Вдовенко

Одной из основных тенденций современного этапа разви-  
тия водного хозяйства является повышение общего уровня ис-  
пользования речного стока путем его регулирования водохра-  
нилищами.

Водохранилища обычно являются капиталоемкими объекта-  
ми гидротехнического строительства, в связи с чем их проек-  
тные параметры должны подвергаться тщательному технико-эко-  
номическому обоснованию.

Каскадное регулирование стока - сложная многокомпонент-  
ная задача, связанная, в частности, с необходимостью учета  
взаимного влияния режимов работы существующих и вновь вво-  
димых в состав каскада его ступеней. Этим во-многом объясня-  
ется то положение, что до последнего времени все еще отсут-  
ствуют достаточно строгие расчетные методы, "которые не позво-  
лили бы без грубой схематизации и упрощения перейти от рас-  
чета отдельных установок к расчету каскадов" (Г.Г.Сванидзе).

Отдельные аспекты расчетной методики каскадного  
регулирования стока, а также влияния хозяйственной деятель-  
ности человека на естественный режим рек рассмотрены в тру-  
дах М.В.Потапова, С.Н.Крицкого и М.Ф.Менкеля, Я.Ф.Плешкова,  
Г.Г.Иванова, М.А.Мосткова, А.Д.Саваренского, В.А.Бахтиярова,  
И.А.Картвелишвили, В.П.Захарова, Ш.Ч.Чокина, Г.Г.Сванидзе,  
А.Ш.Резниковского, П.А.Ляпичева, Я.Д.Гильденבלата, Д.В.Ко-  
ренистова, И.В.Бусалаева, Т.Н.Аткарской, М.Ангелова, Ж.А.  
Висенс, П.Морана и ряда др.авторов. Несмотря на имеющиеся  
достижения в данной области, некоторые актуальные вопросы  
до последнего времени все еще продолжают оставаться недоста-



точно исследованными. К ним, в частности, относятся приемы оценки вероятностных характеристик нарушенного режима стока и разработка на их основе обобщенной расчетной методики для вновь вводимого в состав каскада водохранилища.

Ряд водопотребителей и водопользователей (ирригация, водоснабжение, гидроэнергетика, водный транспорт и др.) существенно изменяют режим речного стока.

Комплекс причин, влияющих на деформацию естественного режима стока условно можно разбить на следующие две группы:

а) причины, непосредственно действующие в руслах рек (водохранилища, годовые водозаборы в ирригационные системы и тракты межбассейновых перебросок стока и т.д.), которые резко влияют на изменения естественного режима нижерасположенных участков водотока;

б) причины, действующие на стокообразующие факторы в пределах площади водосборного бассейна: агрокультурные, осушительные, лесомелиоративные и др. мероприятия. Они приводят обычно к постепенным изменениям во времени и пространстве основных элементов водного баланса бассейна, а следовательно и режима речного стока. В работах ряда авторов /А.И.Чеботарев, С.И.Харченко и др./ отмечается, что влияние причин этой категории на режим стока в целом несущественно и поэтому для ближайшего расчетного уровня может не учитываться.

Учет крупномасштабных изменений режима естественного стока необходим уже на начальных стадиях развития водохозяйственной системы, поскольку даже наличие одного водохранилища (или одной ирригационной системы) может существенно нарушить его режимные характеристики.

По мере развития водного хозяйства, а именно строитель-

ства новых водохранилищ, ирригационных систем, трактов межбассейновых водных связей и т.д., речной сток претерпевает еще большие изменения. Такие реки, как Волга, Дон, Днепр, Иртыш, Сырдарья и др., в значительной степени изменили свой первоначальный режим. В пределе следует ожидать полного "вырождения" характерных признаков естественного режима стока многих рек и превращения их в управляемые человеком водные артерии.

Водоохранилища в составе каскада строятся обычно с соблюдением известной очередности; после завершения одной его ступени приступают к сооружению второго водохранилища, затем, через определенный промежуток времени - к третьему и т.д. - рис.1. При этом периодически корректируются первоначальные схемы использования водных ресурсов, параметры стока, потери воды, характеристики чаш водохранилищ и др. их показатели.

Если "пионерное" водохранилище располагается выше всех намеченных бассейновой схемой ступеней каскада, то его параметры устанавливаются на основе расчетов по существующим методам для одиночного водохранилища. Если же оно не является "верховым", то его расчет по указанной методике, очевидно, может выполняться лишь для начального этапа развития системы (с последующей переоценкой его параметров).

Наиболее типичной является схема размещения проектируемого водохранилища ниже одной или нескольких существующих ступеней каскада. Именно она и принята в основу построения предлагаемой нами расчетной методики многолетнего регулирования стока в условиях нарушенного его режима (как наименее разработанная область водохозяйственных расчетов).

В случае обратной схемы ("верхнее" водохранилище - проектируемое, а "нижнее" - существующее) расчеты должны выпол-



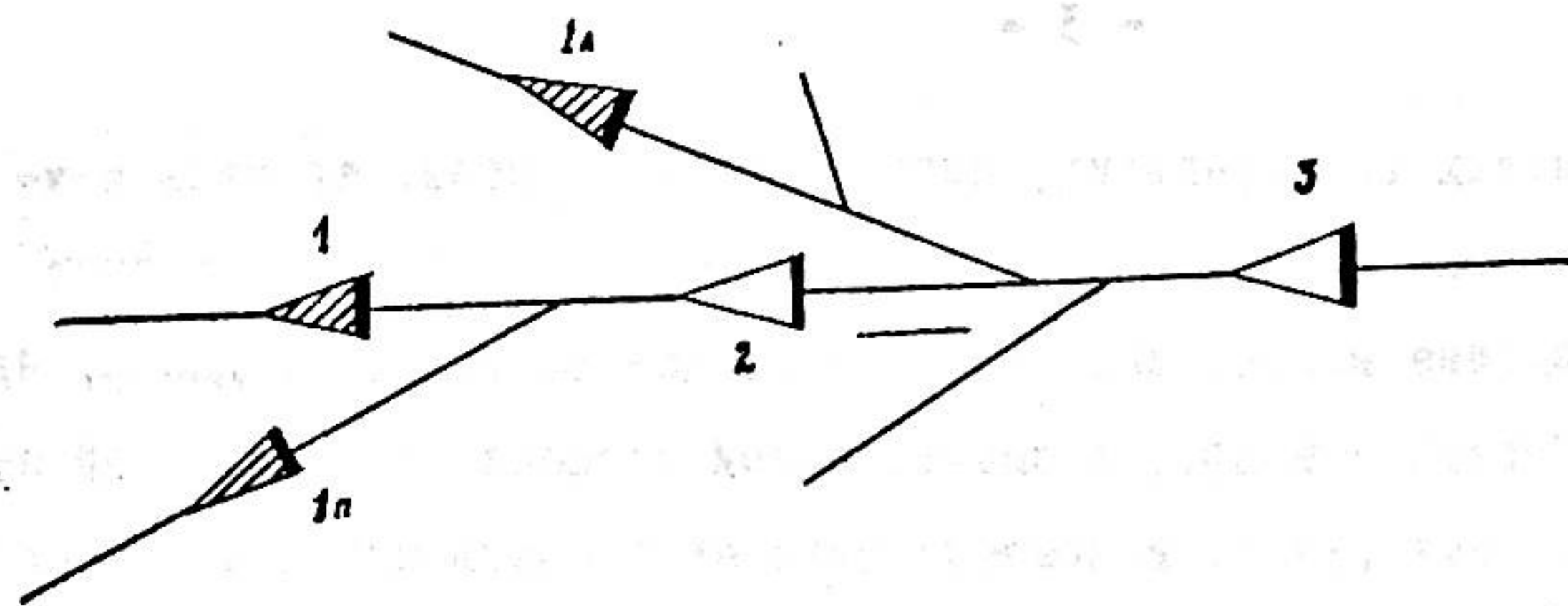


Рис.1. Схема расположения водохранилищ в каскаде: - существующие, - проектируемые

Функции распределения		
исходных величин		их сумм

Рис.2. Функции распределения вероятностей компонентов стока и их сумм  $K_{\Sigma}$ .

няться по методике, учитывающей компенсированный режим водохранилища (опубликована в отдельной нашей работе /7/).

Диссертация состоит из введения, 4-х глав (основное содержание работы), заключения и списка литературы. Общий объем работы 124 страниц машинописного текста и 8 иллюстраций.

В первой главе дается критический обзор имеющихся методов и приемов расчета каскадного регулирования стока. Все они условно подразделены на следующие группы:

а) основанные на замене совокупности ступеней каскада (включая проектируемую) одним условным водохранилищем. Параметры такого условного водохранилища определяются на основе расчетов по существующим методам регулирования стока для изолированной установки (В.П.Захаров, Г.Г.Иванов, В.Л.Бахтияров и др.);

б) рассматривающие совместно все ступени каскада как существующие, так и проектируемые (Г.Г.Сванидзе, Н.А.Картвелишвили, М.Ангелов и др.). Расчетные алгоритмы этой группы методов отличаются сложностью и трудно поддаются реализации на практике (в особенности в случае аналитической их интерпретации);

в) базирующиеся на существующих расчетных схемах одиночного водохранилища. Проектируемая ступень каскада предполагается расположенной ниже существующих установок и рассчитывается по календарным данным на сток нижнего бьефа "верховой" ступени и боковой приточности между ними (П.А.Ляпичев и др.). К этой группе примыкают методы, предложенные Я.Ф.Плешковым, И.В.Бусалаевым и др., основанные на использовании статистических данных о стоке.

Сезонная составляющая емкости водохранилища в большинстве



существующих расчетных методах устанавливается по гидрографу стока реального года, равного по объему гарантируемой (обеспеченной) отдаче. Лишь в работах Н.А.Картвелишвили, Г.Г.Сванидзе, Ш.Ч.Чокина и П.А.Ляличева указаны пути и способы определения полезной емкости водохранилища в каскаде, как единого параметра.

В главе второй подробно рассмотрен предлагаемый прием оценки вероятностных характеристик нарушенного режима водотока в двух интерпретациях: аналитической и численной - основы построения расчетной методики регулирования стока. Годовые объемы суммарного стока при этом рассматриваются как последовательности случайных величин - независимых или зависимых (в последнем случае по схеме простой цепи Маркова). Указанная концепция, очевидно, вполне приемлема для построения расчетной методики регулирования годовых объемов стока в многолетии.

В общем случае суммарный сток в створе проектируемого водохранилища состоит из "n" компонентов различного генезиса: плановых пусков и холостых сбросов верхних водохранилищ каскада, возвратных вод с массивов орошения и промышленных предприятий, боковой приточности и др. Кривые распределения их вероятностей в большинстве случаев являются разрывными функциями. Для математического описания последних в работе использован аппарат обобщенных функций, дающий возможность выразить их в виде дифференцируемых функций во всем диапазоне изменения аргументов.

Распределения вероятностей суммарного стока в рассматриваемом створе реки  $K_{\Sigma} = \sum_{i=1}^n K_i$ , как правило, не описываются известными в теории вероятностей типами кривых. Поэтому плотности вероятностей величин  $K_{\Sigma}$  в работе устанавливаются на основе известного метода построения законов распределения

функций нескольких случайных величин. Так, в случае суммы  $Z = X + Y$ , функция распределения величины  $Z$  определяется по формулам:

$$\left. \begin{aligned} q(z) &= \int_{-\infty}^{\infty} q(x, z-x) dx \\ q(z) &= \int_{-\infty}^{\infty} q(z-y, y) dy \end{aligned} \right\} (1)$$

где  $q(z)$  - плотность вероятностей величины  $Z$ .

Путем повторного применения формулы (I) могут быть определены функции плотности вероятностей при любом числе компонентов суммарного стока.

Математическое ожидание и дисперсия величин  $Z$  определяются по известным формулам математической статистики.

Метод композиции законов распределения случайных величин в той или иной интерпретации часто применяется в гидрологии и водохозяйственных расчетах (С.Н.Крицкий и М.Ф.Менкель, М.В.Потапов и др.).

Как показывает соответствующий анализ, коррелятивная связь между компонентами суммарного стока в ряде случаев отсутствует или близка к нулю (например, между холостыми сбросами из верхних водохранилищ и спецпусками из них, между боковой приточностью и плановыми пусками и т.д.). Поэтому компоненты суммарного стока предполагаются нами как независимые случайные величины.

При построении функции плотности вероятностей величины  $K_{\Sigma}$  обязательен учет веса всех компонентов, т.е. нормирование их в долях единицы суммарного стока. Это достигается с помощью приема установления законов распределения случайных величин, представляющих собой функции от других аргументов, имеющих из-



вестные плотности вероятностей.

Практическое применение приема определения функций плотности вероятностей суммарного стока в работе показано на нескольких характерных примерах-рис. 2.

Если, например, исходные функции плотности вероятностей холостых сбросов  $K_c$  и боковой приточности  $K_{\delta n}$  имеют вид

$$\left. \begin{aligned} q(K_c) &= n \cdot \exp[-\mu K_c] + \lambda \cdot \delta(K_c - K_0), \quad (0 \leq K_c < \infty) \\ q(K_{\delta n}) &= a \cdot K_{\delta n}^{\tau-1} \cdot \exp[-\beta K_{\delta n}], \quad (0 \leq K_{\delta n} < \infty), \end{aligned} \right\} (2)$$

то функцией плотности вероятностей их суммы будет

$$q(K_{\Sigma}) = f(K_{\Sigma}) \cdot \exp[-\beta K_{\Sigma}] + A \cdot \exp[-\mu K_{\Sigma}], \quad \gamma \geq 1, \quad (3)$$

где  $a, \beta, n, \lambda, A, \mu$  - постоянные величины, учитывающие параметры кривых исходных распределений вероятностей стока и соотношения между их объемами;  $\delta(K_c - K_0)$  - дельта-функция Дирака, учитывающая разрыв кривой сбросов в точке  $K_0$ ;

$$f(K_{\Sigma}) = a n \left[ \frac{K_{\Sigma}^{\tau-1}}{\mu - \beta} - \frac{(\tau-1) \cdot K_{\Sigma}^{\tau-2}}{(\mu - \beta)^2} + \dots + (-1)^{\tau-2} \cdot \frac{(\tau-1)! K_{\Sigma}}{(\mu - \beta)^{\tau-1}} + (-1)^{\tau-1} \cdot \frac{(\tau-1)!}{(\mu - \beta)^{\tau}} \right].$$

Формула (3) справедлива при любых значениях параметра кривой распределения стока (Пирсона III-типа) в створе верхней ступени, и при  $\gamma \geq 1$  - стока боковой приточности.

В работе рассмотрен также алгоритм построения функции плотности вероятностей суммарного стока в численной интерпретации, позволяющей оперировать практически с любыми видами функций распределения его компонентов (гладких, кусочно-гладких, имеющих разрывы и т.д.).

Функции плотности вероятностей суммарного стока в створе вновь вводимого в состав каскада водохранилища используются в дальнейших расчетах в качестве ядра интегрального уравнения, описывающего искомую обобщенную водохозяйственную характеристику многолетнего режима его работы (соответственно для зон наполнений, сбросов и дефицитов отдачи).

В третьей главе рассматривается методика расчетов многолетнего регулирования стока водохранилищем при постоянной и переменной его годовой отдаче. Показано, что совокупность ступеней каскада всегда может быть сведена к схеме двух водохранилищ: "верхового"-существующего и "низового"-проектируемого. "Верховое" водохранилище рассматривается как эквивалентное, т.е. заменяющее все гидроузлы, расположенные выше "низовой" ступени каскада. Выходные его стоконные характеристики используются, наряду с другими компонентами суммарного стока, при расчете "низового" водохранилища.

а) расчетный случай при  $\alpha = \text{const}$ .

Уравнение годового баланса проектируемого водохранилища за многолетие имеет следующий общий вид (в долях нормы суммарного стока  $\bar{K}_{\Sigma} = 1$ ):

$$K_{\Sigma} = x - y + \alpha + x_c - x_d, \quad (4)$$

где  $K_{\Sigma}$  - суммарный сток в створе водохранилища;  $x, y$  - наполнения в конце  $n$ -ого и  $n-1$ -ого годов ( $0 \leq x \leq \beta$ ) и ( $0 \leq y \leq \beta$ );  $\alpha$  - отдача;  $x_c, x_d$  - объемы холостых сбросов и дефицитов отдачи;  $\beta$  - многолетняя составляющая емкости.

На основе уравнения годового баланса (4), используя формулу полной вероятности, а также аппарат обобщенных функций,



нами выведено интегральное уравнение регулирования стока водохранилищем в каскаде:

$$\phi(x) = F(x+\alpha) + \int_0^\beta \phi(y) \cdot q(x-y+\alpha) dy, \quad (5)$$

где  $\phi(x)$  - безусловная функция наполнений;  $F(x+\alpha)$  - функция обеспеченности стока в объеме  $x+\alpha$ ;  $q(x-y+\alpha)$  - плотность вероятностей стока в объеме  $x-y+\alpha$ .

По структуре оно сходно с интегральным уравнением, полученным ранее Н.А.Картвелишвили путем применения способа предельного перехода к известному методу многолетнего регулирования стока С.Н.Крицкого и М.Ф.Менкеля 1935 года. Существенным отличием уравнения (5) является более сложный вид его ядра, которое описывает плотность вероятностей не естественного, а нарушенного режима речного стока.

Из уравнения (5) не трудно выводятся интегральные соотношения, описывающие безусловные функции холостых сбросов и дефицитов отдачи.

В случае схем глубокого многолетнего регулирования суммарного стока ( $\beta > \alpha$ ), вместо одного уравнения вида (5), будем иметь систему интегральных уравнений.

Правильность всех выполненных расчетно-методических построений проверялась согласно критериальному соотношению:

$$\alpha + E(x_c) - E(x_d) \approx 1,$$

где  $E(x_c), E(x_d)$  - математические ожидания холостых сбросов и дефицитов отдачи.

В работе подробно рассмотрена численная интерпретация аналитического метода расчетов водохранилища в каскаде, наиболее приемлемая для целей водохозяйственного проектирования. Она связана с предварительным разложением кривых распределения вероятностей компонентов суммарного стока на "n" равных интер-

валов, а также нормированием и композицией. Последняя выполняется по формулам сходным с (I):

$$\left. \begin{aligned} p_j(K_z) &= \sum_{K_i} p_j(K_i) \cdot p_j(K_z - K_i) \\ p_j(K_z) &= \sum_{K_{i+1}} p_j(K_{i+1}) \cdot p_j(K_z - K_{i+1}) \end{aligned} \right\} (I^I)$$

где  $p_j$  - частные вероятности компонентов суммарного стока  $K_i$  и  $K_{i+1}$ .

Вероятности  $p_j(K_z - K_i)$  и  $p_j(K_z - K_{i+1})$  при этом должны приниматься равными нулю всякий раз, как только разности  $K_z - K_i$  (или  $K_z - K_{i+1}$ ) не будут принадлежать к числу возможных значений  $K_i$  (или  $K_{i+1}$ ).

Суммируя частные вероятности  $p_j(K_z)$ , получим функцию распределения вероятностей дискретных значений суммарного стока - основу расчетного алгоритма в численной его интерпретации, реализуемого согласно системе итерационных формул (5).

Предлагаемый метод расчета регулирования нарушенного стока позволяет более обоснованно устанавливать проектные параметры водохранилища в каскаде. Показано, что нельзя пользоваться существующими расчетными графиками, как это рекомендуется некоторыми авторами. Выполненные расчеты, с соблюдением условий сопоставимости, дали следующие значения обеспеченности бесперебойной отдачи водохранилища (при  $\alpha = 0,8$  и  $\beta = 0,7$ ): по предлагаемой нами методике - 0,56, по графикам - 0,66 и по методу П.А.Ляпичева, основанному на соответствующим образом скорректированных натуральных данных о стоке - 0,59.

Установлено также, что учет холостых сбросов из "верховых" водохранилищ повышает обеспеченность отдачи проектируемого "низового" водохранилища (зависит от доли сбросов в общем объеме суммарного стока).

Сезонную составляющую емкости водохранилища в работе пред-



лагается определять по существующим методам для одиночного водохранилища, например, по способам предложенным С.Н.Крицким и М.Ф.Менкелем, Я.Ф.Пленковым, П.А.Ляпичевым и др. авторами.

б) расчетный случай при  $\alpha = \nu \alpha z$

Многолетнее регулирование речного стока водохранилищем на переменную отдачу является актуальной задачей, в особенности для районов с неустойчивым естественным увлажнением. Из работ, посвященных данному вопросу отметим исследования М.В.Потапова, Н.А.Картвелишвили, П.А.Ляпичева, В.А.Киктенко, В.Г.Логинова, Н.П.Капигоновой и др. В указанных работах переменная отдача водохранилища ставится в зависимость от тех или иных условий: наполнения водохранилища, водности года, естественных запасов влаги в почво-грунтах (с учетом осадков за период вегетации) и т.д., или же рассматривается как случайная величина, имеющая свою функцию распределения вероятностей.

В предлагаемом нами расчетном приеме годовые объемы отдачи рассматриваются как последовательности независимых случайных величин, а колебания их как вероятностный процесс. В качестве закона распределения вероятностей отдачи  $\alpha_V$  может быть принято то или иное теоретическое распределение. Вопрос о типе кривой распределения отдачи  $\alpha_V$  требует специального исследования. Нами предполагается, что указанная кривая является известной, т.е. заданной (с верхним и нижним ограничениями, соответствующими максимальному и минимальному значениям отдачи).

Уравнение годового баланса водохранилища за многолетие (4) представим в виде:

$$K_{\Sigma} - \alpha_V = z = x - y + x_c - x_d, \quad (6)$$

где  $K_{\Sigma}$  - суммарный сток в створе водохранилища.

Величины  $K_{\Sigma} - \alpha_V$  и  $x - y$  - соответственно приток воды в водохранилище (за минусом объема отдачи) и разность наполнений в течение года.

На основе балансового уравнения (6) и формулы полной вероятности получено интегральное уравнение регулирования стока. При этом за условную функцию наполнений водохранилища принята кривая распределения величины  $z$  :

$$\theta(x/y) = \theta(z = x - y + x_c - x_d). \quad (7)$$

Функция распределения вероятностей величины  $z$  устанавливается путем композиции законов распределения исходных величин  $K_{\Sigma}$  и  $\alpha_V$ . Она представляет собой ограниченную функцию, имеющую разрывы в точках  $K_{\Sigma} - \lambda \alpha_{max}$  и  $K_{\Sigma} - \lambda \alpha_{min}$ . При  $z < K_{\Sigma} - \lambda \alpha_{max}$  функция  $\theta(z) = 0$ , а при  $z > K_{\Sigma} - \lambda \alpha_{min}$  значение  $\theta(z) = 1$ . Здесь  $\lambda$  - коэффициент нормирования.

Интегральное уравнение регулирования стока для зоны наполнений водохранилища имеет вид:

$$\Phi(x) = F(x) + \int_0^x \Phi(y) \cdot q(x-y) dy, \quad (8)$$

где  $F(x)$  и  $q(x-y)$  - функции обеспеченности и плотности вероятностей расчетного стока соответственно при  $z = x$  и  $z = x - y$ .

Для значений  $F(z)$  в пределах (0,1) безусловная функция обеспеченности наполнений водохранилища определяется непосредственно путем решения уравнения вида (8). При значениях же  $F(z)$  в промежутке  $[0,1]$  искомая функция устанавливается путем решения системы интегральных уравнений. Так, в случае  $0 < F(z) \leq 1$ , система состоит из двух уравнений:



$$\left. \begin{aligned} \Phi_1(x) &= F(x) + \int_0^{\beta-z_1} \Phi_1(y) q(x-y) dy + \int_{\beta-z_1}^x \Phi_2(y) q(x-y) dy, \\ \Phi_2(x) &= F(x) + \int_0^{\beta-z_1} \Phi_1(y) q(x-y) dy + \int_{\beta-z_1}^{\beta} \Phi_2(y) q(x-y) dy \end{aligned} \right\} (9)$$

$(0 \leq x \leq \beta - z_1)$   
 $(\beta - z_1 \leq x \leq \beta)$

Если же  $0 \leq F(z) \leq 1$ , то указанная система будет состоять из трех интегральных уравнений, соответствующих следующим значениям аргумента наполнения:  $0 \leq x \leq \beta - z_1$ ;  $\beta - z_1 \leq x \leq z_2$ ;  $z_2 \leq x \leq \beta$ .

Практическое использование приведенных интегральных уравнений связано с определенными вычислительными трудностями, которые, однако, могут быть преодолены с помощью ЭВМ.

В четвертой главе рассматривается методика расчетов водохранилища в каскаде с учетом связи между водностью смежных лет.

Многолетние колебания стока представляют чаще всего в форме простой цепи Маркова. Связь годовых объемов стока при этом учитывается только между смежными годами в виде коэффициента корреляции, оцениваемого уравнением прямой регрессии.

Следует отметить, что физическая природа многолетних колебаний стока, в частности наблюдаемая на реках цикличность в форме группировок маловодных и многоводных лет, все еще недостаточно изучена. Более того, по ряду основных аспектов проблемы колебаний речного стока имеются довольно противоречивые точки зрения. Данный вопрос рассматривается в работах С.Н. Крицкого и М.Ф. Мамеля, Д.Я. Ратковича, А.Ш. Резниковского, Д.М. Маматканова, В. Евдженча и некоторых др. авторов.

В условиях каскада водохранилищ естественный речной сток претерпевает значительные режимные изменения, поскольку на многие компоненты его большое влияние оказывает хозяйственная де-

ятельность человека.

Для построения условной функции распределения суммарного стока необходимо привлечение той или иной гипотезы. В предлагаемой методике расчета многолетнего регулирования стока водохранилищем в каскаде использована гипотеза Н.А. Картвелишвили. Она заключается в том, что функции одномерного и многомерного распределений стока подчинены одному и тому же закону.

Известно, что любое асимметричное распределение можно представить соотношением:

$$\theta(t) = 0,5 + \mathcal{G}[f(t)],$$

где  $f(t)$  - некоторая неубывающая функция,  $\mathcal{G}[f(t)]$  - функция распределения нормального закона случайной величины  $f(t)$ .

В диссертации показано, что расчетный алгоритм, учитывающий коррелятивную связь может быть выведен путем применения формулы полной вероятности. Применительно к уравнению годового баланса (5) эта формула имеет вид:

$$\Psi(x) = \int_0^{\beta} \Psi(x/z) d\Psi(z), \quad (10)$$

где  $x$  - наполнение в конце  $n$ -ого года регулирования ( $0 \leq x \leq \beta$ );

$z$  - тоже, в конце  $n-2$ -ого или, что тоже самое, в начале  $n-1$ -ого года ( $0 \leq z \leq \beta$ );  $\Psi(x/z)$  - условная функция распределения вероятностей аргумента  $x$  при условии, что в конце  $n-2$ -ого года наполнение было  $z$ ;  $\Psi(x)$  - безусловная функция распределения вероятностей наполнения в конце  $n$ -ого года.

Условная функция распределения наполнений водохранилища может быть получена путем повторного применения теоремы полной вероятности:

$$\Psi(x/z) = \int_0^{\beta} \theta[K_n(x, K_{n-1}, z) / K_{n-1}] d\theta(K_{n-1}). \quad (11)$$



Здесь  $K_n$  - расчетное значение суммарного стока в  $n$ -ом году регулирования;  $K_{n-1}$  - тоже в  $n-1$ -ом году.

Переходя в формулах (I0) и (II) от интегралов Стильтьеса к обычным интегралам Римана, учитывая разрывы первого рода функции  $\Psi(z)$  в точках  $\theta$  и  $\beta$ , для случая  $\alpha = \text{const}$  будем иметь:

$$\Psi(x) = \int_0^{\alpha-\beta} \theta[(x+\alpha)/t] q(t) dt + \int_{\alpha-\beta}^{\alpha} \theta[(x-t-\beta+2\alpha)/t] q(t) dt + \int_{\alpha}^{\infty} \theta[(x-\beta+\alpha)/t] q(t) dt + \int_0^{\beta} \Psi(z) \int_{\alpha-z}^{\beta-z+\alpha} [(x-t+2\alpha)/t] q(t) dt dz, \quad (I2)$$

где  $t$  - сток в  $n-1$ -ом году регулирования ( замена  $t = K_{n-1}$  произведена в целях сокращения записи).

Важной особенностью уравнения (I2) является то, что оно линейное и легко сводится к системе простых алгебраических уравнений, реализуемых на ЭВМ [6].

В приводимой ниже таблице показаны вычисленные значения безусловной функции наполнения водохранилища  $\Phi(x)$  при отсутствии ( $z=0$ ) и наличии ( $z=0.4$ ) коррелятивной связи между объемами суммарного стока в смежные годы ( $\alpha=0.6, \beta=0.6, \gamma_{\beta n}=1$ ):

x	$\Phi(x)$		$\Delta$
	$z=0$	$z=0.4$	
0,0	0,7325	0,6405	0,0920
0,2	0,5699	0,5064	0,0635
0,4	0,4521	0,3998	0,0522
0,6	0,3654	0,3159	0,0495

Как видно, учет коррелятивной связи между водностью смежных лет существенно снижает обеспеченность бесперебойной работы

водохранилища в каскаде (в нашем случае на 12,3%). Чтобы сохранить в условиях рассмотренного примера обеспеченность в отбачу, полученные при значении  $z=0$ , очевидно, необходимо значительно увеличить параметр полезной ёмкости водохранилища.

#### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. На современном этапе развития водного хозяйства каскадное регулирование речного стока является характерной чертой использования водных ресурсов. Анализ существующих расчетных методов указывает на необходимость дальнейшего их усовершенствования в направлении разработок теоретически строгой методики расчетов водохранилища в каскаде (на основе вероятностных характеристики нарушенного режима водотока).

2. Показано, что при наличии количественной оценки нарушенного режима стока совокупность каскада водохранилищ в расчетном отношении может быть сведена к схеме двух его ступеней: "верховой" (существующей) и "низовой" (проектируемой). "Верховое" водохранилище при этом рассматривается как эквивалентное, т.е. заменяющее все гидроузлы, расположенные выше "низовой" ступени каскада. Выходные стокосые характеристики его используются наряду с другими компонентами суммарного стока для расчета "низового" водохранилища. Это обеспечивает не только возможность учета взаимовлияния между отдельными ступенями, но и использовать основные положения расчетных схем регулирования изолированным гидроузлом для построения методики расчета водохранилища в условиях каскада.

3. Деформация естественного режима речного стока происходит в основном под влиянием двух категорий причин: действующих непосредственно в руслах рек (строительство водохранилищ, кана-



лов и т.д.), либо в пределах площади водосборных бассейнов (распашка земель, орошение, осушение и др.). Как правило, имеет место совместное действие указанных причин. Показано, что резкие (крупномасштабные) изменения режима речного стока происходят, главным образом, под влиянием причин первой категории. Они в несравненно большей степени влияют на параметры рассматриваемого водохранилища в каскаде, чем обычно медленно-действующие изменения годового стока на водосборе.

4. Выявлены основные компоненты суммарного стока в створе проектируемой ступени каскада (плановые попуски и холостые сбросы верхних ступеней, боковая приточность, возвратные воды и т.д.). Указаны приемы построения для них функций распределения вероятностей. Дано подробное описание способа количественной оценки нарушенного режима стока, основанного на применении последовательной (по-парной) композиции законов распределения его компонентов в створе рассчитываемого (или реконструируемого) водохранилища в составе каскада.

5. Предлагаемая методика расчетов для вновь вводимого в состав каскада водохранилища основана на применении вероятностных характеристик нарушенного режима суммарного притока в его створе (в виде функции плотности вероятностей), состоящего из ряда компонентов различного генезиса. В общем случае кривые распределения указанных компонентов являются кусочно-дифференцируемыми функциями, для описания которых использован аппарат обобщенных функций.

6. Разработанный аналитический метод расчета водохранилища является строгим в теоретическом отношении. Однако, его реализация на практике встречает известные затруднения вычислительного характера. В связи с этим дается численная интерпретация

аналитического метода, которая является наиболее предпочтительной для практического применения. В этой интерпретации предложенный метод расчета легко реализуется на ЭВМ, поскольку алгоритмы и программы счета отличаются однообразием.

7. На основе формулы полной вероятности выведено интегральное уравнение многолетнего регулирования стока водохранилищем в каскаде с учетом коррелятивной связи между водностью смежных лет. Решение дается путем предварительного сведения его к системе линейных алгебраических уравнений, реализуемых на ЭВМ. Учет указанной связи позволяет более обоснованно выбрать проектные параметры водохранилища (ёмкость, отдачу и её обеспеченность).

8. Для случая переменной по годам отдачи водохранилища разработан аналитический метод расчета регулирования стока, также основанный на применении вероятностных характеристик суммарного стока в его створе. Годовые объемы отдачи рассматриваются как случайные величины, а режим их колебания — как стохастический процесс.

9. Предложенные в работе расчетные методы и приемы удовлетворяют критериальному тождеству (балансу водохранилища за многолетие), что подтверждает правильность выполненных методических построений. Указанные методы и приемы расчетов иллюстрированы примерами их практической реализации (при фиксированных параметрах регулирования и стока).

10. Сформулированы задачи дальнейших исследований в области расчетной методики каскадного регулирования стока. Первоочередными из них являются:

- усовершенствование приемов количественной оценки характеристик нарушенного режима речного стока (с учетом его вну-

Толк  
ил  
Дне



тригодового распределения);

- разработка расчетных приемов определения полной полезной ёмкости водохранилища в составе каскада (как единого параметра);

- развитие приёмов расчета "водохранилищ-компенсаторов", и некоторые др.

---

Основные результаты работы доложены на конференции молодых ученых Казахского н.-и. института энергетики в г.Алма-Ата (1972 г.), Всесоюзных совещаниях -семинарах по теме "С"-0.01. 327 а) 2 в г.Тбилиси (1973 г.) и г.Алма-Ата (1974 г.), Всесоюзном симпозиуме "Оптимизация режимов и параметров гидроэлектростанций и водохозяйственных систем" в г.Москва (1973 г.) и в Казахском филиале Всесоюзного института "Гидропроект" им. С.Я.Жука (1973 г.).

---

Список опубликованных работ автора  
по теме диссертации \*)

1. Аналитический метод расчета многолетнего регулирования стока водохранилищем в каскаде. Тезисы докладов II конференции молодых ученых-энергетиков, Алма-Ата, КазНИИЭ, 1972.

2. Расчет многолетней ёмкости водохранилища в каскаде. Проблемы гидроэнергетики и водного хозяйства, вып. 9, Алма-Ата, "Наука" КазССР, 1972.

3. Обобщенная водохозяйственная характеристика водохранилища в каскаде. Проблемы гидроэнергетики и водного хозяйства, вып. 10, Алма-Ата, "Наука" КазССР, 1973.

4. Распределение вероятностей речного стока, нарушенного хозяйственной деятельностью человека. Доклады Всесоюзного симпозиума "Оптимизация режимов и параметров гидроэлектростанций и водохозяйственных систем", Водные ресурсы, № 5, М., "Наука", 1973.

5. Численный метод расчета многолетнего регулирования стока водохранилищем в каскаде. Проблемы гидроэнергетики и водного хозяйства, вып. 10, Алма-Ата, "Наука" КазССР, 1973.

6. Методика расчета многолетнего регулирования стока водохранилищем в каскаде с учетом связи между водностью смежных лет. Проблемы гидроэнергетики и водного хозяйства, вып. 11, Алма-Ата, "Наука" КазССР, 1974.

7. Компенсирующее регулирование речного стока. Проблемы гидроэнергетики и водного хозяйства, вып. 12, Алма-Ата, "Наука" КазССР, 1975.

8. Оценка статистических характеристик стока ниже регулирующего водохранилища в каскаде. Там же.

9. Аналитический метод расчета водохранилищ при переменном (оросительном) водопотреблении на трактах переброски стока. Проблемы гидроэнергетики и водного хозяйства; вып. 13, Алма-Ата, "Наука" КазССР, 1976 (в печати).

10. Обобщенный прием расчета водохранилища на тракте переброски стока (при переменном режиме водопотребления). Проблемы гидроэнергетики и водного хозяйства, вып. 13, Алма-Ата, "Наука" КазССР, 1976 (в печати).

---

\*) Соавторами отдельных работ являются: В.А.Киктенко /2,3,4, 5,6,7,8,10/, В.К.Редькин /10/.