

МИНИСТЕРСТВО ЭНЕРГЕТИКИ И ЭЛЕКТРИФИКАЦИИ СССР
ГЛАВТЕХУПРАВЛЕНИЕ

Всесоюзный ордена Ленина проектно-изыскательский
и научно-исследовательский институт

„ГИДРОПРОЕКТ“

им. С. Я. Жука

Сборник научных трудов Гидропроекта
(по материалам Казниизэнергетики)

выпуск 119

РЕГУЛИРОВАНИЕ И РАСПРЕДЕЛЕНИЕ
ВОДНЫХ РЕСУРСОВ
В ЭНЕРГОВОДОХОЗЯЙСТВЕННОЙ
СИСТЕМЕ

МОСКВА 1986

**МИНИСТЕРСТВО ЭНЕРГЕТИКИ И ЭЛЕКТРИФИКАЦИИ СССР
ГЛАВТЕХУПРАВЛЕНИЕ**

**Всесоюзный ордена Ленина проектно-изыскательский и научно-
исследовательский институт
ГИДРОПРОЕКТ
им. С.Я.Жука**

**Сборник научных трудов Гидропроекта
(по материалам КазНИИЭнергетики)**

ВЫПУСК 119

**РЕГУЛИРОВАНИЕ И РАСПРЕДЕЛЕНИЕ ВОДНЫХ
РЕСУРСОВ В ЭНЕРГОВОДОХОЗЯЙСТВЕННОЙ
СИСТЕМЕ**

Москва - 1986

Регулирование и распределение водных ресурсов в энергово-
хозяйственной системе.-М., 1986.-113с.

Сборник подготовлен Казахским научно-исследовательским ин-
ститутом энергетики. В нем рассмотрены методы моделирования и
оптимизации крупных ВХС, в том числе вопросы выбора параметров
ГЭС в составе энерговохозяйственного комплекса, модель рацио-
нального распределения воды по орошаемым массивам и обводняе-
мым пастбищам на примере конкретной ОС.

Излагаются новые приемы сезонного регулирования стока, ана-
лизируются условия применимости различных методов расчета па-
раметров водохранилищ при проектировании, даются способы оцен-
ки статистических характеристик судоходных попусков на примере
Верхне-Иртышского пароходства.

Рассматривается гидроэнергетический потенциал малых рек Ка-
захской ССР, способы построения водно-экономических характери-
стик районов Северного Казахстана.

Сборник предназначен для инженеров, занимающихся проектиро-
ванием, строительством и эксплуатацией водохозяйственных систем
и гидроэнергетических установок, а также для научных сотрудни-
ков и аспирантов, специализирующихся в данной области.

Редакционная коллегия:

И.В.Бусалаев (зам.отв.редактора), Б.Б.Баишев (отв.секретарь),
А.С.Паутов, В.К.Редькин, В.А.Григорьев, Ш.Ч.Чокин (отв.редактор)

С

Всесоюзный ордена Ленина проектно-изыскательский и научно-
исследовательский институт "Гидропроект" имени С.Я.Жука, 1986

Предисловие

Для современного этапа развития водного хозяйства страны характерен значительный рост и усложнение структуры энерговодо-хозяйственных систем, связанных с интеграцией в них многочисленных отраслевых подсистем, находящихся в сложном взаимодействии друг с другом. Проектирование таких систем и эффективное управление ими требуют серьезного научного обоснования на базе системного анализа и междисциплинарного подхода. Отдельные проекты, как отмечалось в материалах XXII съезда КПСС, не отвечают современному уровню требований к использованию водных ресурсов, производственного потенциала агропромышленного комплекса, улучшению фондоотдачи, повышению плодородия земли, увеличению продуктивности орошаемого гектара в силу ведомственной ограниченности, слабой обоснованности и устаревшей технологии проектирования. Достигнутый уровень проектирования и управления ВХС характеризуется недостаточным применением методов математического моделирования и ЭВМ и учета стохастичности и неопределенности условий при выборе критериев оптимальности и параметров ВХС. Слабо отражена в имеющихся моделях комплексность использования водных ресурсов.

В долгосрочных целевых программах развития мелиорации и энергетики в нашей стране поставлены задачи, направленные на разработку и внедрение водосберегающей и малоотходной технологий, на рациональное использование природных ресурсов, на повышение эффективности сельскохозяйственного и электроэнергетического производства.

Намеченные цели могут быть достигнуты путем рассмотрения в исследованиях всего технологического цикла использования и перераспределения воды (от ее добычи и потребления до отвода и очистки сточных вод). Именно в такой постановке задача приобретает цельность в решении, где каждый водопользователь и водопотребитель выступает как равноправный компонент ВХС с учетом его перспективы в развитии народного хозяйства рассматриваемого энерговодохозяйственного комплекса в целом.

Указанные задачи могут быть решены на основе экономико-мате-

матического моделирования ВХС.

Рассмотренные в сборнике методы моделирования и оптимизации параметров крупных ВХС в некоторой степени восполняют пробелы существующих методов и могут быть полезны как научным работникам, так и организациям, занимающимся проектированием ВХС.

В составе этой единой задачи рассмотрены вопросы:

- эквивалентирования по частным критериям исходной технико-экономической информации о производственной деятельности различных отраслей народного хозяйства;
- рационального распределения водных ресурсов между отраслями;
- обоснования проектных параметров и режимов работы отдельных водохозяйственных объектов комплексных гидроузлов, отраслевых подсистем;
- регулирования речного стока;
- построения кривой распределения судоходных попусков на примере Верхне-Иртышского пароходства;
- многомодалых кривых гидролого-водохозяйственных характеристик и др.

Учитывая возрастающий интерес к нетрадиционным источникам электроэнергии, редакция сочла нужным включить в сборник статью о гидроэнергетическом потенциале малых рек Казахстана.

Сборник содержит как общетеоретические статьи постановочного характера, так и обоснование ряда конкретных водохозяйственных объектов республики. Большое внимание уделяется научному обобщению опыта проектирования и эксплуатации водноэнергетических систем.

МЕТОДЫ МОДЕЛИРОВАНИЯ И ОПТИМИЗАЦИИ
ЭНЕРГОВОДОХОЗЯЙСТВЕННЫХ СИСТЕМИ.В.Бусалаев
КазНИИЭ

Современный этап развития водного хозяйства характеризуется значительным ростом и усложнением структуры водохозяйственных систем: они становятся комплексными, разветвленными, охватывающими большой круг отраслей народного хозяйства на обширных территориях страны. Их развитие характеризуется тенденцией формирования крупных каскадов и бассейновых комплексов, широким распространением межбассейновых связей и территориального перераспределения стока, что приводит к нарастающему воздействию водохозяйственных мероприятий на природные и экологические системы, часто сопряженному с нежелательными последствиями.

В связи с этим существенно повышаются требования к обоснованию водохозяйственных проектов, составу и качеству исходной информации, применяемым показателям и критериям выбора оптимальных решений, методике планирования перспективных водохозяйственных систем [1].

Методической основой планирования таких сложных ВХС является системный анализ, математическое моделирование и оптимизация. ВХС рассматривается, с одной стороны, как одна из подсистем народнохозяйственного комплекса на территории речного бассейна, с другой - является одним из звеньев ВХС в целом. Она исследуется по всей технологической цепочке преобразования и использования воды, начиная от ее добычи и кончая отведением сточных вод с учетом социально-экологических аспектов проблемы.

I. Формулировка-задачи

Система экономико-математических моделей использования водных ресурсов бассейна реки должна дать ответ на следующие ос-

новые вопросы:

1. Выбор источников для водоснабжения различных отраслей народного хозяйства и установление экономически целесообразных пределов их использования.
2. Выбор вариантов размещения и емкостей регулирующих водохранилищ.
3. Оценка необходимости и возможности межбассейновых перебросок стока.
4. Рациональное распределение водных ресурсов по отраслям народного хозяйства, по важнейшим объектам и по водобалансовым участкам.
5. Выбор вариантов размещения водозаборных узлов и внутрибассейновых водных связей.
6. Оценка вариантов размещения водоемких производств в пределах бассейна реки.
7. Сохранение необходимой чистоты ресурса путем выбора соответствующей технологии производства и мер по очистке загрязненных стоков.
8. Наметьте производительность и основные параметры отраслевых систем и установок при условии достижения минимума расчетных затрат или максимума эффективности по всей ВХС.

В соответствии с этим задачу оптимизации параметров бассейна реки можно сформулировать следующим образом: необходимо определить оптимальный состав, размещение и параметры основных водохозяйственных объектов, сооружений и всей системы в бассейне реки, обеспечивающих выполнение плановых заданий при минимуме приведенных расчетных затрат. Ограничения, накладываемые внешней средой, за исключением тех из них, которые допускают высокую эластичность, включаются в систему целей.

Все другие регулируются посредством утяжеления затрат, путем введения дополнительных компенсационных мероприятий или замыкающего ресурса.

В процессе планирования указанная задача распадается на ряд подзадач, отражающих стадии последовательного углубления и детализации:

- а) оптимизация состава источников водообеспечения — имеет

целью в агрегированном виде рассмотреть межотраслевой водохозяйственный баланс бассейна, определить первоочередные и замыкающие источники, уровень зарегулирования в бассейне, выявить возможные дефициты по участкам и по бассейну в целом; объем сточных вод и др.;

б) оптимизация состава и параметров регулирующих водохранилищ в бассейне. Целью данного этапа является оптимизация схемы регулирования стока с учетом каскадного его использования, размещения водохранилищ и распределения отдачи из них;

в) оптимизация технологии использования водных ресурсов в бассейне;

г) оптимизация последовательности осуществления схемы.

На всех этих этапах происходит процесс распределения воды, но с различной целью и детализацией.

Выделенные разделы представляют собой, с одной стороны, различные самостоятельные задачи, преследующие те или иные цели, с другой стороны, являются как бы этапами приближения к решению всей проблемы, то есть составляют иерархию решений в процессе оптимизации сложной ВХС.

2. Принципы формирования моделей

В основу формирования комплекса моделей положено несколько главных принципов:

– расчленение задачи на иерархические уровни в соответствии с ее территориально-технологическим (функциональным) содержанием. Модели разрабатываются по блокам, отражающим основные цели и функции ВХС в порядке их соподчинения ("добыча" и концентрация, преобразование, распределение и использование водных ресурсов и др.), с одновременной локализацией по водохозяйственным районам и участкам. Это дает возможность рассматривать уровни как обособленные блоки по горизонтали;

– последовательная оптимизация по всем звеньям и блокам, позволяющая сформировать систему условно-оптимальных моделей, поблочно свертывать информацию и оперировать на каждом шаге небольшим числом управляющих переменных (позапно эквиваленти-

рованная информация, кроме того, является более устойчивой к ошибкам исходных характеристик);

– итерационная увязка моделей и расчет эквивалентных характеристик по каждому блоку в зависимости от управляющей переменной.

Комплекс моделей составляется с позиции системного анализа ВХС: с одной стороны, рассматривается как элемент вышестоящей системы водного или даже всего народного хозяйства, с другой – как совокупность взаимодействующих отраслей подсистемы.

Динамика системы в общем случае определяется гипотезой развития народного хозяйства региона и составленным в соответствии с ней техническим заданием на разработку схемы. Этими документами определяются объемы прироста продукции по уровням и этапам развития системы.

Имея кривую роста объемов продукции, необходимо разместить водосемки производства по бассейну реки и сформировать график водопотребления (общий и по водобалансовым участкам).

Следующим этапом является построение траектории развития водохозяйственной системы. С этой целью для каждой точки на графике потребления рассчитывается суммарное зарегулирование стока в бассейне, намечаются допустимые варианты схемы регулирования и распределения стока. Набор параметров на множестве вариантов образует многомерную точку траектории – портрет системы.

Гидроэнергетика при этом может учитываться согласно следующим стратегиям:

- а) как сопутствующая по вынужденному графику;
- б) как участник комплекса со своей эквивалентной характеристикой;
- в) как основной компонент неэнергетические водопотребители учитываются с помощью ограничений.

Следующая точка на графике водопотребления просчитывается аналогично по тем же стадиям: ВХБ, схема зарегулирования, распределение ресурсов по участкам и объектам.

Неполнота информации об условиях формирования системы и объективная неопределенность будущего ее развития обуславливают ряд принципиальных положений, ограничивающих получение

строго оптимального решения для сложных ВХС. В этом случае:

а) упор делается на получение рациональных, реализуемых гибких решений, пригодных для значительного диапазона варьирования условий;

б) при формализации решения предпочтительной является многоцелевая многокритериальная постановка задачи. Выбор и обоснование решений производится по последовательности критериев;

в) построение обоснованной иерархии системы и оценка силы связей также определяются "зоной" неопределенности и точностью исходных данных.

При решении водохозяйственных задач свойство неопределенности условий учитывается: а) при отборе наиболее существенных факторов (силы связей) путем сравнения их с чувствительностью модели; б) при иерархическом делении системы на уровни. При этом выделяются три типа иерархии: по структуре (отраслевой и территориальной), по времени и по стадиям планирования.

Сильность связей при этом может учитываться также относительно базового варианта на основе методов теории подобия.

Важной является и задача выбора длительности планового горизонта и оптимального количества этапов решения.

3. Критерий оптимальности. Основные этапы разработки модели ВХС

В качестве основного критерия оптимальности развития ВХС принимается выполнение заданной программы по уровням развития народного хозяйства с минимумом математического ожидания расчетных затрат (с учетом ущербов от недодачи воды потребителю и водоохраных мероприятий [2]). Здесь стохастичность условий водообеспечения учитывается непосредственно в структуре критерия.

В другой постановке стохастичность частично переносится в ограничения, за счет чего сужается зона ущербов. В этом случае используется критерий эффективности в форме минимума рас-

четных затрат при заданной гарантии выполнения целевой программы с учетом математического ожидания издержек на резервирование. Это аналогично заданию определенного уровня риска нарушения балансовых ограничений по выпуску продукции.

Для решения некоторых задач в условиях недостаточной информации дополнительно применяются критерии минимаксного типа.

Укрупненно процесс оптимизации ВХС бассейна реки можно представить в таком виде. В первом блоке осуществляются широкие предмодельные исследования на основе изучения природных и хозяйственных условий района. Выходной характеристикой этого блока являются водохозяйственное районирование территории, разбивка бассейна реки на водохозяйственные районы, участки и отдельные створы. На этом этапе широко используются имеющиеся фондовые и литературные материалы.

В блоке исследований и оптимизации общесистемных функций (задач) ВХС обеспечивается выбор общей стратегии использования водных ресурсов, определяется наиболее целесообразный состав привлекаемых источников, уровень зарегулирования, распределение ресурсов и другие. Намечается также объем решаемых задач и величина выделяемых ресурсов следующему блоку — исследования отраслевых систем.

В третьем укрупненном блоке производится разработка и оптимизация отраслевых систем: гидроэнергетической, ирригационной, водотранспортной, рыбохозяйственной, водоснабженческой и др.

Строятся оптимизированные эквивалентные характеристики этих систем (функции от объема выделяемых ресурсов, который удобно принять в качестве управляющей переменной), необходимые для оптимизации схемы на более высоких уровнях.

Вследствие сложности системы процесс оптимизации ее осуществляется путем ряда итераций попеременного движения от нижних уровней к верхним и наоборот.

Для конкретного осуществления указанных оптимизационных расчетов разработана система моделей, отражающих как структуру водохозяйственных систем, так и иерархию самих решений (задач).

Кроме основных производственно-отраслевых подсистем выделяются функциональные подсистемы: мобилизации ресурса, регулирования и управления, распределения, использования, регулирования качества воды, сброса дренажных вод, отведения и очистки сточных вод.

Эти подсистемы отображаются в виде структурного графа ВХС, узлы которого отображают функции, а дуги — последовательность их выполнения.

Работы по информационно-математическому обеспечению предусматривают сбор, систематизацию и обобщение по четырем группам характеристик: природным, водохозяйственным, техническим и технико-экономическим — применительно к объектам и подсистемам. Состав данных представлен в виде трехмерной схемы: содержания, системы расчетов и математического обеспечения.

Комплекс экономико-математических (ЭММ) и математических моделей (ММ) приводится на схеме. Он состоит из трех групп моделей: технологических, описывающих особенности и режим водопотребления; гидрологических и водохозяйственных, оценивающих потенциальные и располагаемые водные ресурсы, и экономико-математических, выражающих эффективность принимаемых решений.

Модели первой группы, отображающие технологию использования воды отраслями народного хозяйства, объектами и отдельными установками, имеют целью разработку и построение эквивалентных водно-экономических характеристик участка, отрасли, объекта и пр.

К второй группе относятся модели описания природных процессов: речного стока, почвенно-топографических и инженерно-геологических условий — в зависимости от них находятся водохозяйственные и технико-экономические показатели.

Третья группа — экономико-математические модели. Они позволяют выбрать оптимальный вариант развития системы и ее отдельных подсистем.

На основе рассмотренных методических положений и декомпозиций модели оптимизации параметров схемы использования водотоков расчеты на каждом водохозяйственном участке проводятся в три этапа: оптимизации ВХБ, состава и параметров водохрани-

лиц и структуры водохозяйственной системы в целом.

В задачу первого этапа входит выяснение оптимального состава водонисточников, размеров водопотребления, степени регулирования водотока, возможного объема производимой по участкам бассейна продукции и др.

На втором этапе - оптимизация схемы регулирования стока - учитывается более детально характер приточности (частично искаженной хозяйственной деятельностью), состава существующих и планируемых водопотребителей и водопользователей. Известно, например, что параметры энергооросительного комплекса могут существенно повлиять на схему регулирования стока.

На третьем этапе производится увязка параметров ВХС бассейна реки в целом путем варьирования закрепленными переменными, либо оценками ресурсов, выдвигаемых "центром".

4. Оптимизация ВХБ

Составление оптимального водохозяйственного баланса представляет собой элемент общей задачи планирования водохозяйственной системы. В процессе этой работы устанавливаются технические и экономические пределы использования водных ресурсов, необходимость и вид регулирования речного стока (сезонное, многолетнее), целесообразность развития межбассейновых водохозяйственных связей и др. [3].

В целом под оптимизацией водохозяйственного баланса следует понимать согласованный выбор источников водообеспечения для покрытия заданной потребности по планируемому комплексу потребителей с минимумом суммарных расчетных затрат. При этом распределение водных ресурсов должно быть проведено во времени и по территории.

Целевая функция записывается в виде линейной формы, в которой отражены суммарные расчетные затраты, связанные с возделыванием культур, подготовкой массивов, подачей воды на орошение и водоснабжение промпредприятий, охраной природы и водным благоустройством.

Ограничения задачи даются в форме балансовых уравнений и неравенств, отражающих природные условия и производственные

возможности.

Объем производства каждого вида продукции определяется на основе плановых заданий по бассейну в целом, полная посевная площадь на любом массиве определяется расчетом, ограничения на площади задаются.

Кормовые культуры: многолетние травы, долголетние культурные пастбища и естественные кормовые угодья представляются в технологической матрице в виде кормовых единиц.

Располагаемые водные ресурсы в каждом расчетном году, возможные к использованию на орошаемых землях (поверхностный сток заданной обеспеченности, подземные и сточные воды, переброски и др.) оценивались на основе гидрологических данных.

5. Оптимизация состава водохранилищ в системе.

Рассмотренная выше модель оптимизации выбора источников водообеспечения дает в качестве выходной характеристики оценку требуемой суммарной величины зарегулированного стока, оптимизированный состав источников воды, целесообразный объем производства продукции на участке, а также некоторые предварительные данные по распределению воды между водобалансовыми участками. После этого, зная величину необходимого суммарного зарегулированного стока в бассейне, можно распределить его по конкретным водохранилищам и далее непосредственно по потребителям на каждом участке.

Практически оптимизация состава водохранилищ производится в такой последовательности.

а) По каждому участку намечаются удобные створы водохранилищ, для которых определяется диапазон изменения подпора (по физическим или иным пределам).

б) На уровне оптимизации ВХБ находится предварительная предельная величина зарегулированного объема с заданной гарантией, определяемая по притоку к данному створу.

в) Для нахождения мест расположения и подпорных отметок водохранилищ на участке строится граф допустимых вариантов в координатах: длина реки, подпоры в створах. Водохозяйственные расчеты по регулированию стока производятся методом балансо-

вых разностей.

Оптимальный состав водохранилищ определяется как путь на графе, отвечающий минимуму расчетных издержек (РЗ) по их организации и сооружению.

В качестве гидрологической основы принимаются статистические характеристики стока с учетом его трансформации вышерасположенными водохранилищами каскада. Для верхней ступени — это норма стока и коэффициент вариации в данном створе. В последующих створах подобные характеристики получаются несколько сложнее как результат композиции кривых объемов сброса с верхнего водохранилища и боковой приточности.

Полученные характеристики искаженного стока являются гидрологической основой для расчета емкостей нижележащих водохранилищ при оптимизации схемы регулирования стока бассейна реки по рекуррентным уравнениям преобразования стока.

Уравнения преобразования стока по участкам реки дают возможность легко находить значение отдачи из водохранилищ каскада (или приведенных водохранилищ) по известным графикам Ф.Я.Плешкова, Г.Г.Сванидзе, Ш.Ч.Чокина и др. и производить оптимизационные расчеты. Это удобно сделать сразу же для всех уравнений отдач методом динамического программирования в зависимости от уровня ее использования на участке.

Наиболее рациональный вариант использования воды в пределах бассейна определяется посредством нахождения оптимального пути на графе по критерию максимума эффективности или минимизации затрат по всему водохозяйственному комплексу.

6. Применение результатов исследования

Применение разработанных методов открывает возможность:

- стандартным образом и на единой методической основе формировать условно оптимальные варианты и стратегии развития ВХС на множестве допустимых решений;
- единообразным методом формулировать и решать оптимизационные водохозяйственные задачи в системе бассейна реки с учетом различной детализации и глубины (стадийности) проработки;
- усилить экономическую обоснованность перспективных схем ис-

пользования водотоков, улучшить технико-экономические показатели системы, снизить трудозатраты на разработку проекта.

Таким образом, экономический эффект от методических работ по оптимизации структуры водохозяйственных систем получается за счет:

а) повышения научной обоснованности планов развития водохозяйственных комплексов, способствующих экономичному использованию материальных и водных ресурсов;

б) сокращения сроков и трудовых затрат на разработку проектов на основе широкого использования математических методов и ЭВМ;

в) улучшения базы данных информационного обеспечения управления развитием и функционированием энерговодохозяйственных систем;

г) усовершенствования методов расчетов гидролого-водохозяйственных характеристик в сложных ВХС с учетом взаимосвязи их по водотоку и в бассейне реки.

Исследования показали, что для сокращения размерности задачи и числа управляющих переменных в составе модели на каждой ступени иерархии необходимо предусмотреть блок последовательной оптимизации и эквивалентирования выходных характеристик, представляемых в вышележащие ступени в качестве исходных.

Таким образом удается весьма существенно упростить расчетные алгоритмы и сделать результаты расчета более устойчивыми к погрешностям исходной информации.

Указанные принципы (разработка системы условно оптимальных моделей с последующей итерационной увязкой и уточнением их) успешно могут быть использованы при построении совокупности моделей для оптимизации межбассейновых водохозяйственных связей. Целесообразно при этом выделить три укрупненных блока: оптимизацию объема переброски, оптимизацию трасс при заданном объеме, оптимизацию параметров тракта по схеме перепуска.

Важнейшей для оптимизации трасс переброски стока является проблема оценки их сложности и построения алгоритмов селекции вариантов. Рациональный подход в этом случае, по нашему мнению, состоит в разумном сочетании детальности и полноты располагаемой информации со сложностью экономико-математичес-

кой модели.

Весьма перспективны модели с последовательной поэтапной подготовкой необходимой информации. Именно такой является разработанная для оптимизации трасс переброски двухэтапная модель динамического программирования.

Для оптимизации ВХС необходим большой объем разнообразной информации. Поэтому одной из важнейших задач оптимизационных исследований является разработка информационных моделей планирования; методов эквивалентирования и обобщения характеристик, классификация массивов данных. Для этого обобщены технико-экономические характеристики водохозяйственных объектов на основе анализа проектных данных.

Разработанные методы оптимизации планирования сложных ВХС могут быть успешно применены при составлении перспективных схем использования водных ресурсов в качестве инструмента, помогающего выбрать рациональные решения и оценить влияние различных факторов на параметры системы.

В дальнейшем необходимо усовершенствовать предлагаемую методику в следующих направлениях:

- на базе системного анализа разработать модели планирования ВХС региона, более полно учитывающие динамику ее основных характеристик качественных и неопределенных показателей в увязке с развивающейся объединенной ВХС страны;
- шире отразить в системе моделей влияние на развитие ВХС социальных, экологических и природоохранных факторов;
- произвести дальнейшее развитие предлагаемых методов моделирования, оценки и расчета гидролого-водохозяйственных характеристик, необходимых для обоснования проектов, с учетом физико-статистических закономерностей формирования стока на водосборе и хозяйственной деятельности в бассейне реки.

Литература

1. Бусалаев И.В. Сложные водохозяйственные системы (методы гидрологического обоснования, моделирования и оптимизации решений). -Алма-Ата; Наука, 1980. -230с.
2. Чокин Ш.Ч. Расчетная обеспеченность работы гидроэлектро-

станции.-Алма-Ата: Изд. АН КазССР, 1958.-269с.

3. Захаров Ю.П., Чокин Ш.Ч. Основы методики составления водохозяйственных балансов.-В кн.: Проблемы гидроэнергетики и водного хозяйства.-Алма-Ата: Наука, 1964, вып.2, с.3-42.

УДК 621.22.311

РАСЧЕТ ПАРАМЕТРОВ ГИДРОУЗЛА
НА ОСНОВЕ ЛИНЕЙНОЙ МОДЕЛИ
ЭНЕРГОВОДОХОЗЯЙСТВЕННОГО КОМПЛЕКСА

А.С.Паутов
КазНИИЭ

Особенность гидроэлектростанций как производственных объектов заключается в их функциональной принадлежности к двум меотраслевым системам: энергетической и водохозяйственной. В этой связи обоснование проектных параметров и режимов работы ГЭС на водотоке комплексного использования является одним из этапов более сложной проблемы - управления развитием указанных систем (в качестве методологической основы решения). Такая постановка задачи предопределяет применение системного подхода. Основным фактором такого подхода является полный учет структурных связей ГЭС в народном хозяйстве.

1. Структурные связи ГЭС

ГЭС рассматривается как один из объектов комплексного гидроузла (ГУ), являющегося основой формирования водохозяйственного комплекса (ВХК). Одновременно гидроэлектростанция - структурный элемент энергетической системы (ЭС), имеющей связи по линиям электропередач с энергообъединением (ОЭС).

ГЭС как общий элемент локальной энергосистемы и водохозяйственного комплекса связывает последние в энерговодохозяйственном комплексе (ЭВХК).

Сумма ВХК образует водохозяйственную систему бассейна реки (ВХСВ). При межбассейновой переброске стока она рассматривается как подсистема объединенной водохозяйственной системы (ОВХС).

Таким образом, по производственным функциям и условиям комплексного использования водных ресурсов гидроэлектростанция находится в центре следующей иерархической структуры:

ОЭС-ЭС - ГЭС - КГУ - ВХК - ВХСВ - ОВХС

Первое структурное подчинение (ГЭС в составе комплексного гидроузла) определяет условия строительства станции (сроки, капиталовложения), схемные решения, способ концентрации напора и другие технические характеристики.

Второе структурное подчинение (ГЭС как элемент ВХК) отражает связи станции по многоцелевому использованию водотока в створе гидроузла. В результате распределения зарегулированной отдачи водохранилища и дефицита стока между водопотребителями и водопользователями эти связи заданы величиной энергетического попуска и режимными ограничениями на его сработку через турбины ГЭС.

Энергетические функции ГЭС обусловлены режимом совместной работы ее с другими (альтернативными) источниками электроэнергии: конденсационными установками (КЭС) и теплоэлектростанциями (ТЭЦ).

Как видно из анализа производственных связей, задача оптимизации проектных параметров и режимов ГЭС должна решаться на уровне не ниже, чем энерговодохозяйственный комплекс. ЭВХК в данном случае рассматривается как некоторая надотраслевая система, целевую программу которой составляет совокупность производственных, социально-политических и экологических задач, выполняемых на базе располагаемых энергетических и водных ресурсов с достижением максимальной народнохозяйственной эффективности. При этом поставленные цели, так же как и ограничения по ресурсу, фиксируются в качестве внешних связей ЭВХК со структурными единицами более высокого ранга: энергетической системой, бассейновой ВХС и с отраслевыми неэнергетическими системами (сельскохозяйственной, транспортной, рыбохозяйственной и др.) /1/.

Проявляя себя в отношении ОЭС и ВХСБ как элемент, ЭВХК в свою очередь может быть описан как система объектов, организованных по принципу взаимозаменяемости продукции (электроэнергии, тепла, сельхозпродукции, народнохозяйственных грузов и т.д.) и общности ресурса (воды, топлива и др.). Другими словами, энерговодохозяйственный комплекс включает в себя предприятия как с основной (при использовании воды), так и с альтернативной технологией получения совокупного продукта и услуг заданного объема и качества.

Путем закрепления отдельных внутренних связей в виде ограничений в рамках ЭВХК могут быть получены варианты задач различной размерности. Очевидно, наиболее общая задача, состоящая в обосновании структуры производственных мощностей комплекса (в т.ч. и электрогенерирующих), требует снятия всех внутренних ограничений и закрепления только внешних связей.

2. Состав параметров ГЭС

Основными параметрами гидроэлектростанций, которые обосновываются в процессе проектирования, как известно, являются установленная мощность, отметка нормального подпорного уровня водохранилища (НПУ), глубина сработки (отметка ГМО) или регулирующая емкость водохранилища и расчетная обеспеченность энергоотдачи. К собственным технико-экономическим показателям, полностью определяющим народнохозяйственное значение станции, относятся: используемая в энергосистеме мощность, среднемноголетняя выработка, стоимость установленного киловатта и выработанной за год электроэнергии.

В связи с многоцелевым использованием стока в число основных параметров ГЭС необходимо включить также величину отдачи водохранилища и ее распределение между компонентами ЭВХК, а учитывая его стохастический характер – распределение дефицита отдачи в маловодных условиях работы.

Изменение каждого из перечисленных параметров существенно влияет на экономические показатели: капитальные вложения в строительство и издержки производства всех объектов, входящих в энерговодохозяйственный комплекс.

Величина суммарной гарантированной отдачи и ее распределение обуславливают структуру вновь вводимых производственных мощностей, необходимых для выпуска совокупного продукта ЭВХК, а следовательно, и основную часть его народнохозяйственной эффективности.

Полезная емкость определяет степень регулирования и возможности распределения отдачи водохранилища во времени и между компонентами комплекса.

От отметки НПУ и длины напорного фронта зависят затраты в общekomплексные сооружения: водохранилище, подготовку зоны затопления и оценка потерь на испарение. В случае ее повышения увеличивается эффективность энергетического использования водотока. Выбор более высокой отметки может быть полезен и для других участников ЭВХК; водного транспорта в верхнем бьефе гидроузла, ирригации при заборе воды каналом из водохранилища.

Расчетная обеспеченность отдачи, под которой понимается вероятность того, что ее величина будет не меньше заданного значения, в качестве экономического фактора в значительной мере (соответственно глубине регулирования стока) предопределяет значения других параметров не только ГЭС, но и ЭВХК в целом. Характеризуя дефицитную зону работы водохранилища, она формирует математическое ожидание ущерба в народном хозяйстве от ограничения водоподачи. Распределением дефицита может быть найдено наименьшее значение ущерба и расчетная обеспеченность водопотребления каждого компонента комплекса.

Таким образом, народнохозяйственная себестоимость комплексного гидроузла и сопряженных с ним объектов ЭВХК складывается из производственных затрат, направленных на производство заданного объема продукции двумя технологиями, общekomплексных затрат на сооружение КТУ и математического ожидания ущербов. В форме расчетных затрат эта себестоимость рассматривается в качестве целевой функции при выборе оптимальных параметров ЭВХК, в том числе и ГЭС.

3. Водноэкономическая характеристика компонентов комплекса

В экономических оценках основного (с использованием заре-

гулированного стока) и альтернативного способов выработки того или иного вида продукции широкое распространение получило использование удельных стоимостных показателей. В случае их применения производственные расчетные затраты компонентов могут быть выражены следующим образом:

$$\begin{aligned} \rho Z_o &= c_o \Pi_o; & \rho Z_z &= c_z \Pi_z; \\ \rho Z_{пр} &= \rho Z_o + \rho Z_z = c_z \Pi - (c_z - c_o) \Pi_o, \end{aligned} \quad (I)$$

где c_o, c_z — стоимость единицы продукции основного и альтернативного способов производства; $\Pi = \Pi_o + \Pi_z$ — плановое задание по выпуску продукции.

Введя понятие водоемкости производства (w), расчетные затраты в целом по комплексу можно переписать в следующем виде:

$$\rho Z_{пр} = c_z \Pi - k v, \quad (2)$$

где $k = (c_z - c_o) / w$ — угловой коэффициент; v — часть годового объема отдачи водохранилища, выделенная отдельному участнику ЭВХК.

Нахождение значения углового коэффициента функции — самостоятельная задача, решение которой возможно на основе применения обобщенных технико-экономических показателей. Например, в энергетическом компоненте комплекса содержанием удельных затрат (по отношению к установленной мощности электростанций) является:

$$\begin{aligned} \text{для ГЭС} \quad c_o &= (\varepsilon k_r^{ом} a_{ry} + S_r); \\ \text{для ТЭС} \quad c_z &= (\varepsilon k_T^{ом} k_N a_{ry} + k_z S_T + S_{T\delta}), \end{aligned}$$

где ε — коэффициент эффективности капитальных вложений в строительство станций; $k^{ом}$ — коэффициент, учитывающий омертвление вложений в период строительства; k_N, k_z — коэффициенты вытеснения ТЭС гидроэлектростанций по мощности и выработке энергии (обеспечивают равенство материального эффекта при сравнении вариантов развития мощности); a_y — стоимость установленного киловатта на станциях; S — себестоимость энергии на ГЭС или ТЭС; $S_{T\delta}$ — удельные расчетные затраты в топливную базу.

Водоемкость производства электроэнергии или мощности на ГЭС определяется известным уравнением энергетического процесса, или:

$$w_g = \frac{316}{\eta H} ; \quad w_n = \frac{316 t_u}{\eta H} ,$$

где η, H - КПД и напор ГЭС; t_u - обобщенный режимный показатель работы станции - число часов использования установленной мощности.

Данная линейная функция представляет собой не что иное, как отраслевую водноэкономическую характеристику. Она эквивалентирует (свертывает) большое количество технико-экономических показателей основного и альтернативного способов производства заданного объема продукции. Следует отметить, что угловой коэффициент характеристики зависит и от параметров комплексного гидроузла. Помимо его значения зависимость производственных затрат от объема использования водных ресурсов обусловлена еще ограничениями по минимальной и максимальной величине аргумента. Причем эти ограничения формируются за счет недостаточной регулирующей способности водохранилища при распределении отдачи между компонентами комплекса.

4. Общекомплексные затраты.

В определении расчетных затрат по комплексному гидроузлу (без стоимости ГЭС) могут быть использованы рекомендации, данные в работе [2], где предложена следующая эмпирическая зависимость капитальных вложений:

$$K/W = 1,1 \cdot 10^{-6} H_{пл} \ell / W \quad (\text{коп./м}^3), \quad (3)$$

$H_{пл} = H + \Delta H$ - высота плотины; H - напор ГЭС; ℓ - длина напорного фронта; W - полезная емкость водохранилища (км^3 в правой части уравнения).

Приведя объем водохранилища в обеих частях уравнения к единой размерности и предполагая трапецеидальное сечение створа плотины, получим следующее выражение для общекомплексных затрат:

$$\begin{aligned} PZ_{ок} &= a_{ок} H_{пл}^2 + b_{ок} H_{пл} + c_{ок} = \bar{c}_{ок} H_{пл} ; \\ a_{ок} &= 2,2 \cdot 10^{-3} \text{ctg} \varphi (\varepsilon k_{ок}^{ом} + S_{ок}) ; \\ b_{ок} &= 1,1 \cdot 10^{-3} \ell_{нб} (\varepsilon k_{ок}^{ом} + S_{ок}) ; \quad c_{ок} = 0, \end{aligned} \quad (4)$$

где ε - коэффициент эффективности капитальных вложений;
 $k_{ок}^{ам}$ - коэффициент, учитывающий омертвление затрат за время строительства объекта; $S_{ок}$ - доля эксплуатационных издержек по отношению к капитальным вложениям; $l_{нб}$ - длина плотины по основанию.

В линейном представлении функции средневзвешенное значение углового коэффициента равно:

$$\bar{C}_{ок} = 0,667 a_{ок} H_{пл}^{**} + b_{ок},$$

где $H_{пл}^{**}$ - верхний предел диапазона возможных изменений высоты плотины.

5. Математическое ожидание ущерба

В общем случае оно формируется дефицитными (по водным ресурсам) условиями работы энерговодохозяйственного комплекса, т.е. зависит от величины математического ожидания дефицита стока, распределения его между компонентами комплекса и стоимости компенсирующих мероприятий, направленных на сохранение материального баланса.

В наиболее простом задании дефицитная зона кривой обеспеченности зарегулированных расходов (или естественной приточности при отсутствии водохранилища) может быть представлена треугольником. Тогда математическое ожидание дефицита стока численно равно площади этой фигуры, или

$$M(D) = 0,5 f (1 - \rho) \alpha, \quad (5)$$

где f - коэффициент, учитывающий кривизну гипотенузы треугольника; ρ - обеспеченность отдачи (α) водохранилища.

При наличии дифференцированной оценки ущербов у отдельных компонентов (в зависимости от глубины водоограничения) распределение дефицита стока между ними не вызывает затруднений. Для этой цели может быть использован, например, аппарат динамического программирования, так как выполняется необходимое условие "сепарабельности" целевой функции [3].

В случае отсутствия подробных характеристик ущерба выдвигается та или иная гипотеза экономической оценки компенсиру-

ющих мероприятий, например, дополнительное увеличение производственных мощностей альтернативного способа получения продукции. Тогда ущерб приравнивается приращению производственных затрат отрасли при соответствующем уменьшении объема водопользования. Очевидно, при этом суммарные ущербы по комплексу будут минимальными, если в первую очередь ограничивать потребителей с наименьшим угловым коэффициентом их водноэкономической характеристики.

Такая регламентация в сочетании с заданием дефицитной зоны работы водохранилища в виде треугольника позволяет рассчитать обеспеченность водоподачи каждому компоненту комплекса (см. рис. I):

$$\rho_i = \rho + (1 - \rho) \sum_{j=1}^{i-1} v_j / \alpha, \quad (6)$$

где v_j - объем воды, выделенный отдельному участнику ЭВХК.

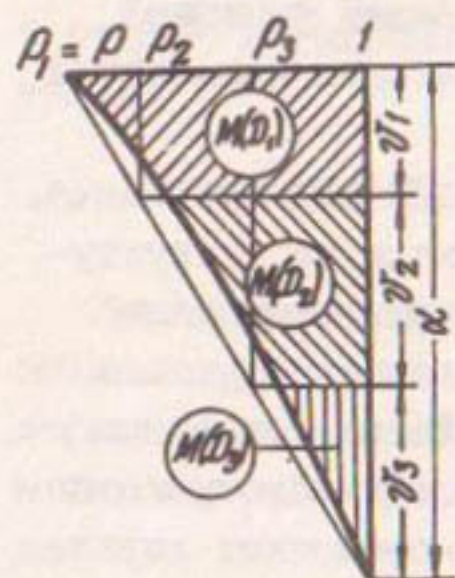


Рис. I. К определению M_0 дефицита стока

Рассматривая математическое ожидание дефицита водопотребления отдельного компонента как площадь трапеции, математическое ожидание ущерба энергОВОДОХОЗЯЙСТВЕННОГО комплекса можно найти как сумму:

$$M(Y) = 0,5 \sum_{i=1}^N [(1 - \rho_i) + (1 - \rho_{i+1})] \times \quad (7) \\ \times y_i (c_{zi} - c_{oi}) v_i / w_i,$$

где N - число участников комплекса; y - коэффициент удорожания компенсационных мероприятий по сравнению с производственными затратами.

В окончательном виде, с использованием выражения (6), целевая функция оптимизации параметров ГЭС, КТУ и ЭВХК может быть преобразована к следующему виду:

$$\rho_{3 \text{ ЭВХК}} = \sum_{i=1}^N [c_{zi} \rho_i - (c_{zi} - c_{oi}) v_i / w_i] + \bar{c}_{ок} H_{пл} + \quad (8) \\ + (1 - \rho) \sum_{i=1}^N y_i (c_{zi} - c_{oi}) [1 - (\sum_{j=1}^{i-1} v_j + 0,5 v_i) / \alpha] v_i / w_i \rightarrow \min.$$

Минимизация расчетных затрат достигается распределением зарегулированной отдачи водохранилища и дефицита стока между компонентами комплекса, выбором высоты плотины. Конкретный алгоритм имеет следующие особенности.

При распределении отдачи водохранилища одновременно решается вопрос и о составе комплекса. Часть компонентов (из первоначального числа N), по условию оптимального решения задачи, может быть полностью ограничена в водопотреблении или водиспользовании.

Распределение дефицита стока и расчет обеспеченности работы участников комплекса в этом случае выполняются среди меньшего их числа.

Водоемкость отдельного производства, а следовательно, и его водноэкономическая характеристика зависят от различных параметров комплексного гидроузла: отметки НПУ водохранилища, напора ГЭС, топографических характеристик бьефов и др. С учетом сложных связей между этими параметрами и целевой функцией возможна следующая последовательность оптимизации параметров ГЭС и комплексного гидроузла.

1. Выявляется зависимость между параметрами водохранилища, распределением отдачи между компонентами комплекса, структурой установленных мощностей и производственными затратами ЭВХ. Исходной информацией этого служат водноэкономические характеристики всех отраслей народного хозяйства, входящих в комплекс. Объем ресурса, выделенного энергетическому компоненту, является основой расчета технико-экономических характеристик непосредственно ГЭС (установленной мощности, выработки энергии). При этом используется эквивалент энергетического компонента - его ВЭХ.

2. Находится функциональная связь между параметрами гидроузла и общекомплексными затратами. Для этой цели необходимы топографические характеристики верхнего и нижнего бьефов, поскольку стоимость сооружения плотины и водохранилища зависит от длины напорного фронта и высоты плотины.

После построения двух указанных функций может быть организована частная оптимизация отметки НПУ водохранилища и сопряженных с ней параметров - отметки ГМО и напора ГЭС.

3. По известным двум параметрам регулирования стока (отдаче и полезной емкости) находится третий – обеспеченность работы водохранилища, который, в свою очередь, определяет математическое ожидание дефицита стока. Этот дефицит по признаку минимального суммарного ущерба распределяется между компонентами комплекса.

Здесь в качестве исходной информации необходима функция регулирования стока, т.е. связь между отдачей, полезной емкостью и обеспеченностью работы водохранилища для каждого комплексного гидроузла, входящего в рассматриваемую бассейновую схему. Второй группой входных данных являются функции ущербов, представляющие собой оценку отраслевых затрат, направленных на выполнение заданных объемов продукции при ограничении водопотребления.

4. Организуется последовательное изменение основных параметров комплексного гидроузла: отметки НПУ, полезной емкости и отдачи водохранилища, а также выбор оптимального их сочетания.

5. Пример расчета параметров ЭВХК

При заданном значении отдачи водохранилища ($\alpha = 20 \text{ км}^3$) оптимизируются остальные параметры: распределение отдачи и дефицита стока между пятью компонентами комплекса, обеспеченность их работы, полезная емкость и отметка НПУ водохранилища.

В качестве исходной информации использованы линейные водноэкономические характеристики (рис.2). При этом функция энергетического компонента дана в трех вариантах (прямые 2а, 2б, 2в на рисунке), соответствующих трем значениям напора ГЭС (20, 30, 40 м).

Функция общекомплексных затрат (4) задана следующими значениями ее переменных: $\rho_{НБ} = 250 \text{ м}$, $\varphi = 45^\circ$, $\varepsilon = 0,12$,

$$k_{ок}^{ом} = 1,15, \quad \bar{c}_{ок} = 0,08, \quad \bar{c}_{ок} = 0,073.$$

Стоимость мероприятий по компенсации дефицита водопотребления отдельных компонентов задана коэффициентами удорожания их производственных затрат (значениями y в табл.1).

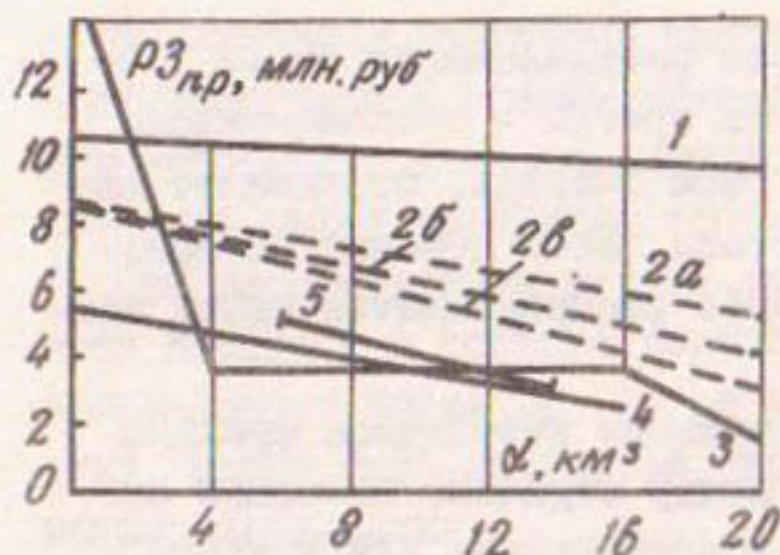


Рис. 2. ВЭХ компонентов комплекса: 1-по водному транспорту, 2-по энергетике, 3-по кормопроизводству, 4-по орошаемому земледелию, 5-по водоснабжению промышленности

$H = h_{86} - h_{нб}$, где ΔH - приращение высоты плотины по отношению к напору ГЭС, включает глубину заложения основания и запас в высоте на случай катастрофического паводка ($\Delta H = 3,5$ м).

Топографическая характеристика верхнего бьефа гидроузла задана уравнением:
 $h_{86} = 45,7\beta + 232$ или $\beta = 0,022(h_{86} - 232)$, где β исчисляется в долях нормы $m = 22 \text{ км}^3$.

Отметка нижнего бьефа принята постоянной - $h_{нб} = 232$ м, соответствующей среднегодовому расходу воды из водохранилища $\bar{Q} = q/0,0316 = 633 \text{ м}^3/\text{с}$. Между отметкой НПУ, высотой плотины и напором ГЭС существует следующая связь: $H_{гс} = H + \Delta H$;

Таблица I

Характеристика компонентов ЭВХК

Компоненты	$c_3, \text{ П.}$ млн. руб	$(c_3 - c_0)/w \cdot 10^{-3}$ руб/м³	Ограничения, км³		y
			max	min	
Водный транспорт	10,5	0,75	0	20	1,2
Энергетика	8,5	1,75-2,75	0	20	1,5
Кормопроизводство	13,0	23,5/0/5	0	20	2
Ирригация	5,5	1,9	0	16	3
Промышленное водоснабжение	6,5	2,25	6	14	5

Алгоритм оптимизации параметров КГУ составлен в предположении того, что функция регулирования стока в рассматриваемом створе реки известна. Возможный вид зависимости обеспеченности отдачи от полезной емкости водохранилища показан на рис. 3. Приведенный график состоит из двух зон, соответствующих годовому и многолетнему регулированию стока. Для построения характеристики во второй зоне использованы графики, приведенные в работе [4].

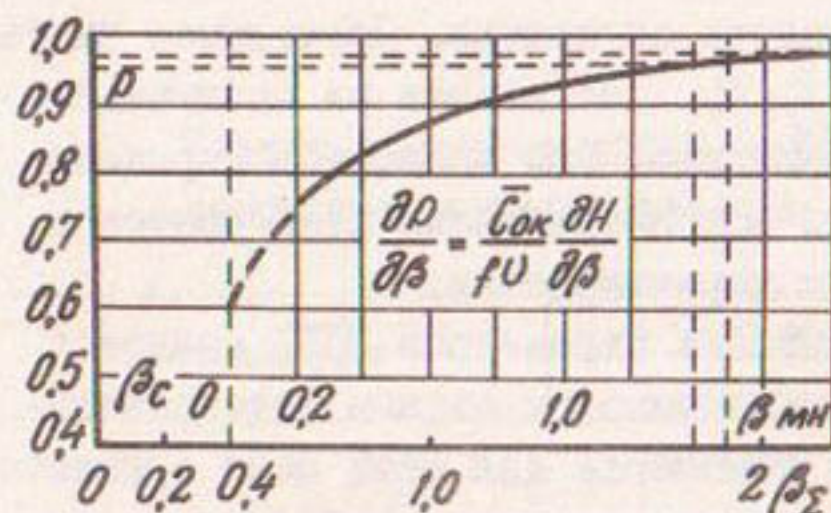


Рис.3. Функция регулирования стока. ($\alpha = 0,9$, $c_y = 0,26$, $\tau = 0,3$)

Последовательность расчетных операций оптимального распределения отдачи водохранилища дана в табл.2.

Таблица 2

Распределение отдачи водохранилища

Параметры	Компоненты					Сумма
	1	2а	3	4	5	
вариант а (H=20 м)						
Ограничение по минимуму, км ³	-	-	4	-	6	10
$(C_j - C_0) / w$, млн.руб/км ³	0,75	1,75	23,5	1,9	2,25	
Приоритет потребления	5	4	1	3	2	
Распределение отдачи, км ³	-	-	4+0	2	6+8	20
ρZ_{np} , млн.руб	10,5	8,5	3,5	5,1	3,2	30,8
вариант б (H=30 м)						
Ограничение по минимуму, км ³	-	-	4	-	6	10
$(C_j - C_0) / w$, млн.руб/км ³	0,75	2,25	23,5/0/5	1,9	2,25	
Приоритет потребления	5	3	1	4	2	
Распределение отдачи, км ³	-	5	4+0	-	6+5	20
ρZ_{np} , млн.руб	10,5	7,7	3,5	5,5	3,7	30,8
вариант в (H=40 м)						
Ограничение по минимуму, км ³	-	-	4	-	6	10
$(C_j - C_0) / w$, млн.руб/км ³	0,75	2,75	23,5/0/5	2,25		
Приоритет потребления	5	2	1	4	3	
Распределение отдачи, км ³	-	10	4+0	-	6+0	20
ρZ_{np} , млн.руб	10,5	6,2	3,5	5,5	5,0	30,7

Отметим следующую особенность алгоритма. Постоянная часть производственных затрат $(\sum_{i=1}^M c_{zi} \Pi_i)$ не влияет на оптимальное распределение отдачи водохранилища. Оно полностью определяется составом ограничений по водопотреблению компонентов и видом их водноэнергетических характеристик.

Последующим этапом оптимизации параметров ЭВХК является выбор полезной емкости и обеспеченности отдачи водохранилища. В математической модели комплекса для этой цели организована серия расчетов. Здесь же используется графо-аналитический метод.

При заданной отдаче (и следовательно, постоянных производственных затратах) регулирующая емкость находится на основе сравнения приращений общекомплексных затрат и математического ожидания ущерба комплекса, или по условию:

$$\frac{\partial P_{\text{зек}}}{\partial H_{\text{пл}}} \frac{\partial H_{\text{пл}}}{\partial \beta} + f U \frac{\partial (1-\rho)}{\partial \beta} = 0 ;$$

$$U = \sum_{i=1}^M y_i (c_{zi} - c_{oi}) / w_i [1 - (\sum_{j=1}^{i-1} v_j + 0.5 v_i) / \alpha] v_i ,$$

где M — фактическое число компонентов комплекса.

После выявления последовательности и глубины ограничения компонентов величина вполне определима. Производная высоты плотины по емкости водохранилища легко находится по топографической характеристике верхнего бьефа или

$$\frac{\partial H_{\text{пл}}}{\partial \beta} = \frac{\partial (k_{\text{вб}} - k_{\text{нб}} + \Delta H)}{\partial \beta} = \frac{\partial k_{\text{вб}}}{\partial \beta} = 45.7 .$$

Тогда условие оптимальности в сокращенной записи будет:

$$\frac{\partial \rho}{\partial \beta} = \frac{\bar{c}_{\text{ок}}}{f U} \cdot \frac{\partial k_{\text{вб}}}{\partial \beta} = \frac{35.1}{U} ,$$

где $\partial \rho / \partial \beta$ — угол наклона касательной к функции регулирования стока (см. рис. 3).

Дальнейшие расчеты сведены в табл. 3, где одновременно дано и распределение дефицита стока при трех вариантах отметки НПУ (или напора ГЭС).

Таблица 3

Расчет обеспеченности водопотребления компонентов
комплекса и распределение дефицита стока

Параметры	Компоненты					Сумма
	I	2а	3	4	5	

вариант а (H=20 м)						
$y(c_j - c_0)/w$	0,90	2,63	47,00	5,70	11,25	
Водопотребление, км ³	-	-	4+0	2	6+8	20
Приоритет ограничения	-	-	3	1	2	
$\sum_{j=1}^{i-1} v_j, \text{ км}^3$	-	-	16	0	2	
$[1 - (\sum_{j=1}^{i-1} v_j + 0,5 v_i)]/\alpha$	-	-	0,10	0,95	0,55	
$[1] \cdot [2] \cdot [5]$	-	-	18,80	10,83	86,63	$\nu = 116,3$
Обеспеченность работы	-	-	0,994	0,970	0,973	
Математическое ожида- ние дефицита стока, км ³	-	-	0,012	0,057	0,231	0,3
Математическое ожида- ние ущерба, млн.руб	-	-	0,536	0,309	2,469	3,314

вариант б (H=30 м)						
$y(c_j - c_0)/w$	0,90	3,38	47,00	5,70	11,25	
Водопотребление, км ³	-	5	4+0	-	6+5	20
Приоритет ограничения	-	1	3	-	2	
$\sum_{j=1}^{i-1} v_j, \text{ км}^3$	-	0	16	-	5	
$[1 - (\sum_{j=1}^{i-1} v_j + 0,5 v_i)]/\alpha$	-	0,88	0,10	-	0,48	
$[1] \cdot [2] \cdot [3]$	-	14,87	18,80	-	59,40	$\nu = 9307$
Обеспеченность работы	-	0,965	0,993	-	0,973	
М.О. дефицита стока, км ³	-	0,146	0,013	-	0,176	0,335
М.О. ущерба, млн.руб	-	0,493	0,611	-	1,980	3,048

вариант в (H=40 м)						
$y(c_j - c_0)/w$	0,9	4,13	47,0	5,7	11,25	
Водопотребление, км ³	-	10	4+0	-	6+0	20
Приоритет ограничения	-	1	3	-	2	
$\sum_{j=1}^{i-1} v_j, \text{ км}^3$	-	0	16	-	10	
$[1 - (\sum_{j=1}^{i-1} v_j + 0,5 v_i)]/\alpha$	-	0,75	0,10	-	0,35	
$[1] \cdot [2] \cdot [5]$	-	30,98	18,80	-	23,63	$\nu = 73,41$
Обеспеченность работы	-	0,960	0,992	-	0,980	

Продолжение таблицы 3

I	2	3	4	5	6	7
Математическое ожидание дефицита стока, км ³	-	0,285	0,015	-	0,080	0,380
Математическое ожидание ущерба, млн.руб	-	1,177	0,705	-	0,900	2,782

Как уже отмечалось, при распределении дефицита стока в первую очередь ограничиваются (в данном примере полностью) компоненты с меньшими удельными ущербами. Оптимальные значения полезной емкости и обеспеченности работы водохранилища соответствуют точке функции регулирования стока с касательной, имеющей расчетный угол наклона. При определении величины этого угла учтено соотношение горизонтального и вертикального масштабов графика (рис.3).

Итоговые результаты выбора параметров КГУ при различных вариантах напора ГЭС приведены в табл.4.

Таблица 4

Выбор оптимальных параметров комплекса

Параметр	Напор ГЭС, м		
	20	30	40
Высота плотины, м	23,5	33,5	43,5
Общekomплексные затраты, млн.руб	1,72	2,52	31,8
Производственные затраты, млн.руб	30,80	30,80	30,80
Угол наклона касательной, градус	1,43	2,17	2,51
Расчетный угол, градус	2,8	4,4	0,5
Обеспеченность отдачи	0,970	0,965	0,960
Полезная емкость, в долях нормы	1,80	1,72	1,64
Математическое ожидание ущерба, млн.руб	3,31	3,08	2,78
Расчетные затраты комплекса, млн.руб	35,83	36,40	36,66

Из таблицы видно, что все рассмотренные варианты практически равноценны. Это объясняется тем, что основная составляющая целевой функции - производственные затраты не зависят от напора ГЭС или проектируемый гидроузел имеет главным образом во-

дохозяйственное значение и выработка энергии на ГЭС подчинены целям затопления поймы, промышленного водоснабжения и орошения земель. Такое соотношение компонентов заложено в их исходных технико-экономических характеристиках.

Однако если следовать формальному правилу достижения минимума расчетных затрат, то оптимальные параметры КГУ соответствуют минимально допустимой (по условию создания необходимого регулирования стока) высоте плотины. В этом случае энергетика вообще не является участником рассматриваемого комплекса (по результатам распределения зарегулированной отдачи см. табл.2, вариант а).

Оптимизация параметров энерговодохозяйственного комплекса на основе линейного представления функций затрат его компонентов позволила выявить структуру изучаемой системы, основные технико-экономические связи между компонентами и ограничения в алгоритме решения поставленной задачи. К числу основных свойств, существенно влияющих на получаемое решение, следует отнести:

- зависимость водноэкономических характеристик отраслей комплекса от параметров гидроузла;
- ограничения по минимальному и максимальному водопотреблению компонентов комплекса;
- сложный вид (наличие точек перелома) функции регулирования стока;
- влияние глубины регулирования стока на распределение и саму величину отдачи.

Главной причиной идеализации предлагаемого расчетного метода является приближенный характер исходной информации, особенно по неэнергетическим компонентам комплекса. С устранением этого недостатка исчезают принципиальные затруднения создания нелинейной оптимизационной модели энерговодохозяйственного комплекса.

Литература

1. Чокин Ш.Ч., Мальковский И.М., Паутов А.С. Параметры и режимы гидроэлектростанций.-Алма-Ата: Наука, 1983.-220с.
2. Бусалаев И.В. Сложные водохозяйственные системы.-Алма-Ата: Наука, 1980.-230 с.

3. Хедля Дж. Нелинейное и динамическое программирование. — М.: Мир, 1967, 1967.—506с.

4. Чокан Ш.Ч., Григорьев В.А., Редькин В.К. Инженерные методы расчета регулирования стока.—Алма-Ата: Наука, 1980.—284с.

УДК 621.221

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ОПТИМИЗАЦИИ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ВОДЫ ПО МАССИВАМ ОРОШЕНИЯ С ПРИМЕНЕНИЕМ МЕТОДА ЛИНЕЙНОГО ПРОГРАММИРОВАНИЯ

И.В.Бусалаев, А.Кадырбаев
КазНИИЭ

1. Исходные предпосылки и постановка задачи

Сельскохозяйственное производство в значительной степени зависит от погодных условий. В засушливые годы резко снижается выход продукции и возникает угроза нарушения плановых заданий. Более устойчивое производство гарантирует орошаемое земледелие.

Экономика сельскохозяйственного производства в условиях орошения имеет специфические особенности, связанные с использованием воды. Поэтому при планировании необходимо, сопоставляя различные варианты распределения воды между хозяйствами, полями, культурами, наметить организационные и технологические мероприятия по осуществлению поливов. Решающее значение при этом имеют природные факторы: характеристики водоисточников, орошаемых участков, величина и режим естественного увлажнения.

В засушливые годы затраты по возделыванию сельскохозяйственных культур при сохранении баланса продукции возрастают за счет увеличения орошаемых площадей. В то же время на богаре урожайность резко падает. При этом затраты и эффект будут

различны для разных сочетаний массивов орошения, богарных земель и возделываемых культур. В связи с этим в оптимизационных моделях целесообразно рассматривать орошаемое земледелие в одном комплексе с богарным [1,3,7], что повышает эффективность и увеличивает стабильность производства сельскохозяйственной продукции.

Исходя из этого, можно поставить задачу - установить наиболее прибыльную производственную программу при известном задании по государственным закупкам, определяемым минимальными допустимыми значениями по растениеводству (зернофуражные), мясу, шерсти, молоку с учетом ограничений на земельные, водные и трудовые ресурсы.

2. Общая экономико-математическая модель оптимизации сельскохозяйственного производства

В соответствии с поставленной задачей оптимизационную модель можно сформулировать в следующем виде. Требуется максимизировать чистый доход сельскохозяйственного производства

$$\Phi = B - RZ \quad (1)$$

при соблюдении ограничений на конструктивные, технологические и природные условия. Здесь $B = \sum_{j \in G} \bar{C}_j x_j$ - валовой доход; $RZ = \sum_{j \in K} C_j x_j$ - расчетные затраты по системе, где $\bar{C}_j$ - прибыль от единицы (головы) j -го вида животноводства или с 1 га товарной культуры; C_j - затраты на единицу площади кормовой культуры;

x_j - площадь под культурой или поголовье j -го вида скота;

G - отрасль животноводства; K - множество кормовых культур.

Допустимые пределы изменения входных и выходных параметров модели выражаются системой уравнений и системой ограничений в виде следующих неравенств:

I) По объему продукции животноводства:

$$\sum_{j \in G} \rho_{kj} \cdot x_j \geq \rho_k, \quad (2)$$

где ρ - продуктивность i -го вида скота по k -му продукту; x_j - поголовье j -го вида скота; ρ_k - план по k -му продукту.

2) По объему продукции товарных культур (Т):

$$\sum_{j \in T} y_{kj} \cdot x_j \geq \Pi_k, \quad (3)$$

где y_{kj} - урожайность j -ой культуры (находящейся в продукте k -го вида); Π_k - плановое задание по k -му продукту.

3) По выходу и потреблению кормов:

$$\sum_{j \in K} z_{js} \cdot x_{js} \geq \sum_{j \in G} \sum_{i \in Ж} b_{jis} \cdot x_{jis}, \quad (4)$$

где s - вид корма; i - возрастная группа скота; z_{js} - выход корма s -го вида с единицы площади, занятой j -ой культурой; b_{jis} - потребность головы скота j -го вида i -ой возрастной группы в данном корме.

4) По использованию рабочей силы:

$$\sum_j \lambda_{jk} \cdot x_{jk} \leq L_m, \quad (5)$$

где m - номер участка; j - номер культуры или вид скота; λ_{jk} - потребность рабочего времени в человеко-часах на единицу площади или 1 голову скота; L_m - ресурсы рабочей силы на m -м участке.

5) По требованиям севооборотов:

$$S_k = \sum_j \mu_j x_{jm}, \quad (m = \overline{1, 7}), \quad (6)$$

где x_{jk} - площадь, занятая j -ой культурой на m -м участке; S_k - площадь k -го участка; μ_j - доля j -ой культуры в севообороте.

Должны соблюдаться также ограничения по площадям: $S_m \leq A_m$, где A_m - площадь, возможная для использования на m -м участке.

6) По водным ресурсам:

$$\sum_j q_{mj} \cdot x_j = Q_m, \quad (7)$$

где Q_m - вода, потребляемая на m -м участке; q_{jm} - оросительная норма j -ой культуры на m -м участке; x_j - площадь под j -ой

культурой, $\sum_m Q_m \leq Q_0$,

где Q_0 - общая потребность системы в воде.

7) По поголовью j -го вида скота на m -ом участке:

$$N_{jm} \leq B_{jk}, \quad (8)$$

B_{jm} - нижняя граница численности соответствующего поголовья.

8) По кормам и рационам кормления:

$$Z_j = \sum_n \mu_{nj} N_j, \quad (9)$$

где Z_j - количество кормов для j -го скота (в тоннах кормовых единиц); N_j - поголовье скота j -го вида; μ_j - среднегодовая норма кормления j -го вида скота (на одну голову).

Содержание разных видов кормов в рационе (кормовые единицы n -го корма для j -го вида скота)

$$a_{nj} \cdot Z_j \leq \mu_{nj} \leq b_{nj} \cdot Z_j,$$

где a_{nj} и b_{nj} - нижняя и верхняя граница доли содержания n -го вида кормов в рационе.

Общий баланс кормов для j -го вида поголовья $Z_j = \sum_n \mu_{nj} N_j$.

9) По побочным видам кормов (солома):

$$Y_{сол.} = \eta \cdot Y_{зер}, \quad (10)$$

где $Y_{сол.}$ - выход соломы с 1 га площади; $Y_{зер}$ - урожайность зерновых культур; η - доля соломы от выхода зерновых.

Записанная здесь в обобщенной форме модель (в развернутом виде даже для I-го этапа развития Лебяжинской ОС содержит свыше 800 переменных, около 400 ограничений и уравнений модели занимают 17 страниц текста) реализуется в виде программы пакета ЛП-АСУ на ЭВМ ЕС-1033. Время счета модели 19 мин. Разработанная модель позволяет определить: оптимальный план производства заданных государственных закупок сельскохозяйственной продукции, максимальную прибыль в хозяйствах за счет оптимизации поголовья скота, размещения культур, выбора кормовых рационов и севооборотов с учетом ограничений по водным, земельным и другим видам ресурсов.

3. Анализ и подготовка исходной информации для расчета

На основе данной модели была проведена оптимизация параметров Лебяжинской ОС, которая в настоящее время строится.

Исходные данные для оптимизационных расчетов, принимались согласно проектным материалам, в случае отсутствия нужных сведений они получались путем косвенных оценок или по литературным источникам [4, 5].

Орошаемые площади системы в границах пяти существующих хозяйств Лебяжинского района с общей площадью землепользования 325,6 тыс.га на год полного освоения составят 16,3 тыс.га. Площадь нового орошения - 15,12 тыс.га, в том числе первая очередь 9,0 тыс.га (см.табл.1).

Таблица 1

Размещение орошаемых площадей в Лебяжинской
ОС по основному варианту, тыс.га

Наименование хозяйства	Всего орошения	Площадь орошаемых земель		
		нового орошения	I очередь	II очередь
Совхоз им. Джамбула	2,08	2,01	2,01	-
Кормовое отделение	3,61	3,61	1,98	1,63
Совхоз Бескарагайский	2,52	1,49	1,49	-
Совхоз Лебяжинский	1,49	1,49	1,49	-
Совхоз Казынский	2,01	1,93	1,93	-
Лебяжинское райспецхозобъединение (РСХО)	3,1	3,1	-	3,1
Совхоз Майкарагайский	1,49	1,49	-	1,49
Всего	16,30	15,12	8,9	6,22

Урожайность на год полного освоения составит: многолетних трав на зеленый корм 300 ц/га; на сенаж 160 ц/га; кукуруза на силос 350 ц/га; зернофуражные 25 ц/га.

Средневзвешенная оросительная норма 4200 м³/га. Строительство и освоение оросительной системы намечено осуществить в две очереди: I очередь - 9,0 тыс.га с освоением в 1985г.,

II очередь - 6,0 тыс.га с освоением в 1967 г.

Структура посевных площадей на землях нового орошения следующая: зернофуражные 2,80 тыс.га; кукуруза на силос 3,42; однолетние травы на сено 0,52; многолетние травы 8,38 тыс.га.

В оптимизационных экономико-математических моделях орошение рассматривается в комплексе с богарным земледелием. Базовая урожайность сельскохозяйственных культур в расчетах принята в основном по проектным данным.

Урожайность на богарных землях существенно колеблется из года в год в зависимости от естественного увлажнения. Это хорошо видно на рис. I.

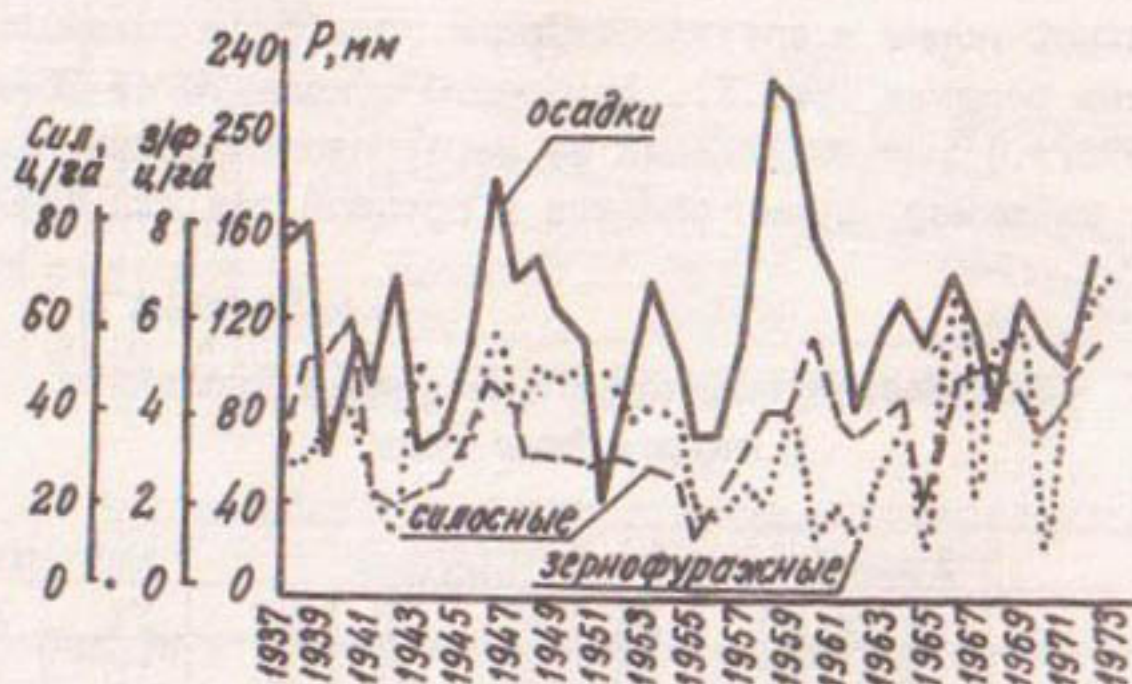


Рис. I. Колебание осадков и урожайность основных сельскохозяйственных культур по годам

Существенная специфика в формализации задачи обнаруживается при учете колебания погодных условий из года в год.

На кривой распределения осадков выделяем три частные зоны: среднеувлажненные, влажные и засушливые. Для каждой из них принимаем следующие величины расчетной обеспеченности: среднеувлажненного года ($P_2 = 55\%$), увлажненного ($P_1 = 25\%$) и засушливого года ($P_3 = 20\%$). В программах счета при этой обеспеченности изменялись урожайность сельскохозяйственных культур, возделываемых на богаре, и оросительные нормы культур на мас-

сивах орошения.

Для определения вероятностей повторения исходов естественного увлажнения P_1, P_2, P_3 проводится обработка данных по осадкам за вегетационный период. Выявляется закономерность повторяемости условий естественного увлажнения. По имеющемуся ряду наблюдений за осадками в вегетационный период строится кривая их обеспеченности (рис.2).

Оросительная норма сельскохозяйственных культур для среднего по увлажнению года принята также по материалам проекта. Рассматривая ее в качестве базовой и учитывая значительную корреляцию урожайности на богаре с осадками за вегетационный период, в первом приближении можно принять изменение базовой оросительной нормы в соответствующие годы пропорционально упомянутым осадкам (рис.1). Для этого используется 36-летний (1937-1972гг.) ряд наблюдений за метеорологическими элементами. Так, например, сумма осадков в средний год для Лебяжинс-

Таблица 2

Количество осадков по месяцам в урожайные и неурожайные годы

Годы	Урожайные			Средние			Неурожайные		
Месяцы	УI	УII	УIII	УI	УII	УIII	УI	УII	УIII
Осадки	49	61	70	38	48	46	15	22	21
Осадки за вегетационный период	180			132			58		

кой ОС (табл.2) составляет 132 мм, что соответствует оросительной норме для зернофуражных $3300 \text{ м}^3/\text{га}$. Для неурожайных лет при сумме осадков 58 мм величина "дефицита" их по сравнению со средним годом составит 74 мм ($740 \text{ м}^3/\text{га}$).

Для получения в засушливые годы гарантированного урожая потребуется приблизительно на эту величину повысить оросительную норму. В этом случае для зернофуражных культур она будет равна $4040 \text{ м}^3/\text{га}$. В годы с большим количеством осадков оросительную норму целесообразно соответственно уменьшить (например, для зернофуражных до $2820 \text{ м}^3/\text{га}$).

Аналогично рассчитываются оросительные нормы для других сельскохозяйственных культур. Полученные таким образом данные в дальнейшем используются в оптимизационных расчетах.

Для сопоставимости результатов в расчетах на перспективу нами принята урожайность для среднего года по данным [5,6]. Для других лет она получена на основе анализа кривых обеспеченности осадков и урожайности (рис.2). Последняя построена по ряду фактической урожайности на богарных землях [6].



Рис.2. Кривые обеспеченности осадков и сельскохозяйственных культур в урожайные и неурожайные годы

Потребность в кормах исчислялась исходя из поголовья скота, зоотехнических норм кормления, структуры кормовых рационов для различных видов животных, лимитированности тех или других видов кормов [5].

В общем случае кормовые рационы оптимизируются с учетом зоотехнических требований и ограничений или рассчитываются, исходя из жестко заданной наиболее типичной для данного вида скота нормы и структуры.

По поголовью общественного скота в каждом совхозе приняты ограничения по верхней границе ($\geq$ проектной), по трудовым ресурсам – по нижней границе.

Предельные границы содержания сельскохозяйственных культур в рационах кормления, потребность скота в кормах, минимальные и максимальные границы содержания кормов в рационах, расчетные

нормы нагрузки работников растениеводства и животноводства принимались по нормативным данным.

Полученный общий объем кормов (147333 т кормовых единиц) вполне согласуется с проектными данными.

Для проведения расчетов по оптимизации параметров Лебяжинской ОС сбор и обработка исходных данных были выполнены по всем входным расчетным элементам экономико-математической модели: культурам, массивам, способам производства, севооборотам, поголовью скота, кормам, рационам питания, трудовым ресурсам, расчетным затратам, себестоимости продукции и т.д. Поставленная задача при определенной детализации и системе ограничений может быть сформулирована также в терминах размещения сельскохозяйственного производства, культур и поголовья скота по хозяйствам. В частности, при доминировании в водопотреблении доли орошаемого земледелия требуется, кроме того, распределить воду по массивам орошения, совхозам и всей системе в целом, выбрать рационы кормления для различных видов скота, организовать кормопроизводство в хозяйствах так, чтобы получить заданный объем продукции растениеводства и животноводства, госпоставки с максимумом чистого дохода.

Себестоимость продукции животноводства и растениеводства по совхозам системы, расчетные затраты, урожайность и оросительные нормы сельскохозяйственных культур, возделываемых на массивах, приняты на основе проектных данных [4,5].

На основе экономико-математической модели, принятых исходных предпосылок и ограничений разработана система линейных уравнений, неравенств и логических условий, на базе которой составлена программа счета на ЭВМ (пакет ЛП-АСУ).

Продукция животноводства получена в соответствии с проектным заданием или с некоторым превышением: шерсти 801 т вместо 785,3 т, остальная продукция животноводства во всех трех вариантах расчета оказывается одинаковой и совпадает с данными проекта так же, как и количество и распределение видов скота: овец 138 250 голов, крупного рогатого скота 22 132, лошадей 1800 голов.

Государству продается 5175 т зернофуражных на 34,6 млн.руб. Чистый доход по годам изменяется в связи с тем, что вся пло-

щадь, оставшаяся после посева кормовых культур, используется для посева семян.

По плану объем продукции семян составляет 308 т. Получено по расчету в увлажненный год 32988 т, средний — 17485 т, сухой — 6506 т, продано государству соответственно на 197,8 млн.руб, 104,9 млн.руб и 39 млн.руб.

На орошаемых землях в увлажненный и средний годы возделываются 5 кормовых культур: зернофуражные, силосные, многолетние травы прошлых лет на сено, на сенаж и на зеленый корм. Эти же культуры, кроме многолетних трав на сенаж, возделываются на орошаемых землях и в сухой год.

Семена возделываются на богаре, а в сухой год и на 744 га орошаемых земель Лебяжинского массива, на богаре возделываются также зернофуражные для продажи государству, на корма и кормосмесь, на богарных землях находятся сенокосы заливные, пастбища улучшенные.

Побочный продукт — солома — получается на орошаемых землях кормового отделения и на богаре. Всего использовано воды в увлажненный год 32,7 млн.м³, среднеувлажненный год — 37,9 млн.м³, сухой год — 44,5 млн.м³.

Трудовые ресурсы по совхозам не выходят за пределы верхней границы.

По расчетам, полный объем водопотребления Лебяжинского массива первой очереди составляет 37,9 млн.м³ для года средней влажности, что несколько меньше водопотребления, предлагаемого по проекту — 39,09 млн.м³. Экономия воды в расчетном варианте получается за счет перераспределения площадей и в результате более полного использования богарных земель.

По данным расчетам уменьшилось число культур многолетних трав, имеющих большие оросительные нормы (4,85 тыс.м³/га) и возделываемых на массивах орошения. Зернофуражные и силосные (с оросительными нормами соответственно 3,3 и 3,5 тыс.м³/га) распределены так же, как в проектном варианте. Для более полного сравнения расчетного и проектного решений они приводятся к сопоставимому виду. Для этого варианты уравниваются по эффекту. Например, исключен излишек семян на продажу.

Кроме того, народнохозяйственные издержки выражаются в рас-

Сравнение экономических показателей расчетного и проектного варианта развития
Лебяжинской ОС на год освоения I очереди, га, тонн, млн. руб. (РЗ-расчетные затраты)

Культуры	Орошаемые земли					Богара		Расчетные затраты по:			Продукция (стоимость продукции)							Всего стои- мость продук- ции	Чистый доход (ЧД)
	Пло- щадь	РЗ на подго- товку пло- щади	Ове- щения затра- ты на воду (ЕК)	Издерж- ки на возде- лыва- ние и полив	Всего РЗ	Пло- щадь	РЗ	расте- ниевод- ству	живот- новод- ству	систе- ме	моло- ко	мясо КРС	мясо лоша- дей	мясо овец	шерсть овечья	зерно- фураж- ные	семе- на		
Зернофуражные	1670 1671,8	0,055 0,055	0,53 0,20	0,20 0,49	0,785 0,745	40900 33725	2,24 1805	3,025 2,590											
Кукуруза на силос	2308 23042	0,076 0,076	0,73 0,39	0,39 0,72	1,196 1,186	2200 -	0,015 -	1,211 1,186											
Многолетние травы на зеленый корм	5007 26348	0,77 0,12	2,2 1,39	0,82 1,17	3,79 1,67			3,79 1,67											
Многолетние травы на сено	6297 6297	0,02 0,02	0,08 0,08	0,27 0,27	0,37 0,37	56839 -	1,64 -	1,64 0,37											
Многолетние травы на сенаж	744 744	0,024 0,024	0,09 0,09	0,30 0,30	0,414 0,414			0,414 0,414											
Многолетние травы на семена						2970 3080	0,365 0,365	0,365 0,365										1,89 1,84	
Сенокосы естественные						3740 -	0,108 -	0,108 -											
Сенокосы заливные						9460 233879	1,517 2,003	1,517 2,003											
Пастбища естественные						164764 -	0,954 -	0,954 -											
Пастбища улучшенные						59944 108856	5,995 10,8	5,995 10,8			11410 11410	3181 3181	73,8 73,8	2571 2571	7853 801				
Всего:	8985 8985	0,901 0,295	3,64 2,15	1,41 1,95	5,77 4,38	340817 169049	12,724 15,01	18605 19,39	6,1 4,7	2470 2407	4,15 4,15	9,72 9,72	0,065 0,065	5,65 5,65	5,52 5,64	0,36 0,36	1,89 1,84	27,3 27,425	2,6 3,355

В числителе - проектные, в знаменателе - расчетные показатели.

четных затратах с учетом тяжести капиталовложений. Сравнение технико-экономических показателей по обоим вариантам приведено в табл.3. Как видно из данных табл.3, издержки по животноводству в расчетном варианте несколько меньше, чем в проектном (4,7 млн.руб против 6,1 млн.руб).

Сравнение результатов расчета показывает, что предлагаемая модель позволяет выбрать наиболее экономичный вариант развития той или иной отрасли сельскохозяйственного производства.

Литература

1. Бусалаев И.В., Вдовица А.И., Кадырбаев А. Экономико-математическая модель оптимизации распределения воды между массивами орошения.-В кн.: Проблемы гидроэнергетики и водного хозяйства.-Алма-Ата: Наука, 1978, вып.14, с.32-41.
2. Кардаш В.А., Пряжинская В.Г. Линейная модель оптимальной организации использования оросительных систем.-В кн.: Экономико-математические методы.-Новосибирск, 1966, вып.3.
3. Бусалаев И.В., Кадырбаев А. Математическая модель для оптимизации распределения воды из тракта переброски стока.-Депонированные научные работы, 1984, № 4, (150).
4. Нормативы удельных капитальных вложений в водохозяйственном строительстве.-М.:Изд. Министерства мелиорации и водного хозяйства СССР, 1966.-36с.
5. Нормативный справочник по сельскому хозяйству.-Алма-Ата: Кайнар, 1970,-272с.
6. Статистический справочник народного хозяйства Казахстана/Казахстан 1975-1977 гг.-Алма-Ата, 1978.-185с.
7. Бусалаев И.В. Сложные водохозяйственные системы (методы гидрологического обоснования моделирования и оптимизации решений).-Алма-Ата: Наука, 1980.-230с.

КРИВАЯ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ВЕРОЯТНОСТЕЙ ОБЪЕМОВ
СУДОХОДНЫХ ПОПУСКОВШ.Ч.Чокин, В.Б.Баишев, А.М.Мамедалиев
КазНИИЗ

Гидроэнергетика является ведущим участником энерговодохозяйственного комплекса (Сибирь, Дальний Восток, север европейской части), который, в свою очередь, находится в сложных взаимодействиях и взаимосвязи со смежными отраслевыми системами, в частности, энергетической, транспортной (судоходство, лесосплав) и др.

Экономическая эффективность ВХК тем больше, чем выше степень зарегулированности стока рек. Последняя может быть достигнута путем строительства крупных водохозяйственных, гидроэнергетических объектов, в расчетах которых следует учитывать не только взаимосвязанные и взаимодействующие элементы ВХК, но и вероятностный характер самой системы, так как на состояние и нормальный режим ее работы сильно влияют внешние факторы (режимы стока, метеорологические, геофизические процессы и т.д.), являющиеся по своей природе стохастическими.

Под элементами ВХК выступают отраслевые системы (компоненты ВХК), каждая из которых использует воду как в постоянном (санитарные попуски, водоснабжение населения и промышленных предприятий с оборотным водоснабжением и др.), так и в переменном режиме (заливка пойменных земель, судоходные попуски, подача воды на орошаемые массивы и др.). В методах расчетов водохранилища, основанных на естественной модели стока, переменные объемы водоотдачи из него могут быть учтены непосредственно по принятым расчетным интервалам времени. В обобщенных же методах — через их функции распределения вероятностей. Однако обобщающих выводов о типах кривых распределения вероятностей объемов водопотребления отдельными компонентами ВХК в существующей литературе пока нет, отдельные сведения содержатся в работах [1-3]. Это объясняется недостаточностью

имеющейся информации о режимах водопотребления компонентами ВХН.

Как показывают сравнительные расчеты, учет переменных режимов водоотдачи снижает полезную емкость рассчитываемого водохранилища на 10–15% [3], что приводит к уменьшению объемов используемой воды. Это имеет особо важное значение для районов с ограниченными водными ресурсами. Поэтому установление вида кривых распределения объемов водоотдачи компонентам ВХН становится необходимостью. Рассмотрим водный транспорт как отдельно взятую отрасль народного хозяйства.

В условиях Казахстана, в частности бассейна р.Иртыша, важное значение имеет водный транспорт, выступающий вторым по значимости участником Иртышского водохозяйственного комплекса. Очевидно, показателем его экономической эффективности как отраслевой системы будет максимум получаемой конечной продукции. В существующей транспортной системе экономическим ее показателем является максимум дохода D (при постоянстве цен на единицу продукции и при минимуме эксплуатационных затрат), который определяется зависимостью

$$D = f(M, \Gamma, N, W), \quad (I)$$

где M – мощность самоходных судов, тыс.л.с.; N – грузоподъемность несамоходных судов, тыс.т; Γ – грузооборот, млн.т-км; W – объемы судоходных попусков, км³.

Естественно, объемы ежегодного дохода по водному транспорту зависят также от объемов капиталовложений во флот, на путевые расходы, на очистку фарватера русла и на другие цели. В качестве примера рассмотрим Верхне-Иртышское пароходство, данные о котором приведены в табл. I.

Как видно, продолжительность навигации t – переменная величина и в среднем составляет более 6,5 месяцев. Среднегодовой объем судоходных попусков равен 10,03 км³.

Данные по объемам судоходных попусков Верхне-Иртышского пароходства имеются более чем за 20 лет. Однако нами выбран 13-летний период (1970–1982 гг.), в котором каждые значения W тесно связаны с M, N, Γ и D за каждый t -й год (см. рис. I). Кроме того, данные до строительства и ввода Бухтарминского водохранилища для обобщения режима его эксплуатации (по водно-

Таблица I

Основные показатели по перевозке грузов
Верхне-Иртышского пароходства

Годы	W , км ³	D , млн. руб.	Γ , млн. т-км	M , тыс. л.с.	N , тыс. т	K , млн. руб.	t , сут.
1970	9,42	12,77	1761,7	81,4	124,7	4,39	193
1971	12,02	13,90	2076,9	82,3	123,5	5,29	204
1972	11,98	15,68	2278,3	84,7	126,6	5,36	204
1973	11,34	16,30	2445,1	86,7	123,4	8,61	214
1974	9,68	16,10	2539,0	91,2	128,5	8,99	204
1975	9,04	15,07	2217,8	93,5	131,4	9,85	202
1976	9,10	15,90	2551,7	98,1	134,3	10,27	202
1977	10,6	18,23	2946,2	102,1	142,1	9,75	208
1978	9,58	17,70	3099,1	106,1	147,9	12,41	213
1979	9,71	18,10	2736,0	109,8	154,2	11,72	198
1980	8,98	19,84	2965,4	112,6	160,4	11,02	213
1981	10,62	17,19	2503,7	120,7	164,5	13,72	215
1982	8,33	15,18	2532,3	128,2	176,2	14,24	219
Ср.	10,03	16,30	2511,8	99,8	141,4	9,66	206,8

му транспорту) не представляют интереса, так как они относятся к естественному режиму водотока. В этом смысле рассматрива-

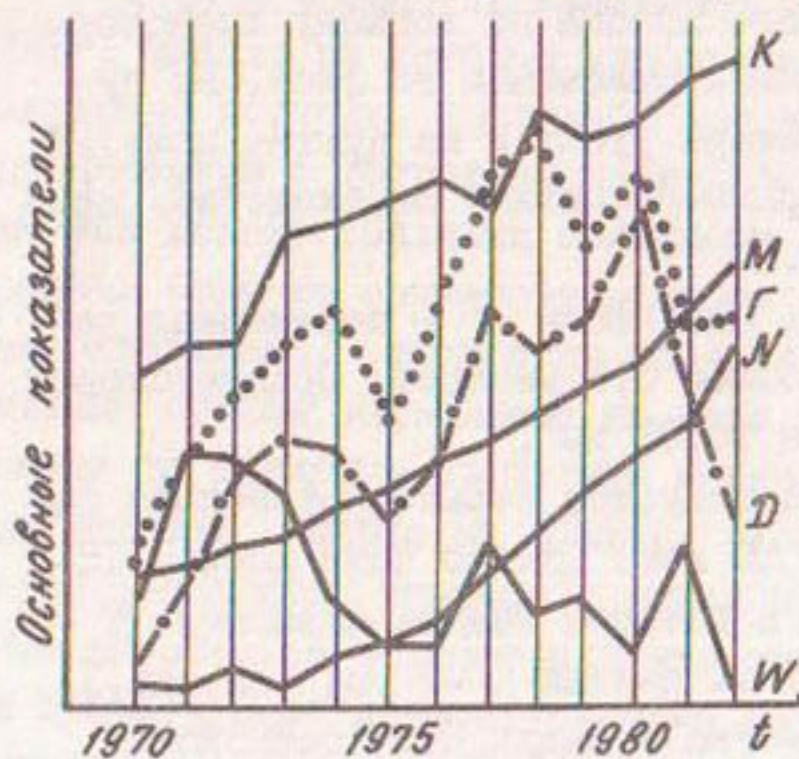


Рис. I. Графики изменения основных показателей Верхне-Иртышского пароходства по годам

емый 13-летний ряд является характерным для периода планомерного развития всех отраслей народного хозяйства Восточного Казахстана, в том числе и водного транспорта.

Отметим, что годовые объемы судоходных попусков определяются как объемом производства продукции, подлежащей перевозке по водному пути, так и стоком боковой приточности периода межени W_M , режим колебания которого является стохастическим процессом. Поэтому хотя водный транспорт как отрасль — планируемое хозяйство, в объемах попусков воды, обеспечивающих нормальное его функционирование, имеются элементы случайности.

Между объемами судоходных попусков W и меженного периода боковой приточности W_M в общем случае может быть зависимость любого вида. В частности, как $W = a W_M^2 + b W_M + c$, так и $W = a W_M + b$. Для рассматриваемого конкретного случая между попусками воды из Бухтарминского водохранилища

W и суммарным стоком боковой приточности W_M за период межени рек Убы и Ульбы оказалась более предпочтительной зависимость вида $W = -0,127 W_M + 10,35$, чем кривая $W = -0,041 W_M^2 + 0,38 W_M + 8,996$ (см.рис.2).

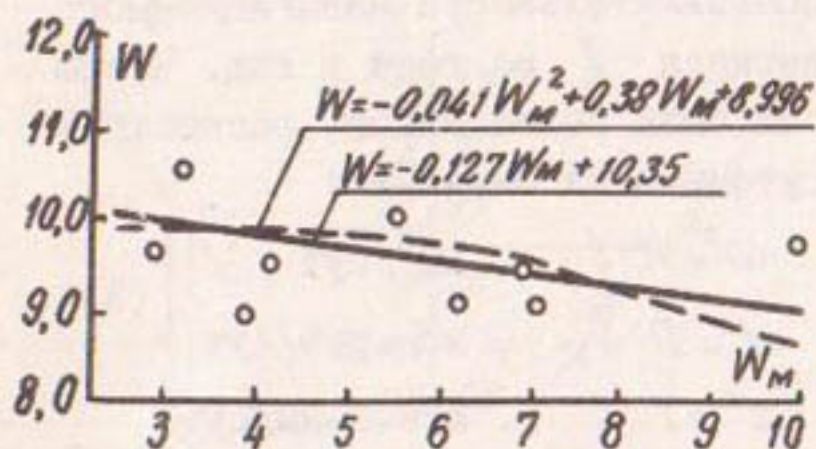


Рис.2. Зависимость судоходных попусков воды из Бухтарминского водохранилища и меженных объемов стока р. Убы и Ульбы за период навигации

Безусловно, 13-летний ряд недостаточен для установления вида кривой распределения вероятностей величины W . Поэтому на основе зависимости (1) с учетом динамики развития основных показателей водного транспорта составим искусственно удлиненный ряд величины W .

Значение $W = 0$ соответствует $t = 0$ навигации, т.е. когда речной флот не функционирует, $W = W_{min}$ — минимальным объемам грузоперевозок. Отметим, что величина W не может быть бес-

конечно большой, так как мощность самоходных и грузоподъемность несамоходных судов, а также объемы грузоперевозок не могут быть больше своих возможных максимумов, определяемых объемом производства материальных ресурсов в регионе, в пределах которого функционирует водный транспорт. Таким образом, пределами изменения величины W являются $[W_{min}, W_{max}]$.

Очевидно, чем больше мощность самоходных M , грузоподъемность несамоходных судов N и объемов судоходных попусков W , обеспечивающих их работоспособность, тем больше объемы перевозимых ими грузов, а следовательно, при постоянстве цен увеличиваются и объемы получаемых речным пароходством D . Другими словами, имеет место ряд следующих зависимостей: $N=f(M)$, $\Gamma=f(N, W)$, $D=f(\Gamma)$, который для простоты расчетов представим в следующем виде:

$$\left. \begin{aligned} M &= f(N), & \Gamma &= f(N), \\ D &= f(\Gamma), & D &= f(W) \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

В абсолютных единицах зависимости (2) выражены не четко, например $D=f(W)$ (рис.3). Это объясняется переменностью продолжительности навигационного периода t из года в год. Чтобы они были сопоставимы, рассмотрим суточные их значения:

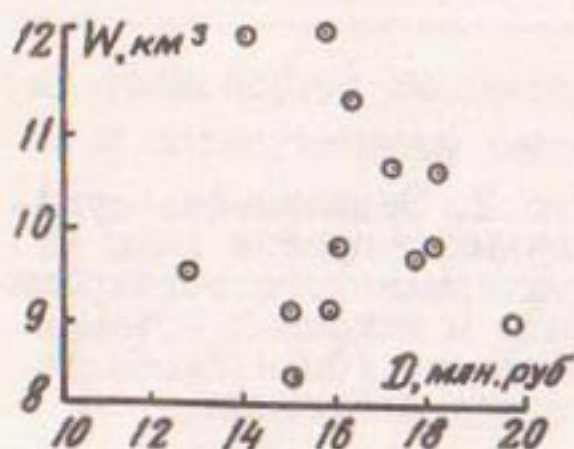


Рис.3. Зависимость $D=f(W)$

$$\left. \begin{aligned} \omega^* &= W:t, & \text{км}^3/\text{сут} \\ d^* &= D:t, & \text{млн.руб/сут} \\ z^* &= \Gamma:t, & \text{млн.т-км/сут} \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

Для удобства графических построений и расчетов исключены также их размерности:

$$\left. \begin{aligned} \omega &= \frac{\omega^*}{\omega}, & \pi &= \frac{M}{M} \\ d &= \frac{d^*}{d}, & z &= \frac{z}{z}, & n &= \frac{N}{N} \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

где $\bar{\omega}$, $\bar{d}$, $\bar{z}$, $\bar{M}$, и $\bar{N}$ - среднее значение величин соответственно ω^* , d^* , z^* , M , N .

Кривые (2) в относительных единицах имеют вид (рис.4):

$$\left. \begin{aligned} m &= a_1 n + b_1, \\ z &= a_2 n^2 + b_2 n + c, \\ d &= a_3 z + b_3, \\ \omega &= d : (a_4 d + b_4). \end{aligned} \right\} \quad (5)$$

Коэффициенты $a_1, \dots, a_4$; $b_1, \dots, b_4$ и c относительно показателей Верхне-Иртышского пароходства, вычисленные методом наименьших квадратов, имеют следующие значения:

i	a_i	b_i	c
1	0,7920	0,2080	
2	1,2414	-1,3039	1,0521
3	0,7113	0,2887	
4	1,3611	-0,3460	

Результаты расчетов по формулам (4) приведены в табл.2. В ней также содержатся значения ω , d и z , полученные по формулам (5).

Коэффициенты корреляции между основными показателями оказались равными: $r_{d/\omega, d} = 0,90$; $r_{d, z} = 0,83$; $r_{n, z} = 0,75$; $r_{m, n} = 0,88$.

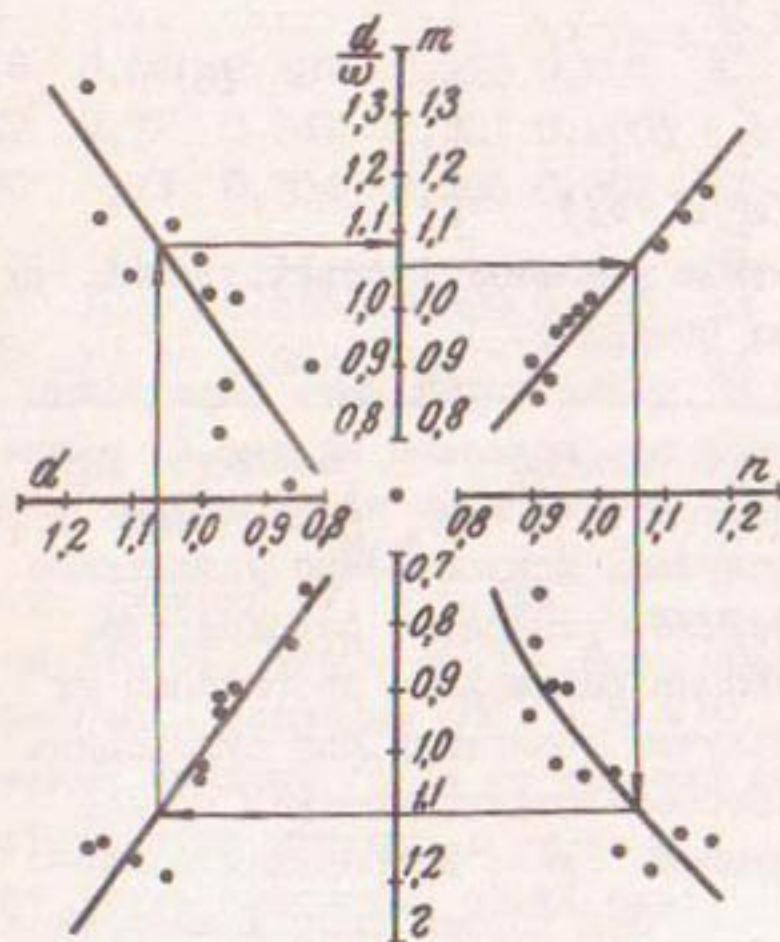


Рис.4. Графики для определения годовых объемов судовых попусков

Таблица 2

Относительные показатели Верхне-Иртышского пароходства

Годы	ω	d	z	m	n	ω_p	d_p	z_p
1970	0,913	0,832	0,747	0,854	0,916	1,086	0,820	0,100
1971	1,201	0,856	0,833	0,863	0,907	1,069	0,881	0,891
1972	1,196	0,967	0,914	0,889	0,930	1,003	0,940	0,913
1973	1,080	0,958	0,935	0,910	0,907	1,019	0,954	0,890
1974	0,966	0,992	1,019	0,957	0,944	0,992	1,013	0,928
1975	0,913	0,938	0,898	0,981	0,965	1,019	0,927	0,950
1976	0,917	0,990	1,034	1,029	0,987	0,994	1,024	0,974
1977	1,039	1,101	1,159	1,071	1,044	0,950	1,113	1,044
1978	0,917	1,045	1,191	1,113	1,087	0,970	1,136	1,101
1979	0,999	1,149	1,131	1,152	1,133	0,935	1,093	1,169
1980	0,858	1,171	1,139	1,181	1,179	0,929	1,099	1,240
Ср.	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	0,997	1,0	1,0

Очевидно, годовые объемы W, D, Γ могут быть вычислены согласно (5) по формулам:

$$\left. \begin{aligned} \Gamma &= (a_2 n^2 + b_2 n + c) \bar{\Gamma}, \\ D &= (a_3 z + b_3) \bar{D}, \\ W &= d \bar{W} : (a_4 d + b_4) \end{aligned} \right\} \quad (6)$$

где $\bar{\Gamma}, \bar{D}, \bar{W}$ - среднееголетние значения соответственно грузооборота, дохода и судоходных попусков.

Расчетные объемы Γ, D и W также могут быть определены непосредственно по графикам, как это показано на рис. 4, умножением снятых с графика значений z, d и ω на их нормы.

По зависимостям (6) можно получить искусственно удлиненные ряды каждого из показателей Верхне-Иртышского пароходства, что позволяет определить тенденцию развития и прогнозные их значения. В частности, нами получен 54-летний ряд судоходных попусков W , по которому построена статистическая кривая распределения вероятности величины W . В пределах изменения аргумента $W_{min} < W < W_{max}$ она хорошо аппроксимируется функцией вида:

$$\theta(W) = 1 - \exp \left[- \frac{W - W_{min}}{\sigma} \right]. \quad (7)$$

Здесь σ – среднеквадратическое отклонение, равное 0,6577.

Максимальное значение модуля Δ разностей между статистической и теоретической функциями распределения составляет 0,067 (табл.3 в сокращенном виде). Согласно критерию А.Н.Колмогорова имеем $\rho(\lambda = \Delta \sqrt{n}) = 0,967$, что показывает приемлемость функции (7) в качестве теоретической в пределах изменения величины $W_{min} < W < W_{max}$.

Таблица 3

Вероятности статистической и теоретической кривых распределения

$\frac{N}{n/n}$	W	ρ_c	ρ_m	Δ	$\frac{N}{n/n}$	W	ρ_c	ρ_m	Δ
1	9,43	0,018	0	0,018	32	10,07	0,582	0,622	0,040
2	9,44	0,036	0,015	0,016	...	...	...	...	...
3	9,45	0,054	0,030	0,024	38	10,33	0,691	0,742	0,051
4	9,46	0,072	0,045	0,027	39	10,41	0,709	0,775	0,066
5	9,48	0,090	0,073	0,017	40	10,46	0,727	0,791	0,064
6	...	...	...	...	41	10,53	0,745	0,812	0,067
18	0,69	0,327	0,326	0,001	42	10,56	0,764	0,821	0,057
19	9,72	0,345	0,351	0,006	...	...	...	...	...
20	9,73	0,364	0,366	0,002	51	11,38	0,927	0,948	0,021
...	...	...	...	...	52	11,61	0,945	0,963	0,018
30	10,0	0,545	0,580	0,035	53	11,88	0,964	0,976	0,012
31	10,06	0,564	0,616	0,052	54	12,19	0,982	0,985	0,003

При значении W , равном W_{min} , согласно (7) имеем $\theta(W) = 0$, а при $W = W_{max}$ $\theta(W) = \{1 - \exp[(-W_{max} - W_{min})/\sigma]\} < 1$, т.е. функция (7) в точке W_{max} имеет разрыв первого рода (см.рис.5). Чтобы $\theta(W)$ была дифференцируемой в диапазоне изменения величины $W_{min} \leq W < \infty$, используем аппарат обобщенных функций [4] в их простейшей форме, а именно: единичную ступенчатую функцию $\mathcal{U} = (W - W_{max})$. Тогда выражение (7) будет иметь следующий общий вид:

$$\theta(W) = \begin{cases} 1 - \exp\left[-\frac{W - W_{min}}{\sigma}\right], & (W_{min-0} \leq W \leq W_{max+0}), \\ \rho \cdot U(W - W_{max}), & (W_{max-0} \leq W < \infty) \end{cases} \quad (8)$$

Здесь ρ — величина скачка в точке W_{max} и равна $\exp[-(W_{max} - W_{min})/\sigma]$. Тогда из формулы (8) имеем

$$\theta(W) = 1 - \exp\left[-\frac{W - W_{min}}{\sigma}\right] + \rho U(W - W_{max}), \quad (9)$$

$$(W_{min-0} \leq W < \infty).$$

Соответственно плотностью вероятностей $q(W)$ будет:

$$q(W) = \frac{1}{\sigma} \exp\left[-\frac{W - W_{min}}{\sigma}\right] + \rho \delta(W - W_{max}), \quad (10)$$

$$(W_{min-0} \leq W < \infty),$$

где $\delta(W - W_{max})$ есть производная от $U(W - W_{max})$.

Нетрудно убедиться в том, что $q(W) \geq 0$.

$$\int_{W_{min}}^{\infty} q(W) dW = 1$$

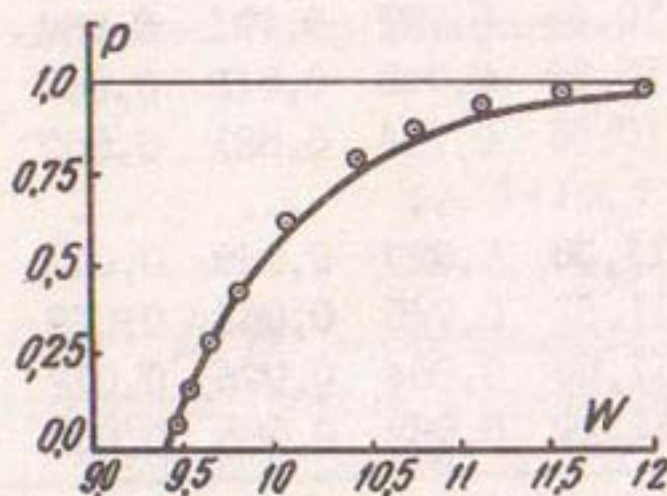


Рис. 5. Кривая распределения вероятностей величины W :
— статистическая;
○ ○ ○ — теоретическая

Функции (9) и (10) позволяют вести расчеты проектируемых водохранилищ на переменные объемы судоходных попусков одним из существующих обобщенных методов регулирования речного стока.

Литература

1. Ваишев Б.Б. Аналитический метод расчета водохранилищ при переменном (оросительном) водопотреблении на трактах переброски стока. — В кн.: Проблемы гидроэнергетики и водного хозяй-

ства.-Алма-Ата: Наука, вып.13, 1976, с.116-124.

2. Чокин Ш.Ч., Баишев Б.Б., Григорьев В.А. Расчеты водохранилищ многоцелевого назначения.-Алма-Ата: Наука, 1983.-205с.

3. Логинов В.Г. Приемы регулирования стока на случайную отдачу.-Труды Гидропроекта, 1970, №19, с.185-193.

4. Пугачев В.С. Введение в теорию вероятностей.-М., 1968.-368с.

УДК 621.22

МНОГОМОДАЛЬНЫЕ ПЛОТНОСТИ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ВЕРОЯТНОСТЕЙ ГИДРОЛОГО-ВОДОХОЗЯЙСТВЕННЫХ ХАРАКТЕРИСТИК

Ш.Ч.Чокин, В.А.Григорьев
КазНИИЭ

Расчеты регулирования речного стока при его комплексном использовании выдвигают ряд требований к кривым распределения гидролого-водохозяйственных характеристик. Во-первых, стандартные одномодальные кривые не всегда с достаточной точностью описывают необходимый для расчетов статистический материал. Более того, они могут давать ложные максимумы в тех местах, где практически отсутствуют исследуемые величины. Примером тому служит аппроксимация гистограмм продолжительности цикла регулирования t_c р.Северной Двины кривой Пирсона III типа $[1]$. В том месте гистограммы, где сосредоточиваются основные значения t_c , эти кривые практически равны нулю, а там, где они отсутствуют, кривая Пирсона III типа дает максимальное значение. Во-вторых, стандартные кривые описывают только генетически однородный статистический материал. При комплексном использовании водных ресурсов такая однородность, как правило, нарушается. Обусловлено это разнородными требованиями режимов водопотребления и водопользования, а также возможной генетической неоднородностью гидрологического режи-

ма рек. Кроме того, перечисленные режимы могут быть генетически разнородными и включать в себя как детерминированную, так и случайную составляющие. В результате такой неоднородности, даже в тех случаях, когда при расчетах одиночного водохранилища одноцелевого назначения гидролого-водохозяйственные характеристики достаточно хорошо описывались одномодальными кривыми распределения (Пирсона III типа, С.Н.Крицкого-М.Ф.Менкеля и т.д.), при комплексном подходе эти кривые оказываются непригодными. Это есть результат генетической неоднородности не только входных гидрографов, но и режимов и требований водопотребителей и водопользователей.

В связи с перечисленным возникает настоятельная потребность в создании универсальной многомодальной плотности распределения вероятностей гидролого-водохозяйственных характеристик, пригодных для расчетов регулирования речного стока при его комплексном использовании. В основе конструирования такой функции должна лежать некоторая, довольно общая схема случайных событий, отражающая генетическую разнородность случайных величин. Всякое произвольное задание такой функции может привести к тому, что не все участки кривой будут достаточно хорошо описывать эмпирический материал.

Функции, описывающие генетически разнородный материал гидролого-водохозяйственных характеристик, будем вводить следующим образом. Пусть имеется N событий A_i , $i = 1, 2, \dots, N$. Вероятность того, что при n испытаниях произойдет ровно m событий, равна сумме вероятностей всевозможных сочетаний цепочек из n неповторяющихся событий A_i , из которых произвольные события произошли ровно раз [2]. Если же часть событий A_i генетически разнородная, то представляет интерес вероятность того, что в каждой генетически однородной группе произойдет соответственно ровно $m_1, m_2, \dots, m_k$ событий. Если же эти группы событий независимые, то эта вероятность будет

$$\rho(m_1, m_2, \dots, m_k) = \rho_{n_1}(m_1) + \rho_{n_2}(m_2) + \dots + \rho_{n_k}(m_k), \quad (1)$$

где $\rho_{n_i}(m_i)$ — сумма всевозможных сочетаний из n_i элементов по m_i произошедших событий из i -ой генетической группы. Если

n_i велики (как правило, более 10), то практически невозможно учесть всевозможные сочетания и поэтому идут на некоторые допущения. Таковым будет предположение о равновероятных событиях в каждой генетической группе. В этом случае функция (1) переписывается так:

$$\rho(m_1, m_2, \dots, m_K) = \sum_{i=1}^K C_{n_i}^{m_i} \rho_i^{m_i} q_i^{n_i - m_i}, \quad (2)$$

где $q_i = 1 - \rho_i$.

Это уже многомодальное биномиальное распределение. Оно является обобщением формулы Бернулли на K групп генетически разнородных событий. Если в каждой такой группе события A_i удовлетворяют локальной теореме Муавра-Лапласа, то при $n \rightarrow \infty$

$$\rho_{n_i}(m_i) \rightarrow S_i \frac{1}{\sqrt{n_i \rho_i q_i}} \frac{1}{\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{1}{2} x_i^2}.$$

Здесь $x_i = (m_i - n_i \rho_i) / \sqrt{n_i \rho_i q_i}$, т.е. функция (2) в этом случае представлена в виде суммы нормальных законов

$$\rho(x) = \sum_{i=1}^K S_i \frac{1}{\sqrt{2\pi} \sigma_i} e^{-\frac{(x - M_i)^2}{2\sigma_i^2}}, \quad (3)$$

где $S_1 + S_2 + \dots + S_K = 1$. Величины S_i выполняют роль весовых коэффициентов.

Аналогично из формулы (2) можно получить многомодальную кривую в виде суммы кривых Пирсона III типа

$$\rho(x) = \sum_{i=1}^K S_i \frac{\tau_i^{\tau_i}}{\Gamma(\tau_i)} e^{-\tau_i x} x^{\tau_i - 1}. \quad (4)$$

Если эта кривая сдвинута относительно начала координат, то формула (4) приобретает более общий вид:

$$\rho(x) = \sum_{i=1}^K S_i \frac{\tau_i^{\tau_i}}{\Gamma(\tau_i)} e^{-\tau_i (x - \beta_i)} (x - \beta_i)^{\tau_i - 1}. \quad (5)$$

Естественно, на нее наложено условие $x - \beta_i \geq 0$. В противном случае $\rho(x) = 0$.

При $K = 2$ получаем двухмодальную кривую [1], пригодную для описания некоторого класса гистограмм продолжительности цикла регулирования.

На функцию (2) можно наложить также требования о том, чтобы отдельные группы генетически разнородных событий стремились

к различным законам распределения. В этом случае функция (2) принимает вид

$$\rho(x) = \sum_{i=1}^K f_i(x) .$$

Примером тому может служить двухмодальная кривая вида

$$\rho(x) = S_1 \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} e^{-\frac{(x-m)^2}{2\sigma^2}} + S_2 \frac{x^r}{\Gamma(r)} e^{-rx} x^{r-1}, \quad (6)$$

состоящая из нормального закона распределения и кривой Пирсона III типа.

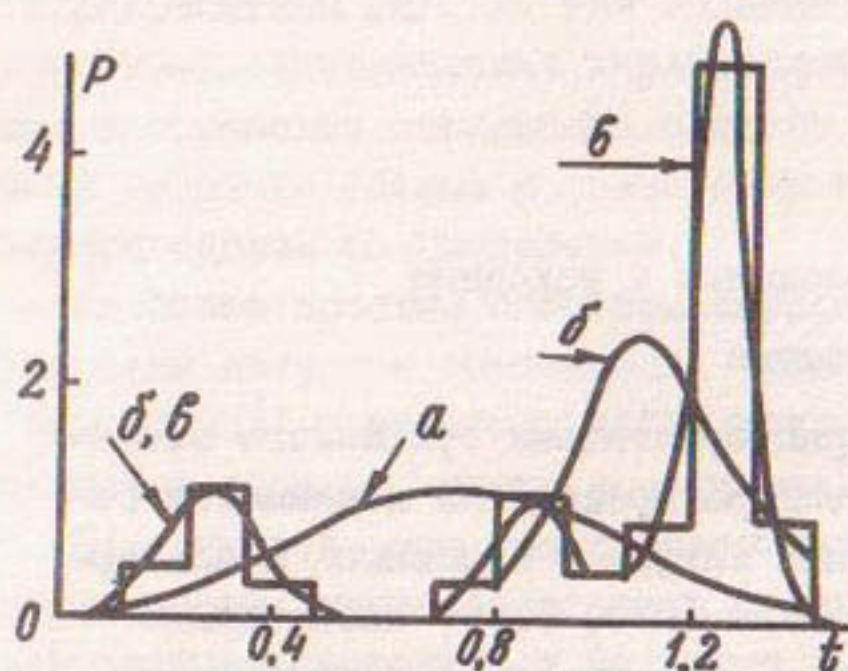
Рассмотренные кривые – это многопараметрические функции. Существует несколько способов определения их параметров. Наиболее простой – это метод моментов, суть которого в том, что составляется система уравнений на основе формул моментов, равная числу определяемых параметров. Это довольно строгий математический прием. Основной его недостаток в том, что на коротких рядах [3] (а гидрологические ряды являются именно такими) моменты высших порядков определяются с недостаточной точностью, что может внести в многопараметрическую функцию существенное искажение [1].

Следующий способ заключается в том, что множество случайных величин разбивается на генетически однородные подмножества и каждая из таких групп описывается одномодальной кривой. Здесь при аппроксимации гистограмм каждой из таких групп не возникает принципиальных трудностей. Центр тяжести в этом случае переносится на способ разбиения исходного статистического материала на генетически однородные группы.

Возможен также способ определения неизвестных параметров путем сокращения их числа с использованием некоторых связей между ними, а также некоторых допущений, например, минимума потери информации [1]. Оставшиеся параметры определяются первым способом, т.е. методом моментов.

Полученные многомодальные кривые являются весьма универсальными. Они могут описывать довольно сложные генетически разнообразные процессы речного стока и гидролого-водохозяйственные характеристики. На рисунке приведен пример такой аппроксимации гистограмм продолжительности цикла регулирования р.Зей одномодальной (а), двухмодальной (б) и трехмодальной (в) плотностями

ми распределения вероятностей. Из графика видно, что употребляемая в практике водохозяйственного проектирования одно-модальная кривая Пирсона III типа аппроксимирует гистограммы та-



Аппроксимация гистограммы продолжительности цикла регулирования р. Зеи: а — одномодальная; б — двухмодальная; в — трехмодальная кривая

кого типа весьма приближенно, внося тем самым существенные погрешности в алгоритмы расчетов регулирования речного стока. Значительно лучше аппроксимирует эти гистограммы предложенная ранее [1] двухмодальная кривая (б) и совсем хорошо это можно осуществить с помощью трехмодальной кривой (в). Для практических расчетов, связанных с расчетами регулирования речного стока, по-видимому, вполне достаточно будет трехмодальных кривых. В общем же случае, при комплексном использовании водных ресурсов системой водохранилищ, вероятно, придется использовать многомодальные кривые вида (5) или смешанного типа, ибо простые одномодальные кривые не всегда с достаточной точностью аппроксимируют исходные гистограммы. Задачей дальнейших исследований является выявление степени влияния многомодальных кривых на параметры регулирования.

Литература

1. Гнеденко Б.В. Курс теории вероятностей. — М.: Наука, 1965. — 406с.
2. Крамер Г. Математические методы статистики. — М., 1949. — 632с.
3. Чокан Ш.Ч., Григорьев В.А., Редькин В.К. Методика расчета регулирования стока. — Алма-Ата: Наука, 1977. — 300с.

К ВОПРОСУ ПОСТРОЕНИЯ ВОДНОЭКОНОМИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ОРОШЕНИЯ ДЛЯ УСЛОВИЙ СЕВЕРНОГО КАЗАХСТАНА

В.П.Павленко
КазНИИЭ

1. Методические положения и исходные предпосылки

Под водноэкономическими характеристиками орошаемого земледелия в задачах оптимального водораспределения понимается зависимость приведенных расчетных затрат в основные и альтернативные (замещающие) мероприятия (P_{30} , $P_{3з}$), необходимые для производства заданного объема продукции (определенного состава и качества) от величины используемых водных ресурсов [1]:

$$P_{3\rho} = P_{30}(W_0, \Pi_0) + \sum_{i=1}^n P_{3zi}(W_{zi}, \Pi_{zi}) + M[Y(W_0)] \quad (1)$$

при $\Pi = \Pi_0 + \Pi_z$, $[i = (\overline{1, n})]$.

Здесь $P_{30}(W_0, \Pi_0)$ - затраты в основные мероприятия, необходимые для зарегулирования использования местных водных ресурсов;
 $\sum_{i=1}^n P_{3zi}(W_{zi}, \Pi_{zi})$ - затраты в замещающий (альтернативный) вариант получения недостающего объема продукции:

- за счет орошения площадей из других водоисточников;
- за счет получения той же продукции в других районах страны безводным технологическим способом;

$M[Y(W_0)]$ - математическое ожидание ущербов основного варианта за пределами расчетной обеспеченности за счет гидрологической изменчивости речного стока, т.е. дополнительные затраты, необходимые для выполнения заданных объемов продукции при ограниченной водоподаче.

Одним из возможных путей построения водноэкономической характеристики в орошаемом земледелии является определение замыкающих удельных расчетных оценок на производство единицы

заданного вида продукции или замыкающих оценок водных ресурсов.

Для некоторых сельскохозяйственных культур такие показатели разработаны [2], но для большинства из них получение необходимых экономических характеристик затруднительно, так как в орошаемом земледелии следует учитывать не только величину годового объема используемых водных ресурсов, но и его внутригодовое распределение.

Наиболее простым способом определения экономических характеристик является компенсация водопотребления с помощью "внутренних" замещающих вариантов: получение недостающего количества воды из других источников.

Если учесть, что капиталовложения в ирригацию состоят из двух частей: капиталовложения на ирригационное и сельскохозяйственное освоение, а издержки в свою очередь слагаются из издержек по оросительной системе и отдельно по сельхозпредприятиям-потребителям оросительной воды, расчетные затраты будут равны

$$PZ_{np}^{up} = E(K_{up} + K_{с/х}) + (I_{op} + I_{с/х}) + M(y) \quad (2)$$

Здесь PZ_{np}^{up} - приведенные суммарные расчетные затраты на орошение; $K_{up}, K_{с/х}$ - капитальные вложения на ирригацию и сельскохозяйственное освоение (руб/га); $I_{op}, I_{с/х}$ - суммарные ежегодные издержки по оросительной системе и сельхозпредприятиям; $M(y)$ - математическое ожидание ущерба.

Капиталовложения на ирригацию слагаются из капиталовложений в водозаборные сооружения ($K_{вдз}$), магистральный канал ($K_{мк}$), насосные станции ($K_{нс}$) и распределительную сеть (K_p), т.е.

$$K_{up} = K_{вдз} + K_{мк} + K_{нс} + K_p$$

Величина $K_{с/х}$ состоит из капиталовложений на подготовку земель к орошению (K_n) и на устройство дренажной сети (K_d), то есть $K_{с/х} = K_n + K_d$.

Математическое ожидание ущерба определяется по следующей формуле:

$$M(y) = \int_{W_d}^{W_g} y_{ср}(W_d) [1 - \rho(W_d)] dW_d$$

Здесь W_d - объем дефицита; $\alpha(1-\rho)$ - математическое ожидание объема дефицита за пределами расчетной обеспеченности

[3]; a - параметр кривой продолжительности ρ_g в зоне дефицита ($\rho_g - (1-\rho)W_g/a$). Используя уравнение (I), с учетом (2) запишем целевую функцию водноэкономической характеристики орошаемого земледелия:

$$\rho z_{np}^{op}(W) = \rho z_o^{op}(W_o) + \rho z_z^{op}(W_z) + M(y) \quad (3)$$

или в развернутом виде

$$\begin{aligned} \rho z_{np}^{op}(W) = & [(EK_{up.o} + EK_{сфх.o}) + (I_{op.o} + I_{сфх.o})](W_o) + \\ & + [(EK_{up.z} + EK_{сфх.z}) + (I_{op.z} + I_{сфх.z})](W_z) + \int_{W_o}^W y_{ср}(W_g) \times \\ & \times [1 - \rho(W_g)] dW_g; \text{ при } \Pi = \Pi_o + \Pi_z; W = W_o + W_z. \end{aligned} \quad (4)$$

Здесь ρz_o^{op} - расчетные затраты в основной вариант орошения;

ρz_z^{op} - то же, в альтернативный (замещающий) вариант;

K_o^{op}, K_z^{op} - капитальные вложения в основной и замещающий варианты орошения; I_o, I_z - соответственно издержки по вариантам.

Полученная функция (4) представляет собой водноэкономическую характеристику для орошаемого земледелия. Как видно, она эквивалентизирует большое количество технико-экономических показателей основного и альтернативного способов получения заданного объема продукции.

Таким образом, для построения эквивалентной водноэкономической характеристики орошаемого земледелия нужно иметь:

- 1) данные о наличии местных водных ресурсов;
- 2) водопотребление местных оросительных систем, необходимое для получения заданного объема продукции;
- 3) удельные затраты на освоение местных и привлекаемых извне водных ресурсов;
- 4) технико-экономические показатели гидротехнических сооружений (ГЭС, насосных станций, магистральных и распределительных каналов и др.);
- 5) удельные затраты на получение единицы продукции по основному и замещающему вариантам.

Для орошения, связанного с водоподачей по каналу переброски, рассматриваются следующие альтернативные варианты.

а) Орошение тех же площадей, в тех же районах, но из других водоисточников. В том случае, когда местные водные ресурсы ис-

черпаны, возникает необходимость в переброске стока, в качестве замещающих используется замыкающий источник (дополнительное зарегулирование стока, подземные воды, опреснение соленых вод).

б) Орошение эквивалентных площадей для тех же культур в других районах страны.

В этом случае варианты могут отличаться по затратам на сельскохозяйственное освоение.

Задача ставится следующим образом: при заданном объеме водопотребления ($W_{пот}$) для рассматриваемого водохозяйственного района найти оптимальное соотношение использования местных водных ресурсов (W_M) и переброски стока (W_K) для получения заданного объема продукции (Π_o). Распределение воды между культурами и площадями считаем заданным.

Пусть $\rho_{3_1}(W_M)$ и $\rho_{3_2}(W_K)$ расчетные затраты от использования W_M и W_K для получения Π_o . Тогда математически задача может быть сформулирована так. Необходимо минимизировать целевую функцию

$$\rho_{3_1}(W_M, \Pi_M) + \rho_{3_2}(W_K, \Pi_K) + MY \rightarrow \min \quad (5)$$

при следующих ограничениях ее элементов:

$$\left. \begin{aligned} W_M + W_K &= W_{пот} \\ 0 &\leq W_M \leq W^H \\ 0 &\leq W_K \leq W_{пот} \\ \Pi_M + \Pi_K &= \Pi_o \end{aligned} \right\} ,$$

где W^H — максимальная отдача нетто из водохранилища при заданной обеспеченности (ρ) и физическом пределе регулирования; $\rho_{3_1}(W_M, \Pi_M)$, $\rho_{3_2}(W_K, \Pi_K)$ — расчетные затраты соответственно на использование местных и привлекаемых водных ресурсов.

Причем величина $\rho_{3_1}(W_M, \Pi_M)$ отражает в основном затраты на создание новых и увеличение объема существующих водохранилищ $\rho_{3_{гy}}(W_M, W^H)$ и вспомогательных объектов, а именно: насосных станций $\rho_{3_{нс}}^H$, распределительных каналов $\rho_{3_{pc}}$ и др., т.е.

$$\rho_{3_1}(W_M, \Pi_M) = \rho_{3_{гy}}(W_M, W^H) + \rho_{3_{нс}}(W_M, H_M) + \rho_{3_{pc}}(W_M, L_M) . \quad (6)$$

Другая составляющая выражения (4) $\rho z_2(W_K, \Pi_K)$ содержит удельные затраты на 1 м³ воды в створе водозабора из магистрального канала переброски плюс затраты на создание и эксплуатацию подводящих и распределительных каналов:

$$\rho z_2(W_K, \Pi_K) = S \cdot W_K + \rho z_K^{nc}(W_K, H_K) + \rho z_{pc.k}(W_K), \quad (7)$$

где S – затраты на 1 м³ привлекаемой воды.

Как показывает соответствующий анализ водопотребления рассматриваемого района (Северо-Казахстанской, Кокчетавской, Кустанайской, Актюбинской и Тургайской областей), значительная доля падает на орошаемое земледелие, а на все остальные компоненты приходится около 10% от общего потребления воды. Поэтому считаем, что существующие гидроузлы имеют ирригационное назначение.

Величина зарегулированной отдачи нетто определяется по формуле

$$\alpha_H = \alpha_{бр} - \alpha_{пот},$$

где $\alpha_{бр}$ – отдача брутто, устанавливаемая по эмпирической зависимости С.И.Рыбкина [4]

$$\alpha_{бр} = 1 - \frac{a_1 C_V^2}{\beta + a_2 C_V^2},$$

а потери воды на испарение водохранилища – $\alpha_{пот}$ определяются из выражения [5]

$$\alpha_{пот} = S_0 H / \bar{W},$$

где S_0 – площадь водного зеркала; H – слой испарения; $\bar{W}$ – норма стока.

С учетом известного выражения описания топографической характеристики водохранилища $V = c H^m$ потери из водохранилища составят:

$$\alpha_{пот} = m \sqrt[m]{\frac{c}{\bar{W}}} [(0,6 + \mu) \cdot \beta]^{1 - \frac{1}{m}} \cdot H.$$

Здесь μ – доля мертвого объема водохранилища.

Расчетные затраты на строительство гидроузлов находим по зависимости, построенной путем обобщения опыта проектирования свыше сорока существующих и запроектированных гидроузлов Казахстана и Средней Азии [6]. Получены кривые для определения

расчетных затрат по малым ($V < 1$ млрд.м³) и большим ($V > 1$ млрд.м³) водохранилищам в аналитической форме. Так, при $\varepsilon = 0,12$ зависимости для рассматриваемых кривых имеют вид:

$$\begin{aligned}\psi_1(V) &= (0,12 + \rho) \cdot 8,25 \cdot V^{0,82} \\ \psi_2(V) &= (0,12 + \rho) \cdot 11,07 \cdot V^{0,74},\end{aligned}$$

где ρ - принимает значения 0,04+0,08; V - объем водохранилища (в млн.м³).

На основе зависимости (5) и с учетом уравнений (6) и (7) расчетным путем определены водноэкономические характеристики орошения Северо-Казахстанской, Кокчетавской, Тургайской, Кустанайской и Актыбинской областей. Необходимая исходная информация приведена в табл. I.

Таблица I

Исходные данные для определения
максимальной отдачи нетто из водохранилища

Водохранилище	C	m	C _V	I _M	K, %	P, %	Объем водохранилища W ₃ млн.м ³
Сергеевское на р. Ишим в Северо-Казахстанской области	0,59	2,08	1,1	0,75	0,1	95	641
Верхнетобольское на р.Тобол в Кустанайской области	0,13	2,75	1,0	0,9	0,1	95	208
Каратомарское на р.Аят в Кустанайской области	0,6	2,77	0,94	0,8	0,1	95	455
Есильское на р. Ишим в Тургайской области	0,02	3,57	1,1	0,85	0,1	95	367
Чаглинское на р.Чаглинка в Кокчетавской области	0,09	2,40	1,07	0,90	0,1	95	370
Карагалинское на р.Карагалы в Актыбинской области	0,12	3,10	1,3	0,70	0,1	95	178

Таблица 2

Степень использования водных ресурсов

Водохранилище	Водопо- требле- ние $W_{пот}$, млн. м ³	Норма стока, W , млн. м ³	Удель- ная сто- имость воды Σ , коп./м ³	Отда- ча в до- лях α	Отда- ча в млн. м ³	Многолет- нее, млн. м ³	Местные водные ресурсы W_m , млн. м ³	Объем переб- роски W_k , млн. м ³	ΣP_{Σ} , млн. руб.	Удель- ные расчет- ные за- траты, коп./м ³
Есильское (Тур- гайская область)	808	367	5	0,393	144	1059	142	666	125,8	15
Сергеевское (Северо-Казах- станская область)	700	641	5	0,561	359,6	3867	341	359	75,12	10
Карагалинское	1115	178	5	0,308	54,8	593	51	1064	192,8	17
Верхнетобольское (Кустанайская область)	2180	208	5	0,487	101,2	726	99	2081	463,4	21,2
Каратомирское (Актюбинская область)	2180	455	5	0,459	208,8	1288	205	1975	410	18

В качестве альтернативного варианта принимаем переброску стока сибирских рек в Казахстан и Среднюю Азию. Результаты расчетов сведены в табл.2.

По расчетным данным построены водноэкономические характеристики для рассматриваемых водохозяйственных районов (см. рис.1-5).

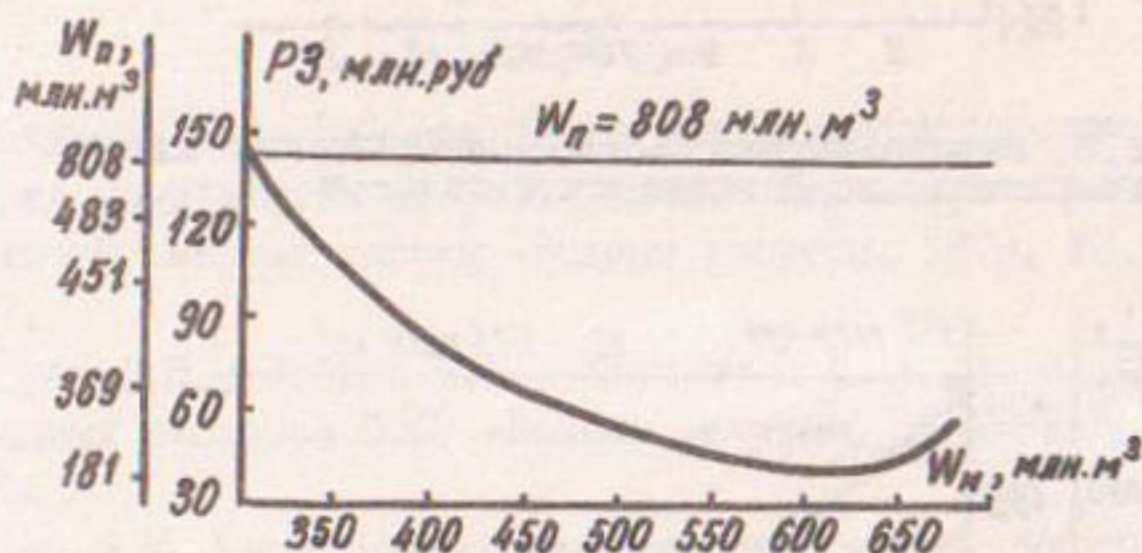


Рис.1. Эквивалентная водноэкономическая характеристика по Тургайской области

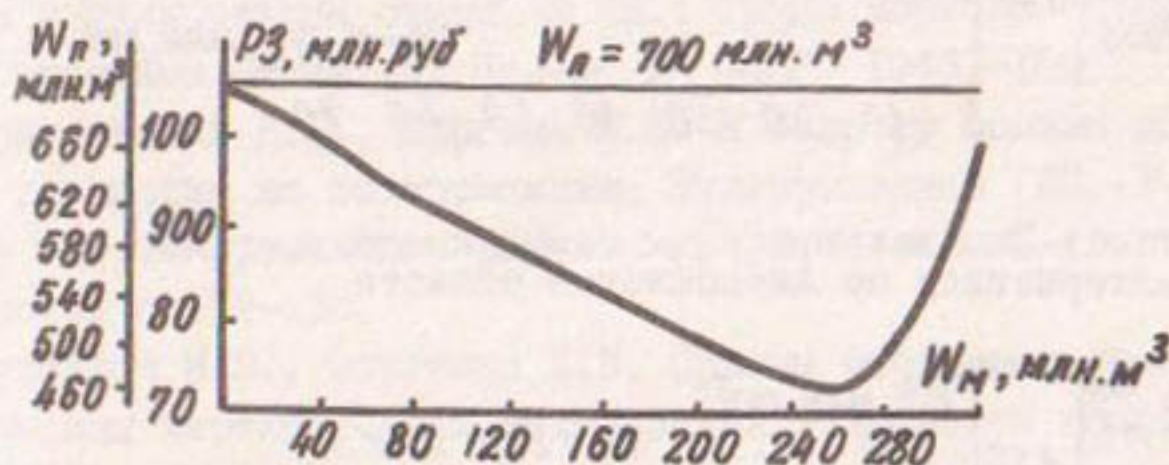


Рис.2. Эквивалентная водноэкономическая характеристика по Северо-Казахстанской области

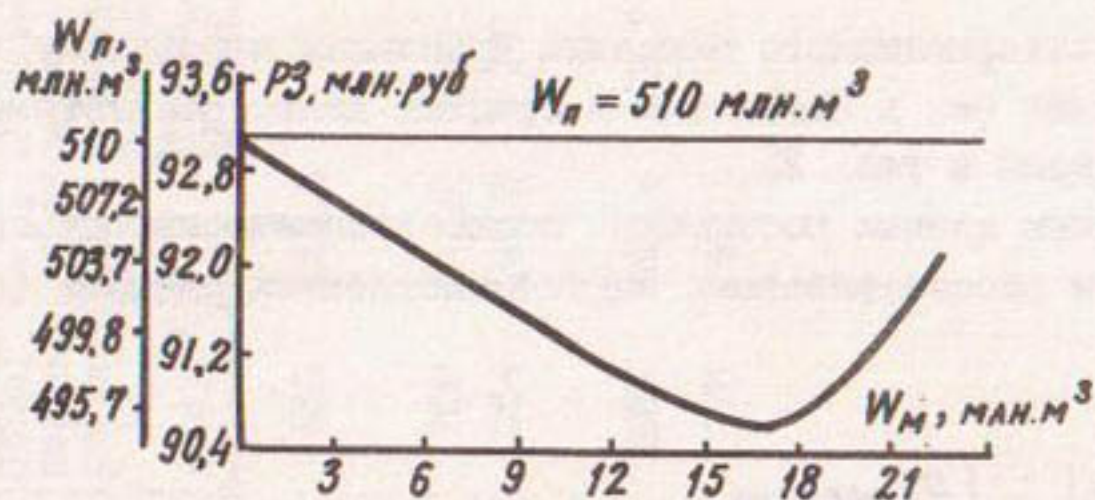


Рис.3. Эквивалентная водноэкономическая характеристика по Кокчетавской области

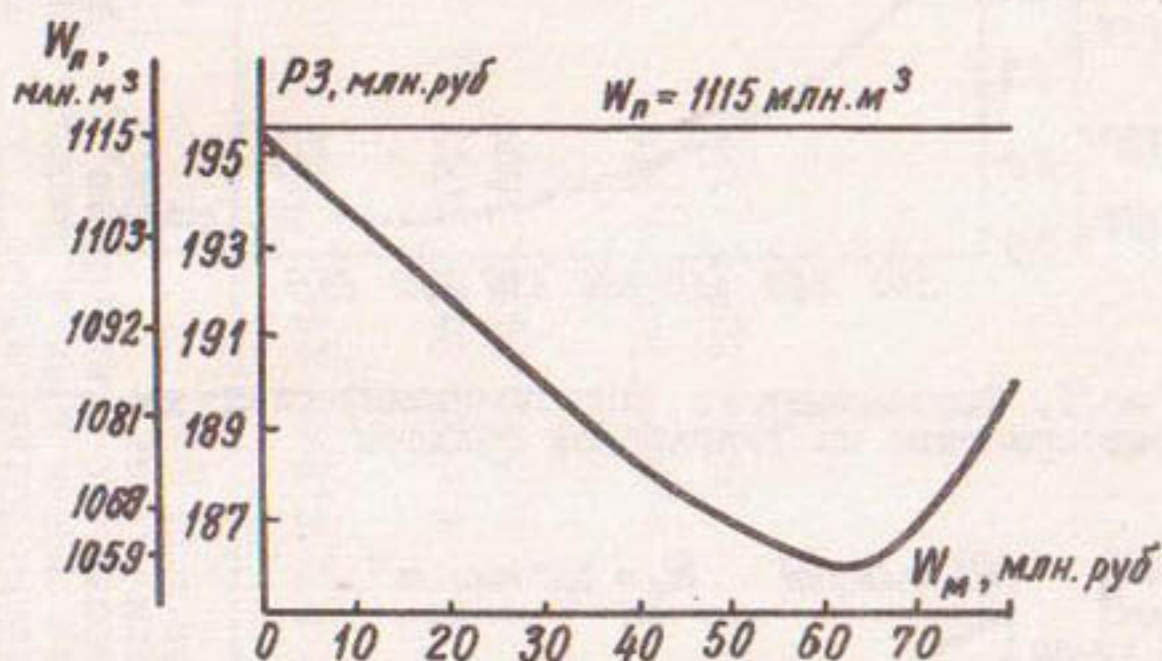


Рис.4. Эквивалентная водноэкономическая характеристика по Актобинской области

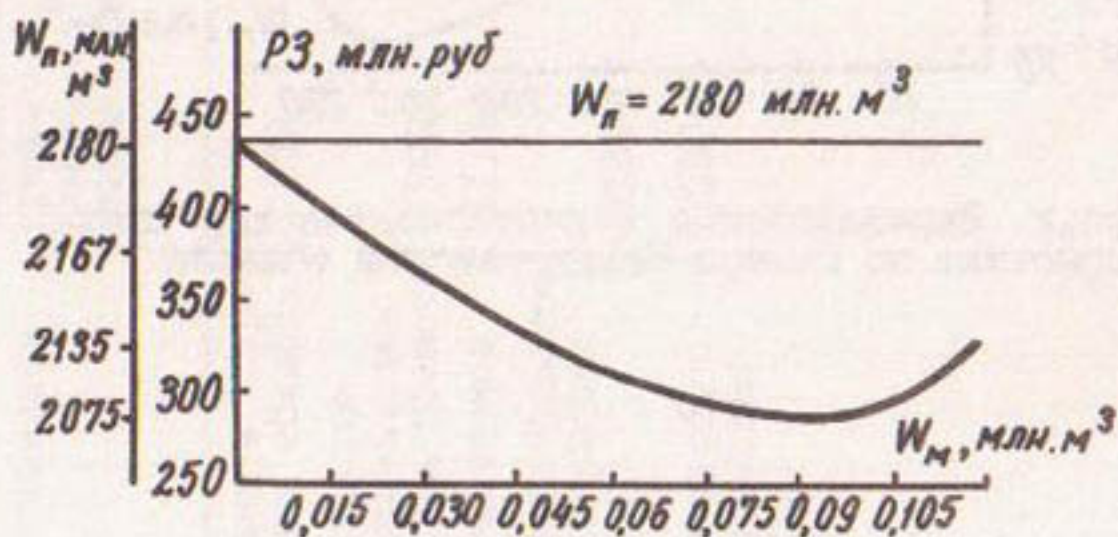


Рис.5. Эквивалентная водноэкономическая характеристика по Кустанайской области

Анализ полученных результатов показывает, что с высокой гарантией (75-95%) возможно использовать не более 50% среднегодового местного стока, а преимущественно - около 30-40%. Водохранилища при этом получают достаточно емкими, примерно 2-3 нормы стока. Недостающий объем стока для покрытия заданного водопотребления предусматривается привлекать из тракта переброски.

Литература

1. Бестужева К.Н. Вопросы построения водноэкономических характеристик компонентов при оптимизации параметров комплексных водохозяйственных систем.-Водные ресурсы, 1973, №5, с.184-187.

2. Егоров А.Н., Забина Л.Н., Иванова В.П. и др. Замыкающие оценки водных ресурсов СССР.-Водные ресурсы, 1973, № 5, с. 198-204.

3. Чокин Ш.Ч. Расчетная обеспеченность работы гидроэлектростанций.-Алма-Ата: Наука, 1958.-269с.

4. Рыбкин С.И. Метод расчета на основе теории вероятностей основных водохозяйственных характеристик водохранилищ при многолетнем регулировании стока.-В кн.: Труды Первого совещания по регулированию стока.-М.:Изд-во АН СССР, 1946.-150с.

5. Браславский А.П., Шергина К.Б. К вопросу оценки потерь воды на испарение из водохранилища Бухтарминской ГЭС.-В кн.: Проблемы гидроэнергетики и водного хозяйства.-Алма-Ата: Наука, 1967, вып.5, с.112-118.

6. Бусалаев И.В., Сергеева Л.В. Приемы обобщения технико-экономических характеристик комплексных гидроузлов по проектным данным. - Там же, с. 37 - 46.

ПРОЕКТНЫЕ МЕТОДЫ РАСЧЕТА ГАРАНТИРОВАННОЙ ВОДО-И ЭНЕРГООТДАЧИ ГИДРОУЗЛОВ

А.Е.Асарин
Гидропроект

Реализация Энергетической программы, Продовольственной программы и Долговременной программы мелиорации связана со строительством гидроузлов с водохранилищами как на частично освоенных реках, так и в труднодоступных районах, где будут создаваться пионерные водохранилища. Для выбора параметров гидроузлов, корректной оценки их водохозяйственного и энергетического эффекта необходимо дальнейшее развитие и совершенствование теории регулирования речного стока и практических расчетных приемов. В частности, более четкого ответа требует вопрос выбора рационального метода расчета многолетнего регулирования стока водохранилищем или системой водохранилищ.

Формально водохранилище осуществляет многолетнее регулирование стока тогда, когда его гарантированная отдача превышает годовой сток, обеспеченность которого равна обеспеченности отдачи, т.е. $\beta_{mn} > 0$, если $\alpha_p > K_p$, где β_{mn} — многолетняя составляющая полезной емкости в долях среднего многолетнего стока $\bar{X}$; α_p — гарантированная водоотдача в долях среднего многолетнего стока, имеющая обеспеченность ρ по числу бесперебойных лет; K_p — модульный коэффициент или отношение годового стока X_p обеспеченностью ρ к среднему многолетнему стоку.

При работе водохранилища в режиме компенсации незарегулированного стока притока, выпадающего в реку ниже гидроузла, или отдачи других водохранилищ каскада или водохозяйственной системы параметры регулирования стока не всегда могут быть определены или заданы однозначно. Так, и одиночное водохранилище, и каскад водохранилищ могут осуществлять регулирование стока для обеспечения заданного расхода или уровня воды в створе, расположенном много ниже створа нижнего гидроузла каскада.

При этом боковая приточность между створом нижнего водохранилищного гидроузла и створом, в котором заданы требования к расходам (или уровням) воды, может быть сопоставимой, а иногда и превосходить объем стока, контролируемого водохранилищами.

Расчетная величина гарантированной водоотдачи каскада или ее прирост при вводе нового объекта, т.е. при увеличении суммарной регулирующей емкости, будет существенно зависеть от принятого в расчет среднего многолетнего стока, по отношению к которому определяется коэффициент регулирования стока α или относительная регулирующая емкость β .

Например, суммарная полезная емкость водохранилищ Иркутской (озеро Байкал) и Братской ГЭС, равная 94 км^3 , составляет 102% среднего годового стока Ангары в створе Братского гидроузла и около 50% нормы стока Енисея у г. Енисейска, где регламентирован навигационный расход, обеспечиваемый в маловодные годы за счет сработки ангарских водохранилищ. Суммарная полезная емкость водохранилищ ГЭС Куринского каскада (Мингечаурская и Шамхорская ГЭС), равная $8,8 \text{ км}^3$, или 70% среднего многолетнего стока Куры у Мингечаура ($12,6 \text{ км}^3$), теоретически обеспечивает близкий к предельному коэффициент регулирования стока ($\alpha = 0,9$ при обеспеченности отдачи $P=90\%$). Дальнейшее развитие емкости практически не увеличивает отдачи. Однако к водоотдаче куринских водохранилищ предъявляют требования также и ирригационные системы, частично питаемые водой Аракса — крупнейшего притока Куры, и рыбное хозяйство нижнего течения Куры. Если суммарный полезный объем куринских водохранилищ отнести к среднему годовому стоку реки в створе, расположенном ниже устья Аракса, то он, даже в сумме с полезной емкостью водохранилищ на Араксе, сократится с 70 до 36%, а соответствующий коэффициент регулирования стока уменьшится до

$\alpha = 0,75$. При этом увеличение суммарной емкости водохранилищ в бассейне Куры, например, путем строительства Кирзанской и Алазанской ГЭС с суммарным полезным объемом водохранилищ $1,7 \text{ км}^3$ дает теоретический прирост гарантированной водоотдачи на $1,3 \text{ км}^3$. Расчетная водоотдача куринских водохранилищ

также существенно изменится, если определять ее применительно не к естественному стоку, а к располагаемым водным ресурсам, т.е. стоку, уменьшенному безвозвратным водопотреблением в верхней части бассейна Куры и в бассейне Аракса.

Таким образом, и относительные (в долях среднего многолетнего стока), и абсолютные показатели регулирования стока несколькими водохранилищами – регулирующая емкость и коэффициент регулирования стока или водоотдача – обобщенным способом не всегда могут быть определены однозначно.

Показатель надежности водоотдачи – обеспеченность (обычно по числу бесперебойных лет, а иногда по продолжительности, т.е. по доле времени в расчетном многолетнем ряду, в течение которого расчетная потребность полностью удовлетворяется) задается в соответствии с ответственностью использующих воду отраслей хозяйства. При этом, к сожалению, далеко не всегда регламентируются или хотя бы вариантно рассматриваются требования к водоотдаче, естественно, меньше нормальной, за пределами расчетной обеспеченности, т.е. в переребойные годы. Между тем такая регламентация имеет большое значение, ибо позволяет избежать глубоких перебоев водообеспечения участников водохозяйственного комплекса в закритических условиях. Ведь если вслед за маловодным периодом, в течение которого был полностью исчерпан запас воды в водохранилище с расчетной отдачей обеспеченностью 75 %, наступит крайне маловодный год (обеспеченность 95%), то потребитель получит лишь незначительную часть гарантированной отдачи. Снижение годовой водоподачи в таком случае в зависимости от коэффициента регулирования стока α и изменчивости годового стока C_v может составить:

Таблица I

Коэффициент регулирования стока α	Уменьшение отдачи в % от гарантированной при коэффициенте изменчивости C_v				
	0,6	0,7	0,8	0,9	1,0
0,6	57	70	80	87	92
0,7	63	74	83	89	93
0,8	68	78	85	90	94
0,9	71	80	87	91	95

Во избежание столь значительного снижения отдачи, падающей до 40–5% нормального годового объема с полным прекращением водоподачи в отдельные месяцы на реках с высокой внутригодовой неравномерностью водности, устанавливаются диспетчерские правила работы водохранилища. Эти правила предусматривают постепенное уменьшение водоотдачи по мере сокращения запаса воды в водохранилище. Это уменьшение, обычно на 10, 15, 20, 25 и 30%, а иногда сразу на 20 или 25%, позволяет предотвратить либо сделать чрезвычайно редкими глубокие перебои, возможные при работе водохранилища с постоянной водоотдачей вплоть до полной сработки всей регулирующей емкости.

Предоставление потребителям регламентированного количества воды за пределами расчетной обеспеченности возможно либо за счет увеличиваемой для этого регулирующей емкости, либо, при заданной емкости водохранилища, за счет снижения расчетной водоотдачи, гарантированной с нормативной обеспеченностью.

Практический прием, позволяющий оценивать обобщенным способом дополнительную емкость, необходимую для поддержания сниженной отдачи за пределами расчетной обеспеченности, может быть разработан на основе приближенной формулы С.Н.Крицкого и М.Ф.Менкеля для определения так называемой "приведенной обеспеченности" [1]:

$$\rho_{пр} = \rho_{норм} + \frac{A_{сн}}{A_{норм}} (\rho_{сн} - \rho_{норм}),$$

где $\rho_{пр}$ – приведенная обеспеченность; $\rho_{норм}$ – обеспеченность нормальной отдачи; $\rho_{сн}$ – обеспеченность сниженной отдачи;

$A_{норм}$ – нормальная отдача; $A_{сн}$ – сниженная отдача.

В зависимости от заданных или выбираемых условий регулирования стока в части размеров сниженной водоотдачи $A_{сн}$ за пределами обеспеченности $\rho_{норм}$, которой гарантируется нормальная отдача $A_{норм}$, приведенная обеспеченность $\rho_{пр}$ изменяется следующим образом:

Таблица 2

Допустимое снижение отдачи $\frac{A_{норм} - A_{сн}}{A_{норм}} \cdot 100\%$	Приведенная обеспеченность отдачи $P_{кр}$ (%)			
	при $P_{норм}$ и $P_{сн}$			
	75-95	80-95	85-95	95-99
10	93	93,5	94	98,6
20	91	92	93	98,2
30	89	90,5	92	97,8
40	87	89	91	97,4
50	85	87,5	90	97,0

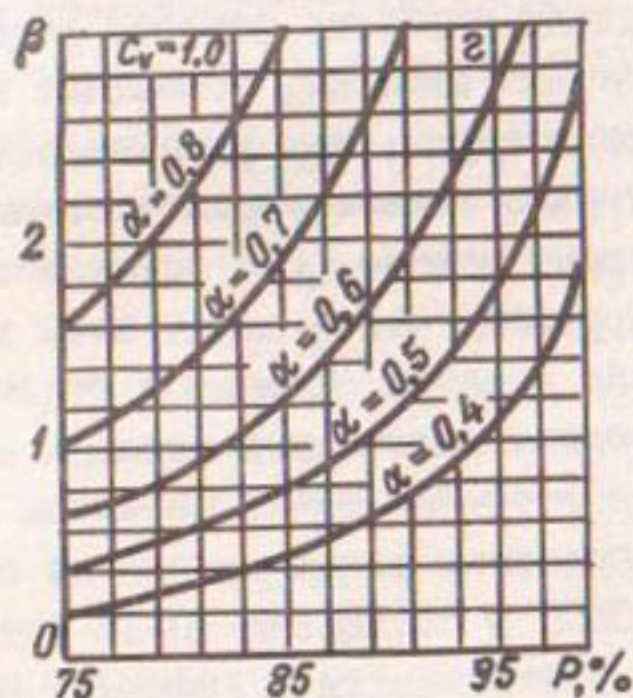
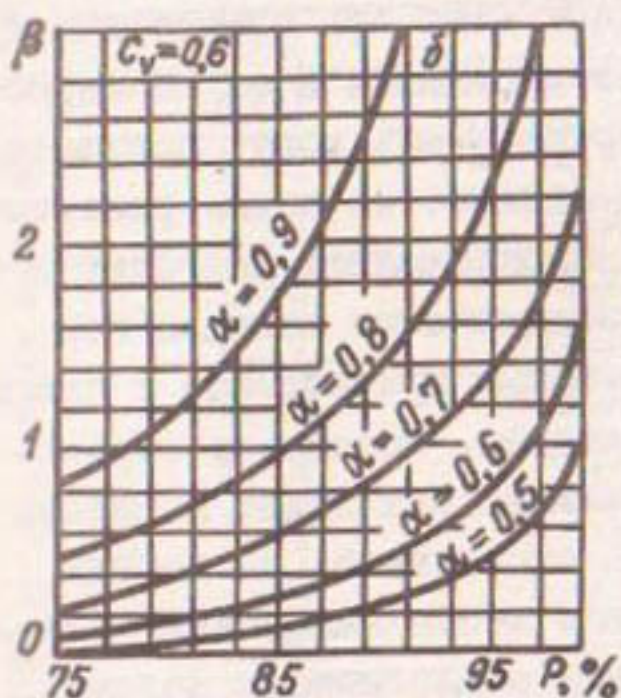
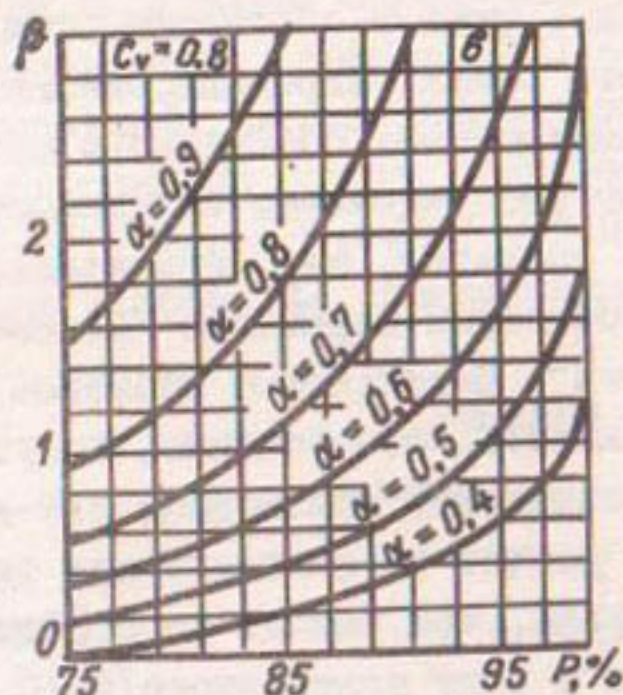
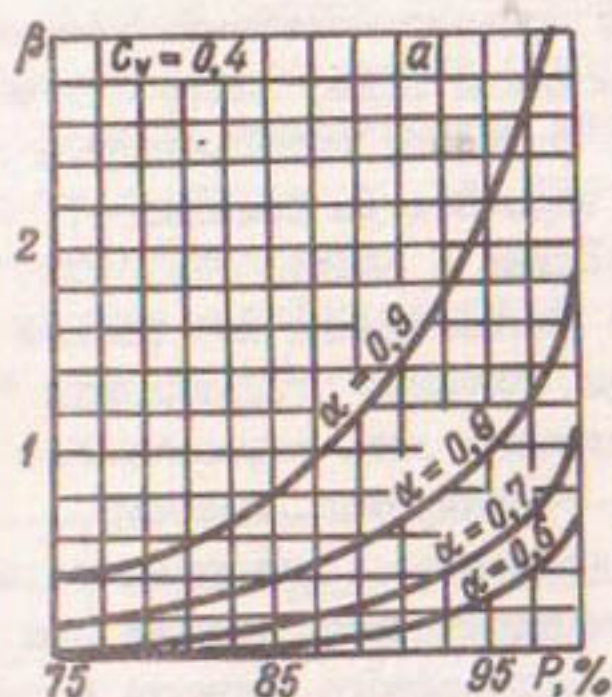
Переход к высокой (приведенной) обеспеченности отдачи приводит к увеличению многолетней составляющей емкости и соответствующему увеличению полезной и полной емкости водохранилища.

Расчеты показывают, что для подачи на орошение (обеспеченность нормальной отдачи 75%) в перебойные годы (обеспеченность подачи 76-95%) хотя бы половины нормального объема воды, т.е.

$A_{сн} = 0,5 A_{норм}$ при повышенных, но достаточно распространенных значениях коэффициента изменчивости годового стока C_v от 0,6 до 1,0 полезная емкость водохранилища $V_{пол}$ должна быть увеличена на 60-70%. Для повышения за пределами расчетной обеспеченности сниженной отдачи $A_{сн}$ до 70-80% нормальной отдачи $A_{норм}$ требуется еще большая регулирующая емкость. Значительного увеличения полезной емкости требует и сохранение сниженной отдачи на водоснабжение в диапазоне обеспеченностей 95-99%, что иллюстрируют графики на рисунке. На них приведена зависимость многолетней составляющей полезной емкости водохранилища β от относительной отдачи α и ее обеспеченности ρ при закреплённом значении коэффициента изменчивости годового стока C_v и коэффициенте корреляции между стоком смежных лет $\gamma = 0,3$.

При проектировании пионерных (одиночных) водохранилищ выбор их параметров целесообразно проводить на основании обобщенных расчетов, позволяющих быстро получить зависимость водоотдачи (а если нужно, и энергоотдачи)^х от емкости водохра-

^х) С помощью номограмм для вычисления коэффициента энергетического использования стока [2].



Номограммы для определения многолетней составляющей полезной емкости водохранилища

нилища или подпорной отметки и отметки сработки. После выбора параметров использования стока (полная и полезная емкость водохранилища, НПУ, нормальная и сниженная водо-или энергоотдача) следует выполнять расчеты по многолетнему ряду. Эти расчеты имеют целью выработать правила регулирования стока, проверить надежность функционирования гидроузла при принятых параметрах и диспетчерских правилах работы водохранилища, а также построить многолетние характеристики режима работы ус-

тановки — кривые обеспеченности или продолжительности уровней верхнего бьефа, зарегулированных расходов воды, напоров и т.п.

Преимуществом обобщенного метода расчета, использующего параметры распределения вероятностей годового (и сезонного) стока, является, как справедливо указано в работе [3], учет всех возможных вариантов "взаимного расположения лет разной водности". Календарные стоковые ряды, имеющие ограниченную длительность, естественно, могут включать лишь ограниченное число сочетаний маловодных лет и их группировок. Поэтому обычно расчет по многолетнему ряду дает более оптимистические результаты, чем расчет по обобщенным параметрам. Однако при наличии в ряду длительного (5–10 лет) маловодного периода могут выявляться глубокие перебои водостдачи даже при существенной многолетней емкости. Отношение проектировщиков к таким перебо-ям, при которых, как указывалось, потребитель может получать существенно меньшее гарантированного количества воды, различно. Существует мнение, что оставлять в водохранилище многолетнего регулирования стока запас воды для поддержания сначала нор-мальной, а затем сниженной отдачи в такие критические и сверх-критические маловодные периоды не следует, поскольку вероят-ность повторения таких периодов невелика. Как будет показано ниже, подобная точка зрения не очень обоснована: на многих реках СССР в последние 10–15 лет имело место маловодье, близ-кое по длительности и дефициту стока к аналогичному явлению, отмечавшемуся в 1930-е годы.

Вероятность возникновения маловодного периода длительностью n лет может быть определена с помощью известной зависимости, связывающей стандарт суммы из n членов простой цепи Маркова или коэффициент изменчивости стока n -летия (C_{V_n}) со стандартом или изменчивостью годового стока (C_V) и коэффи-циентом корреляции между стоком смежных лет z [4]:

$$C_{V_n} = \frac{C_V}{\sqrt{n}} \sqrt{1 + \frac{2z}{n(1-z)} \left(n - \frac{1-z^n}{1-z} \right)}$$

Вычислив C_{V_n} и отношение среднегодового стока $\bar{x}$ мало-водного n -летия к среднему многолетнему стоку $\bar{x}$, по табли-

це ординат кривой обеспеченности определяют обеспеченность ρ_{x_n} . Вероятность появления такого маловодного периода $(100 - \rho_{x_n})\%$.

Влияние коэффициента автокорреляции z на изменчивость стока n -летия C_{V_n} и, таким образом, на оценку обеспеченности стока маловодного периода ρ_{x_n} весьма велико, что иллюстрируют модифицированные данные работы [4], приведенные ниже.

Таблица 3

n	Значение выражения $\sqrt{1 + \frac{2z}{n(1-z)} \cdot \left(n - \frac{1-z^n}{1-z}\right)}$				при величине z			
	0,2	!	0,3	!	0,4	!	0,5	
1	1,00		1,00		1,00		1,00	
2	1,10		1,14		1,18		1,22	
3	1,14		1,21		1,28		1,36	
4	1,16		1,24		1,34		1,44	
5	1,17		1,27		1,38		1,49	
6	1,18		1,29		1,40		1,53	
7	1,19		1,30		1,42		1,56	
8	1,19		1,30		1,43		1,58	
9	1,20		1,32		1,44		1,60	
10	1,20		1,32		1,45		1,61	
11	1,20		1,32		1,46		1,62	
12	1,20		1,32		1,46		1,62	

Например, при умеренно высоком коэффициенте изменчивости $C_V = 0,6$ обеспеченность стока 10-летнего периода со средним расходом воды, равным 0,7 средней многолетней величины, составляет: при $z=0$ 96%, при $z=0,2$ 93,5%, при $z=0,3$ 90% и при $z=0,4$ 86,5%. Таким образом, повторяемость гипотетического маловодного десятилетия в зависимости от расчетного коэффициента корреляции между стоком смежных лет может оцениваться в диапазоне значений от 1/25 до 1/7, т.е. отличаться в 3,5 раза.

Низкая достоверность выборочной оценки коэффициента авто-

корреляции обуславливает и разброс возможных оценок вероятности появления маловодных периодов. Для получения однозначного решения можно либо нормировать коэффициент автокорреляции в зависимости от модуля среднего многолетнего стока реки [5], либо принимать его для всех бассейнов равным среднему значению 0,3. В работе [6] предлагается принимать $z = 0,28$ в бассейнах рек европейской территории и $z = 0,35$ в бассейнах рек с повышенной изменчивостью годового стока.

Несмотря на сравнительно высокую вероятность появления крайне маловодных периодов, имеются предложения либо исключать их из рассмотрения, либо искусственно увеличивать их водность путем приведения к более низкой обеспеченности, равной обеспеченности гарантированной отдачи.

С такими предложениями нельзя согласиться, поскольку подобный подход неизбежно приведет к понижению надежности водно-и энергоснабжения народного хозяйства.

Так, проектная гарантированная энергоотдача ГЭС Ангарского каскада была определена применительно к 10-летнему маловодному периоду с 1920 по 1929 г., обеспеченность стока которого оценивается в 99%. Во второй половине 1970-х годов на Ангаре началось маловодье, продолжавшееся до 1981 г. Средний за 1976-1981 гг. расход воды составил 82% от среднего многолетнего, обеспеченность стока этой шестилетки также равна 99%. Однако несмотря на столь низкую естественную водность Ангары и глубокую работу водохранилища, гидроэлектростанции вырабатывали даже в конце этого периода в среднем за год 42 млрд. кВт·ч, что на 5% выше проектной гарантированной энергоотдачи. В результате зимой 1979-80 гг. были израсходованы все запасы воды в озере Байкал и Братском водохранилище, суммарный полезный объем которых позволяет вести глубокое многолетнее регулирование стока и энергоотдачи Ангаро-Енисейского каскада ГЭС. С 1980 г. эти водоемы осуществляли только сезонное регулирование стока. Благодаря повышению водности Ангары в 1982 и в 1983 гг. и принятым оперативным мерам (уменьшены навигационные попуски в нижний бьеф Иркутской ГЭС и существенно снижена выработка электроэнергии на всех ГЭС каскада) удалось восстановить многолет-

ную емкость указанных водохранилищ [7]. В случае продолжения маловодья в течение еще 1-2 лет народное хозяйство Сибири могло бы столкнуться с еще большими трудностями в связи с ограничениями энергоснабжения и снижением судоходных глубин на Ангаре и Енисее.

Приведенный пример подтверждает правомерность оценки проектной гарантированной отдачи по календарному стоковому ряду с учетом затяжных понижений естественной водности рек и необходимость осуществления диспетчерских ограничений отдачи по мере расходования многолетней регулирующей емкости водохранилищ.

Возвращаясь к вопросу о границах применимости обобщенных методов водохозяйственных и водноэнергетических расчетов, подведем некоторые итоги. Построение зависимости водо-и энергоотдачи пионерного гидроузла от отметки НПУ и глубины сработки водохранилища для выбора наилучших параметров установки целесообразно выполнять обобщенными приемами. Эти приемы позволяют определить полезную емкость водохранилища либо непосредственно [8,9], либо как сумму отдельно вычисляемых многолетней и сезонной составляющих регулирующей емкости. В проектной практике значительно больше распространен второй способ. Многолетняя составляющая емкости $V_{\text{млн}}$ при этом определяется с помощью номограмм И.В.Гуглия [10], А.Ш.Резниковского и В.В.Зубарева [11], Д.Я.Ратковича [5], связывающих относительную водоотдачу водохранилища α с коэффициентом изменчивости годового стока C_v для разных значений коэффициента корреляции γ между смежными величинами годового стока.

Следует отметить, что сезонная составляющая полезной емкости $V_{\text{сез}}$ водохранилища многолетнего регулирования стока, определяемая применительно к стоку года, обеспеченность которого равна обеспеченности отдачи, довольно заметно изменяется в зависимости от внутригодового распределения стока. Во избежание преуменьшения сезонной составляющей ее следует рассчитывать применительно к нескольким моделям помесечного распределения стока в маловодные годы, выбирая самую неблагоприятную модель. Годовой сток рассматриваемых лет приводится к расчетной обеспеченности.

При создании каскада водохранилищных гидроузлов из двух или более ступеней или при возложении на водохранилище функций компенсатора возможности надежного определения их гарантированной отдачи обобщенными способами без выполнения расчетов по многолетнему ряду существенно уменьшаются.

Расчетный вероятностный прием, позволяющий определить емкость водохранилища многолетнего регулирования стока, ведущего компенсирующее регулирование, был предложен Я.Д.Гильденблатом и Д.В.Коренистовым [12]. Он основан на композиции кривых обеспеченности годовых балансовых разностей для одного, двух, трех и т.д. лет с кривой обеспеченности этих разностей за предшествующий год. Методика использовалась авторами метода лишь один раз — для расчетов регулирования стока Верхнего Урала.

Следует указать, что попытка определения многолетней составляющей полезной емкости водохранилища, расположенного в верхнем течении реки или на притоке, т.е. контролирующего лишь часть стока, к регулированию которого предъявляются требования, была предпринята Ю.М.Малисовым [13]. Результаты численных экспериментов он обобщил в виде номограмм, связывающих емкость верхового водохранилища с гарантированной водоподачей в нижнем течении реки для ряда соотношений параметров стока (норма, C_v) в створе регулирующего гидроузла и в створе, где предъявляются требования к гарантированному объему стока. Отдавая должное оригинальности построений Ю.М.Малисова, нельзя не сказать об ограниченности рассмотренных автором вариантов сочетаний стока в верхнем и нижнем расчетных створах и недостаточном диапазоне исследованных значений коэффициента изменчивости ($C_v = 0,1-0,4$) и коэффициента корреляции между годовым стоком в верхнем и нижнем створах ($r = 0; 1$ и -1). Это ограничивает и возможности широкого использования номограмм Ю.В.Малисова в проектной практике.

Можно указать еще один случай, когда водоотдачу одиночного водохранилища предпочтительнее определить расчетом по календарному ряду. Речь идет о бассейнах, где безвозвратное водопотребление выше проектируемого водохранилища достигло размеров, существенно искажающих статистические параметры естест-

венного годового (и сезонного) стока. Если ежегодный отбор воды в верхней части бассейна реки составляет 25% нормы стока $\bar{x}$, коэффициент изменчивости $C_v = \sigma/\bar{x}$ увеличивается на 33%, так как $C'_v = \frac{\sigma}{0,75\bar{x}}$. При 75%-ной обеспеченности отдачи многолетняя составляющая относительной регулирующей емкости $\beta_{\text{мн}}$ определенная по номограммам И.В.Гутля или А.Ш.Резниковского, при увеличенном на одну треть коэффициенте изменчивости C'_v возрастает на 88-108% при $C_v = 0,5-0,7$, а абсолютная величина полезной емкости, включающая и сезонную составляющую, - на 66-81%. Необходимость в столь значительном увеличении регулирующей емкости вызывает сомнение.

Таким образом, с повышением степени использования стока, с усложнением водохозяйственных систем, подчас превращающихся в системы энерговодохозяйственные, работоспособность обобщенных методов водохозяйственных расчетов уменьшается. Выявляются преимущества расчетов по календарным стоковым рядам. При этом помимо требования к минимальной длительности ряда, необходимой для надежной оценки гарантированной отдачи и ее обеспеченности^{х)}, появляются требования к изученности не только основной реки, но и ее притоков. Гидрологические наблюдения на притоках, имеющие, как правило, меньшую продолжительность, служат исходным материалом для формирования рядов боковой приточности между створами гидроузлов. (Методика получения многолетних рядов боковой приточности, особенно при необходимости помесечной и подекадной разбивки и увязки стока, нуждается в совершенствовании). В некоторых случаях необходимый для расчетов сложной энерговодохозяйственной системы ансамбль многолетних рядов боковой приточности между гидроузлами может быть получен путем статистического моделирования. Однако и здесь и проектировщика и исследователя ждут трудности, связанные как с пониженной надежностью оценок параметров стока притоков с короткими рядами наблюдений, так и с техникой мо-

^{х)} Применительно к одиночному водохранилищу вопрос о длительности наблюдений, при которой обеспеченность водоотдачи может быть надежно определена расчетом по календарному ряду, детально исследован Л.В. Ивановой [14] и Д.Я. Ратковичем [3].

делирования внутригодичного распределения стока. Искусственные стоквые ряды особенно эффективны в водохозяйственных и водно-энергетических расчетах развивающихся энергосистем.

Опыт проектных водохозяйственных и водноэнергетических расчетов с использованием гидрологических рядов, полученных методом статистических испытаний, пока невелик. Методика и результаты таких расчетов, выполненных в институте Энергосетьпроект для уточнения энергоотдачи ангарских ГЭС, описан в монографии [15]. Предложенная автором настоящей статьи методика расчета функционирования Нарын-Сырдарьинской энергосистемы с использованием ансамблей искусственных выборок была реализована Средазгидропроект для определения энергоотдачи Нарынских ГЭС в период начального наполнения Токтогульского и Камбаратинского водохранилищ.

Применение искусственных гидрологических рядов для уточнения параметров или режима работы одиночного гидроузла, как правило, по нашему мнению, нецелесообразно. Исключение представляют случаи, когда ряд наблюдений за стоком короток (меньше 20 лет) либо получен косвенным способом, например, по связи с осадками, а статистические параметры стока определены по картам или эмпирическим формулам.

Из изложенного выше могут быть сделаны следующие выводы и рекомендации.

1. Обобщенные, т.е. основанные на статистических параметрах стока, методы водохозяйственных и водноэнергетических расчетов целесообразно применять при проектировании пилонных (одиночных) гидроузлов на стадии выбора объема водохранилища, величины и обеспеченности гарантированной отдачи и установленной мощности ГЭС.

2. Емкость водохранилища и его отдача должны рассчитываться с учетом регламентации сниженной отдачи в перебойные годы и периоды, т.е. за пределами расчетной обеспеченности.

3. Обобщенные приемы оценки гарантированной водоотдачи водохранилища или системы водохранилищ, работающих в режиме компенсирующего регулирования неконтролируемой боковой приточности,

нельзя считать удовлетворительными. Здесь еще большое поле для исследований и методических разработок, достоинства которых можно оценить сопоставлением результатов обобщенных расчетов с детальными расчетами регулирования стока по календарным стоковым рядам.

4. Водохозяйственные и водноэнергетические показатели гидроузлов, являющихся ступенью каскада или элементом энерговодохозяйственной системы, должны устанавливаться на основании расчетов по многолетнему гидрологическому ряду с непременным управлением проектным режимом их работы по диспетчерским правилам.

5. Использование в водохозяйственных и водноэнергетических расчетах искусственных гидрологических рядов целесообразно для построения правил управления сложными каскадами и системами гидроузлов, а также для определения энергетических и водохозяйственных показателей новых элементов этих систем в период их ввода в эксплуатацию.

Литература

1. Крицкий С.Н., Менкель М.Ф. Водохозяйственные расчеты. — Л.: Гидрометеиздат, 1952. — 392 с.

2. Крицкий С.Н., Менкель М.Ф. Номограммы для водноэнергетических расчетов. — Гидротехническое строительство, 1944, № 6, с. 3-7.

3. Раткович Д.Я. О методологии расчетов многолетнего регулирования речного стока. — Труды Гидропроекта, 1977, вып. 54, с. 3-27.

4. Крицкий С.Н., Менкель М.Ф. Расчет многолетнего регулирования речного стока с учетом коррелятивной связи между стоком смежных лет. — В кн.: Проблемы регулирования речного стока. Вып. 8. — М.: Изд-во АН СССР, 1959, с. 5-36.

5. Раткович Д.Я. Многолетние колебания речного стока. — Л.: Гидрометеиздат, 1976. — 256 с.

6. Резниковский А.Ш., Александровский А.Д., Атурин В.В. и др. Гидрологические основы гидроэнергетики. — М.: Энергия, 1979, — 232 с.

7. Асарин А.Е., Грачева Л.В., Терман И.А. Об использовании гидроэлектростанций в энергосистемах. - Гидротехническое строительство, 1984, №3, с.6-10.
8. Киктенко В.Д., Баишев Б.Б. Аналитический метод расчета регулирования стока. - Алма-Ата: Наука, 1980. - 200с.
9. Чокин Ш.Ч., Григорьев В.А., Редькин В.К. Методика расчета регулирования стока. - Алма-Ата: Наука, 1977. - 300с.
10. Гутлий И.В. К расчету многолетнего регулирования речного стока с учетом коррелятивных связей между величинами стока смежных лет. - В кн.: Проблемы регулирования речного стока. Вып.8. - М.: Изд-во АН СССР, 1959, с.35-55.
11. Резниковский А.Ш., Зубарев В.В. Номограммы для определения многолетней составляющей емкости водохранилища. - Гидротехническое строительство, 1966, №11, с.49-50, 1967, №1-4, с.65.
12. Гильденблат Я.Д., Коренистов Д.В. О вероятностном расчете компенсационного регулирования стока. - Труды Гидропроекта, 1960, №4, с.166-182.
13. Малисов Д.М. Многолетнее компенсированное регулирование стока. - Водные ресурсы, 1979, №6, с.37-46.
14. Иванова Л.В. Исследование метода расчета многолетнего регулирования речного стока по коротким гидрологическим рядам. - Водные ресурсы, 1976, №5, с.48-64.

УДК 621.22

МЕТОДИКА РАСЧЕТА СЕЗОННОГО РЕГУЛИРОВАНИЯ СТОКА

А.М.Бактыбаева
КазНИИЭ

Рациональное использование водных ресурсов требует распределения их во времени. Осуществляется это посредством регулирования речного стока водохранилищами. В зависимости от назначения они подразделяются на многолетние, сезонные, недель-

ные, суточные. К водохранилищам многолетнего регулирования стока относятся те, которые выравнивают годовую неравномерность стока, то есть в многоводные годы вода накапливается в водохранилище, а в маловодные сбрасывается [1]. К водохранилищам сезонного регулирования стока относятся те, которые выравнивают только внутригодовую неравномерность стока [1].

Общая теория регулирования речного стока исходит из того, что сток ξ рассматривается как непрерывный во времени вероятностный процесс. Уравнение регулирования одним водохранилищем запишется в общем виде следующим образом [2]: $\frac{dx}{dt} = f(\xi, \alpha)$, где dx — разность между притоком и отдачей водохранилища за бесконечно малый промежуток времени dt . Под x подразумевается не только фактическое наполнение водохранилища, но и объемы сбросов и дефицитов отдачи; α — отдача из водохранилища, на которую наложены соответствующие ограничения

$$\alpha = \begin{cases} \alpha(0), & \text{если } x \leq 0 \\ \alpha(x), & \text{если } 0 \leq x \leq \beta \\ \alpha(\beta), & \text{если } x \geq \beta. \end{cases}$$

В проектной практике используют разностный аналог этого уравнения $x(t+1) = x(t) + f(\xi, \alpha)$. (I)

Получить удовлетворительное решение уравнения (I) не всегда представляется возможным ввиду ограниченной длины исходных гидрологических рядов ξ . Это стимулировало разработку методик, позволяющих по коротким рядам получать более точное решение. Наибольшее распространение в проектной практике получили следующие методы расчета водохранилищ сезонного регулирования стока.

Календарный метод. Суть его в следующем. Рассмотрим последовательность объемов стока за год $\xi_1, \xi_2, \dots, \xi_n$.

Предположим, что объем водохранилища равен β , а отдача из него за соответствующий интервал времени равна α .

Регулирование речного стока календарным методом заключается в решении уравнения водного баланса по наблюдаемой реализации $x_{i+1} = \beta + \xi_{M_i} - \alpha_M$, где ξ_{M_i} — сток за межень; α_M — отдача за межень.

Искомая обеспеченность опорожненного состояния водохранили-

ща в этом случае есть отношение $\rho = m/n$, где m число x_i , удовлетворяющих условию $x_i > 0$, n - общее число испытаний.

Метод В.Г.Андреянова. Предполагается, что гидрологический ряд рассекается постоянным уровнем потребления α [3]. По полученным объемам дефицитов отдачи строим гистограмму. Ввиду того, что гистограмма дефицитов отдачи - эмпирическая кривая, не имеющая точек при достаточно больших значениях D , конец ее аппроксимируется кривой Гудрича. Поэтому искомая емкость водохранилища при заданной обеспеченности отдачи ρ будет $\beta = D + \Delta/\beta$, где D - абсцисса плотности распределения вероятностей дефицитов отдачи внутригодового распределения стока, соответствующая заданной обеспеченности отдачи ρ , т.е.

ρ - гидрологическая характеристика, а не водохозяйственная.

Метод С.Н.Крицкого-М.Ф.Менкеля. Если в методе В.Г.Андреянова объем дефицитов отдачи D берется как наблюдаемый, то в данном методе он вычисляется так: $D = \alpha_m - M_\rho$, где α_m - отдача за межень; M_ρ - сток за межень расчетной обеспеченности [1].

По методу И.М.Панасенко объем дефицита отдачи рассчитывается по формуле $D = t_i(\alpha - q_i)$, где t_i - длина дефицитного периода; q_i - средний расход воды меженного периода.

Вводится допущение, что t и q независимые переменные и путем композиции находится кривая распределения D [4].

Метод М.Н.Вагапова. В нем учитываются случаи, когда водохранилище оказывается недонаполненным. В расчетном алгоритме используется не совсем тесная связь между паводком и дефицитом, распространенная на всю область изменения $C_{пв}$ и C_d [5]:

$$x_N - D = 0, \\ x_N = \begin{cases} \beta, & \text{если } C_{пв} > \beta \\ C_{пв}, & \text{если } C_{пв} \leq \beta \end{cases}$$

Перечисленные методы расчетов сезонного регулирования стока не вполне могут удовлетворить проектную практику. Они дают не только систематическое смещение искомых параметров (ρ или β), но и по точности определения этих параметров не отвечают требованиям сегодняшнего дня. В связи с этим ниже предлагается методика, позволяющая вычислить более достоверные параметры

водохранилища (ρ или β).

Рассмотрим уравнение водного баланса водохранилища в i -ом году $x = y + W - \alpha - x_c + x_d$, где y — начальное наполнение водохранилища; W — объем стока за цикл (или год); α — объем отдачи за цикл (или год); x_d и x_c — соответственно величины объемов дефицита отдачи и холостого сброса. Так как в дальнейшем будет рассматриваться только сезонное регулирование, то это уравнение должно описывать водный баланс только одного года и не иметь связи с предшествующими. Этого можно достичь при условии, что всегда $y = 0$, либо когда во время паводка $x_c > 0$.

Приведенное уравнение водного баланса содержит только объемные характеристики. В этом случае отпадает необходимость в детальном рассмотрении внутригодовой неравномерности, как это имело место, если бы рассматривались месячные интервалы времени. Данное уравнение водного баланса позволяет рассчитывать водохранилище, если в конце расчетного года оно всегда опорожнено. Тогда исходное уравнение водного баланса можно записать в более простой форме

$$x_i = \begin{cases} C_{пвi} - C_{дi}, & \text{если } C_{пвi} < \beta \\ \beta - C_{дi}, & \text{если } C_{пвi} \geq \beta, \end{cases} \quad (2)$$

где $C_{дi}$ — меженный дефицит отдачи в относительных единицах измерения.

Здесь $C_{пвi}$, $C_{дi}$ — объемные гидролого-водохозяйственные характеристики внутригодового распределения стока. Первое уравнение соответствует случаю, когда во время паводка водохранилище заполняется не полностью. Естественно, что за этот промежуток времени в водохранилище накопится воды $C_{пвi}$, так как рассматривается схема регулирования, когда водохранилище перед началом паводка всегда опорожнено. В этом случае в конце расчетного года объем воды в водохранилище будет $C_{пвi} - C_{дi}$.

Если же во время паводка водохранилище наполнится полностью, то аналогично предыдущему случаю в конце года воды в нем окажется $\beta - C_{дi}$.

Таким образом, имеются две расчетные зоны:

1 - паводковая волна не заполняет полностью объем водохранилища; 2 - паводковая волна заполняет полностью объем водохранилища и если есть избыток, то происходит сброс.

В уравнение водного баланса (2) входят две объемные характеристики внутригодового распределения стока $C_{пб}$ и $C_{д}$. Для расчета регулирования речного стока по уравнению (2) необходимо задаваться обеими этими величинами, что весьма усложняет расчет. В этой связи желательно было бы свести это уравнение к одной независимой переменной.

Выразим объем паводковой волны $C_{пб}$ через объем дефицита $C_{д}$. Составим уравнение водного баланса цикла регулирования

$$W = C_{пб} + d - C_{д} . \quad (3)$$

Экспериментально установлено, что между паводковой волной и годовым стоком существует довольно тесная корреляционная связь (0,90-0,95). Это позволило выразить одну из них через другую посредством линии регрессии [6]

$$C_{пб} = \bar{C}_{пб} + z K_c (W - \bar{W}) , \quad (4)$$

где z - коэффициент корреляции между паводковой волной и годовым стоком; K_c - стандарт паводковой волны в единицах стандарта годового стока.

Полученная эмпирическая связь между $C_{пб}$ и W зависит только от величины и закона отдачи, но не от вида регулирования. Это есть гидрологическая связь между объемом паводка и годовым стоком. Причем она никоим образом не учитывает связь между смежными годами, так как при построении линии регрессии связь между смежными членами случайной совокупности не входит в эту формулу. Линия регрессии учитывает корреляционную связь только между той парой случайных величин, для которых строится эта линия. Таким образом, на полученную линию регрессии будем смотреть как на функцию связи объемных характеристик внутригодового распределения стока.

Эту линию регрессии будем строить только для точек $C_{пб}$, находящихся в диапазоне $[0, \beta]$, ибо для $C_{пб} > \beta$ эти точки не участвуют в расчетном алгоритме. Учет их даст только дополнительные погрешности. Из уравнения (4) легко находится величи-

на годового стока

$$W = \frac{C_{пв} - \bar{C}_{пв} + zK_c \bar{W}}{zK_c} . \quad (5)$$

Подставляя ее в уравнение (3), получим зависимость паводковой волны $C_{пв}$ от дефицита C_d

$$C_{пв} = \frac{zK_c}{1-zK_c} \left(-C_d + \alpha + \frac{\bar{C}_{пв} - zK_c \bar{W}}{zK_c} \right) . \quad (6)$$

Заменив величину паводковой волны $C_{пв}$ в уравнении водного баланса (2), окончательно получим уравнение водного баланса на i -й год

$$x_i = \begin{cases} -\frac{1}{1-zK_c} C_d + \frac{\bar{C}_{пв} + zK_c(\alpha - \bar{W})}{1-zK_c}, & \text{если } C_{пв} < \beta \\ \beta - C_d, & \text{если } C_{пв} \geq \beta, \end{cases} \quad (7)$$

где граница расчетной зоны находится из уравнения (2), если $C_{пв} = \beta$.

В силу этого искомая граница расчетных зон запишется так:

$$C_d = \alpha + \frac{\bar{C}_{пв} - zK_c \bar{W}}{zK_c} - \beta \frac{1-zK_c}{zK_c} .$$

Дефицит C_{di} и наполнение x_i на i -й год, согласно уравнению (7), находятся в линейной зависимости. Это позволяет плотность распределения вероятностей x найти через плотности распределения вероятностей дефицитов. Она рассчитывается так:

$$f(x) = \begin{cases} (1-zK_c) f_d \left[\left(x - \frac{\bar{C}_{пв} + zK_c(\alpha - \bar{W})}{1-zK_c} \right) (zK_c - 1) \right], & \text{если } C_{пв} < \beta \\ f_d(\beta - x), & \text{если } C_{пв} \geq \beta. \end{cases} \quad (8)$$

Уравнение (8) является обобщением методов В.Г.Андреянова, С.М.Крицкого – М.Ф.Менкеля и др., так как перечисленные методы содержат только второе уравнение из системы (8), т.е. рассматривается случай, когда водохранилище заполняется полностью.

Интегрируя соотношение (8) от x до ∞ , получим искомую обеспеченность

$$P(x) = \int_x^\infty \begin{cases} (1-zK_c) f_d \left[\left(x - \frac{\bar{C}_{пв} + zK_c(\alpha - \bar{W})}{1-zK_c} \right) (zK_c - 1) \right], & \text{если } C_{пв} < \beta \\ f_d(\beta - x), & \text{если } C_{пв} \geq \beta \end{cases} dx \quad (9)$$

Применяемая в практике водохозяйственных расчетов сезонного регулирования кривая Пирсона III типа

$$f_{\theta} = \frac{\nu^{\tau}}{\Gamma(\tau)} e^{-\nu x} x^{\tau-1},$$

где $\nu = M/D$; $\tau = M^2/D$; M — математическое ожидание; D — дисперсия, по заданному аргументу $x [x \in (0, \infty)]$ для описания дефицитов, не всегда приемлема. Это связано с тем, что при $C_S < 0$ она практически не аппроксимирует соответствующие гистограммы. Поэтому наиболее целесообразно использовать комбинированную функцию вида

$$f_{\theta} = \begin{cases} \frac{\nu^{\tau}}{\Gamma(\tau)} e^{-\nu x} x^{\tau-1}, & \text{если } C_S \geq 0, a > a_{\max} \\ \frac{1}{G(\tau, a)} e^{-\nu x} x^{\tau-1}, & \text{если } C_S \geq 0, a < a_{\max} \\ \frac{\nu^{\tau}}{\Gamma(\tau)} e^{-\nu(a-x)} (a-x)^{\tau-1}, & \text{если } C_S < 0, a > a_{\max} \\ \frac{1}{G(\tau, a)} e^{-\nu(a-x)} (a-x)^{\tau-1}, & \text{если } C_S < 0, a < a_{\max}. \end{cases} \quad (10)$$

Первое уравнение из соотношения (10) — вычисление кривой Пирсона III типа, второе уравнение — вычисление значений усеченной кривой Пирсона III типа до какой-то точки a . Третье уравнение — обратное отображение кривой Пирсона III типа, если $a > a_{\max}$ и четвертое — вычисление обратного усеченного отображения кривой Пирсона III типа до какой-то точки a , если $a < a_{\max}$. Это довольно универсальная кривая, которая позволяет описывать не только распределение случайной величины в интервале $(0, \infty)$, но и в ограниченном интервале $(0, a)$, причем как для $C_S > 0$, так и для $C_S < 0$. Величина $a_{\max}$ находится по формуле $a_{\max} = 6 \cdot \tau^{0.8} + 1$. Полная гамма-функция находится по формуле $\Gamma(\tau) = \int_0^{\infty} e^{-t} t^{\tau-1} dt$, а неполная гамма-функция — по формуле $G(\tau, a) = \int_0^a e^{-\nu x} x^{\tau-1} dx$.

Любая методика, в том числе и рассматриваемая, дает систематическое смещение искомого параметра. Оценить это смещение можно следующим образом. Берем гидрограф какой-либо реки и

на его основе моделируем гидрологический ряд. Календарным методом находим искомый параметр водохранилища (ρ или β). При достаточно длинном ряде (например в 1000 лет) этот метод можно принять за эталонный. Расчет по этому ряду параметра ρ или β по предлагаемой методике дает другие ρ_1 или β_1 . Разность между ними $\Delta\rho = \rho - \rho_1$, $\Delta\beta = \beta - \beta_1$ есть смещение метода. Это так называемое асимптотическое смещение. В реальных же условиях мы имеем дело с гидрологическими рядами ограниченной длины (10-50 лет). Поэтому возникает еще дополнительная смещенность за счет коротких рядов. Оценить ее можно следующим образом. Моделированный гидрологический 1000-летний ряд разбиваем на равные отрезки (например, по 50 лет) и на каждом из них находим ρ_i или β_i , т.е. смещенность равна $\Delta\rho_i = \rho - \rho_i$ или $\Delta\beta_i = \beta - \beta_i$. Норма этой смещенности $\Delta\rho = \frac{1}{n} \sum \Delta\rho_i$ или $\Delta\beta = \frac{1}{n} \sum \Delta\beta_i$ — есть смещенность метода за счет ограниченной длины гидрологического ряда.

Анализ существующих методов на ЭВМ показал, что все они имеют такое смещение и порой значительное.

Для предлагаемой методики по большому числу рек при различных вариациях α были найдены смещения, приведенные на рис. I.

Они группируются вдоль некоторой кривой параболического типа

$\Delta\rho = a(1-\rho)^b$, параметры которой можно найти по методу *min* среднеквадратического отклонения этих точек от кривой. Для нашего случая кривая систематического смещения имеет вид $\Delta\rho = \frac{1}{2}(1-\rho)^{2.32}$.

Эта эмпирическая формула смещенности ρ_u и зависимости от ρ была внесена в расчетный алгоритм в виде $\rho_u = \rho - \Delta\rho$.

Проверка алгоритма по нахождению ρ_u дала хорошее совпадение с эталонной обеспеченностью по 1000-летнему ряду. Для рассматриваемого ниже примера это расхождение

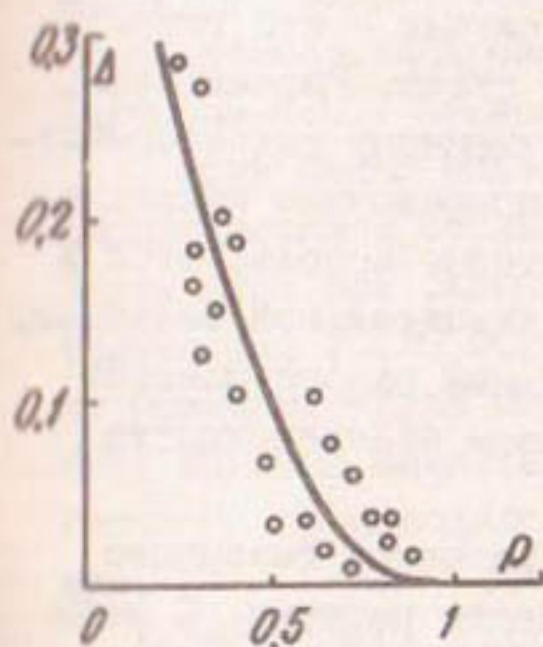


Рис. I. Зависимость смещенности от обеспеченности

составляет 2%. Итак, расчетный алгоритм предлагаемой методики следующий. Входом в нее служат: α – отдача из водохранилища; β – емкость водохранилища; $\bar{C}_{пв}$ – норма паводковой волны; $\bar{W}$ – норма годового (циклового) стока; ε – коэффициент корреляции между паводковой волной и годовым стоком; $K_c = \sigma_c / \sigma_w$ – стандарт паводковой волны в единицах стандарта годового стока. M , D , C_s – норма, дисперсия и коэффициент асимметрии объемов дефицитов внутригодового стока. Выход – кривая обеспеченности объема стока на конец расчетного года. В частности, $\rho(0) = \rho$ – обеспеченность того, что водохранилище не будет опорожнено.

Искомая обеспеченность ρ_u находится по формуле

$$\rho_u = \rho - \frac{1}{2}(1-\rho)^{2,32},$$

где $\rho = \rho(0)$ определится по выражению (9), а функции f_j – по формуле (10).

Полученная обеспеченность есть вероятность того, что при заданных α , β водохранилище не будет опорожнено. Совершенно неверно приписывать этой обеспеченности обеспеченность некоторого объема годового стока, ибо в первом случае эта величина есть характеристика регулирования, т.е. водохозяйственная характеристика, а во втором случае – это гидрологическая характеристика объемов годового стока. Рассчитывая водохранилище по одному и тому же искусственному гидрологическому ряду в 1000 лет с внутригодовым распределением календарным методом или обобщенными методами, которые используются в проектной практике, получим расхождения значительной величины. Эти расхождения являются результатом подмены одного понятия обеспеченности другим, т.е. отождествлением обеспеченности отдачи с обеспеченностью года.

Упорядочим наиболее известные методы расчетов сезонного регулирования речного стока по достоверности решения. С этой целью будет использован прием, аналогичный тому, который применялся для ранжировки методик многолетнего регулирования стока [7]. Суть его в следующем. Моделируется гидрологический ряд с внутригодовым распределением стока достаточной продолжи-

тельности (обычно 1000 лет). Подставляя последовательно значения этого ряда в уравнение (I), получим эталонное решение. Такой способ решения уравнения (I) называется календарным. Однако в реальных условиях у нас нет достаточно длинных гидрологических рядов, а на коротких рядах решение, полученное этим методом, по сравнению с эталонным содержит погрешность и довольно часто значительную. Для проверки разных методик на коротких рядах поступим следующим образом. Разобьем моделируемый ряд на отрезки длиной n . В реальных условиях это, как правило, 10–50 лет. На каждом из этих отрезков по какой-либо методике проведем расчет емкости водохранилища β , либо обеспеченности ρ . Так как мы имеем дело с короткими рядами,

β на каждом отрезке будет различно, т.е. примет значения $\beta_1, \beta_2, \dots, \beta_n$. Их можно рассматривать как случайные величины, которые будем характеризовать математическим ожиданием $M\beta_i$ и дисперсией $D\beta_i$. При этом оказывается, что $M\beta_i$ будут отличаться от эталонного значения β на величину $\Delta\beta$. Эта систематическая смещенность ликвидируется путем введения ее в расчетный алгоритм. Дисперсия $D\beta_i$ характеризует случайную ошибку метода: чем она меньше, тем лучше метод. С учетом этого принципа были исследованы шесть методик: календарная, Андреянова В.Г., Крицкого С.Н. – Менкеля М.Ф., Вагапова М.Н., Панасенко И.М. и предлагаемая.

С этой целью моделировался ряд в 1000 лет с внутригодовым распределением стока, по которому делался эталонный расчет. Затем этот ряд разбивался последовательно на интервалы длительностью 10, 20, 30, 40, 50 лет, так как основная часть рек имеет примерно такие периоды наблюдений. На каждом из интервалов была найдена емкость водохранилища β по заданным α и ρ . Расчет производился одновременно по шести указанным методикам.

Естественно, каждый метод дает различные результаты вычисления β . Возникают они по следующим причинам. Во-первых, в методе В.Г.Андреянова дефициты рассчитываются по фактическому ряду. В методе С.Н.Крицкого–М.Ф.Менкеля они берутся в качестве нормы, в методе И.В.Панасенко – как композиция случайных величин t, α, C_m . Из этих приемов теоретически наиболее

обоснованным является метод М.Н.Вагапова, так как по С.Н.Крицкому-М.Ф.Менкелю дефициты - это осреднение величин, не зависящих от ρ , а по И.М.Панасенко дефициты можно вычислить достаточно точно, если известны условные функции распределения. Использование же безусловных кривых приводит к ошибкам.

Во-вторых, в методах В.Г.Андреянова и С.Н.Крицкого-М.Ф.Менкеля участвует коэффициент восстановления $\Delta\beta$ ($\Delta\beta = \beta - D$), а у И.М.Панасенко его нет. Сам же коэффициент рассчитывается по-разному: в методе В.Г.Андреянова - по кривой Гудрича, а в методе М.Н.Крицкого-М.Ф.Менкеля - по формуле $\Delta\beta = (\bar{C}_M - M\rho) \frac{W - \alpha}{W - W\rho}$.

В третьих, коэффициент восстановления $\Delta\beta$ учитывает возможные паводки внутри года, которые могут полностью заполнить водохранилище. Он участвует в вычислениях даже в тех случаях, когда таковые не наблюдаются.

Предложенный метод показал хорошее совпадение с эталонной обеспеченностью по 1000-летнему ряду. Для рассматриваемого примера р.Тогузак (ст.Тогузак) это расхождение составляет 2%, в то время как для метода М.Н.Вагапова 13%, В.Г.Андреянова - 18%, С.Н.Крицкого-М.Ф.Менкеля - 19% и И.М.Панасенко - 36% (см.рис.2). Такие расхождения объясняются тем, что в этих алгоритмах не учитывалось I-ое уравнение из (8), а в методе В.Н.Вагапова использовалась не совсем тесная связь между паводком и дефицитом, причем распространенная на всю область изменения C_{nb} и C_d , в то время как эта связь нужна только в диапазоне $0 \leq C_{nb} \leq \beta$.

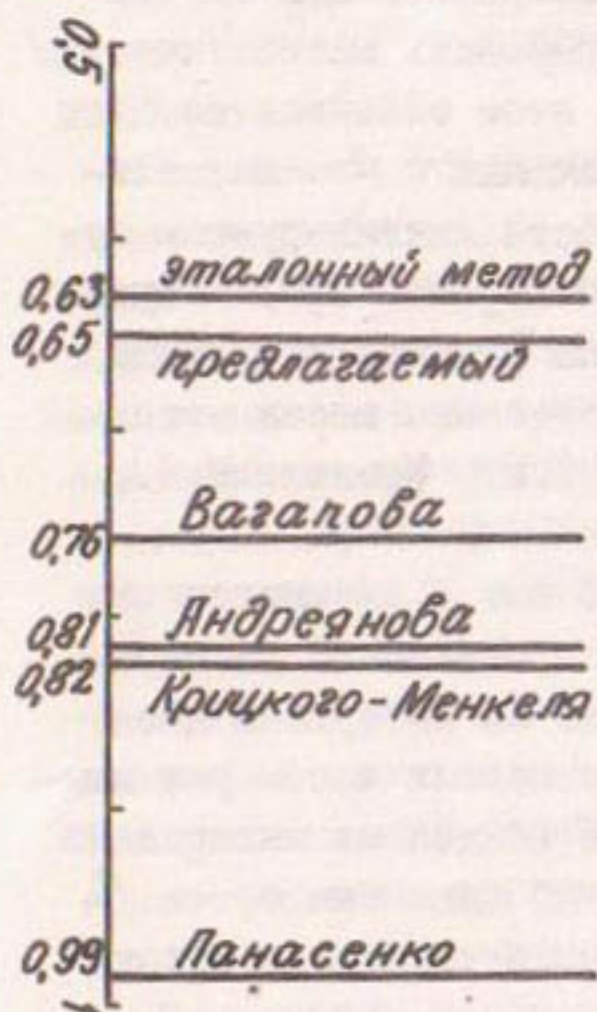


Рис.2. Сравнительные расчеты

изменения C_{nb} и для ограниченной $0 \leq C_{nb} \leq \beta$ не совпадают, что и явилось источником дополнительных погрешностей в

методе М.Н.Вагапова. Кроме того, в этих алгоритмах не совсем правильно описана кривая дефицитов, и предполагалось (за исключением метода М.В.Вагапова), что водохранилище во время половодья заполняется полностью.

И наконец, во всех перечисленных методах не учтена систематическая погрешность. Таким образом, предлагаемый метод значительно точнее методов, применяемых в настоящее время в практике водохозяйственного проектирования.

Предложенная методика сезонного регулирования стока. полнее учитывает реальные процессы, имеющие место при регулировании. Она позволяет существенно повысить достоверность расчетных параметров (ρ или β) водохранилища и тем самым получить более обоснованные параметры проектируемого водохранилища сезонного регулирования.

Литература

1. Крицкий С.Н., Менкель М.Ф. Водохозяйственные расчеты.—Л.: Гидрометеиздат, 1952.—392с.
2. Картвелишвили Н.А. Теория вероятностных процессов в гидрологии и регулировании речного стока.—Д.: Гидрометеиздат, 1967.—291с.
3. Андреянов В.Г. Внутригодовое распределение речного стока.—Л.: Гидрометеиздат, 1960. — 327с.
4. Панасенко И.М. Сезонно-годовое регулирование речного стока при энерго-ирригационном использовании водотока.—Тр. Института энергетики, Алма-Ата, 1958, т. I, с. 54-60.
5. Вагапов М.Н. Метод расчета многолетнего регулирования стока по характеристикам водобалансовых разностей.—В кн.: Проблемы гидроэнергетики и водного хозяйства.—Алма-Ата: Наука, 1964, вып. 2, с. 135-148.
6. Чокин Ш.Ч. Комбинированная методика расчета регулирования стока при однократном режиме работы водохранилища.—В кн.: Проблемы гидроэнергетики и водного хозяйства.—Алма-Ата: Наука, 1968, вып. 6, с. 54-112.
7. Чокин Ш.Ч., Григорьев В.А., Редькин В.К. Методика расчета регулирования стока.—Алма-Ата: Наука, 1977.—300с.

ГИДРОЭНЕРГЕТИЧЕСКИЙ ПОТЕНЦИАЛ МАЛЫХ РЕК КАЗАХСКОЙ ССР^{х)}

А.С.Паутов, А.В.Андреев
КазНИИЭ

Казахская ССР в целом характеризуется слабо развитой гидрографической сетью. Всего на территории республики насчитывается около 2200 рек, из которых только шесть имеют среднегого-летние расходы воды свыше $100 \text{ м}^3/\text{с}$. Рек с расходами воды от 50 до $100 \text{ м}^3/\text{с}$ — семь, от 10 до 50 $\text{м}^3/\text{с}$ — около сорока, расходы подавляющего числа рек — менее $10 \text{ м}^3/\text{с}$. К числу наиболее водоносных рек относится Иртыш с годовой нормой стока $32,8 \text{ км}^3$, Сырдарья — $22,5 \text{ км}^3$, Или — 18 км^3 , Урал — 10 км^3 [1].

Потенциальные водноэнергетические ресурсы рек Казахской ССР оцениваются величиной 19,6 млн. кВт среднегодовой мощности (172 млрд. кВт.ч энергии в год) [1,2]. Из них 4,1 млн. кВт, или 35,7 млрд. кВт.ч, приходится на малые реки [3]. По запасам гидравлической энергии республика находится на третьем месте в стране, уступая РСФСР (875 млрд. кВт.ч) и Таджикской ССР (236 млрд. кВт.ч). Наибольший гидроэнергетический потенциал сосредоточен в восточном, юго-восточном и южном водохозяйственных районах (соответственно 72,1, 71,6 и 23,2 млрд. кВт.ч энергии в год). На долю остальных районов (западного, северного и центрального) приходится менее 5% гидроэнергоресурсов республики (5,8 млрд. кВт.ч).

Технически возможные к использованию ресурсы гидроэнергии КазССР ориентировочно оцениваются в 62 млрд. кВт.ч, а экономически целесообразные — в 25 млрд. кВт.ч. Свыше 99% экономического энергетического потенциала республики сосредоточено в восточном и юго-восточном районах [2]. Гидроэнергетический потенциал Казахской ССР в перспективе может быть существенно пополнен за счет переброски стока сибирских рек в засушливые районы Средней Азии и Казахстана. В этом отношении наибольший энергетический эффект может дать осуществление водо-

^{х)} В работе принимал участие М.Кример.

хозяйственной связи Обь-Иртыш по Верхне-Катунскому направлению. В случае переброски $4,5 \text{ км}^3$ воды в год дополнительно может быть получено 13 млрд. кВт.ч энергии в год, что увеличивает экономический гидроэнергопотенциал республики до 48 млрд. кВт.ч, т.е. в 1,5 раза [4].

В настоящее время в Казахской ССР эксплуатируется шесть крупных гидроэнергетических объектов: Бухтарминская, Усть-Каменогорская, Капчагайская и Чардаринская ГЭС, а также Алма-Атинский и Лениногорский каскады гидроэлектростанций. Суммарная установленная мощность их составляет 1628 МВт, а годовая выработка энергии – 5,6 млрд. кВт.ч. С вводом в число действующих первой очереди строящейся Шульбинской станции мощность ГЭС увеличится на 700 МВт, а выработка – на 1,4 млрд. кВт.ч. Таким образом, степень использования технических гидроэнергетических ресурсов в республике достигнет 11%, а экономических – 28% [5].

Значительная часть территории Казахской ССР недостаточно обеспечена водными ресурсами. Дефицит воды является по существу единственным фактором, сдерживающим развитие производительных сил республики. Поэтому перспективы "большой" гидроэнергетики (за счет строительства крупных и средних по мощности ГЭС) непосредственно связаны с развитием водного хозяйства. Очевидно, что неэнергетические компоненты (ирригация, водоснабжение, водный транспорт и др.) сокращают возможности освоения гидроэнергопотенциала рек как в количественном отношении, так и в режиме их использования.

Одновременно гидроэнергетические ресурсы привязаны к определенной территории, не всегда совпадающей с районами наибольшего энергопотребления. Это снижает эффект использования ГЭС как маневренных станций. Плановая перестройка топливно-энергетического баланса страны, нарастающий дефицит водных ресурсов и противоречия по их комплексному использованию, а также стоимость компенсационных мероприятий по созданию водохранилищ привели к необходимости оценки возможности использования малых ГЭС (МГЭС) как источников энергии, а в ряде случаев и вытесняющей мощности в энергосистеме. В связи с разработкой новых технологий и конструкций МГЭС условно отнесены к нетрадиционным источникам энергии. Экономическая целе-

сообразность их строительства обусловлена большим числом факторов: технико-экономическими характеристиками, ролью МГЭС в энергосистеме, условиями комплексного использования водных ресурсов и др. В соответствии с этим немаловажное значение в оценке перспектив использования гидроэнергopotенциала малых рек приобретает формирование критерия их отбора.

Определяющим параметром МГЭС является величина ее установленной мощности. В соответствии с рекомендациями работы [6] гидроэнергоустановка мощностью в пределах от 0,05 до 30 МВт относится к малым гидроэлектростанциям. В этой связи в число малых рек не войдут крупные водотоки, гидроэнергетические ресурсы которых могут быть использованы строительством традиционных ГЭС.

Исключены из состава малых рек такие мелкие водотоки (или отдельные участки) с удельной (на километр длины) концентрацией валового потенциала менее 5 млн.кВт.ч. Соответственно этому меньший предел мощности МГЭС несколько увеличивается - примерно до 0,15 МВт.

Таким образом, с целью определения возможных масштабов строительства МГЭС в республике под гидроэнергетическим потенциалом (ГЭП) малых рек в данной работе подразумевается энергия тех водотоков, на которых возможно создание МГЭС с принимаемым диапазоном мощностей от 0,15 до 30 МВт.

Верхний предел в два раза превышает ограничение малых ГЭС по мощности, принятое за рубежом, и объясняется недостаточной изученностью рек, ресурсы которых могут быть использованы путем сооружения "нетрадиционных" гидроэлектростанций [6]. Поэтому из общего числа 2174 рек в республике длиной больше 10 км в учетный состав не включены водотоки, имеющие большое энергетическое значение. Значение это подтверждено составленными в разное время проектными схемами, согласно которым использование ГЭП намечается на средних и крупных гидроэлектростанциях (более 30 МВт). К числу таких рек могут быть отнесены в Восточном Казахстане: Иртыш, Бухтарма, Уба, Кальджир, Громотуха, в юго-восточном водохозяйственном районе: Чарын, Кок-Су.

В случае осуществления развернутой программы развития малой гидроэнергетики, очевидно, в первую очередь, будут выбра-

ны более качественные гидроэнергетические ресурсы. Классификация ГЭП по удельной энергии с выделением пяти групп предложена в работе [1]: I-группа - участки с энергией более 25 млн. кВт.ч в год; II - от 25 до 10; III - от 10 до 5; IV - от 5 до 1; V - менее 1 млн. кВт.ч. С учетом принятого диапазона мощности МГЭС и указанного выше предположения были отобраны участки рек с удельной энергией более 5 млн. кВт.ч в год на один километр длины водотока (I, II и III группы). Использование участков с менее качественными гидроэнергоресурсами вызывает необходимость создания крупных водохранилищ в равнинных районах или многокилометровых дериваций в горных, что сопряжено с большими капиталовложениями.

Ожидаемый научно-технический прогресс сооружения МГЭС не исключает транспортную проблему. Необходимость строительства дорог в горных условиях является существенно сдерживающим фактором развития малой гидроэнергетики. Поэтому при оценке перспектив этого развития допустимо предположить, что гидроэнергетические ресурсы, расположенные выше 2000 м над уровнем моря, не будут использованы по крайней мере в рассматриваемой перспективе до 2020 года.

С учетом дефицита водных ресурсов во всех регионах республики строительство малых ГЭС будет осуществляться в составе мероприятий по решению проблемы водообеспечения всего народного хозяйства. В этой связи при оценке гидроэнергетических ресурсов для МГЭС не рассматриваются реки, являющиеся основой формирования водохозяйственных комплексов. К таким рекам могут быть отнесены: Урал, Сырдарья, Ишим, Тобол, Талас, Чу, Или, Каратал, Дарьса. По той же причине для каждой учтенной реки исключены низовья, зоны рассеивания или разбора стока в целях орошения.

Северный, центральный и западный водохозяйственные районы не имеют рек с качественными гидроэнергоресурсами и создание в этих районах МГЭС возможно только на водохранилищах неэнергетического назначения. Валовый потенциал МГЭС юго-восточного, восточного и южного районов составил соответственно 19,0; 23,9; 1,8 млрд. кВт.ч., или 43, 53, 4% от общего ГЭП.

Точное значение технического ГЭП малых рек может быть получено путем составления схем комплексного использования водных

ресурсов рек республики. Однако такие работы требуют много времени, значительных средств и к настоящему времени выполнены в ограниченных масштабах. Поэтому в данной работе для определения величины технических гидроэнергетических ресурсов используется метод эмпирических коэффициентов, полученных на основе обобщения данных по изученным рекам. Эти коэффициенты позволяют получить величину технического ГЭП как долю от валового.

Расчет технического потенциала был выполнен по двум методам. По методике, предложенной в работе [3], учитывается снижение ГЭП, рек, протекающих в орошаемых районах, а также зависимость технического потенциала от валового. Технический потенциал по данному методу оказался равным 14,7 млрд. кВт.ч.

Наш метод базируется на предположении регулирования стока на пригодных для сооружения МГЭС реках не выше суточного.

Как известно, обобщенный коэффициент пересчета валового потенциала реки в технический содержит три показателя: степень использования падения реки, расходов воды и КПД преобразования потенциальной энергии в электрическую:

$$\mathcal{E}_T = K_H K_Q \eta \mathcal{E}_H \quad (1)$$

Полнота использования общего падения реки определяется выбором отдельных ее участков, в пределах которых отсутствуют технические ограничения в создании установок, воспринимающих весь напор участка. При таком предположении имеем $K_H = 1$.

Потери стока из-за недостаточного его регулирования возникают за счет холостых сбросов и недовыработки энергии при наступлении суточных расходов, большой пропускной способности турбин МГЭС. Некоторые объемы воды теряются также на испарение и фильтрацию. Ввиду того, что многие МГЭС не будут иметь бассейна суточного регулирования, а при его наличии дополнительное испарение и фильтрация воды незначительны, эта часть потерь в дальнейшем не учитывается. В этом случае коэффициент использования стока равен соотношению двух объемов: сработанного через турбины ГЭС и в целом за сутки. Выражая значения этих объемов через соответствующие площади кривой обеспеченности суточных,

расходов, имеем: $k_q = \rho \frac{Q_p}{\bar{Q}} + \frac{1}{\bar{Q}} \int_0^{\bar{Q}} Q(\rho) \alpha \rho$, (2)
 где Q_p, ρ – расход ГЭС и его обеспеченность; $\bar{Q}$ – норма су-
 точных расходов.

Ввиду недостаточного развития сети гидрометрических постов по многим отобраным малым рекам отсутствует информация для "представительного" построения кривых продолжительности не только суточных, но и среднемесячных расходов. Как правило, гидрологическая основа расчета технического потенциала отдель-
 ных рек представлена лишь гидрографом года 50%-ной обеспечен-
 ности. По другим рекам (105 из 159 отобранных) имеется только норма среднегодовых расходов, определенная косвенным образом, например, по районированному модулю и площади водосбора [1].

В этих условиях полнота использования стока рассчитывалась с применением кривой продолжительности месячных расходов сред-
 него по водности года. С целью учета трансформации распределе-
 ния вероятностей суточных и среднемесячных расходов вводился поправочный множитель, равный отношению коэффициентов исполь-
 зования стока, рассчитанных для одного и того же расхода ГЭС по двум вышеуказанным статистическим характеристикам стока. Этот множитель, найденный для отдельных рек, распространяется на весь бассейн. Наконец, если информация о водотоке задана только нормой стока, то значение искомого коэффициента опреде-
 ляется по корреляционной зависимости с реками того же водохо-
 дящего района.

Заменив значения интеграла суммой элементарных площадей (что соответствует использованию кривых продолжительности ме-
 сячных расходов), выражение (2) преобразуем к следующему виду:

$$k_q = \frac{1}{Q_{50}} (n Q_p + \sum_{i=1}^{12-n} Q_i) k_{c-m}, \quad (3)$$

где Q_{50} – среднегодовой расход 50%-ной обеспеченности; Q_p –
 задаваемая величина расхода ГЭС; n – число месяцев, в кото-
 рых расходов воды больше турбинных на ГЭС; Q_i – месячные рас-
 ходы воды, меньшие Q_p ; k_{c-m} – поправочный коэффициент, зна-
 чение которого зависит от взаимного расположения и формы кри-
 вых обеспеченности суточных и месячных расходов. КПД МГЭС в
 соответствии с имеющимися рекомендациями [1,3] принимался
 равным 0,8.

Результаты расчетов по определению технического потенциала малых рек для трех пропускных способностей турбин МГЭС, соответствующих обеспеченности среднесуточных расходов в 50, 75 и 90% приведены в таблице.

Гидроэнергетический потенциал малых рек КазССР

Район	Количество рек	Гидроэнергopotенциал, млрд. кВт.ч.				
		Э _{вал.}	Э _{техн.}	Э ₅₀	Э ₇₅	Э ₉₀
Южный	6	1,79	0,54	0,57	0,49	0,36
Юго-Восточный	70	19,04	6,31	6,89	5,27	4,31
Восточный	83	23,87	7,88	4,33	2,80	2,01
Всего	159	44,69	14,72	11,79	8,49	6,68
% к Э _{вал.}	-	100	32,9	26,4	19,0	15,0

Необходимо также отметить, что часть выявленного потенциала может быть использована на обычных ГЭС ($N_y \geq 30$ МВт). Однако этот вопрос может быть решен конкретно для каждой реки в результате технико-экономического сравнения вариантов строительства каскада МГЭС или одной более крупной.

Таким образом, отобраны отдельные участки 159 рек Казахской ССР с валовым потенциалом 44,7 млрд. кВт.ч энергии в год. Их технический потенциал обеспеченностью 50, 75 и 90% равен соответственно 11,8, 8,5 и 6,7 млрд. кВт.ч.

Большее значение характеризует возможные масштабы производства электроэнергии на МГЭС или ожидаемую экономию топлива в энергосистемах (около 6 млн. т. у. т.) в средний по водности год. Меньшее является по существу гарантированной выработкой и может быть использовано для оценки вытеснения тепловых электростанций по мощности. При коэффициенте преобразования гарантированной мощности в пиковую, равном 2 (что характерно для энергосистем республики), малые ГЭС в состоянии вытеснить 1500 МВт мощности ТЭС.

Полученные количественные характеристики гидроэнергopotенциала позволяют оценить возможные масштабы развития малой гидроэнергетики республики.

Литература

1. Калачев Н.С., Лаврентьева Л.Д. Водноэнергетический кадастр рек Казахской ССР.-Алма-Ата: Наука, 1965.-707с.
2. Чокин Ш.Ч. Энергетика и водное хозяйство Казахстана.-Алма-Ата: Казахстан, 1975.-304с.
3. Энергетические ресурсы СССР/Гидроэнергетические ресурсы.-М.: Наука, 1967.-599с.
4. Бусалаев И.В., Лаврентьева Л.Д. и др. Исследование Верхне-Обского варианта переброски стока.-В кн.:Проблемы гидроэнергетики и водного хозяйства.-Алма-Ата: Наука, вып.13, 1976, с.82-92.
5. Чокин Ш.Ч., Мальковский И.М., Паутов А.С. Перспективы развития гидроэнергетики в бассейне Иртыша.-В кн.:Проблемы гидроэнергетики и водного хозяйства.-Алма-Ата: Наука, 1979, с.3-11.
6. Михайлов Л.П., Резниковский А.Ш., Фельдман Б.Н. Малая гидроэнергетика и перспективы ее развития.-Гидроэнергетическое строительство, 1982, №8, с.5-10.

СЕРГЕЙ НИКОЛАЕВИЧ КРИЦКИЙ
(к 85-летию со дня рождения)

Исполнилось 85 лет со дня рождения одного из видных советских ученых в области гидрологии, гидроэнергетики, гидротехники и водного хозяйства доктора технических наук, профессора, лауреата Государственной премии СССР Сергея Николаевича Крицкого.

С.Н.Крицкий родился 31 декабря 1900 года. Высшее образование получил в Московском институте транспорта, который закончил в 1926 году. Трудовую деятельность Сергей Николаевич начал в Водоканалпроекте (1926-1932гг.). Получив практический инженерный опыт проектирования водохозяйственных объектов, он переходит на преподавательскую работу (1932-1937гг.)—возглавляет кафедру гидротехнических сооружений Военно-инженерной академии им. В.В.Куйбышева. В этот период в соавторстве с М.Ф.Менкелем С.Н.Крицкий опубликовал один из первых учебников по гидрологии "Расчеты речного стока" (1934г.).

В связи с возросшими масштабами и темпами гидротехнического строительства Сергея Николаевича приглашают в институт Гидропроект им. С.Я.Жука на должность начальника отдела и главного гидролога (1937-1961гг.). Почти четверть века под его руководством проводилось гидрологическое обоснование строительства крупнейших водохозяйственных объектов, в частности: Волго-Донского водохозяйственного комплекса, гидроузлов Волжско-Камского каскада, каналов Сев.Донец — Донбасс, Днепр — Кривой Рог, Иртыш — Караганда, гидроузла Садд-аль-Аали на р.Нил и др.

Наряду с этим Сергей Николаевич с 1944 г. проводил большую работу в секции Академии наук СССР по научной разработке проблем водного хозяйства, а также в Энергетическом институте им. Г.М.Кржижановского. В эти годы С.Н.Крицкий в творческом содружестве с М.Ф.Менкелем завершил большую научно-исследовательскую работу в области гидрологических расчетов. Основные результаты исследований подытожены в книге "Гидрологические основы речной гидротехники" (1950г.), за которую ему присвоено звание лауреата Государственной премии.

Круг научных интересов С.Н.Крицкого не ограничивался только вопросами теории гидрологического режима рек и водотоков, но охватывал проблему комплексного использования водных ресурсов в целом. Им изучен, проанализирован многолетний опыт советского гидротехнического проектирования в области регулирования стока Дона, Волги и других рек, обобщенный в монографии "Водохозяйственные расчеты" (1952г.). Особое внимание в этой работе было уделено физической стороне рассматриваемых явлений и процессов, даны методы определения параметров гидрорулов, расчетов проектных и эксплуатационных режимов. Рекомендованы целесообразные формы работы установок, использующих речной сток для нужд водоснабжения, гидроэнергетики, сельскохозяйственного орошения, водного транспорта и других отраслей народного хозяйства.

Указанные фундаментальные работы С.Н.Крицкого и М.Ф.Менкеля по регулированию и использованию речного стока получили широкое распространение во всем мире.

В 1962-1965 гг. Сергей Николаевич работал в СОПСе Госплана СССР, а в 1965-1968 гг. - в Московской лаборатории ГТИ. С осени 1968г. его жизнь и научная деятельность тесно связаны с Институтом водных проблем АН СССР. Здесь его исследования в области гидрологических и водохозяйственных расчетов, гидротехники, гидроэнергетики получили дальнейшее развитие. В частности, им сформулированы принципы нормирования максимальных расходов воды при проектировании гидротехнических сооружений на реках, новые приемы оценки параметров речного стока методом максимального правдоподобия и др.

Совместно с группой исследователей С.Н.Крицкий со всей очевидностью доказал огромное значение вопросов совершенствования управления водными ресурсами на основе изучения закономерностей колебаний речного стока и методов моделирования водохозяйственных систем.

Основные результаты этих исследований обобщены в его монографиях: "Гидрологические основы управления речным стоком" (1981г.) и "Гидрологические основы управления водохозяйственными системами" (1982г.)

С.Н.Крицким опубликовано более 100 научных трудов (общим

объемом свыше 300 п.л.).

Блестящий ученый и инженер, хорошо знающий запросы практики, С.Н.Крицкий внес большой вклад в развитие советской водохозяйственной науки, в обоснование и практическое осуществление крупных гидротехнических объектов в нашей стране. Особо следует отметить его участие и помощь в формировании научных направлений водного сектора КазНИИЭ, его постоянный интерес к проблемам водохозяйственного строительства в Казахстане.

В многолетнем творческом сотрудничестве с М.Ф.Менкелем им создана одна из наиболее авторитетных школ в области комплексного изучения и использования водных ресурсов и теория регулирования речного стока.

За последние 40 лет наряду с научной работой С.Н.Крицкий участвовал в правительственных экспертизах крупных водохозяйственных проектов и состоял членом научных, научно-технических и ученых Советов многих институтов и ГНТ.

Производственная и научная деятельность С.Н.Крицкого получила высокую правительственную оценку. Он награжден двумя орденами Трудового Красного Знамени, орденами Красной Звезды и Знак Почета, медалями СССР.

Значение научных исследований С.Н.Крицкого велико. Велика его роль в подготовке высококвалифицированных кадров инженеров-гидротехников, кандидатов и докторов наук.

Замечательная творческая жизнь Сергея Николаевича Крицкого, его вклад в развитие гидрологии, гидротехники и водного хозяйства, оставленное научное наследство обязывают нас развивать славные традиции советской школы гидрологов в решении еще более сложных задач энергетического и водохозяйственного строительства в нашей стране.

Заключение

Материалы, содержащиеся в сборнике, могут оказать определенную помощь в работах по практическому использованию методов проектирования и эксплуатации водноэнергетических объектов и систем.

Некоторые из разработанных методов частично реализованы при обосновании параметров конкретных объектов – в частности Лебяжинской и Павлодарской оросительных систем (КазССР), развитие генерирующих мощностей Иртышского каскада, расчеты по регулированию стока водохранилищами и выбору параметров ГЭС и др.

В результате более широкого внедрения разработанных моделей можно ожидать повышение надежности и эффективности принимаемых решений, сокращение сроков и стоимости проектирования, интенсификации использования водных ресурсов.

СОДЕРЖАНИЕ

Предисловие.....	3
И.В.Бусалаев. Методы моделирования и оптимизации энергосовохозяйственных систем.....	5
А.С.Паутов. Расчет параметров гидроузла на основе линейной модели энергосовохозяйственного комплекса.....	18
И.В.Бусалаев, А.Кадырбаев. Математическая модель оптимизации распределения воды по массивам орошения с применением метода линейного программирования.....	34
Ш.Ч.Чокин, Б.Б.Баишев, А.Мамедалиев. Кривая распределения вероятностей объемов судоходных попусков.....	46
Ш.Ч.Чокин, В.А.Григорьев. Многомодальные плотности распределения вероятностей гидролого-водохозяйственных характеристик.....	55
В.П.Павленко. К вопросу построения водноэкономических характеристик орошения в условиях Северного Казахстана	60
А.Е.Асарин. Проектные методы расчета гарантированной водо-и энергоотдачи гидроузлов.....	70
А.Ж.Бактыбаева. Методика расчета сезонного регулирования стока.....	84
А.С.Паутов, А.В.Андреев. Гидроэнергетический потенциал малых рек Казахской ССР.....	96
Сергей Николаевич Крицкий (к 85-летию со дня рождения)	104
Заключение.....	107
Рефераты.....	

РЕФЕРАТЫ

УДК 330.115:338:626.81

Методы моделирования и оптимизации энерговодохозяйственных систем. Б у с а л а е в И.В. - Регулирование и распределение водных ресурсов в энерговодохозяйственной системе. - М., 1986, 6.0-18.

Развивается методика оптимизации структуры больших ВХС на основе экономико-математического моделирования и системного анализа с применением современных вычислительных средств.

Дается формулировка задачи, принципы и этапы формирования моделей, их состав и иерархическая организация. Обсуждается критерий оптимальности. Выявлен состав необходимой информации и формы ее представления в моделях. Намечены задачи дальнейших исследований

Ил.1, библ.3

УДК 621.311

Расчет параметров гидроузла на основе линейной модели энерговодохозяйственного комплекса. П а у т о в А.С. - Регулирование и распределение водных ресурсов в энерговодохозяйственной системе. - М., 1986, с.18-34.

Предложен метод расчета параметров гидроузла с ГЭС в составе энерговодохозяйственного комплекса (ЭВХК). В число оптимизируемых показателей (помимо мощности и выработки энергии ГЭС, отметки НПУ и полезной емкости водохранилища) включены: распределение отдачи и дефицита стока между компонентами ЭВХК, обеспеченность работы водохранилища.

В качестве критерия оптимальности принят минимум расчетных затрат на получение заданного объема совокупного продукта ЭВХК, подразделенных на производственные, общекомплексные затраты и математическое ожидание ущерба, возникающего при дефицитах стока.

Табл.4, ил.3, библ.4

Математическая модель оптимизации распределения воды по массивам орошения с применением метода линейного программирования. Б у с а л а е в И.В., К а д ы р б а е в А. - Регулирование и распределение водных ресурсов в энерговодохозяйственной системе. - М., 1986, с. 34-45.

Разработана линейно-программная модель, позволяющая находить оптимальные параметры оросительной системы - площади богарных и орошаемых земель с учетом севооборота, отводимых под посевы культур, рациональные размеры массивов орошения, кормовые рационы для различных групп скота, водные ресурсы, необходимые для удовлетворения выявленной потребности и др. - по максимуму чистого дохода или минимуму расчетных затрат.

На основе упомянутых моделей составлены алгоритмы и программы счета на ЭВМ.

Применение предлагаемой модели, как показывает конкретный пример расчета параметров Лебяжинской ОС, дает возможность снизить затраты на водохозяйственное строительство.

Табл.3, ил.2, библи.7

УДК 621.22

Кривая распределения вероятностей объемов судоходных попусков. Ч о к и н Ш.Ч., Б а и ш е в Б.В., М а м е д а л и е в А. - Регулирование и распределение водных ресурсов в энерговодохозяйственной системе. - М., 1986, с.46-55.

Годовые объемы судоходных попусков из водохранилища комплексного использования рассматриваются как случайные величины, а режимы их колебания - как вероятностный процесс. Приведен вид кривой распределения вероятностей режима их колебания. Расчеты выполнены на примере попусков воды из Бухтарминского водохранилища Верхне-Иртышского каскада.

Табл.2, ил.5, библи.4

УДК 621.22

Многомодальные плотности распределения вероятностей гидрометеоводохозяйственных характеристик. - Ч о к и н Ш.Ч., Г р и г о р ь е в В.А. - Регулирование и распределение водных ресурсов в энерговодохозяйственной системе. - М., 1986, с.55-59.

Генетическая разнородность речного стока, режимов водопотребления и водопользования в различные моменты времени года приводит к многомодальным плотностям распределения вероятностей гидролого-водохозяйственных характеристик. В статье дается теоретическое обобщение одномодальных кривых на многомодальный случай. Конкретная реализация предлагаемого метода иллюстрируется на примере кривых Гаусса и Пирсона III типа. Показано преимущество аппроксимации гистограмм гидролого-водохозяйственных характеристик многомодальными функциями по сравнению с одномодальными.

Ил.1, библи.3

УДК 621.22.01

К вопросу построения водноэкономических характеристик орошения для условий Северного Казахстана. П а в л е н к о В.П. - Регулирование и распределение водных ресурсов в энергосистемной системе. - М., 1986, с.60-69.

Проведены расчеты и построены водноэкономические характеристики для Кокчетавской, Северо-Казахстанской, Актобинской, Кустанайской и Тургайской областей Северного Казахстана. Анализ полученных результатов показал, что с высокой гарантией (75-90%) можно использовать не более 50% среднегодового местного стока, а преимущественно около 30-40%. Недостающий объем стока для покрытия заданного водопотребления предусматривается прирывать из тракта переброски.

Табл.2, ил.5, библи.6

УДК 621.22

Проектные методы расчета гарантированной водо-и энергоотдачи гидроузлов. А с а р и н А.Е. - Регулирование и распределение водных ресурсов в энергосистемной системе. - М., 1986, с.70-84.

В статье дается анализ обобщенных и календарных методов расчета регулирования стока для одиночных водохранилищ и их систем. Показаны преимущества и недостатки этих методов. Даются рекомендации по практическому использованию в проектной практике той или иной группы методов расчета.

Табл.3, ил.1, библи.15

УДК 621.22

Методика расчета сезонного регулирования стока. Б а к т ы - б а е в а А.М. - Регулирование и распределение водных ресурсов в энергосистемной системе. - М., 1986, с.84-96.

Предлагаемая методика в отличие от существующих полнее учитывает реальные процессы, имеющие место при регулировании, что позволяет существенно повысить достоверность расчетных параметров водохранилищ. Показано, что применяемые в проектной практике методы расчетов сезонного регулирования дают систематическое смещение искомой обеспеченности P . В данной методике приводится формула по ее устранению.

Ил.2, библи.8

УДК 621.22

Гидроэнергетический потенциал малых рек Казахской ССР.
Паутов А.С., Андреев А.В. - Регулирование и распределение водных ресурсов в энергovoдoхoзяйственной системе. - М., 1986, с.96-103.

На основе разработанных принципов классификации малых рек, пригодных для сооружения ГЭС мощностью 5-25 МВт, дана количественная оценка их валового и технического гидроэнергoпoтeнциала.
Табл.1, библи.6

СПОДНИК НАУЧНЫХ ТРУДОВ ГИДРОПРОЕКТА
(по материалам КазНИИэнергетики)

Регулирование и распределение водных ресурсов
в энергосистемнохозяйственной системе

Редактор Н.П.Пушкина

Подписано в печать 23.07.86г. Л - 68464
Усл.п.л. 7,0. Уч.-изд.л. 6,5. Тираж 300 экз.
Заказ № 372 Цена 1р.

КО СЭП, г.Алма-Ата, ул.Джандосова, 4